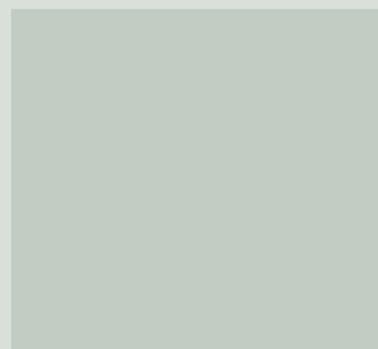
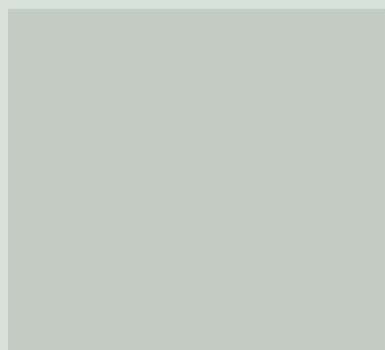


Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar

Manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes

Fábio César da Silva
Fernando José Freire
Editores técnicos



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agricultura Digital
Ministério da Agricultura e Pecuária*

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar

Manejo, nutrição, bioinsumos,
recomendação de corretivos
e fertilizantes

Fábio César da Silva

Fernando José Freire

Editores técnicos

Embrapa

Brasília, DF

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Recife, PE

2024

Embrapa
Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos
52171-900 - Recife, PE
Telefone (81) 3320 6001
www.ufrpe.br
www.ufrpe.br/acessoinformacao

Responsáveis pelo conteúdo
Embrapa Agricultura Digital
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agricultura Digital

Presidente
Stanley Robson de Medeiros Oliveira

Secretária-executiva
Maria Fernanda Moura

Membros
Adriana Farah Gonzalez
Alexandre de Castro
Carla Cristiane Osawa
Debora Pignatari Drucker
Ivan Mazoni
João Camargo Neto
Joao Francisco Goncalves Antunes
Magda Cruciol

Responsável pela editoração
Embrapa, Superintendência de Comunicação

Coordenação editorial
Daniel Nascimento Medeiros
Nilda Maria da Cunha Sette

Edição executiva
Cristiane Pereira de Assis

Revisão de texto
Everaldo Correia da Silva Filho
Francisca Elijani do Nascimento
Jane Baptistone de Araújo

Normalização bibliográfica
Iara Del Fiaco Rocha (CRB-1/2169)
Márcia Maria Pereira de Souza

Projeto gráfico, diagramação e capa
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Da esquerda para direita, de cima para baixo
Fotos da capa
(1ª) Williann Pereira, (2ª) Saulo Coelho Nunes, (3ª) Daniel Chistofoleiti,
(4ª) Marcílio Nogueira do Amaral Gurgel, (5ª) José Roberto Miranda,
(6ª e 7ª) Paulo Lanzetta, (8ª e 10ª) Célia Regina Grego e
(9ª) Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues
Fotos da quarta capa
(1ª) pexels.com, (2ª) Guilherme Medeiros Simbiose, (3ª) pexels.com,
(4ª) José Tadeu Coleti, (5ª) Alexandre Rocha, (6ª) pexels.com e
(7ª) Célia Regina Grego

1ª edição
Publicação digital (2024): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa, Superintendência de Comunicação

Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar : manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corre-
tivos e fertilizantes / Fábio César da Silva, Fernando José Freire, editores técnicos. Brasília, DF : Embrapa,
2024.

PDF (471 p.) : il. color.

ISBN 978-65-5467-055-5 (Embrapa). — ISBN 978-85-7946-381-5 (UFRPE)

1. Agroindústria. 2. Análise foliar. 3. Fertilidade do solo. 4. Resíduo agrícola. 5. Acidez do solo. I. Silva,
Fábio César da. II. Freire, Fernando José. III. Embrapa Agricultura Digital. IV. Universidade Federal Rural de
Pernambuco.

CDD (21 ed.) 633.61

Márcia Maria Pereira de Souza (CRB 1-1441)

© 2024 Embrapa

Editores técnicos e autores

Alexandre de Castro

Físico, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Aline Dário

Tecnóloga em Administração com MBA em Gestão de Projetos, coordenadora administrativa do Setor Agrícola na Usina Granelli, Charqueada, SP

Antônio Márcio Souza Rocha

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Jaboticabal, SP

Ariovaldo Luchiari Júnior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Agronomia, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Arnaldo José Raizer

Engenheiro-agrônomo, mestre em Genética e Melhoramento de Plantas, profissional autônomo, Curitiba, PR

Bárbara Elis Pereira Silva

Engenheira de produção, mestre em Engenharia de Transportes, doutoranda em Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

Cassio Hamilton Abreu Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, professor associado da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

Célia Regina Grego

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, Energia na Agricultura, pesquisadora da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Christiane Abreu de Oliveira Paiva

Engenheira-agrônoma, doutora em Interação Planta-Microorganismos, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Cristiano Alberto de Andrade

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues

Zootecnista, doutora em Biologia Vegetal, pesquisadora da Embrapa Territorial, Campinas, SP

Daniel Cristofoleti

Engenheiro-agrônomo, especialista em Gerenciamento Ambiental, analista técnico-agronômico da Coplacana, Piracicaba, SP

Edgard Henrique dos Santos

Analista de Sistemas, analista da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Edilaine Istefani Franklin Traspadini

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, assessora especial de Regularização Fundiária na Secretaria de Agricultura do Estado de Rondônia (Seagri), Porto Velho, RO

Eduardo Antonio Speranza

Cientista da Computação, doutor em Ciência da Computação, analista da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Eliane Aparecida Gomes

Bióloga, doutora em Genética e Melhoramento, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Fábio Cesar da Silva

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Fernando José Freire

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, professor associado da Universidade Federal Rural de Pernambuco e secretário-executivo da Fundação Apolônio Salles de Desenvolvimento Educacional (Fadurpe), Recife, PE

Francisco José Severino

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, gerente técnico da Cooperativa dos Plantadores de Cana do Estado de São Paulo (Coplacana), Piracicaba, SP

Gelza Carliane Marques Teixeira

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Palmas, TO

Gilmara Pereira da Silva

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, estudante de pós-doutorado na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Guilherme Martineli Sanches

Engenheiro agrícola, doutor em Bioenergia, professor colaborador na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP

Guilherme Rossi Machado Junior

Engenheiro-agrônomo, mestre em Produção Vegetal, diretor da Rossi Consultoria e Representação Ltda., Piracicaba, SP

Gustavo Costa Rodrigues

Engenheiro-agrônomo, mestre em Fisiologia Vegetal, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Inácio Henrique Yano

Tecnólogo em Processamento de Dados e economista, doutor em Engenharia Agrícola, analista da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Jayme Garcia Arnal Barbedo

Engenheiro eletricitista, doutor em Engenharia Elétrica, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Jefrejan Souza Rezende

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, professor da Universidade Estadual do Piauí (UESPI/Picos), Teresina, PI

José Antonio Bressiani

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, Diretor Agrícola na Granbio Investimentos, São Paulo, SP

José Geraldo Vidal Vieira

Cientista da Computação, doutor em Engenharia de Produção, professor da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba, SP

José Tadeu Coleti

Engenheiro-agrônomo, diretor da Coleti-Consultoria e Planejamento Ltda., Ipeuna, SP

Klever José Coral

Engenheiro-agrônomo, superintendente e head de Inovação da Coplacana, Piracicaba, SP

Luis Eduardo Gonzales

Engenheiro da Computação, analista da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Luis Fernando Sanglade Marchiori

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, professor e coordenador da Fazenda Areão da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

Luiz Antonio Falaguasta Barbosa

Cientista da Computação, mestre em Ciências da Computação, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Agrícola, engenheiro sênior de Projetos Industriais da Dedini, Bio – Equipamentos e Plantas - Divisão de Novos Produtos, Tecnologias e Negócios, Piracicaba, SP

Marcos Fava Neves

Engenheiro-agrônomo, doutor em Administração, professor titular do Departamento de Administração da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA-RP/USP), Ribeirão Preto, SP

Marcos Guimarães de Andrade Landell

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, diretor do Centro de Cana do Instituto Agrônomo de Campinas, Ribeirão Preto, SP

Maria Angelica de Andrade Leite

Engenheira civil, doutora em Engenharia de Computação, pesquisadora da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Mariana Abdalla Granelli

Advogada, diretora Jurídica na Usina Granelli, Charqueada, SP

Mariana Lopes Carvalho

Tecnóloga em Biocombustíveis, estudante de mestrado do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

Mauro Violante

Engenheiro-agrônomo, gerente de Produtos e Assistência Técnica do Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, SP

Miguel Ivan Lacerda de Oliveira

Economista, mestre em Agronegócio, diretor do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), Brasília, DF

Naara Rosa Martins

Engenheira-agrônoma, assessora técnica da Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do Estado de Rondônia (Idaron), Rolim de Moura, RO

Paulo Guilherme Salvador Wadt

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Rondônia, Porto Velho, RO

Paulo Sérgio de Arruda Ignácio

Engenheiro de produção mecânica, doutor em Engenharia Civil, professor da Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP

Pedro Luiz de Freitas

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Rafael Bordonal Kalaki

Engenheiro-agrônomo, doutor em Administração de Organizações, superintendente da Associação dos Fornecedoros de Cana de Guariba (Socicana), Guariba, SP

Renato de Mello Prado

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor do Departamento de Produção Agrícola da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Jaboticabal, SP

Ricardo Augusto de Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, professor adjunto do Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá

Analista de Sistemas, doutora em Computação Aplicada, pesquisadora da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Sylvia Morais de Sousa

Bióloga, doutora em Genética e Biologia Molecular de Plantas, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Thomaz Adolpho Rein

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Brasília, DF

Ubiraci Gomes de Paula Lana

Químico, doutor em Genética, analista da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Vitor Nardini Marques

Engenheiro-agrônomo, mestre em Administração de Organizações, consultor associado e coordenador de Inteligência de Mercado, Ribeirão Preto, SP

Willian Pereira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campus dos Goytacazes, RJ

Dedicamos este livro a todas as pessoas e instituições que movimentam essa grande cadeia produtiva de cana-de-açúcar do Brasil e aos financiadores, públicos e/ou privados, que apoiam a pesquisa brasileira.

Os autores agradecem, em especial, a três grandes personalidades das Ciências Agrárias do Brasil. Aos dois professores e pesquisadores acadêmicos Victor Hugo Alvares Venegas (in memoriam), do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), e Bernardo Van Raij (in memoriam), do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) pelo enorme legado à pesquisa em Fertilidade do Solo no Brasil. A contribuição de suas aulas e pesquisas fomentou tudo que está escrito neste livro, o que torna a obra de fácil leitura e entendimento.

Nesse mesmo contexto, agradecem também ao engenheiro-agrônomo Alysson Paulinelli (in memoriam), que, ainda em vida, escreveu o prefácio desta obra. A contribuição desse grande brasileiro para as Ciências Agrárias fortalece a labuta diária de cada um de nós, que cultivamos os solos brasileiros, embalados por outros que produzem conhecimento de pesquisa agrônômica realizada no Brasil.

A essas três grandes personalidades do Brasil, nossos mais sinceros agradecimentos.

Apresentação

A agroindústria sucroenergética destaca-se no cenário agrário nacional pela importância econômica, contribuindo com uma matriz energética mais limpa e sustentável. Nos últimos anos, o setor vem experimentando mudanças em seus processos de produção com a introdução de novas tecnologias, conceitos e ambiente de inovação tecnológica, com novos atores, como startups, entre outros.

Neste livro encontram-se uma compilação e agregação de conhecimentos em 14 capítulos, que permitem sua utilização na capacitação de produtores de cana-de-açúcar no Brasil.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) tem investido em pesquisa na agroindústria sucroenergética na forma de Projetos Tipo III, isto é, articulados com setor produtivo em inovação aberta para a solução de problemas que agregam tecnologia desde a pesquisa, inovação, transferência de tecnologia e desenvolvimento institucional. Desta forma, há o comprometimento com a adoção dos Ativos de Inovação a serem desenvolvidos nos projetos, pois estes projetos começam e terminam no setor produtivo.

Desta forma, a presente obra está associada a quatro Projetos Tipo III da programação de pesquisa e desenvolvimento da Embrapa: Projeto Coplacana – Desenvolvimento de soluções tecnológicas com escopo na recuperação da produtividade da cana-de-açúcar; Projeto Canacer32 – Desenvolvimento de sistemas de produção de cana-de-açúcar no Cerrado – Fase 3; Projeto Embracalcana – Aprimoramento das recomendações técnicas de correção da acidez do solo e suas implicações fitotécnicas no canavial; e Projeto CanaMS – Aperfeiçoamento do sistema de produção de cana-de-açúcar em Mato Grosso do Sul.

Em busca do estado da arte, fez-se a opção por uma obra mais focada e integrada com a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), assim como, com diversas parcerias dentro da Embrapa (Agricultura Digital, Meio Ambiente, Cerrados, Rondônia, Milho e Sorgo) e parceiros externos (Universidade de São Paulo, Universidade Estadual Paulista, Coplacana, Dedini, Centro Tecnologia Canavieira, Universidade Estadual de Campinas, Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Universidade Estadual do Piauí, Associações de Produtores, entre outros) para aprofundar questões da economia setorial, manejo varietal, agricultura digital e de precisão, nutrição mineral, fertilidade do solo e associações com microrganismos, adubação e diversas tecnologias e ferramentas inovadoras (drones, modelagem, Internet das Coisas, rastreamento por *blockchain*, entre outras). Por fim, a parceria com a UFRPE vem para consolidar uma obra com abrangência do Centro-Sul ao Nordeste brasileiro.

O livro apresenta inicialmente um cenário socioeconômico da agroindústria canavieira, depois introduz o leitor ao tema Agricultura 4.0, convergindo para a agricultura digital. Em seguida, apresenta aspectos técnicos do cultivo de cana-de-açúcar desde a parte de fitologia e fenologia da planta até o uso de microrganismos produtores de crescimento. Discute-se manejo, correção e fertilidade de solos, monitoramento nutricional e o uso agrícola de resíduos gerados pela própria indústria canavieira. Posteriormente, apresenta-se a agricultura de precisão, inovações e novas tecnologias que possam incrementar a produtividade, transformando os cultivos em *clusters* mais eficientes. Na sequência é apresentada a tecnologia *blockchain* para rastrear processos da indústria sucroalcooleira. Portanto, o livro se caracteriza pela sua grandeza de relacionar diversos aspectos do setor sucroenergético brasileiro, apresentando em seu conteúdo técnico uma linguagem que refina o conhecimento científico, mas, ao mesmo tempo, proporciona uma leitura focada no agricultor e produtor de cana-de-açúcar.

Essa obra tem o mérito de organizar e reunir informações dispersas na literatura de forma objetiva e de fácil entendimento aos produtores e demais interessados no assunto, podendo constituir-se em uma efetiva contribuição a esta área de conhecimento.

Stanley Robson de Oliveira

Chefe-Geral da Embrapa Agricultura Digital

Maria José de Sena

Reitora da Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prefácio

Em boa hora, a obra *Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes* aborda um assunto tão importante para o cenário socioeconômico da agroindústria canavieira, especialmente do Centro-Sul e Nordeste, de fundamental importância para a economia, gerando emprego, renda e oportunidade de trabalho nos principais estados dessas regiões. Assunto que foi abordado com a participação e consulta de alguns expoentes das nossas ciências agrárias. Ademais, seus autores discorrem sobre agricultura digital e suas possibilidades no avanço da qualidade e da produtividade da matéria produzida nos estados produtores do Brasil. Estudam e comentam os sistemas de plantio, inclusive a condição de mudas pré-brotadas, que constituem uma das inovações para o aumento da produtividade dessa importante matéria-prima do açúcar e do álcool. Discorrem, também, sobre os elementos de nutrição e diagnose foliar na cana-de-açúcar, que vem sendo, há anos, uma evolução científica importante no desenvolvimento de toda a agricultura tropical. Além disso, avançam na diagnose nutricional da cana-de-açúcar por diferentes métodos de interpretação.

Pessoalmente, a obra traz uma feliz surpresa, quando tratam do silício como básico em mudas pré-brotadas da cana-de-açúcar. Procuram inovar na parte de fertilidade do solo e adubação em cana-de-açúcar, não deixando de lado a tão necessária correção dos solos para o aumento da produtividade brasileira. Da mesma forma, entram na parte de gerenciamento e tratamento de resíduos em toda cadeia produtiva. Para todos nós que acreditamos e estamos convencidos de que a bioeconomia será, sem dúvida, uma das principais pontas de lança no desenvolvimento de produção da área tropical do globo. Por sua vez, não se esqueceram de referir-se aos microrganismos tão indispensáveis na evolução da produção agropecuária tropical.

Como a cana-de-açúcar é uma produção de larga escala, trataram de analisar também a agricultura de precisão, hoje em evolução em todo País. Não foram esquecidas as tecnologias mais avançadas para se conseguir obter a rastreabilidade em toda cadeia produtiva sucroalcooleira. Tratando-se de cientistas e de estudiosos, fundamental foi a discussão para introdução de inovações e novas tecnologias, que estão sendo aplicadas na cana-de-açúcar, cuja produtividade no Brasil vem crescendo satisfatoriamente.

Faz-se necessário reconhecer a oportunidade propiciada por este livro, no momento em que o Brasil a cada dia se coloca como um dos maiores *players* de exportação de alimentos para o mundo e, passando a ser, segundo os organismos internacionais, a forte segurança do suprimento de alimentos, bem como de produtos agrícolas e energia renovável para um

mundo cada dia mais carente. As organizações internacionais já descrevem como resultado de suas análises que o mundo, só em 2050, tenderá a ter um equilíbrio populacional pela igualdade de nascimentos e mortes em nossa população. Só que, em 2050, não teremos só 10 bilhões de almas no mundo para alimentar como acontece hoje. Teremos mais 2,5 bilhões de habitantes, principalmente vindo de países populosos, que hoje têm o seu crescimento econômico três vezes maior do que os países industrializados, cujo índice de crescimento de sua população está praticamente estável ou em decréscimo. Já sabemos, portanto, que em 2050 os países populosos, como China, Índia, Indonésia e o próprio continente africano, representado pelos seus países populosos, estarão representados popularmente nessa população em um número muito maior, só que com uma renda familiar muito mais elevada do que hoje possuem. Essas organizações internacionais também já sabem que, estatisticamente em 2050, a demanda global por alimentos será, no mínimo, proporcional à de hoje, de 70 a 100% a mais do consumo atual. Sem dúvida, isso nos obriga a colocar essa agricultura tropical como sustentável e competitiva, produzindo muito mais do que produzem hoje os países especialmente de clima temperado, que já esgotaram suas áreas de crescimento e não poderão oferecer grandes evoluções em sua oferta alimentar. Caberá, portanto, ao Brasil — que foi capaz de, nestes últimos 45 anos, desenvolver a primeira agricultura tropical sustentável e competitiva que o mundo esperava. Essa responsabilidade é nossa; não temos como fugir dela. Teremos, até 2050, que aumentar a nossa produção 2,4 vezes à atual, ou, então, o mundo passará fome.

A obra chega exatamente em um momento estratégico, pois, diante do quadro mundial, teremos de tomar decisões estratégicas, para cumprir essa nossa missão.

Além da oportunidade desta literatura tão atualizada, cabe aqui um elogio àquilo que mais defendemos em toda a nossa vida profissional, que é a integração de esforços de nossas instituições científicas com as nossas universidades e com a iniciativa privada. Essa integração está refletida no trabalho dos pesquisadores Fábio Cesar da Silva, da Embrapa, e Fernando José Freire, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), financiados, inicialmente, pela Cooperativa dos Plantadores de Cana do Estado de São Paulo (Coplacana), Usina Granelli Açúcar e Álcool Ltda. e a Empresa Brasileira de Calcário (Embracal). Esse foi um fato brilhante na construção deste livro, recomendado a todos que acreditam em nosso futuro.

Alysson Paolinelli (in memoriam)

Engenheiro-agrônomo, ex-ministro da Agricultura (1974–1979)

Sumário

CAPÍTULO 1 Cenário socioeconômico da agroindústria canaveira: presente e futuro	19
Marcos Fava Neves Rafael Bordonal Kalaki Vitor Nardini Marques	
CAPÍTULO 2 Agricultura digital, inovação e aplicações	41
Maria Angelica de Andrade Leite Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá Klever José Coral	
CAPÍTULO 3 Manejo varietal na produção da cana-de-açúcar	63
Guilherme Rossi Machado Júnior Arnaldo José Raizer José Antonio Bressiani Ricardo Augusto de Oliveira Fábio Cesar da Silva Marcos Guimarães de Andrade Landell Fernando José Freire Mauro Violante	
CAPÍTULO 4 Produção, plantio e condução de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar	163
Fábio Cesar da Silva Ariovaldo Luchiarí Júnior Pedro Luís de Freitas Willian Pereira José Tadeu Coleti Gustavo Costa Rodrigues Mariana Lopes Carvalho Daniel Chistofoleti	
CAPÍTULO 5 Elementos da diagnose foliar da cana-de-açúcar	185
Edilaine Istéfani Franklin Traspadini Gilmara Pereira da Silva Gelza Carliane Marques Teixeira Renato de Mello Prado	
CAPÍTULO 6 Diagnose nutricional da cana-de-açúcar por diferentes métodos de interpretação	215
Edilaine Istéfani Franklin Traspadini Paulo Guilherme Salvador Wadt Luiz Antonio Falaguasta Barbosa Renato de Mello Prado Fábio Cesar da Silva Naara Rosa Martins	
CAPÍTULO 7 Uso de silício em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar	243
Gelza Carliane Marques Teixeira Antônio Márcio Souza Rocha Renato de Mello Prado	
CAPÍTULO 8 Fertilidade do solo e adubação em cana-de-açúcar	255
Fernando José Freire Jefrejan Souza Rezende Fábio Cesar da Silva Cristiano Alberto de Andrade Thomaz Adolpho Rein Luis Fernando Sanglade Marchiori	
CAPÍTULO 9 Correção da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar	291
Cristiano Alberto de Andrade Fernando José Freire Fábio Cesar da Silva Thomaz Adolpho Rein	
CAPÍTULO 10 Gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos na cana-de-açúcar	341
Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel Fernando José Freire Fábio Cesar da Silva Cassio Hamilton Abreu Junior Luis Fernando Sanglade Marchiori Arnaldo José Raizer	
CAPÍTULO 11 Microrganismos promotores de crescimento vegetal em cana-de-açúcar e outras gramíneas	389
Christiane Abreu de Oliveira Paiva Eliane Aparecida Gomes Sylvia Morais de Sousa Ubiraci Gomes de Paula Lana Fabio Cesar da Silva Fernando José Freire	
CAPÍTULO 12 Aplicação da agricultura de precisão em cana-de-açúcar	415
Célia Regina Grego Eduardo Antonio Speranza Guilherme Martineli Sanches Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues Ariovaldo Luchiarí Júnior	
CAPÍTULO 13 Tecnologia <i>blockchain</i> para a rastreabilidade da cadeia produtiva sucroalcooleira	439
Alexandre de Castro Bárbara Elis Pereira Silva Edgard Henrique dos Santos Fábio Cesar da Silva Francisco José Severino Inácio Henrique Yano José Geraldo Vidal Vieira Mariana Abdalla Granelli Miguel Ivan Lacerda de Oliveira Paulo Sérgio de Arruda Ignácio	
CAPÍTULO 14 Inovação e desenvolvimento tecnológico na fertilização de lavouras	451
Jayme Garcia Arnal Barbedo	

Cenário socioeconômico da agroindústria canavieira

Presente e futuro

Marcos Fava Neves | Rafael Bordonal Kalaki | Vitor Nardini Marques

Introdução

A energia é um elemento fundamental em nossas vidas e, conseqüentemente, para o processo produtivo, desde a primária e fundamental atividade da produção de alimentos até o funcionamento dos mais variados e tecnológicos setores econômicos de um país. Por causa disso, a segurança energética é uma importante pauta no desenvolvimento das nações, e um de seus grandes desafios reside em abastecer tal desenvolvimento com energia limpa, que utilize recursos renováveis e que seja produzida de forma sustentável, levando em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Nesse sentido, o setor sucroenergético brasileiro mostra sua força, produzindo diferentes formas de agroenergia (açúcar, etanol, eletricidade e outros produtos) sustentáveis e renováveis, que são capazes de suprir a demanda presente sem comprometer a disponibilidade de recursos para gerações futuras. De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar – Unica (2019a), o Brasil é referência no uso de energias renováveis e o setor sucroenergético tem grande participação nisso, sendo o etanol e a bioeletricidade os maiores responsáveis por tal representatividade.

Cenário atual do setor sucroenergético

O setor sucroenergético tem importância para o Brasil desde o tempo de colonização do País,

sendo o motor propulsor da economia nacional em diversos momentos da história. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), com uma participação próxima a 37% no volume total produzido. Já na produção de açúcar, o País ocupou a segunda posição na safra 2018/2019, com 16,5% de participação, sendo superado apenas pela Índia; nas exportações da commodity, o Brasil foi líder na última temporada, sendo responsável por quase 35% do volume total embarcado para outras nações. Na produção de etanol, o País ocupa a posição de segundo maior produtor, concentrando 27,7%, de acordo com dados de 2018 (Estados Unidos, 2019; FAO, 2019; Renewable Fuels Association, 2019a; Unica, 2019b).

Segundo pesquisa coordenada por Neves e Trombin (2014), com o apoio da Unica, da Organização de Associações de Produtores de Cana do Brasil (Orplana) e do Centro Nacional das Indústrias do Setor Sucroenergético e Biocombustíveis (Ceise Br) (Sertãozinho, SP), o setor tem forte impacto na geração de riquezas para a nação, sendo que, em 2013–2014, contribuiu com um produto interno bruto (PIB) de US\$ 43,4 bilhões, o que equivale a aproximadamente 2% do PIB do Brasil no período. Considerando a soma total das vendas dos diversos elos que compõem o sistema agroindustrial da cana, foi alcançado o valor de US\$ 107,7 bilhões.

A tendência é que esses valores continuem aumentando, ao passo que outros produtos, que hoje não são as principais fontes de receita, ganham mais importância na geração de riquezas

do setor, como é o caso da bioeletricidade, das leveduras, dos bioplásticos, do diesel de cana, do biobutanol, do etanol celulósico, dos créditos de carbono, entre outros (Neves; Trombin, 2014).

Ainda, segundo o mesmo estudo, no ano de 2013, a massa salarial do setor atingiu US\$ 4,13 bilhões, arrecadando US\$ 8,5 bilhões em impostos e trazendo anualmente uma exportação próxima a US\$ 10 bilhões (Neves; Trombin, 2014).

Cana-de-açúcar

O Brasil produziu na safra de 2022/2023 um total de 598 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o que representa 37% do total mundial, sendo, dessa forma, o maior produtor mundial da gramínea (Unica, 2019b). A produção brasileira cresceu 3,4% nos últimos 10 anos. Na Figura 1.1 a seguir ilustra-se o histórico de produção e moagem da cana-de-açúcar nas últimas dez safras nas duas principais regiões produtoras: Centro-Sul e Norte-Nordeste.

Em relação à área ocupada no Brasil com a plantação, a cana fica em terceiro lugar quando comparada às culturas temporárias, estan-

do atrás apenas da soja e do milho, atingindo 8,3 milhões de hectares plantados em 2022 (Conab, 2023).

A seguir, na Figura 1.2, são apresentados os principais estados produtores de cana-de-açúcar e suas respectivas participações na produção total do País.

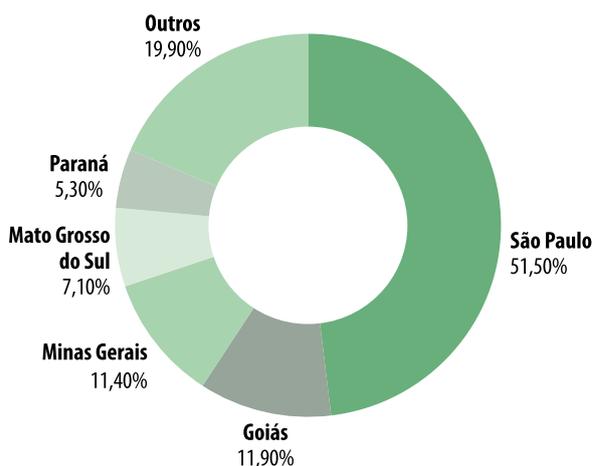


Figura 1.2. Participação por estado na produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Fonte: Unica (2019b).

De acordo a Figura 1.2, o estado de São Paulo é o maior produtor, representando, na safra 2018/2019, 51,5% da produção e moagem

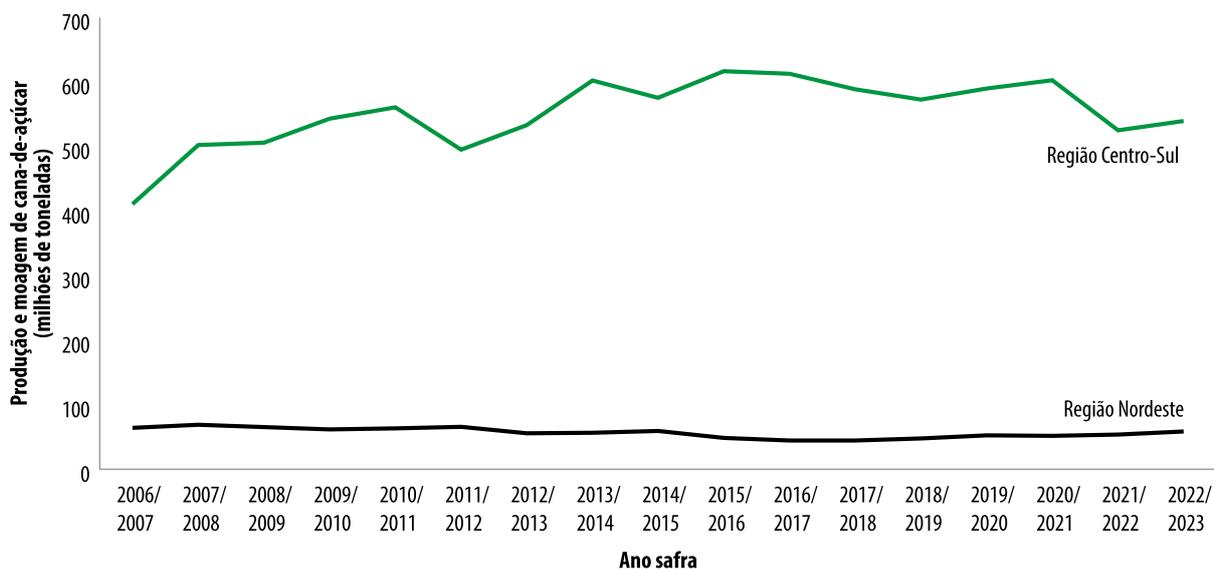


Figura 1.1. Histórico de produção e moagem da cana-de-açúcar.

Fonte: Unica (2019b).

nacional. Aparecem em segundo e terceiro lugares, respectivamente, Goiás, com 11,9%, e Minas Gerais, com 11,4% (Conab, 2023). O estado de São Paulo concentra grande parte da atividade de processamento de cana, contando com 155 usinas de um total de 369 espalhadas pelo território nacional, de acordo com *NovaCana* (As usinas..., 2022).

O comportamento da produtividade geral, da área colhida e da qualidade da cana-de-açúcar no Brasil nos últimos 10 anos é apresentado na Figura 1.3.

No que tange à produtividade dos canaviais (em volume – toneladas de cana por hectares), ilustrada na Figura 1.3, observa-se uma oscilação dos dados ao longo do período, mas, seguindo uma tendência de queda, com uma perda de produtividade de 5,3% nos últimos 10 anos (Conab, 2023). A redução da produtividade dos canaviais tem influência de diversos fatores, como clima desfavorável e condições de baixa nos preços do mercado global (principalmente do açúcar), acarretando redução dos investimentos às lavouras, como na renovação do

canavial, por exemplo (Azenha, 2018). Por sua vez, a qualidade da matéria-prima (quilograma de açúcar total recuperável – ATR por tonelada de cana) teve um aumento de 6,2% no período (Conab, 2019b).

Ao analisar a rentabilidade da atividade, é possível notar que o preço do valor do ATR cresceu 102% nos últimos 4 anos. Por sua vez, os custos de produção cresceram 63%. Se considerarmos nessa análise a queda de produtividade, nota-se que, nas últimas cinco safras, somente a safra 2021/2022 apresentou resultado operacional positivo na cultura (Tabela 1.1) (Pecege, 2023).

Açúcar

O açúcar é produzido no mundo a partir de duas matérias-primas principais, a cana-de-açúcar e a beterraba, sendo que, de acordo com dados do United States Department of Agriculture – Usda (Estados Unidos, 2019), 78% do açúcar produzido mundialmente é derivado da cana, enquanto apenas 22% vêm da beterraba. Na Figura 1.4 apresenta-se o mapa de distribuição da produção de açúcar por matéria-prima no mundo.

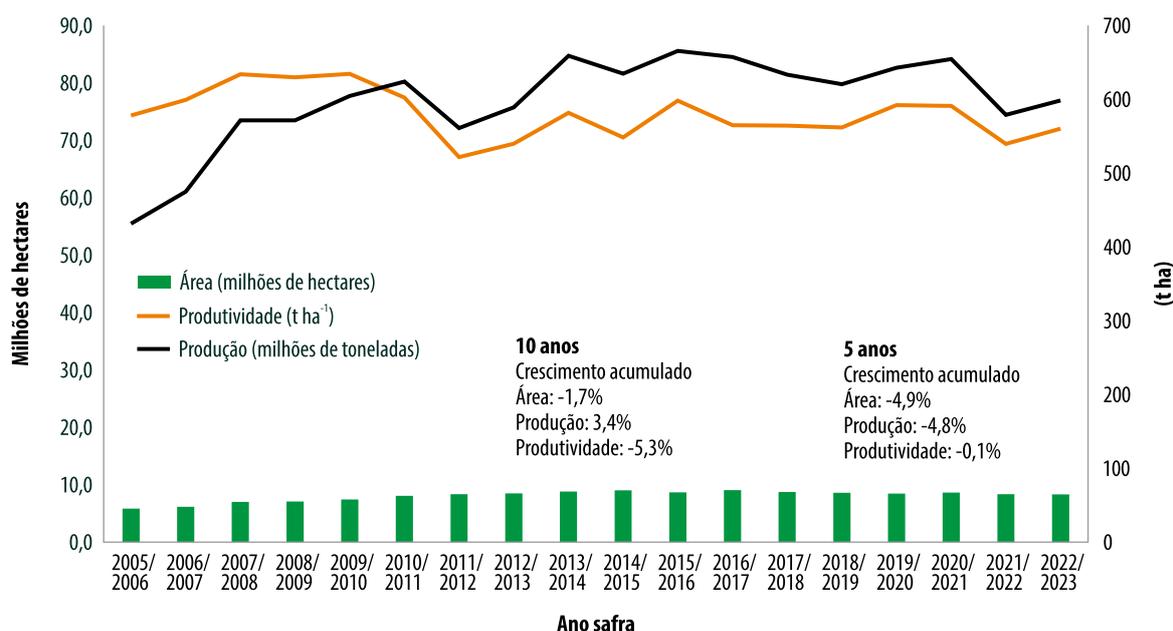


Figura 1.3. Área colhida, produtividade e qualidade da cana-de-açúcar.

Fonte: Conab (2019b).

Tabela 1.1. Expedição de custos da cana-de-açúcar.

Parâmetro	Valor nominal						Variação em relação ao anterior (%)			
	Und.	2018/ 2019	2019/ 2020	2020/ 2021	2021/ 2022	2022/ 2023 ⁽¹⁾	2019/ 2020	2020/ 2021	2021/ 2022	2022/ 2023 ⁽¹⁾
Formação do canavial	R\$/ha	9.808	10.046	10.395	12.969	16.156	2	3	25	25
tratos cana soca	R\$/ha	1.953	2.325	2.593	3.028	3.739	19	12	17	23
Sistema de colheita	R\$/t	32	29	28	40	47	-9	-5	44	18
Arrendamentos	R\$/ha	1.245	1.380	1.526	2.302	2.280	11	11	51	-1
TCH ⁽²⁾	t/ha	75,1	76,5	81,2	70,4	74,4	2	6	-13	6
ATR ⁽³⁾	kg/t	130,5	134,8	137,8	135,9	135,8	3	2	-1	0
TAH ⁽⁴⁾	t/ha ATR	9,8	10,3	11,2	9,6	10,1	5	9	-14	6
Custo-caixa	R\$/ha	7.379,00	7.894,00	8.314,00	10.414,00	12.303,00	7	5	25	18
	R\$/t	98,20	103,20	102,40	147,90	165,30	5	-1	44	12
	R\$/kg ATR	0,75	0,77	0,74	1,09	1,22	2	-3	46	12
Consecana-SP	R\$/kg ATR	0,58	0,66	0,78	1,18	1,17	13	18	52	-1

⁽¹⁾ Formação canavial = preparo do solo + plantio (c/ mudas) e tratos planta. Sistema de colheita = corte + transbordo + transporte + apoio. ⁽²⁾ TCH – tonelada de cana por hectare; ⁽³⁾ ATR – açúcar total recuperável; ⁽⁴⁾ TAH – tonelada de açúcar por hectare.

Fonte: Pecege (2023).

Produção

Na safra mundial 2018/2019 foram produzidos 178,9 milhões de toneladas de açúcar no mundo (Estados Unidos, 2019). Índia, Brasil, União Europeia, Tailândia, China e Estados Unidos são os seis maiores produtores e representaram 63,5% da produção total de açúcar da temporada 2018/2019 (Figura 1.5).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de açúcar e atingiu um volume de 29,5 milhões de toneladas na temporada 2018/2019, o que representa 16,5% da produção global (Estados Unidos, 2019). Na safra 2009/2010, o País chegou a representar quase 24% de toda a produção mundial da commodity, no entanto, vem reduzindo seu *share* nos últimos anos, optando por um *mix* mais alcooleiro, em consequência

da baixa remuneração do açúcar (Empresa de Pesquisa Energética, 2019).

A Índia é o maior produtor mundial, com uma produção de 33,1 milhões de toneladas, uma participação de 18,5% na última temporada. Diferentemente do Brasil, na Índia predomina a produção em pequenas propriedades (em média de 1 a 2 ha) e, além disso, o governo garante um preço mínimo, subsidiando a produção para garantir a sobrevivência dos produtores (Otto et al., 2012). Juntos, Brasil e Índia são responsáveis por quase 35% do volume total produzido (Estados Unidos, 2019).

A União Europeia é o terceiro produtor mais representativo, com o equivalente a 10,2% (18,2 milhões de toneladas). Sua principal matéria-prima de produção é a beterraba. Em quarto

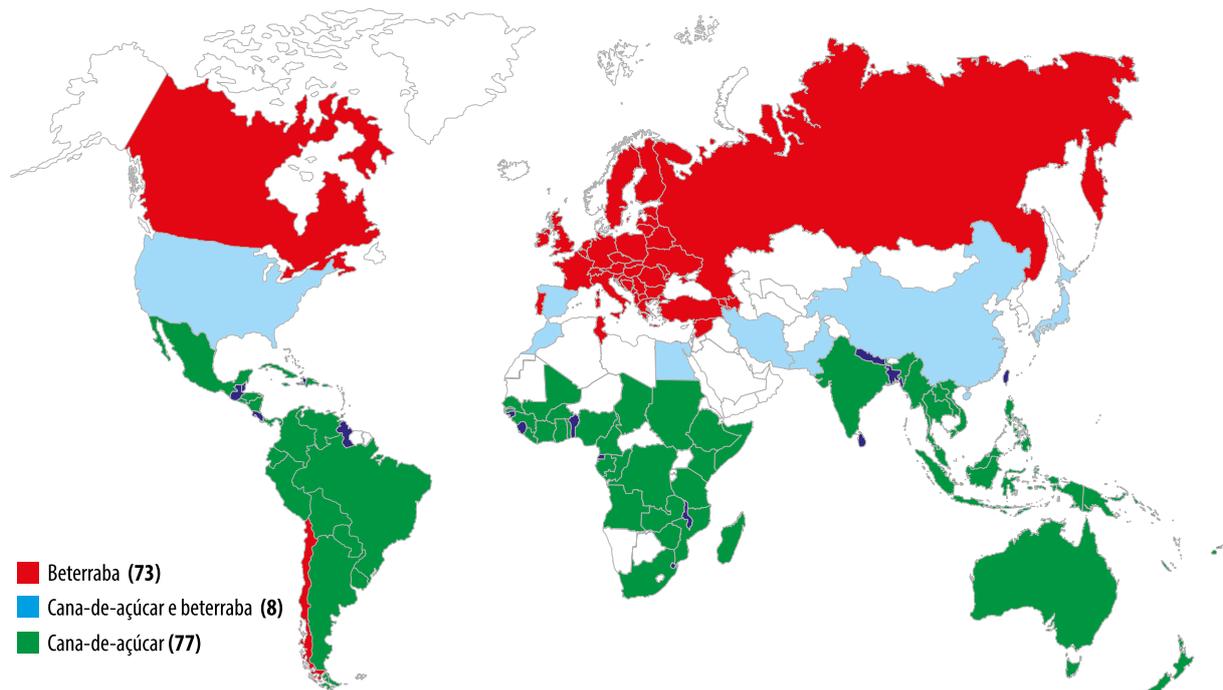


Figura 1.4. Países produtores de açúcar e suas matérias-primas.

Fonte: International Sugar Organization (2020).

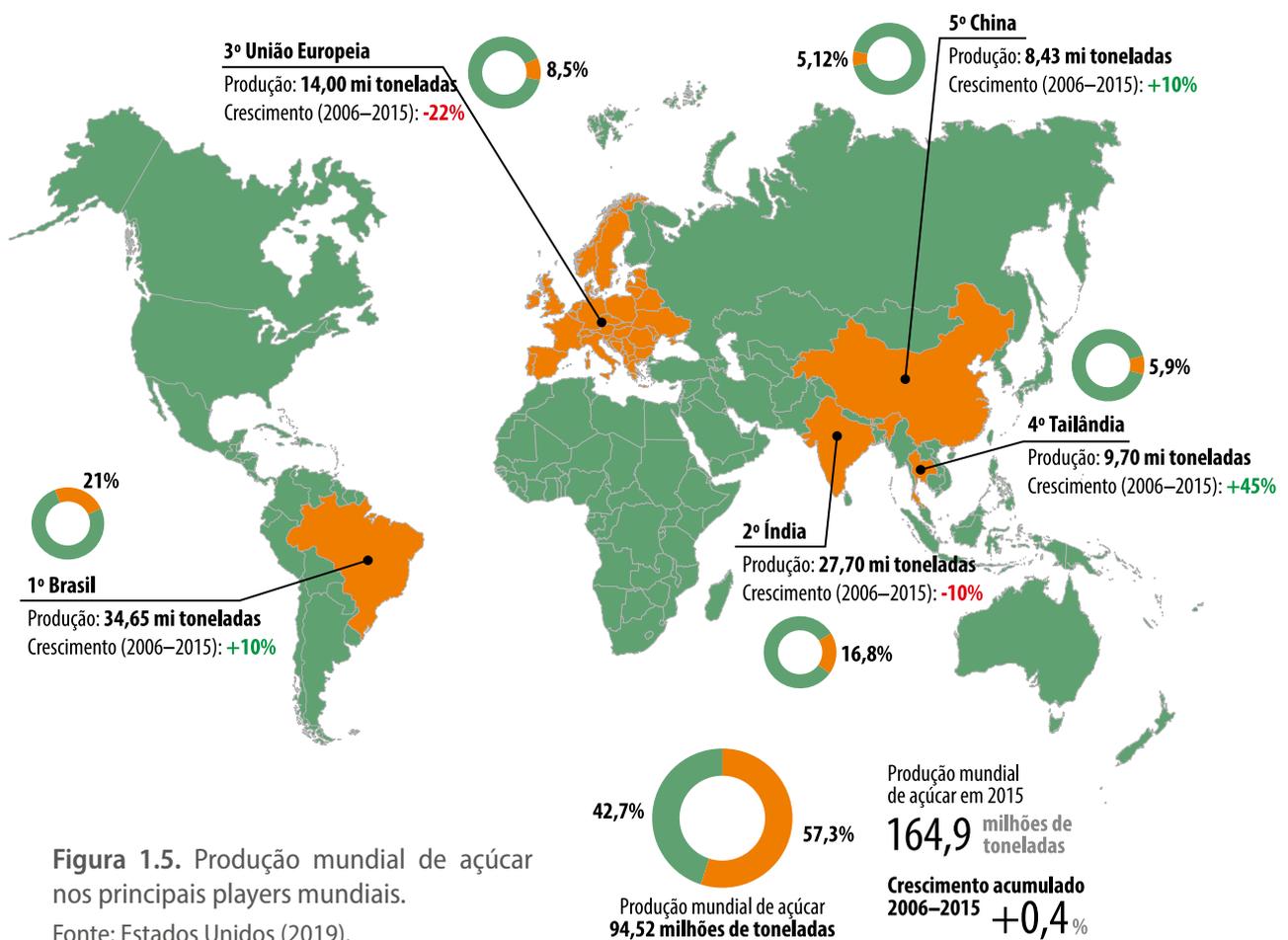


Figura 1.5. Produção mundial de açúcar nos principais players mundiais.

Fonte: Estados Unidos (2019).

colocado, a Tailândia concluiu a safra 2018/2019 com uma produção de 14,2 milhões de toneladas, uma participação de 7,9% na produção mundial. Em 10 anos o país cresceu 104,8% em sua produção, passando de sexto para quarto maior produtor mundial de açúcar (Estados Unidos, 2019).

Consumo

Na última década o consumo mundial do açúcar aumentou 12,3%, atingindo um total de 173,9 milhões de toneladas na safra 2018/2019 (Figura 1.6).

O balanço geral entre oferta e demanda de açúcar mante-se estável e em razoável equilíbrio na última década (Figura 1.7).

De acordo com dados da Figura 1.7, o consumo mundial apresentou taxa de crescimento médio

nos últimos 10 anos de 1,2% ao ano, ao passo que a produção apresentou um crescimento médio de 1,6% ao ano. Na relação oferta e demanda, muitos países não conseguem atingir a produção necessária para suprir seu consumo, como é o caso da China e dos Estados Unidos, tornando-se grandes importadores. Já outros países, como o Brasil, têm uma produção excedente, alimentando o comércio internacional (Tabela 1.2).

Os dados da Tabela 1.2 revelam que Índia, União Europeia, China, Estados Unidos e Brasil são os cinco maiores consumidores mundiais do produto e juntos foram responsáveis em 2018/2019 por um consumo de 83,7 milhões de toneladas, o equivalente a 48,1% do total mundial.

Ainda, segundo o Usda (Estados Unidos, 2021), o consumo da Índia em 2018/2019 representou 15,8% do consumo mundial (27,5 milhões de

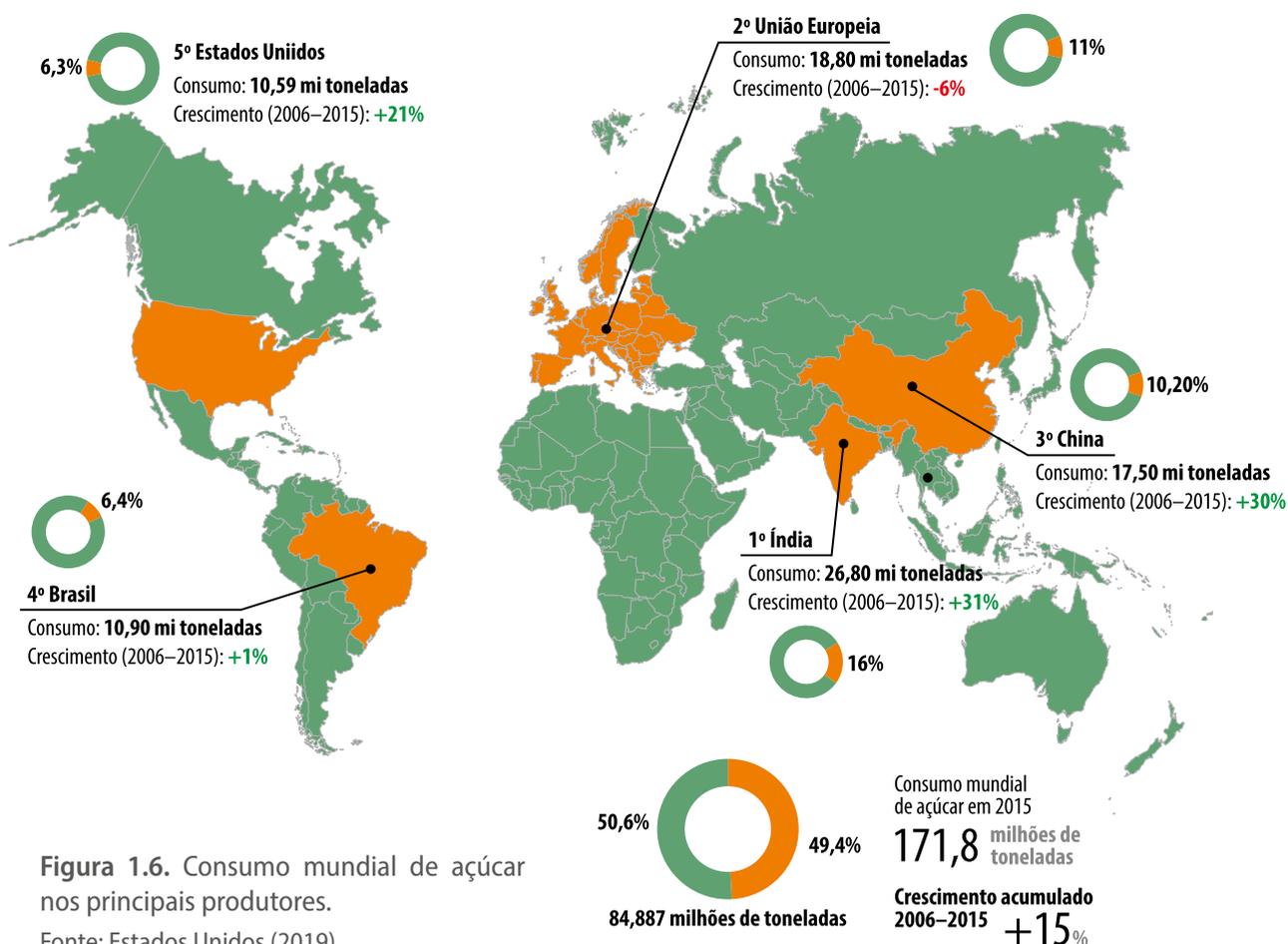


Figura 1.6. Consumo mundial de açúcar nos principais produtores.

Fonte: Estados Unidos (2019).

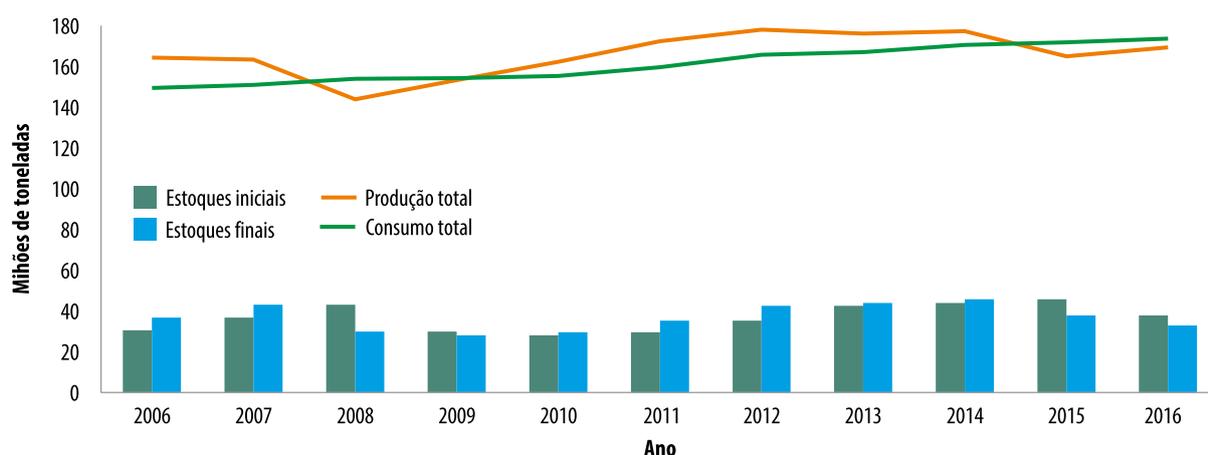


Figura 1.7. Relação entre produção, consumo e estoque.

Fonte: Estados Unidos (2019).

Tabela 1.2. Balanço de produção e consumo de açúcar em mercados selecionados na safra 2018/2019.

País	Produção	Consumo	Balanço
	(milhões de toneladas)		
Brasil	29,5	10,6	18,9
Tailândia	14,2	2,6	11,6
Austrália	4,9	1,2	3,7
México	6,6	4,5	2,1
Índia	33,1	27,5	5,6
Paquistão	5,5	5,4	0,1
Rússia	5,9	6,0	-0,1
Estados Unidos	8,1	11,0	-2,9
União Europeia	18,2	18,5	-0,3
China	10,6	15,8	-5,2
Mundo	178,9	173,9	5,0

Fonte: Estados Unidos (2019).

toneladas), e na última década o país aumentou seu consumo em 22,2%. Caso a Índia continue com seu crescimento populacional médio de 1,0% ao ano, é possível que, em um futuro próximo, o país tenha que importar, regularmente, açúcar (The World Bank, 2019). A União Europeia apresentou um consumo de 18,5 milhões de toneladas (10,6% do consumo mundial) e aumentou seu consumo em 5,3% em comparação

há 10 anos. A China consumiu 15,8 milhões de toneladas e apresentou um crescimento no consumo de 10,5% nos últimos 10 anos. Já o Brasil é o quinto maior consumidor mundial de açúcar, apresentou um consumo de 10,6 milhões de toneladas e nos últimos 10 anos teve uma queda no consumo de 10,2% (Estados Unidos, 2019).

Etanol

As principais matérias-primas para produção de etanol no mundo são a cana-de-açúcar (Brasil e Índia), o milho (EUA e Canadá), a beterraba, o trigo (Europa) e a mandioca (Tailândia). O etanol é produzido em sua maior parte por países localizados nas Américas do Norte e Sul, mas também em alguns países da Ásia e Europa (Estados Unidos, 2006).

Produção

No ano de 2018, de acordo com a Renewable Fuels Association (2019a), foram produzidos 108,15 bilhões de litros de etanol, um crescimento de 16,6% em relação ao ano de 2009. Já em relação a 2014, houve um crescimento de 13,9%. Do total produzido no mundo em 2018, 94,3% foi de responsabilidade de cinco grandes referências no mercado internacional de etanol: EUA, Brasil, União Europeia, China e Canadá (Fi-

gura 1.8). No entanto, se somadas somente as produções de EUA e Brasil, tem-se um montante de 83,9% de todo o etanol produzido (90,78 bilhões de litros).

Os Estados Unidos da América (EUA) são o maior produtor mundial de etanol com 56,2% de participação na produção total em 2018, e um montante de 60,80 bilhões de litros. O país apresentou um crescimento de 46,8% em relação a 2009 (Renewable Fuels Association, 2019a). Como a produção americana de etanol é derivada de milho, o país utilizou 34% de sua safra de milho para a produção de etanol, de acordo com dados da Renewable Fuels Association (2019c).

O segundo maior produtor é o Brasil, sendo responsável pela produção de 29,98 bilhões de litros (27,7% de todo o volume produzido no mundo). Em relação a 2009 foram acrescentados 5,08 bilhões de litros na produção brasileira, um crescimento de 20,4% (Renewable Fuels Association, 2019a).

A União Europeia deteve 5,0% da produção mundial de etanol em 2018, no entanto, em relação a 2009, o crescimento da produção foi expressivo, 37,6%, passando de 3,94 para 5,41 bi-

lhões de litros. A China e o Canadá também possuem importância nessa conjuntura. Juntos são responsáveis por 5,4% da oferta mundial e obtiveram crescimento em relação a 2009 de 93,9 e 65,2%, respectivamente, os maiores crescimentos entre os principais produtores (Renewable Fuels Association, 2019a).

Apesar de a produção de etanol dos EUA ser superior, em volume, em comparação à produção brasileira, de acordo com Macedo (2007), o etanol produzido no Brasil é mais competitivo e eficiente energeticamente que o americano produzido a partir do milho. O etanol brasileiro não é apenas mais competitivo que o americano, como também é mais competitivo que aquele produzido pelos outros países. O principal fator ligado a essa maior competitividade é a matéria-prima utilizada para a produção do etanol.

Em relação à produção de etanol por hectare (produtividade), a cana-de-açúcar se mostra superior frente às outras matérias-primas. No Brasil são produzidos 6.800 L de etanol de cana por hectare por ano, enquanto o etanol produzido de beterraba na Europa produz 5.000 L e o etanol produzido de milho nos EUA apresenta uma produção de apenas 3.100 L (Macedo, 2007).

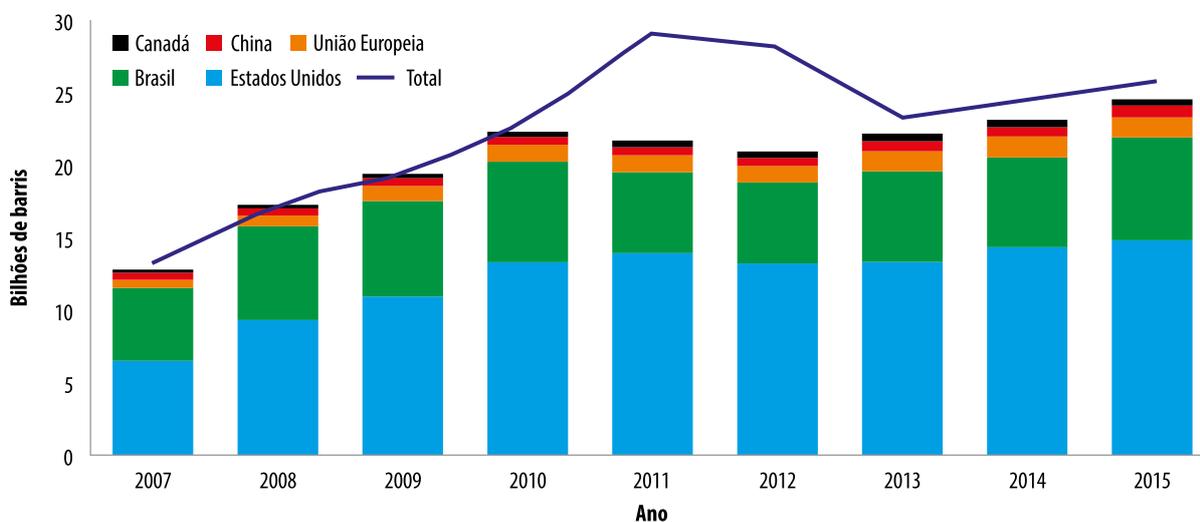


Figura 1.8. Principais players produtores de etanol no mundo.

Fonte: Renewable Fuels Association (2019a).

Além da questão da produtividade por área, a produção de etanol de cana é mais eficiente energeticamente do que as demais fontes. Na Figura 1.9 compara-se o balanço energético de diferentes fontes para produção de etanol.

Segundo Macedo (2007), utilizando-se de 1 unidade de energia fóssil, o etanol brasileiro produz 8,9 unidades de energia utilizável, ao passo que o etanol de milho americano produz apenas 1,3 unidade de energia utilizável. Dessa maneira, o balanço energético do etanol brasileiro é 6 vezes mais eficiente que o etanol americano e mais de 4 vezes em comparação ao etanol europeu de beterraba ou trigo. Ao ser analisado sobre a ótica ambiental, o etanol brasileiro também leva vantagem sobre os demais, visto que produz mais energia por unidade de energia fóssil consumida, utiliza menor quantidade de combustível fóssil e diminui as emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Em um exercício realizado por Souza (2014), são comparadas as quantidades de energia da cana-de-açúcar com a do petróleo. O autor verificou

que 1 t de cana-de-açúcar contém 1,2 barril de petróleo em termos de energia, sendo que a cana-de-açúcar possui 1.718×10^6 Kcal, enquanto um barril de petróleo possui 1.386×10^6 Kcal. Na cana-de-açúcar, essa energia está contida, de forma aproximada, um terço no caldo da cana, que será transformado em açúcar ou álcool, outro terço no bagaço e o terço final na palhada. Se considerarmos a safra 2018/2019 do Centro-Sul, a qual foi de 572,7 milhões de toneladas, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2019b), ter-se-ia o equivalente a 686,6 milhões de barris de petróleo por ano ou 1,9 milhão de barris de petróleo por dia.

O Brasil produz em média 72 t de cana por hectare (Conab, 2019b) e, com isso, 6,5 mil litros de etanol por hectare (Unica, 2019b). Caso o País alcançasse o potencial de produção de 200 t de cana por hectare, conforme sinalizam alguns experimentos do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), o País produziria, então, quase 20 mil litros de etanol por hectare, aumentando a sua competitividade e liberando áreas produtivas para outras culturas.

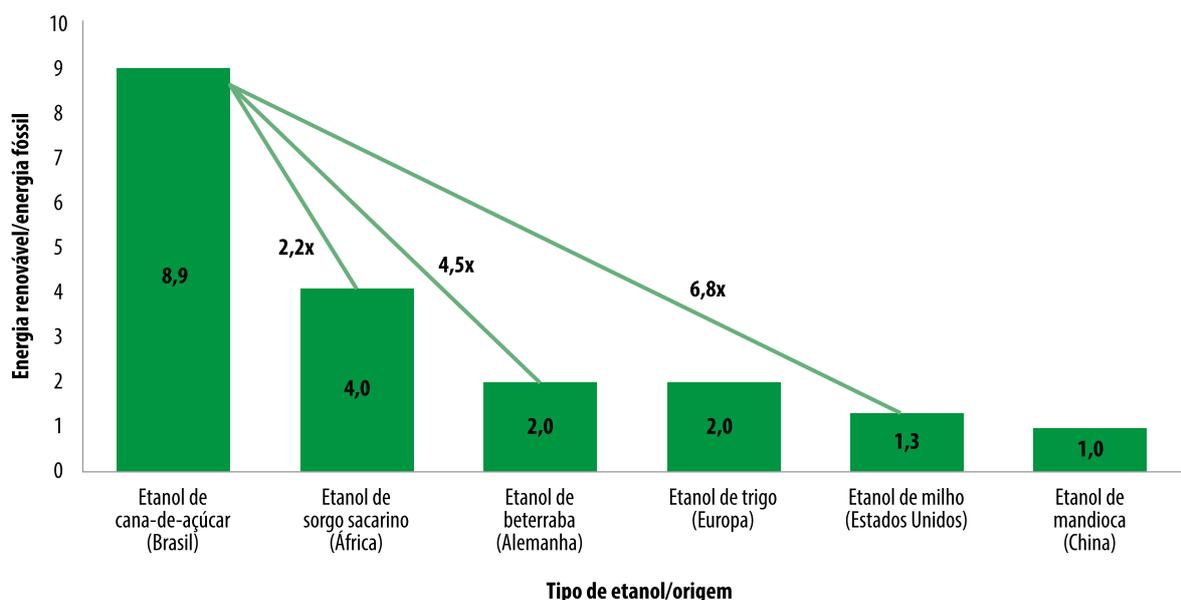


Figura 1.9. Balanço de energia na produção de etanol a partir de diversas matérias-primas.

Fonte: Neves (2017).

Consumo

Brasil e EUA são os maiores exportadores mundiais de etanol. De todo etanol exportado em 2018 pelos EUA, cujo volume atingiu 6,5 bilhões de litros, em média 30% destinaram-se ao abastecimento do mercado brasileiro, 20% tiveram como destino o Canadá, 9% foram destinados para a Índia, 5% para Coreia do Sul e 5% para a Holanda (Renewable Fuels Association, 2019b).

O Canadá se tornou o maior importador a partir do ano de 2014. No entanto, até 2014, o principal responsável pelas importações mundiais era a União Europeia (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2016; Renewable Fuels Association, 2018).

As preocupações com os impactos ambientais, o aquecimento global, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e os benefícios apresentados pelos biocombustíveis, em especial o etanol, foram fatores que levaram muitos países a adotarem programas de consumo de etanol em detrimento dos combustíveis fósseis, princi-

palmente por meio de metas de adição de etanol anidro na gasolina.

O movimento adotado por 66 países envolve políticas de adição de biocombustíveis na gasolina e diesel. Esse movimento é um indicador extremamente promissor ao mercado de etanol no mundo. Na Figura 1.10 a seguir ilustram-se os principais países que adotaram políticas de adição de biocombustíveis aos combustíveis fósseis.

De acordo com dados da BiofuelsDigest (Lane, 2018), se comparado com 2012, o número de países com políticas de adição de biocombustíveis aumentou em 26,9%, passando de 52 para 66 em 2018. A Argentina, por exemplo, acrescentou 3% de etanol na gasolina e 5% de biodiesel no diesel no período, contando atualmente com E8 e B10. O Brasil, que chegou a possuir 18% de etanol na gasolina, conta atualmente com 27% (E27) e intenção de 27,5%, assim como para o biodiesel que deve chegar a 12% até março de 2020. O cronograma prevê que, para 2023, esse teor atinja 15% (B15). É favorável também o

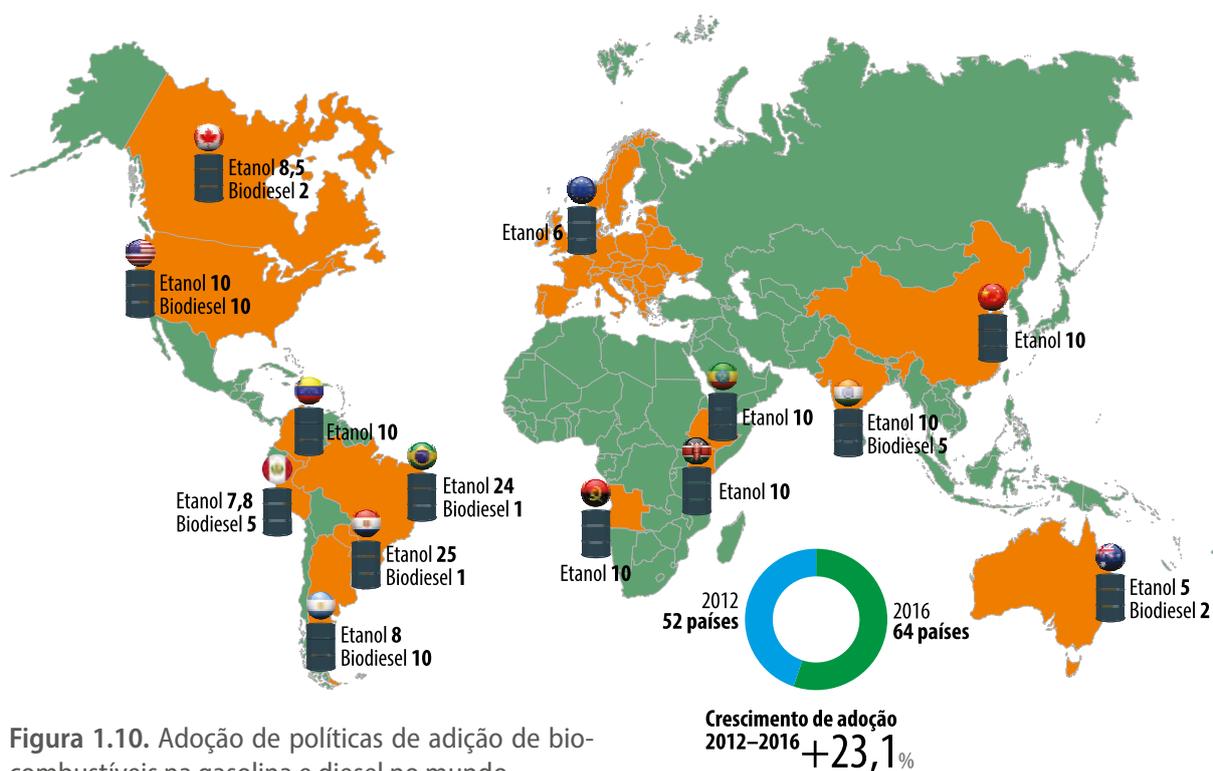


Figura 1.10. Adoção de políticas de adição de biocombustíveis na gasolina e diesel no mundo.

Fonte: Lane (2016, 2018).

fator de que os países próximos ao Brasil também possuem crescentes índices percentuais de mistura de etanol: Paraguai (E25), Peru (E7,8), Argentina (E8 e B10) e Colômbia (E10), assim como se pode observar na Figura 1.10.

Bioenergia

A matriz energética mundial do ano de 2018 está ilustrada na Figura 1.11.

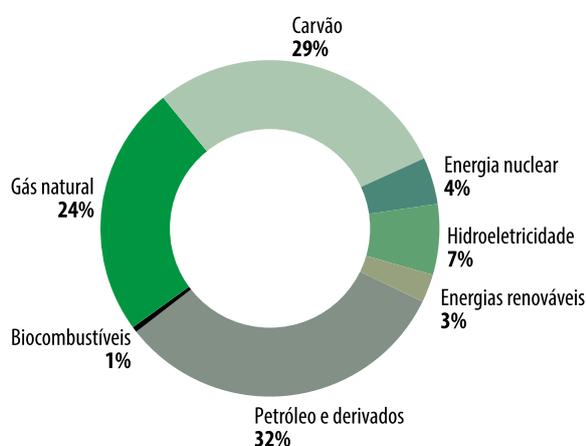


Figura 1.11. Matriz energética mundial em 2018 (em milhões de toneladas de petróleo equivalentes). Fonte: BP Statistical Review of World Energy (2019).

Em 2018, segundo a BP (BP Statistical Review of World Energy, 2019), em torno de 32% da energia consumida mundialmente foi proveniente do petróleo, 29% do carvão e 24% do gás natural. Dessa forma, os combustíveis fósseis representam 85% da matriz energética mundial. Em contrapartida, a participação de fontes renováveis ainda é pequena, com hidroeletricidade representando 7% e outras fontes de energia, 4%. No entanto, em longo prazo, a tendência é que a participação percentual mais que duplique, fazendo com que as fontes não renováveis sejam gradativamente substituídas por fontes renováveis.

Mercado brasileiro

No Brasil, desde 1990, a demanda total de energia dobrou, motivada pelo grande crescimento

no consumo de eletricidade e pela alta demanda por combustíveis, graças ao forte crescimento econômico e à expansão da classe média (International Energy Agency, 2016).

De acordo com o Ministério de Minas e Energias (Brasil, 2018), em 2018, 45,3% da oferta interna de energia foi derivada de fontes renováveis, entre elas estão: a) biomassa da cana; b) hidráulica; c) lenha e carvão vegetal; d) lixívia; e) outras fontes renováveis (Figura 1.12). Por sua vez, o petróleo e derivados ainda representam 34,4% da oferta interna de energia e o gás natural, 12,5%; somadas as fontes de energia não renováveis representam 54,7% da oferta energética brasileira.

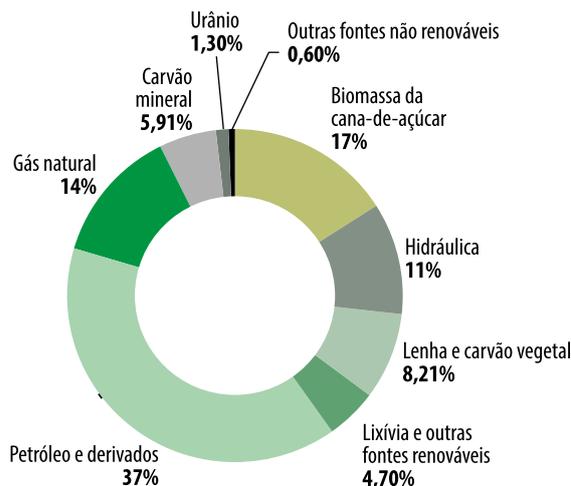


Figura 1.12. Repartição da oferta interna de energia no Brasil. Fonte: Brasil (2018).

Em 2017, sete estados foram responsáveis por quase 65% da produção de energia elétrica, segundo dados consolidados pela Empresa de Pesquisa Energética (2018). Entre os estados, por ordem do maior para o menor gerador, estão: a) Paraná (16,5%); b) Rio de Janeiro (12,3%); c) Espírito Santo (9,9%); d) São Paulo (7,6%); e) Pará (7,3%); f) Rondônia (5,8%); g) Rio Grande do Sul (5,1%).

Além do etanol, a bioeletricidade produzida no Brasil se mostra como outro importante fator de competitividade. Em 2018, das 410 usinas presentes no País, 188 utilizaram a biomassa da cana para exportar energia para rede elétrica, ofertando algo em torno de 21,5 TWh, de acordo com a *NovaCana* (Ranking..., 2019), um crescimento de 13,4% em relação ao dado de 2014.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2022 o potencial de oferta de bioeletricidade somente com o bagaço de cana será de 8,4 GW e, se considerar a utilização da palha da cana, esse potencial sobe para 22,1 GW, o equivalente a duas usinas de Itaipu ou quatro usinas de Belo Monte (Souza, 2014).

Ainda, segundo Souza (2014), a bioeletricidade contribui para redução das emissões de CO₂ na produção de energia. Ao comparar o Brasil com outros países no mundo, o Brasil, para gerar 1 MWh, emite cerca de 14 vezes menos CO₂ do que a China, 9 vezes menos que os EUA, 7 vezes menos do que a União Europeia.

De acordo Moraes e Shikida (2002), a cogeração do setor sucroenergético é mais eficiente se comparada com a geração termoelétrica convencional, pois possui eficiência superior a 85% no uso da energia do combustível, ao passo que nas termoelétricas convencionais essa eficiência é de cerca de 30 a 40%.

Futuro do setor sucroenergético

Neste tópico, serão abordadas algumas das principais tendências do setor, bem como um panorama para o ano de 2030.

Principais tendências

Por questões didáticas, optou-se por separar as tendências de acordo com os principais produtos da cadeia.

Cana-de-açúcar

Neves (2017) realizou uma estimativa para o setor sucroenergético para o ano de 2030. De acordo com as estimativas, o Brasil terá uma produção de 942,75 milhões de toneladas de cana, com uma produtividade média de 148,08 kg de ATR por tonelada de cana-de-açúcar e uma produção de 100 t de cana por hectare. Dessa forma, serão alcançados 11,8 milhões de hectares cultivados (considerando-se uma taxa de renovação de 20%).

Em relação às inovações previstas para a cana-de-açúcar, existem diversas possibilidades, como: a) desenvolver variedades de cana tolerantes a herbicidas; b) inovações no controle biológico; c) sementes de cana que busquem gerar ganho na produção, diminuindo as falhas de plantio e reduzindo os custos; d) desenvolvimento de novos genes com eficiência fotossintética, maior produção e acúmulo de açúcar e tolerância à seca; e) tecnologias de otimização de ativos e recursos, buscando diminuir o número de máquinas e pessoas envolvidas na plantação e colheita; f) conectividade e inteligência artificial, de modo a otimizar a tomada de decisão e gestão das propriedades (Neves, 2017).

Açúcar

A previsão para 2025 é de uma produção de 210,03 milhões de toneladas de açúcar, segundo a Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) (2016). O crescimento será de 17,4% em menos de uma década, algo que não tem acontecido no último período, visto que o crescimento nos últimos 10 anos foi de 16,8%. Para 2030, a organização estima um crescimento de 30,2% na produção, chegando a 232,9 milhões de toneladas (Figura 1.13).

Ainda segundo a Organisation for Economic Co-Operation and Development (2016), a projeção de consumo per capita total da commodity

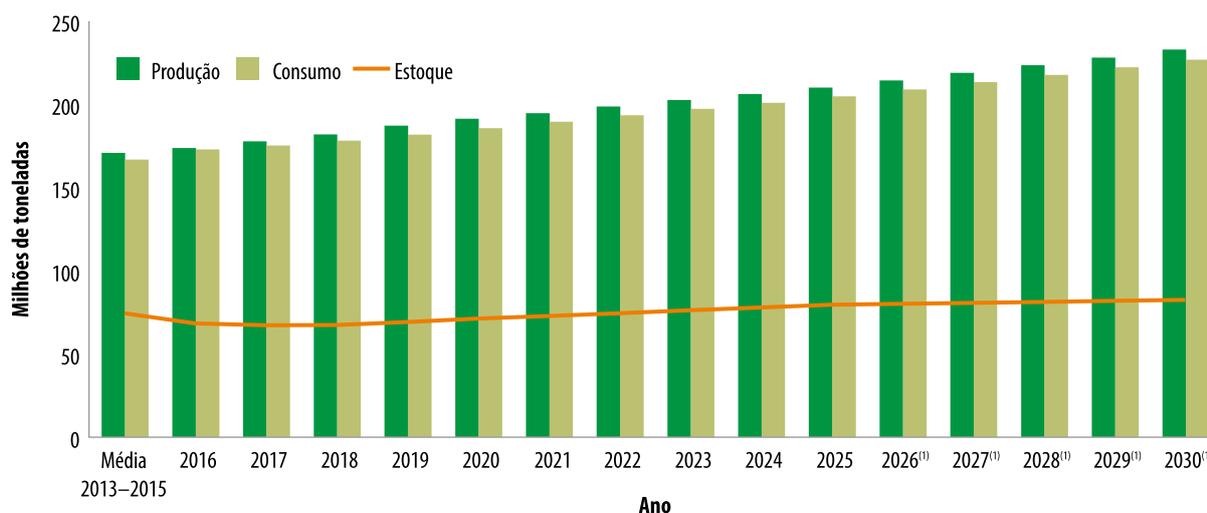


Figura 1.13. Produção, consumo e estoques mundiais de açúcar até 2030.

⁽¹⁾ Projeções feitas pelos autores a partir da média de crescimento de 10 anos (Fao, 2019).

Fonte: Organisation for Economic Co-Operation and Development (2016).

tende a aumentar mais de 15% até 2025. É esperado que essas taxas de crescimento de consumo per capita sejam menores em países desenvolvidos e maiores em países em desenvolvimento. Dessa forma, países da Ásia e do Pacífico, como China, Índia e Indonésia, representarão quase 70% de toda a expansão. Evidencia-se que, no entanto, a Organização Internacional do Açúcar – International Sugar Organization (ISO), e a Organização Mundial da Saúde (OMS) vêm realizando campanhas de conscientização a respeito da quantidade de açúcar ingerida diariamente e dos malefícios atrelados ao seu consumo em excesso, o que pode impactar nas projeções de crescimento do consumo per capita em longo prazo.

O Brasil continuará sendo o principal país na produção de açúcar, com um papel-chave no mercado mundial. A estimativa dos autores é que o País tenha uma produção de 46,37 milhões de toneladas em 2030, dos quais 33,0 milhões serão destinados para exportações e outros 13,37 milhões para o mercado interno. Os valores foram projetados a partir das previsões da Organisation for Economic Co-Operation and Development (2016) para 2025.

Etanol

De acordo com a Organisation for Economic Co-Operation and Development (2016), até 2025 a produção mundial de etanol deverá crescer 18,7%, alcançando o patamar de 128,4 bilhões de litros. O órgão ainda projeta que cerca de 50% desse volume acrescido será proveniente do Brasil. As projeções indicam também que os EUA e o Brasil continuarão sendo os dois maiores expoentes na produção de etanol no mundo.

O Brasil deverá aumentar sua produção em 80% durante o período de projeção. Os principais fatores que alimentam tal crescimento são o aumento da demanda interna pelo combustível e o compromisso firmado pelo governo brasileiro, na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 (COP-21), em reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025, em relação aos níveis de 2005, e como contribuição indicativa subsequente, em reduzir as emissões de GEE em 43% em 2030, na mesma base de comparação. O governo brasileiro elaborou um documento no qual projeta que o País deverá produzir 45 bilhões de litros de etanol em 2025 e 54 bilhões de litros em 2030 para cumprir o compromisso brasileiro na COP-21 (Fundamentos..., 2015). Esse va-

lor foi utilizado neste estudo para traçar o cenário de 2030.

Já os EUA deverão estabilizar sua produção de etanol no período, graças ao atingimento das metas. Caso estas se alterem, pode haver novo crescimento, principalmente com o desenvolvimento do E15 e do E85.

Há projeções de crescimento de produção de etanol também para a Índia, onde novas políticas encorajarão a produção de etanol a partir do melão. A indústria de biocombustíveis ainda tem pequena expressividade na África subsaariana, com o equivalente a menos de 1% do mercado global. No entanto, o potencial de crescimento é bastante evidente, por causa da disponibilidade de recursos que a região possui e do apoio dado por diferentes governos da região para que sejam estimulados a produção e o consumo de biocombustíveis, a fim de aumentar a segurança energética dos países e reduzir a dependência de fontes fósseis. Embora ainda pouco expressiva, a produção de etanol tem expandido em mais de 90% na última década, e com uma taxa de crescimento projetada de 3% ao ano até 2025. Tal crescimento deverá ocorrer na parte sul e na parte ocidental do continente, onde o crescimento médio é de 7% ao ano (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2016).

A Comissão Europeia tem financiado grandes projetos industriais na Europa para ampliar as possibilidades de produção de biocombustíveis. Ao contrário dos tradicionais métodos, os projetos BIOFAT, All-GAS e Intesusal visam produzir etanol, biodiesel e produtos biológicos em larga escala a partir de algas e com um impacto ambiental reduzido. Apesar dos esforços, o etanol ainda continua sendo um biocombustível altamente competitivo (European Commission, 2015).

De acordo com entrevista com especialistas (comunicação pessoal)¹, o Brasil pode se tornar ainda mais competitivo por meio da utilização de outras matérias-primas para a produção de etanol, as quais podem ser utilizadas nos períodos de entressafra da cana-de-açúcar. Por exemplo, cita-se o sorgo sacarino, que poderia ser utilizado para a produção de etanol com as mesmas estruturas existentes hoje nas usinas, podendo ser moído em março e abril, antes da colheita da cana, e, dessa forma, diminuir o período em que a usina fica ociosa. Além do etanol de sorgo sacarino, também tem atraído as atenções o etanol de milho. Pode-se produzir o etanol de milho com unidades anexas às usinas de cana e, com isso, aumentar a produção de etanol, como também utilizar o excedente de milho produzido em anos de safra maior, evitando-se a queda de preço para o produtor. Apesar dessas possibilidades, tanto a utilização do sorgo quanto a do milho ainda são competitivas comparadas com a cana. É preciso melhorar os processos.

Bioenergia

A British Petroleum – BP (BP Statistical Review of World Energy, 2016) projetou que a demanda

¹ Foram realizadas entrevistas em profundidade com agentes do setor. As entrevistas foram feitas por meio de um roteiro de questões semiestruturadas. A realização das entrevistas aconteceu de forma presencial e via telefone, com os seguintes agentes:

Entrevistas com organizações: foram realizadas entrevistas em profundidade com organizações do setor: Associação das Indústrias Sucreenergéticas de Minas Gerais, o Sindicato da Indústria de Fabricação do Alcool do Estado de Minas Gerais e o Sindicato da Indústria do Açúcar no Estado de Minas Gerais (Siamig); Datagro, União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica) e Organização de Associações de Produtores de Cana do Brasil (Orplana).

Entrevistas com especialistas: foram realizadas entrevistas em profundidade com especialistas do setor. Ao todo foram cinco entrevistas.

Entrevistas com produtores rurais: foram aplicados questionários para cerca de 230 produtores, contemplando mais de 70 cidades e regiões produtoras.

Entrevistas com usinas: foram realizadas entrevistas em profundidade com duas usinas sucroenergéticas.

por energias provenientes de fontes renováveis apresentará crescimento. Para 2035, 8% da matriz energética mundial será de energias renováveis. No entanto, é possível somar nesse montante o percentual de biocombustíveis e hidroeletricidade, fazendo com que o montante renovável estimado para 2035 seja 16% do total de fontes utilizadas.

Na Figura 1.14, comparam-se a produção e o crescimento de diferentes fontes de energia no mundo entre 2015 e 2035.

De acordo com dados da BP (BP Statistical Review of World Energy, 2016), entre 2015 e 2035 as fontes que mais apresentarão crescimento serão as energias renováveis com um crescimento de 283%, apesar de uma participação ainda pequena. Na sequência, aparecerão os biocombustíveis, com crescimento de 90% e menor participação entre as fontes de matéria de energia. O petróleo continuará sendo a principal fonte no mundo, porém, apresentará o menor crescimento no período, somente 12,9%.

Em 2030 no Brasil, segundo projeções feitas pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2016), para que o País cumpra o compromisso assumido na COP-21, o setor sucroenergético deve produzir 76 TWh em 2030. Ainda de acordo com o órgão, a oferta interna de energia será, em sua maior parte, de fontes não renováveis; repre-

sentando 55% das energias não renováveis, a principal fonte será o petróleo e seus derivados, seguida por gás natural e carvão mineral (Tabela 1.3).

De acordo com a Tabela 1.3, as energias renováveis terão participação de 45% na oferta interna de energia. Chama a atenção que os derivados da cana devem saltar da segunda posição como principal fonte de energia renovável em 2005 para principal fonte em 2030.

Outros produtos

O setor sucroenergético engloba diversos outros produtos, além de açúcar, etanol e bioenergia, como: a) leveduras; b) etanol celulósico; c) bioplásticos; d) crédito de carbono; e) diesel de cana; f) biobutanol; entre outros. Apesar disso, esses produtos são pouco explorados pelo setor, ainda. Um exemplo é o biogás, que utiliza, como fonte de matéria orgânica, os resíduos do setor sucroenergético. O Brasil teria um potencial de produção de biogás de aproximadamente 12 bilhões de metros cúbicos por ano, algo próximo a 58 mil GWh de energia elétrica (Empresa de Pesquisa Energética, 2016; Coelho, 2018).

O etanol celulósico, ou também chamado de etanol de segunda geração, tem ganhado importância. De acordo com projeções da EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2016), em 2030 a produção brasileira de etanol de segunda geração será de 2,5 bilhões de litros.

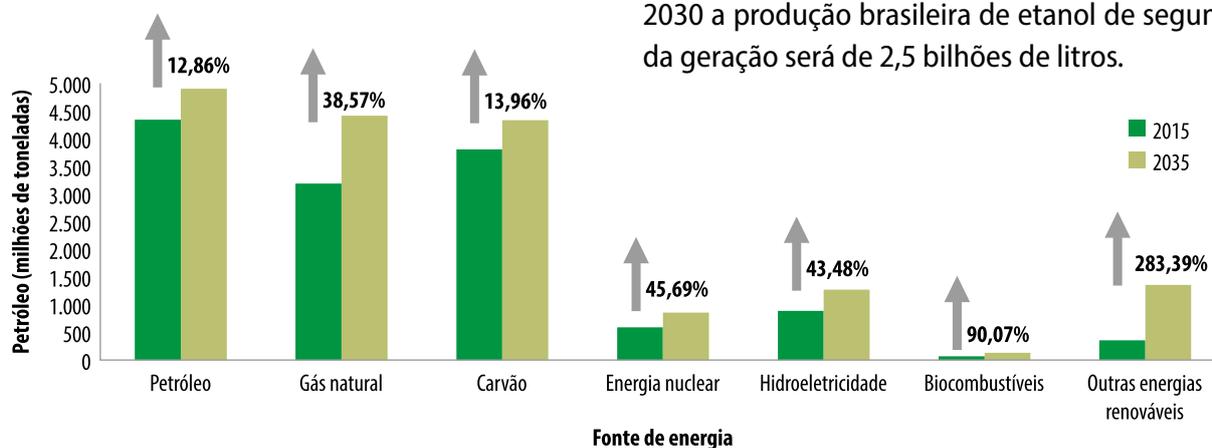


Figura 1.14. Produção de energia por fontes e seus crescimentos percentuais no mundo entre 2015 e 2035. Fonte: BP Statistical Review of World Energy (2016).

Tabela 1.3. Oferta interna de energia em 2030.

Tipo de energia	2005		2014		2025		2030	
	10 ³ tep	(%)						
Não renovável	121.819	55,9	185.100	60,6	226.143	55,1	265.152	55,0
Petróleo e derivados	84.553	38,8	120.327	39,4	146.515	35,7	164.430	34,1
Gás natural	20.526	9,4	41.373	13,5	46.679	11,4	61.207	12,7
Carvão mineral e derivados	12.991	6,0	17.551	5,7	23.303	5,7	26.421	5,5
Urânio (U308) e derivados	2.549	1,2	4.036	1,3	6.996	1,7	10.232	2,1
Outras energias não renováveis	1.200	0,6	1.814	0,6	2.650	0,6	2.862	0,6
Renovável	96.117	44,1	120.489	39,4	184.097	44,9	216.820	45,0
Hidráulica e eletricidade	32.379	14,9	35.019	11,5	53.209	13,0	59.949	12,4
Lenha e carvão vegetal	28.468	13,1	24.728	8,1	27.333	6,7	29.022	6,0
Derivados de cana-de-açúcar	30.150	13,8	48.128	15,7	69.087	16,8	80.940	16,8
Outras energias renováveis	5.120	2,3	12.613	4,1	34.468	8,4	46.910	9,7
Eólica	8	0,0	1.050	0,3	7.898	1,9	8.989	1,9
Solar	–	0,0	–	0,0	1.075	0,3	3.056	0,6
Óleo vegetal (biodiesel)	–	0,0	2.193	0,7	4.458	1,1	7.481	1,6
Outros	5.112	2,3	9.370	3,1	21.037	5,1	27.383	5,7
Total	217.936	100,0	305.589	100,0	410.240	100,0	481.972	100,0

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016).

Estudos recentes realizados por Huang et al. (2016) mostram a oportunidade para cana-de-açúcar produzir óleo vegetal. Os pesquisadores modificaram geneticamente a cana-de-açúcar para produzir óleo, o chamado cana-óleo. Este produto tem potencial para gerar biodiesel. Segundo o estudo, o óleo diesel renovável, com origem da cana-de-açúcar, tem custo aproximado entre US\$ 0,59 e US\$ 0,89 por litro, ao passo que o produzido de soja tem custo de US\$ 1,08 por litro e o produzido a partir de petróleo tem custo entre US\$ 0,82 e US\$ 0,98. Outra vantagem do óleo diesel renovável está na sua produtividade. Enquanto o cana-óleo pode alcançar até 6.700 L ha⁻¹, o biodiesel de soja produz cerca de 500 L ha⁻¹.

Segundo Alfred Szwarc (Siamig, 2017), consultor da Unica, outros produtos poderão conquistar a cana no curto prazo: o bagaço como

alternativa para melhorar a durabilidade de concretos e argamassas [substituindo areia natural — projeto da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), de nome Areia de Cinza do Bagaço de Cana], que poderia evitar a retirada de 4 a 5 milhões de toneladas do total de 100 a 200 milhões de toneladas de areia dos rios para a construção civil (5% do volume total). Outro uso seria para produção de carvão ativo à base de bagaço, feito pelo Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), com custo 20% menor que os concorrentes, para uso em processos de filtragem.

Podem ser destacados ainda outros usos do etanol, como nas células combustíveis movidas a etanol, o que otimiza a estrutura já instalada de postos de combustíveis para viabilizar o abastecimento de carros elétricos. Além disso, ainda

há o bioquerosene, que está sendo testado na aviação; bebidas de caldo de cana embaladas em caixinhas, prontas para consumo; tijolos ecológicos produzidos com bagaço de cana e cinza de caldeira (custo aproximado de R\$ 0,80, ao passo que o de barro custa R\$ 1,40); *whey protein* (proteínas vegetais à base de bagaço); biodetergente; bandejas (que substituem isopor), entre outros produtos. O potencial da cana-de-açúcar é enorme e deve ser mais bem aproveitado no futuro.

COP-21 e o setor sucroenergético em 2030

Neste tópico, será feito um retrato do setor sucroenergético em 2030, utilizando como premissas o compromisso assumido pelo Brasil na COP-21.

COP-21 e os compromissos assumidos pelo Brasil

A COP-21 foi a 21ª Conferência das Partes, a qual é uma Convenção-Quadro sobre o clima, que busca entender e encontrar soluções para as mudanças climáticas. A Conferência das Partes é o principal órgão decisório da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima ou United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). O objetivo da COP-21 era que os países assumissem compromissos para redução dos gases do efeito estufa (GEE). Durante o evento, 195 países propuseram documentos de compromissos individuais, chamados de intended Nationally Determined Contribution (iNDC). Estes documentos são planos de ações e metas submetidos por cada país e que visam diminuir as emissões dos GEE (Fundamentos..., 2015).

O Brasil apresentou, por meio de sua iNDC, medidas a serem realizadas em diversos setores visando à redução da emissão dos GEE. Dessas medidas assumidas pelo governo brasileiro, al-

gumas trazem impactos diretos no setor sucroenergético (Fundamentos..., 2015):

i) Aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, expandindo o consumo de biocombustíveis, aumentando a oferta de etanol, inclusive por meio do aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração), e aumentando a parcela de biodiesel na mistura do diesel.

[...]

iii) No setor da energia, alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, incluindo:

- Expandir o uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, na matriz total de energia para uma participação de 28% a 33% até 2030;

- Expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar.

Dessa forma, é preciso entender quais são os impactos destes compromissos no setor sucroenergético, sejam no consumo dos principais produtos, na produção, nos insumos, nos empregos, na geração de renda e impostos, entre outros.

Setor sucroenergético em 2030

Para a realização dessas estimativas, foram formados levantamentos de dados secundários em revistas, documentos, relatórios, artigos, textos, trabalhos técnicos, entre outras fontes de informações já publicadas (Neves, 2017). Também foram utilizadas fontes de dados primárias, por meio de entrevistas em profundidades com organizações setoriais, especialistas, agroindústrias, mais de 230 entrevistas com produtores rurais de 70 regiões, associações e workshops com associações e produtores. Para construção do cenário, utilizou-se como ferramenta o método GESis, desenvolvido por Neves (2008).

Impactos na cadeia

Caso o Brasil cumpra com todos os compromissos assumidos na COP-21, no ano de 2030 o País deverá produzir 54 bilhões de litros de etanol, 46 milhões de toneladas de açúcar e 76 TWh de energia elétrica. Para alcançar esses valores de produção de etanol, açúcar e bioenergia, serão necessários cerca de 940 milhões de toneladas de cana (51,1% maior que a produção atual — 666 milhões de toneladas), o que levará à necessidade de 11,8 milhões de hectares (3,12 milhões de hectares a mais do que se utilizou em 2016 — considerando-se áreas de renovação).

Ao considerar os valores supracitados de produção e área como base de cálculo, foi estimado o PIB do setor sucroenergético em 2030. Nesse cenário, portanto, o PIB do setor sucroenergético atingiria a cifra de US\$ 74,49 bilhões, 72% maior que o PIB do setor na safra 2013/2014. Os valores e a representação de cada produto para composição do PIB podem ser vistos na Tabela 1.4.

Já com relação à movimentação financeira, ou seja, a soma do faturamento de todos os elos da cadeia ou todo o dinheiro que passou diretamente pelo setor sucroenergético, o setor al-

cançaria um valor de US\$ 206,64 bilhões, 92% maior que a movimentação financeira na safra 2013/2014 (Tabela 1.5).

A movimentação financeira das vendas dos diversos produtos ao longo da cadeia gera receita na forma de impostos para o governo. Conside-

Tabela 1.5. Movimentação financeira do setor sucroenergético em 2030.

Agente	Total (MI + ME) US\$ (milhões)
Antes da fazenda	12.487,58
Nas fazendas	54.957,33
Insumos industriais	4.129,96
Usinas	64.376,36
Distribuição	66.958,08
Agentes facilitadores	8.083,18
Total	210.992,50

Fonte: Neves (2017).

rando-se somente o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (Cofins), o

Tabela 1.4. Produto interno bruto (PIB) do setor sucroenergético em 2030.

Produto US\$ (milhões)	Mercado interno (MI)	Mercado externo (ME)	Total (MI + ME)
	US\$ (milhões)	US\$ (milhões)	
Etanol	Hidratado	812,42	33.272,00
	Anidro	1.550,42	14.760,80
	Não energético	–	1.214,10
Açúcar	7.904,32	13.133,35	21.037,66
Bioeletricidade	3.740,09	–	3.740,09
Bioplástico	121,89	284,40	406,29
Levedura e aditivos	20,93	33,68	54,61
Crédito de carbono	–	0,36	0,36
Total	58.671,28	15.814,63	74.485,91

Fonte: Neves (2017).

setor poderá arrecadar US\$ 19,23 bilhões em impostos agregados. Se comparado com o setor em 2013, a arrecadação de impostos crescerá 126%, saindo de US\$ 8,5 bilhões em 2013 para US\$ 19,2 bilhões em 2030 (Neves; Trombin, 2014).

Em 2030, o setor gerará 261 mil postos de trabalho diretos. A remuneração média mensal de um trabalhador do setor será de US\$ 424,00, levando a uma massa salarial total de US\$ 1,33 bilhão (R\$ 5,91 bilhões). Utilizando-se no fator de geração de empregos indiretos desenvolvido por Montagnhani et al. (2009), os empregos indiretos serão de 624 mil postos. Se comparado com 2013, em 2030 seriam criados 80 mil novos postos de trabalhos diretos e 190 mil postos de trabalhos indiretos, em que a massa salarial do setor passaria de R\$ 3,05 bilhões para R\$ 5,90 bilhões em 2030 (Neves; Trombin, 2014).

É possível traçar o cenário do setor, detalhando a movimentação de cada elo da cadeia em 2030 (Figura 1.15).

Investimentos

Para que se alcancem os valores mencionados no tópico anterior, alguns investimentos fazem-se necessários para o desenvolvimento do setor.

Os investimentos trazidos por Neves (2017) necessários à formação de canais e unidades industriais totalizam US\$ 31,4 bilhões (R\$ 139,4 bilhões), dos quais:

- Formação de 3,13 milhões de hectares – US\$ 4,58 bilhões (R\$ 20,35 bilhões) – R\$ 6.500 por hectare.
- Capacidade industrial instalada adicional de 298 milhões de toneladas – ne-

cessidade de 80 novas usinas no período (2016–2030).

A construção de 80 novas usinas levará à necessidade de investimento de US\$ 26,80 bilhões (R\$ 119 bilhões) – US\$ 90 por tonelada de cana.

Considerações finais

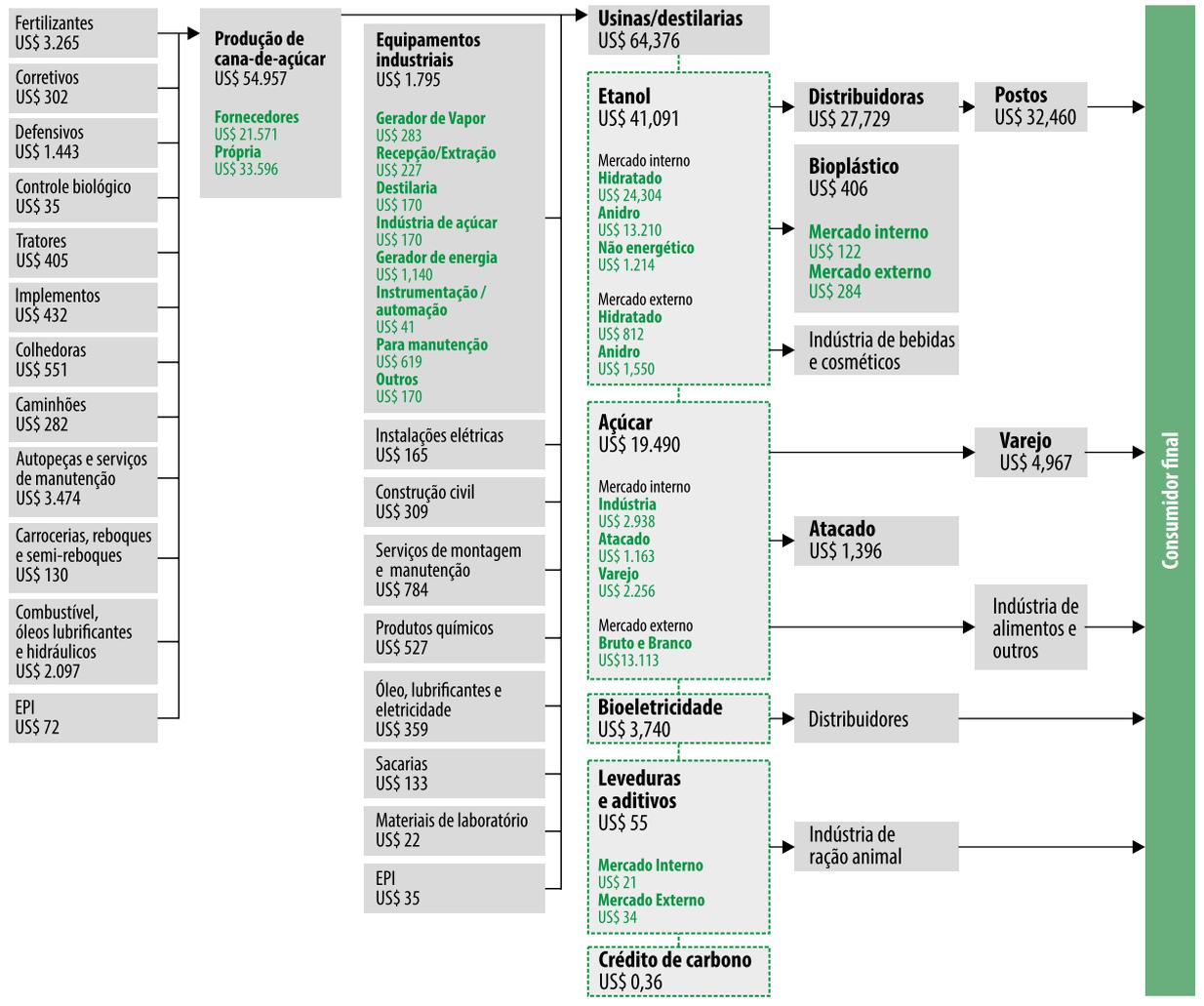
O setor sucroenergético tem importância histórica para o Brasil. O setor possui um forte impacto na geração de riquezas para a nação, bem como importância social na geração de empregos e distribuição de renda, além de sua importância ambiental, com os diversos benefícios para o meio ambiente e para a população.

O setor tem enfrentado desafios nos últimos anos, como o crescente custo de produção que está comprometendo as margens dos produtores, o endividamento das unidades industriais, relativo apoio governamental e políticas públicas específicas para valorização do setor, entre outros problemas.

Além dos investimentos financeiros, diversas ações são necessárias para o sucesso do setor. Neste capítulo, procurou-se fazer simulações mais conservadoras, com base em projeções já realizadas por órgãos representativos de cada setor para, assim, poder chegar a números mais plausíveis e a uma agenda mais realista.

Apesar dos desafios, acredita-se que exista uma clara chance de novo ciclo de crescimento do setor:

- I – Soberania – Proálcool 1974/1975.
- II – Tecnologia – Flex Fuel 2003/2004.
- III – Sustentabilidade Global 2017/2018.



Agentes facilitadores ⁽¹⁾ (não compram e vendem, apenas prestam serviços) - US\$ milhões					
CCT terceirizado	US\$ 876	Planos de saúde ⁽²⁾	US\$ 100	Pedágios de exportação	US\$ 322
Impostos agregados	US\$ 19,324	Alimentação ⁽²⁾	US\$ 162	Fretes de exportação	US\$ 1,406
		Custo de elevação no porto	US\$ 662	P&D	US\$ 182
				Eventos	US\$ 13
				Revistas/jornais	US\$ 4
				Massa salarial	US\$ 1,329

⁽¹⁾ Centro-Sul. ^{(2),(3)} Valores estimados para cana própria.

Figura 1.15. Setor sucroenergético em 2030.

Fonte: Neves (2017).

Referências

- AS USINAS de açúcar e etanol do Brasil. **NovaCana**. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil. Acesso em: 9 dez. 2022.
- AZENHA, A. C. Tecnologia e cocriação. **Opiniões**, ano 15, n. 56, p. 39-40, 2018. Divisão C. Disponível em: <http://english.unica.com.br/convidados/42854212920313606276/tecnologia-e-cocriacao>. Acesso: 11 nov. 2019.
- BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. London: BP, 2016. v. 65.
- BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. London: BP, 2019. v. 68.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Resenha energética brasileira: 2018: ano base 2017**. Brasília, DF, 2018. 30 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36208/948169/Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira++edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v3.pdf/92ed2633-e412-d064-6ae1-eefac950168b>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- COELHO, J. M. **O potencial do biogás: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/EPE_Jos%C3%A9%20Mauro_Potencial%20do%20Biog%C3%A1s_06jun.pdf. Acesso em: 13 nov. 2019.
- CONAB. **Insumos agropecuários**. 2019a. Disponível em: <https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultainsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- CONAB. **Séries históricas**. 2019b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- CONAB. **Séries históricas**. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 1 mar. 2024.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de conjuntura dos biocombustíveis: ano 2018**. Rio de Janeiro, 2019. 75 p. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-402/An%C3%A1lise_de_Conjuntura_Ano%202018.pdf. Acesso em: 11 nov. 2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2018: ano base 2017: 2018 statistical yearbook of electricity: 2017 baseline year**. Rio de Janeiro, 2018. 248 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: produção e uso de energia**. [Rio de Janeiro], 2016. 97 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2020.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Foreign agricultural service**. 2019. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Sugar: world market and trade**. 2021. 7 p. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/Sugar.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **The economic feasibility of ethanol production from sugar in the united states**. 2006. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/reports/energy/EthanolSugarFeasibilityReport3.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- EUROPEAN COMMISSION. EU energy stories: Algae, the new biofuel. 2015. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/news/eu-energy-stories-algae-new-biofuel>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- FAO. **Faostat**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- FUNDAMENTOS para a elaboração da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris sob a UNFCCC. [2015]. 13 p. Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Bases_elaboracao_iNDC.pdf. Acesso em: 2 fev. 2020.
- HUANG, H.; LONG, S.; SINGH, V. Techno-economic analysis of biodiesel and ethanol co-production from lipid-producing sugarcane. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 10, n. 3, p. 299-315, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.1640>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Brazil**. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/brazil>. Acesso em: 22 nov. 2016.
- INTERNATIONAL SUGAR ORGANIZATION. **Cane and beet**. Disponível em: <https://www.isosugar.org/sugarsector/cane-and-beet>. Acesso em: 27 mar. 2020.
- LANE, J. Biofuels mandates around the world 2018. **Biofuels Digest**, 2018. Disponível em: <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/01/01/biofuels-mandates-around-the-world-2018>. Acesso em: 11 nov. 2019.

- LANE, J. Biofuels mandates around the world: 2016. **Biofuels Digest**, 2016. Disponível em: <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/01/03/biofuels-mandates-around-the-world-2016>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- MACEDO, I. C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 157-165, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142007000100012>.
- MONTAGNHANI, B. A.; FAGUNDES, M. B. B.; SILVA, J. F. da. O papel da agroindústria canavieira na geração de empregos e no desenvolvimento local: o caso da usina mundial no município de Mirandópolis, Estado de São Paulo. **Informações econômicas**, v. 39, n. 12, p. 26-38, dez. 2009.
- MORAES, M. A. F. D. de; SHIKIDA, P. F. A. (org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios**. São Paulo: Atlas, 2002. 368 p.
- NEVES, M. F. (coord.). **O setor sucroenergético em 2030: dimensões, investimentos e uma agenda estratégica**. Brasília, DF: CNI, 2017. 100 p.
- NEVES, M. F. Método para planejamento e gestão estratégica de sistemas agroindustriais (GESis). **Revista de Administração**, v. 43, n. 4, p. 331-343, 2008.
- NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. (coord.) **A dimensão do setor sucroenergético: mapeamento e quantificação da safra 2013/14**. Ribeirão Preto: Markestrat, 2014. 62 p.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD-FAO agricultural outlook 2016-2025**. Paris, 2016. 133 p. DOI: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-en.
- OTTO, I. M. C.; NEVES, M. F.; PINTO, M. J. A. **Cadeia produtiva sucroenergética: construindo juntos o futuro de Goiás**. Goiânia: FIEG, 2012. 196 p.
- PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2022/2023: acompanhamento da safra 2022/2023**. Piracicaba, 2023. 78 p.
- RANKING da bioeletricidade: as 100 usinas de cana que mais geraram eletricidade em 2018. **NovaCana**, 28 mar. 2019. Seção Cogeração de Energia. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cogeracao/ranking-bioeletricidade-100-usinas-cana-mais-geraram-eletricidade-2018-280319>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **2017 U.S. ethanol exports and imports: statistical summary**. Ellisville, 2018. 8 p. Disponível em: https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2018/02/2017-U.S.-Ethanol-Trade-Statistics-Summary_CORRECTED-1.pdf. Acesso em: 16 nov. 2019.
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **2018 U.S. ethanol exports and imports: statistical summary**. Ellisville, 2019b. 8 p. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2019/03/2018-US-Ethanol-Trade-Statistics-Summary.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Annual fuel ethanol production: U.S. and world ethanol production**. 2019a. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Feedstock use and co-product output**. 2019c. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/statistics/feedstock-use-co-product-output>. Acesso em: 30 jan. 2020.
- SIAMIG. **Bagaço de cana-de-açúcar poderá ser usado para produzir areia e carvão**. Belo Horizonte, 21 fev. 2017. Disponível em: <http://www.siamig.com.br/noticias/bagaco-de-cana-de-acucar-podera-ser-usado-para-produzir-areia-e-carvao>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- SOUZA, Z. J. Bioeletricidade: potencial de uso de combustível como gás natural, óleo diesel e biomassa para geração térmica. In: FÓRUM DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA: CENÁRIOS, 2014, Rio de Janeiro. **Operação termelétrica como garantia no suprimento energético, estabilidade operacional e econômica**. [S.l.: s.n.], 2014. Palestra.
- THE WORLD BANK. **Population growth (annual %) – India**. 2019. Disponível em: <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW?locations=IN>. Acesso em: 11 dez. 2019.
- UNICA. UNICA lança campanha para melhoria da qualidade do ar. 2019a. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/unica-lanca-campanha-para-melhoria-da-qualidade-do-ar>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- UNICA. **UNICAData**. 2019b. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/index.php?idioma=1>. Acesso em: 7 nov. 2019.

Agricultura digital, inovação e aplicações

Maria Angelica de Andrade Leite | Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá | Klever José Coral

Introdução

O Brasil é o maior exportador mundial de soja, café, açúcar, suco de laranja, etanol de cana-de-açúcar, carne bovina e de frango. Em 2018, as exportações do agronegócio foram da ordem de US\$ 101,686 bilhões, aumentando 5,91% em relação aos US\$ 96,014 bilhões obtidos em 2017. A agricultura brasileira é baseada em mais de 300 espécies de cultivos e envia para o mundo 350 tipos de produtos que chegam a 200 mercados do planeta. O Brasil é grande produtor de grãos, carne e frutas, e o setor agropecuário contribui com 21,1% do produto interno bruto (PIB) e 20% da força de trabalho. O País ainda se destaca na busca de fontes de energia renováveis. Entre 1975 e 2019, a produção de cana-de-açúcar aumentou de 91,5 milhões de toneladas para 665 milhões de toneladas, ocupando pouco mais de 1% do território nacional (Embrapa, 2019).

No País, a agricultura familiar é responsável por parte importante da produção nacional de alimentos. Cerca de 50% dos estabelecimentos da agricultura familiar se concentram na região Nordeste, 19% na região Sul, 16% na região Sudeste, 10% na região Norte, 5% na região Centro-Oeste. A Bahia é o estado com maior número de estabelecimentos familiares (15%), seguida por Minas Gerais (10%). Esses dois estados possuem também as maiores áreas com estabelecimentos familiares, cerca de 10 milhões e 9 milhões de hectares, respectivamente (Embrapa, 2019).

Apesar da pujança de sua agricultura, ainda existem muitos desafios a serem enfrentados.

A expectativa de a população mundial atingir 9 bilhões de habitantes em 2050 demanda uma quantidade crescente de alimentos, impondo a necessidade de aumentar a produtividade com redução de custos na mesma área plantada, respeitando a conservação dos recursos naturais. Ao mesmo tempo, os novos hábitos do consumidor com demanda por alimentos mais nutritivos e funcionais, os eventos climáticos extremos, o envelhecimento da população rural, o deslocamento dos jovens do campo para as cidades, além da ameaça do coronavírus com impactos na exportação e no preço das commodities agrícolas representam situações a serem enfrentadas pela agricultura.

Nesse contexto, surgiu um novo fator de produção que está transformando a base de crescimento econômico para os países em todo o mundo. Trata-se da transformação digital, que é uma nova abordagem onde as tecnologias da informação e comunicação (TICs) desempenham papel-chave na transformação da estratégia, estrutura, cultura e processos das organizações, com o alcance e o poder da internet. O Fórum Econômico Mundial (FEM) lançou a Iniciativa de Transformação Digital em 2015, em colaboração com a Accenture, para servir de ponto focal para novas oportunidades e temas emergentes relacionados aos últimos desenvolvimentos na área da digitalização de negócios e da sociedade. Essa iniciativa suporta as ações do FEM em torno dos temas relacionados à *Quarta Revolução Industrial*, levando ao estabelecimento da Indústria 4.0 (World Economic Forum, 2017).

Para que o Brasil possa garantir, ou mesmo ampliar, sua capacidade de produção com

sustentabilidade, ao mesmo tempo que atende à demanda por segurança alimentar e nutricional, tornam-se necessárias a modernização e a inovação em toda a cadeia de produção agrícola, implantando a transformação digital no campo e convergindo para a agricultura digital ou Agricultura 4.0, numa analogia à Indústria 4.0.

A agricultura digital se baseia em conteúdo digital por meio do processamento do grande volume de dados produzido em todas as áreas que contribuem com o desenvolvimento agrícola, como a biotecnologia, as mudanças climáticas, as geotecnologias, as ciências agrárias, informações de mercado, distribuição e logística. Esse conteúdo digital visa gerar conhecimentos que serão aplicados em todos os elos da cadeia produtiva, desde a pré-produção, passando pela produção, até a fase de pós-produção (Massruhá et al., 2020b). Nesse cenário, existe um conjunto de inovações que são as chamadas tecnologias disruptivas, que, juntas, prometem grandes avanços na automação da agricultura. Algumas dessas tecnologias são: Internet das Coisas (IoT), *big data*, inteligência artificial, impressão 3D, robótica, *blockchain*, realidade aumentada, realidade virtual, além de plataformas sociais, mobilidade e computação em nuvem, as quais, em conjunto, são alguns dos pilares para inovação na agricultura.

Na agricultura digital, tecnologias da informação e comunicação (TICs), são empregadas nos processos de produção agrícola. Aplicações dessas tecnologias em agricultura e pecuária de precisão, irrigação, manejo integrado de pragas e rastreabilidade animal, gestão de fazendas, controle de maquinário, entre outras, podem ser vistas hoje em diversos estágios de desenvolvimento, na pesquisa, em projetos-pilotos e em produção e uso comercial. Nessas aplicações, a comunicação de dados no campo, do campo e para o campo é crucial.

A partir da transformação digital, houve a proliferação de startups que são altamente flexíveis em relação às empresas tradicionais e que têm um objetivo claro e rapidez para adaptar-se, mudar, criar, reformular estratégias, enxergar e criar novos mercados e novas possibilidades de monetização. Em 2020, a Associação Brasileira de Startups – Abstartups (Abstartups, 2017) contabilizou mais de 13 mil startups entre suas filiadas (StartupBase, 2020). Na agricultura não se pode deixar de mencionar o movimento de startups agrícolas, as AgTechs, que são empresas inovadoras, associadas à tecnologia, e que visam construir aplicações para a agricultura. As AgTechs têm um importante papel na implantação da agricultura digital no Brasil. De acordo com o 2º *Censo AgTech Startups Brasil*, realizado pela AgTech Garage (AgTech Garage, 2020), os maiores investimentos realizados pelas AgTechs estão no desenvolvimento de soluções para as culturas de soja (46%), milho (41%), cana-de-açúcar (35%), pecuária de corte (30%), café (25%), pecuária de leite (20%), citricultura (18%), culturas florestais (15%), piscicultura (11%), suinocultura (10%) e avicultura (10%). Além dessas, também há soluções para horticultura, fruticultura, algodão, agricultura orgânica e agroecológicos e para produção de equinos. No estudo *Radar AgTech Brasil 2019: mapeamento das startups do setor agro brasileiro* (Dias et al., 2019), realizado em parceria pela SP Ventures, Homo Ludens e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), dentro do Programa Pontes para Inovação, foi levantado que atualmente existe um total de 1.125 AgTechs no Brasil, sendo que 196 atuam na fase de pré-produção, 397 na fase de produção, e 532 na fase de pós-produção. Esse número só tende a crescer, dada a importância do agronegócio para a balança comercial do Brasil e sua necessidade de modernização e do uso das novas tecnologias digitais para que o agronegócio mantenha sua pujança na economia do País e na oferta de alimentos para o mundo.

Como exemplo de transformação digital, cita-se a Cooperativa dos Plantadores de Cana do Estado de São Paulo – Coplacana (Coplacana..., 2020). Ela foi a primeira cooperativa de plantadores de cana a ser fundada no estado em 1948, com o objetivo de oferecer insumos e assistência ao produtor rural. Conta com 27 filiais nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, além de fábrica de rações; central de recebimento de embalagens vazias de agrotóxicos; *coop service*; e de duas unidades produtivas, o confinamento de gado e unidade de grãos. Preocupada em oferecer os melhores serviços e tecnologias para os seus cooperados, a Coplacana vem investindo em novas tecnologias disruptivas para oferecer novas soluções digitais para o campo. Para tanto, lançou o Avance Hub (Avance, 2020a), seu hub de inovação, buscando trazer novas tecnologias e eficiência dos setores de agronegócios, telecomunicações, saúde, mineração e ventures. Com sede no AgTech Garage em Piracicaba, SP, a evolução do hub é notada pelas grandes possibilidades ofertadas tanto para os novos empreendedores quanto para os cooperados que buscam cada vez mais por soluções aplicáveis na rotina do campo.

A Embrapa Agricultura Digital é uma unidade de pesquisa da Embrapa que tem como foco atuar em pesquisa, desenvolvimento e inovação em agricultura digital, visando à sustentabilidade, à competitividade e à agregação de valor nas cadeias produtivas. A Unidade tem emvidado esforços para desenvolver pesquisas e soluções para a promoção da agricultura digital no País, em conjunto com os demais centros de pesquisa da Embrapa e instituições parceiras do setor público e privado (Massruhá et al., 2020a).

Este capítulo pretende explorar as ações realizadas pela Embrapa e a Coplacana na área da agricultura digital.

Pesquisas e aplicações para a agricultura digital

No contexto atual, há um acelerado aumento da capacidade de aquisição de dados de diferentes naturezas (imagens aéreas de satélites, drones, equipamentos de agricultura de precisão, estações meteorológicas, socioeconomia, melhoramento genético, biotecnologia, balanço nutricional de culturas, sensores em áreas de plantio e nos diversos elos das cadeias produtivas, mercado, distribuição e logística, etc.). Esses dados necessitam ser processados e analisados de forma adequada e em tempo hábil, para gerar informação e conhecimento visando ao atendimento das complexas demandas da agricultura brasileira. O processamento desses dados demanda pesquisas e geração de tecnologias em diversas áreas, como computação científica, modelagem agroambiental, geotecnologias, visão computacional, automação e agricultura de precisão, bioinformática e biotecnologia.

A geração, o processamento e a análise desses dados, de forma integrada — por meio de experimentos e instrumentos de coleta de dados, infraestrutura de alto desempenho computacional para o processamento e algoritmos de inteligência artificial, utilizando-se modelos matemáticos e estatísticos para análise, — irão permitir a produção de conhecimentos que possibilitarão a tomada de decisão nos diversos elos das cadeias produtivas nas fases de pré-produção, produção e pós-produção, levando à implantação da agricultura digital no País. Esta seção apresentará pesquisas e aplicações envolvendo essas diversas áreas no contexto da transformação digital na agricultura.

Modelagem agroambiental

A modelagem agroambiental se destaca como uma ferramenta para avaliar as repostas da produtividade agrícola às condições climáticas por

meio do uso de modelos estatísticos empíricos e de modelos baseados em processos biofísicos e socioeconômicos, os quais simulam a produtividade agrícola e suas interações com o ambiente e as práticas de manejo (Jones et al., 2017).

Diversas tecnologias e produtos que fazem uso da modelagem agroambiental aplicada ao planejamento rural têm sido desenvolvidos, direta ou indiretamente, com os principais eixos de atuação apresentados a seguir. Esses trabalhos podem ser agrupados em quatro vertentes centrais: 1) obtenção, organização, armazenamento e distribuição de dados básicos para a modelagem agroambiental; 2) quantificação e análise dos riscos climáticos e resiliência dos sistemas agrícolas; 3) produtos para suporte ao planejamento territorial; e 4) integração de análises socioeconômicas na modelagem agroambiental. Essas vertentes se complementam e, em vários momentos, se fundem no desenvolvimento das análises, na modelagem e simulação para a geração do conhecimento e dos produtos aplicados ao planejamento rural de forma integrada (Cuadra et al., 2020).

Um dos tipos de dados mais importantes para a modelagem agroambiental são os dados agrometeorológicos. Para disponibilização desses dados, de forma gratuita, a Embrapa conta com o sistema Agritempo¹ e os aplicativos móveis Agritempo mobile e Agritempo GIS. O Agritempo mobiliza uma rede colaborativa com 40 instituições, além de organizar e administrar um conjunto de mais de 1.600 estações meteorológicas, sendo que cada vez mais estações são agregadas. Também contém uma base de dados de pelo menos 10 anos de imagens de satélites que podem ser usadas para auxiliar pesquisas em agrometeorologia.

Para que a base de dados do Agritempo possua resolução e precisão nos dados suficientes para

o monitoramento da ocorrência de eventos adversos e sinistros agrometeorológicos, é utilizado o sistema Conprees, acrônimo para dados meteorológicos Consistentes, Preenchidos e Especializados. Trata-se de uma plataforma colaborativa de análise e compartilhamento de dados meteorológicos que integra diversas fontes de dados por meio de técnicas de inteligência artificial nesse processo (Monteiro, 2015).

A partir da disponibilização de dados agrometeorológicos, é possível a realização do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), regido pelo programa nacional do Decreto nº 9.841/2019 (Brasil, 2019). O Zarc delimita regiões e épocas de plantio de acordo com suas probabilidades de perda de produção causadas por eventos meteorológicos adversos (Santos; Martins, 2016). Suporta a tomada de decisão nos programas de seguro do governo federal, como o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro) e o Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR). Essas informações são utilizadas para evitar perdas excessivas com indenizações em áreas ou épocas de alto risco para a agricultura, bem como avaliar soluções para sistemas de produção menos suscetíveis às adversidades climáticas.

Para facilitar o acesso às indicações do Zarc, o aplicativo Plantio Certo está disponível na loja de aplicativos da Embrapa², o qual permite que o usuário receba a indicação das diferentes taxas de riscos atrelados as suas respectivas épocas de plantio, abrangendo 43 culturas, entre elas a cana-de-açúcar, e todos os municípios do território nacional.

Outro aspecto a ser considerado quando se trata de planejamento rural é o planejamento territorial e o uso da terra, considerando-se os dados e informações sociais, econômicas e ambientais para apoiar a tomada de decisão sobre o uso da

¹ Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/agritempo>.

² Disponível em: www.embrapa.br/aplicativos.

terra nas diferentes escalas do território. Estudos e a aplicação de modelos em bases territoriais permitem a melhor compreensão dos processos de expansão, retração, transição, conversão e intensificação agrícola, bem como podem apoiar as políticas públicas associadas às mudanças climáticas e ao desenvolvimento rural sustentável brasileiro (Bolfé et al., 2016).

Nessa ótica, o sistema Agroideal³, desenvolvido pela The Nature Conservancy (TNC) em parceria com a Embrapa Agricultura Digital e empresas comerciais do setor agrícola, congrega informações como logística (localização de silos de armazenagem), socioeconomia (ocorrência de conflitos de terra) e legislação ambiental (localização de unidades de conservação) com dados de modelos de crescimento de culturas (produtividade atingível da soja). Dessa forma, o tomador de decisão pode avaliar sua estratégia de atuação, identificando os riscos e oportunidades das diferentes regiões do Brasil.

Outra abordagem após considerar o potencial produtivo, levando-se em conta o fator climático, permite o desenvolvimento de um modelo para diferenciar a necessidade da cultura, de acordo com a produtividade desejada e o potencial de suprimento do solo, de tal forma que a adição de nutrientes seja oriunda fundamentalmente do balanço nutricional. A Embrapa Agricultura Digital, em parceria com a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), utiliza o conhecimento desse balanço de nutrientes que permitirá ajustes para a obtenção de recomendações mais adequadas, podendo, inclusive, chegar a uma redução na quantidade de fertilizantes a ser utilizada (Freire et al., 2016; Traspadini et al., 2018). O ajuste de modelos mecanísticos de abrangência mais generalizada pode tornar-se uma ferramenta eficaz para recomendações criteriosas de fertilizantes para

a cultura, em ajuste na parceria com a Coplacana. Esses modelos substituem as tabelas de recomendação, que, embora com razoável acerto em suas indicações, apresentam evidente empirismo ou subjetivismo em sua constituição. Esses aspectos são detalhados no Capítulo 8, Fertilidade do Solo e Adubação em Cana-de-açúcar.

A integração de análises socioeconômicas é outro tipo de estudo que pode melhorar o retrato da produção agropecuária brasileira. A partir de dados do Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi possível diferenciar os tipos de sistemas de produção de bovinos de corte e de cana-de-açúcar em uso pelos produtores ao longo do território nacional. As informações levantadas permitiram associar as diferentes formas de produção com impactos ambientais, como o cálculo das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, tais informações foram a base para a construção de inventários de ciclo de vida (ICV), que resultaram em estudos de avaliação de ciclo de vida (ACV) de cana-de-açúcar e derivados da produção pecuária, para colaborar com a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). A caracterização dos sistemas de produção de cana-de-açúcar foi adotada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) no âmbito do financiamento de usinas-flex e pelo RenovaBio. Diversos projetos da Embrapa e seus parceiros contribuíram com esses resultados (Cuadra et al., 2020).

Uso de geotecnologias

Geotecnologia é um tipo específico de tecnologia voltada à aquisição, ao armazenamento, ao processamento, à visualização e à análise de dados geoespaciais, que, por sua vez, permeiam, direta ou indiretamente, uma série de temas relacionados à dinâmica da atividade agrícola. Sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas, sistemas de posicionamento

³ Disponível em: <https://agroideal.org>.

global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) de navegação por satélite e banco de dados geoespaciais são alguns exemplos de geotecnologias amplamente utilizadas por vários setores nas mais diversas aplicações para a agricultura e o meio ambiente. Na agricultura digital, as geotecnologias assumem grande importância, pois permitem verificar a variabilidade temporal, espacial e a rastreabilidade da produção em todos os elos da cadeia, bem como o monitoramento das propriedades rurais, entre outras. As séries temporais de imagens de satélite têm sido cada vez mais utilizadas em uma vasta gama de aplicações para o monitoramento da superfície terrestre (Macario et al., 2020).

Uma dessas séries é voltada ao monitoramento da cobertura vegetal terrestre onde são utilizados os índices vegetativos. Esses índices podem ser utilizados para produzir gráficos temporais, visando representar as variações do vigor vegetativo ao longo do tempo. Nesse sentido, foi desenvolvido o Sistema de Análise Temporal da Vegetação⁴ (SATVeg), para atender à demanda por fornecimento instantâneo de perfis temporais de índices vegetativos pela internet a partir de uma plataforma de fácil acesso e visualização (Esquerdo et al., 2020). Hoje, o sistema possui uma área de cobertura para toda a América do Sul. Recentemente, o SATVeg foi incluído na Portaria nº 4.796 do Banco Central do Brasil como ferramenta remota para apoio à comprovação de perdas agrícolas no âmbito do Proagro (Brasil, 2020), uma vez que o sistema pode dar indicativos sobre a condição da biomassa das lavouras e apoiar as decisões sobre questões relacionadas ao pagamento do seguro agrícola.

A geração de dados e informações sobre a dinâmica do uso e da cobertura da terra também se constitui em uma área de desenvolvimento de soluções das geotecnologias. Para tratar dessa

temática, principalmente no que diz respeito ao estudo da expansão da agricultura das commodities agrícolas sobre as florestas da Amazônia, foi criado o Projeto TerraClass Amazônia (Almeida et al., 2016). O portal TerraClass Amazônia⁵ está disponível para acesso livre e tem como público-alvo usuários de dados que necessitam conhecer e analisar a dinâmica do uso e cobertura da terra nas áreas desflorestadas da Amazônia Legal, com foco em gestão territorial. As informações são apresentadas como classes temáticas, sendo uma delas a de “Cultura agrícola semiperene” representada, principalmente, pela cultura da cana-de-açúcar.

Posteriormente, essa cobertura também se expandiu para o bioma Cerrado por meio do Projeto TerraClass Cerrado⁶. Dessa forma, é possível aumentar a capacidade de gestão nos biomas da Amazônia e do Cerrado. O objetivo desses projetos é o de produzir, sistematicamente, mapeamentos do uso e da cobertura da terra na região, viabilizando o monitoramento dos impactos das ações e das políticas públicas do governo federal, tanto as focadas no desenvolvimento e na intensificação da atividade agrícola quanto na preservação dos sistemas naturais. Outras aplicações consistem no Sistema Interativo de Suporte ao Licenciamento Ambiental (Sisla)⁷ — implantado no estado de Mato Grosso do Sul, o qual permite a coleta, a organização, a integração e o gerenciamento de informações georreferenciadas relacionadas a processos de licenciamento ambiental por parte de órgãos governamentais (Speranza et al., 2011) — e no Sistema Interativo de Análise Geoespacial da Amazônia Legal (Siageo Amazônia)⁸, que reúne de forma sistematizada as informações geoes-

⁴ Disponível em: www.satveg.cnptia.embrapa.br.

⁵ Disponível em: www.terraclass.gov.br.

⁶ Disponível em: dpi.inpe.br/tccerrado.

⁷ Disponível em: sisla.imasul.ms.gov.br.

⁸ Disponível em: www.amazonia.cnptia.embrapa.br.

paciais utilizadas e produzidas nas diversas iniciativas de zoneamento ecológico-econômico (ZEE) da região da Amazônia.

Computação científica

As técnicas de computação científica irão contribuir para a análise e processamento do grande volume de dados que vem sendo produzido na agricultura, por diferentes fontes tais como: a) sensores que podem ser embarcados em satélites, drones ou máquinas agrícolas, instalados diretamente no campo ou em diferentes “coisas”, conforme preconizado pela IoT; b) dados biológicos gerados a partir das ciências “ômicas” ou c) dados que podem ser obtidos em plataformas colaborativas ou mídias sociais (ciência do cidadão), entre outros.

A computação científica consiste em um conjunto de técnicas, ferramentas e teorias que englobam inteligência artificial; matemática; estatística; física e computação; e abrange conhecimentos específicos de subáreas, tais como estatística aplicada; econometria; matemática aplicada; inteligência computacional; visualização científica e biometria, que é central no desenvolvimento de novas tecnologias agrícolas, agora no contexto da emergente agricultura digital. Nas últimas décadas, inclusive, a computação científica tem sido apontada como o terceiro pilar da pesquisa científica, junto com a experimentação e a teoria (Souza et al., 2017).

Por meio dessas técnicas, será possível, a partir dos dados coletados, extrair informações e conhecimentos que auxiliarão no processo de tomada de decisão em todos os elos das cadeias produtivas, tornando-se centrais no desenvolvimento de novas soluções e tecnologias agrícolas no contexto da agricultura digital (Ternes et al., 2020).

Uma aplicação nessa área é o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), que conside-

ra uma ampla gama de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos, além de aspectos ambientais, tais como clima, vegetação, relevo, material originário, condições hídricas, características externas ao solo e relações solo e paisagem (Santos et al., 2013). Para tanto, a Embrapa Agricultura Digital e a Embrapa Solos conceberam duas ferramentas inteligentes para classificação automática de solos. A primeira refere-se ao desenvolvimento de um sistema especialista que contém as regras do SiBCS de forma automática para classificação de solos. O SiBCS simula o raciocínio de um profissional especialista do domínio ao realizar a classificação de perfis de solo (Vaz et al., 2018, 2019a, 2019b). O SiBCS vai fornecer as informações para o Sistema Web SoloClass⁹ para classificação de perfis de solos, para acesso pelo usuário final. O sistema permite que um usuário forneça, como entrada, um conjunto de variáveis de um ou mais perfis de solo, e receba, como resultado, a classificação de cada perfil de acordo com o SiBCS, com uma probabilidade associada à classe prevista.

No setor sucroalcooleiro, a tecnologia *blockchain* será utilizada para a rastreabilidade de processos da indústria, permitindo a rápida tomada de decisão nos processos da cadeia produtiva e fornecendo conhecimento para o consumidor preocupado com informações sobre a origem dos alimentos que consome. Além disso, a adoção dessa tecnologia vai permitir a confiabilidade no compartilhamento de dados nas fases agrícola, industrial, certificação e distribuição da cadeia produtiva. Essa aplicação será descrita no capítulo Tecnologia *Blockchain* para Rastreabilidade de Cadeia Produtiva Sucroalcooleira.

Na área de sanidade vegetal, um exemplo é o desenvolvimento de ferramentas biomatemáticas para auxiliar no monitoramento, amostra-

⁹ Disponível em: www.soloclass.cnptia.embrapa.br.

gem, detecção e erradicação do huanglongbing (HLB) ou greening dos citros, uma doença que atinge a produção de laranja nacional (Barbosa, 2015, 2019). A doença é transmitida pelo psíldeo *Diaphorina citri*, que adquire as bactérias ao se alimentar da seiva de plantas infectadas, transmitindo-as posteriormente para plantas saudáveis.

A ferramenta Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS)¹⁰ avalia a sustentabilidade de sistemas de produção de gado de corte em regiões complexas e dinâmicas, como é o caso do Pantanal, de modo que seja possível verificar os pontos fracos do sistema e buscar boas práticas de manejo para obter a sustentabilidade (Santos et al., 2014a, 2014b, 2015, 2017; Soares et al., 2014; Abreu et al., 2015; Amâncio et al., 2016). Para tanto, a FPS emprega técnicas de modelagem matemática e computacional, como a teoria de conjuntos nebulosos, lógica nebulosa e sistemas de inferência baseados em lógica nebulosa. Seu principal uso está relacionado com o diagnóstico (grau de sustentabilidade) do sistema de produção de bovinos de corte na planície pantaneira por meio da avaliação de impactos ambientais, sociais e econômicos da atividade, auxiliando, assim, na gestão eficiente por meio da seleção de tecnologias e boas práticas de manejo. A ferramenta está sendo implantada em 15 fazendas no Pantanal de Mato Grosso com apoio da Federação da Agricultura e Pecuária do Estado de Mato Grosso (Famato), da Associação dos Criadores de Mato Grosso (Acimat), do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (Senar), do Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária (Imea) e de sindicatos rurais; bem como em seis fazendas no Pantanal de Mato Grosso do Sul, com apoio da Federação da Agricultura e Pecuária de Mato Grosso do Sul (Famasul), do Senar e de sindicatos rurais. Melhorias serão incorporadas ao longo do

tempo em conjunto com técnicos, produtores e pesquisadores.

A irrigação inteligente e de precisão é uma pesquisa financiada pelo governo brasileiro e a União Europeia, que usa sensores, computação em nuvem e em névoa, além de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para, a partir dos dados obtidos por sensores de solo e estações climatológicas, preverem a necessidade de irrigação. O projeto denomina-se Swamp (do inglês *Smart Water Management Platform*) e foi desenvolvido em parceria com a Universidade Federal do ABC (UFABC) (Kamienski; Visoli, 2018; Rodrigues; Silva, 2020).

Visão computacional

De acordo com Santos et al. (2020), a visão computacional é o campo da inteligência artificial dedicada à extração de informações a partir de imagens digitais. No contexto da agricultura digital, a visão computacional pode ser empregada na detecção de doenças e pragas, na estimação de safra e na avaliação não invasiva de atributos, como qualidade, aparência e volume, além de ser componente essencial em sistemas robóticos agrícolas.

Uma classe de problemas abordados pela visão computacional são os problemas ditos *perceptuais*: a detecção e a classificação de padrões nas imagens que são associados a um objeto de interesse, como frutos (Sa et al., 2016; Santos et al., 2020), animais (Barbedo et al., 2019) ou sintomas de doenças e pragas (Ferentinos, 2018; Barbedo, 2019). Esses padrões podem ser difíceis de encontrar, uma vez que as imagens capturadas apresentam uma grande variabilidade referente à iluminação, posição, oclusão e às fontes diversas de ruído (lentes sujas, poeira, interferência, etc.). Camargo Neto et al. (2019) mostraram a evolução do trabalho que vem sendo realizado, em parceria com o Fundo de Defesa da Citricultura (Fundecitrus), no reconhecimento de frutos de diver-

¹⁰ Disponível em: <https://www.fps.cnptia.embrapa.br>.

sas variedades de laranja, de diferentes níveis de maturação, com predominância de frutos verdes, em pés de laranja. Por sua vez, Santos et al. (2020) mostraram que, para uvas em viticultura — nas culturas que apresentam grande variabilidade em forma, cor, tamanho e compacidade —, os cachos podem ser detectados nas videiras. Outra aplicação diz respeito à identificação de doenças em plantas. A detecção e a classificação de sintomas de doenças, pragas e deficiências nutricionais de plantas em imagens são de enorme interesse na agricultura. A detecção automática possibilita o monitoramento constante, a busca por anomalias na cultura a partir de imagens capturadas por equipes de campo ou obtidas por câmeras acopladas em tratores, implementos, robôs ou veículos aéreos não tripulados (Vants). Já a classificação associa as anomalias detectadas à doença, deficiência ou praga, auxiliando o produtor na intervenção correta. Barbedo (2019) mostrou que essas técnicas de visão computacional podem ser aplicadas na classificação de um grande número de patologias em diversas culturas, atingindo valores de acurácia de 80 (maracujá) a 100% (mandioca, couve, algodão, trigo e cana-de-açúcar). Essas detecções acuradas são obtidas assim que puderem ser produzidas quando os sintomas já são severos. Entretanto, estudos adicionais devem ser feitos para permitir a detecção quando os sintomas ainda são brandos ou não ocupam grandes porções do tecido vegetal, sendo justamente o momento ideal para intervenção pelo agricultor. A detecção de animais em pastagens é outra aplicação que poderá auxiliar o monitoramento de enormes áreas, como a detecção de gado na pecuária extensiva (Barbedo et al., 2019).

No capítulo Inovação e desenvolvimento tecnológico na fertilização de lavouras, serão apresentadas algumas técnicas para o monitoramento do estado nutricional das plantas e para a detecção de deficiências passíveis de correção. A ênfase é

dada a técnicas baseadas em imagens digitais e aprendizado de máquina, as quais têm mostrado o maior potencial para uso em tecnologias que possam ser usadas efetivamente no campo. Esse capítulo considera tanto técnicas que fazem uso de imagens proximais, as quais normalmente são capturadas usando-se câmeras convencionais, quanto imagens capturadas remotamente usando-se Vants, aeronaves tripuladas e satélites.

Outra classe de problemas são os *geométricos*, nos quais a visão computacional permite a reconstrução tridimensional (3D) a partir de um conjunto de imagens da mesma cena a partir de imagens obtidas por Vants popularmente conhecidos como drones. Metodologias baseadas em visão computacional geométrica têm sido empregadas em estudos geológicos (Westoby et al., 2012), na avaliação de altura de pastagens (Forsmo et al., 2018) e no mapeamento de culturas (Comba et al., 2018), entre outros usos. A combinação da informação 3D com a detecção de frutos em cada imagem permite que a posição espacial de cada fruto seja determinada e que o mesmo fruto não seja contabilizado mais de uma vez; quando os frutos aparecem em múltiplas imagens, apresentam uma reconstrução tridimensional de uma linha de videiras em campo, a partir dos quadros de uma sequência de vídeo produzida por uma câmera embarcada em um veículo de serviço (Santos et al., 2020). Outras aplicações nessa área são identificar os frutos nos pés e estimar seu volume e peso (Santos et al., 2017).

A partir de imagens capturadas por equipes de campo ou obtidas por câmeras acopladas em tratores, implementos, robôs ou drones, um monitoramento constante e eficiente pode ser realizado: 1) a busca por anomalias na cultura ou na criação; 2) a avaliação de variabilidade espacial da cultura para intervenção, segundo os preceitos da agricultura de precisão; e 3) a atuação autônoma por máquinas e implementos (Santos et al., 2020).

Um grande desafio da robótica agrícola é a colheita automatizada de frutas. Enquanto culturas como grãos, cana-de-açúcar e café contam com maquinário próprio para colheita automatizada, a mesma condição não vale para a horticultura e fruticultura. As culturas de pomicultura, pimentões, alface, morango e kiwi têm sido investigadas para a realização de colheita automática (Bac et al., 2017; Birrell et al., 2020; Williams et al., 2020; Xiong et al., 2020).

Agricultura de precisão

A agricultura de precisão é uma estratégia de gestão que coleta, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gerenciamento de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agropecuária (Springer, 2019). As técnicas de agricultura de precisão aliadas às novas tecnologias relacionadas à agricultura digital, tais como processamento em nuvem, processamento de alto desempenho, conectividade e inteligência artificial, para análise de dados, têm possibilitado o mapeamento e entendimento mais preciso das áreas de produção como também a construção de soluções mais inteligentes para atuação no campo (Grego et al., 2020).

Algumas pesquisas da Embrapa nessa área incluem: 1) caracterização da variabilidade espacial dos sistemas de produção de cafés especiais do sul de Minas Gerais, permitindo diferenciar a qualidade do café produzido (Rodrigues et al., 2019b; Speranza et al., 2019b); 2) comportamento espacial e espectral em cana-de-açúcar correlacionado com a condutividade elétrica do solo, que pode otimizar indiretamente a amostragem espacial de áreas de cultivo e promover a economia de quantidade de coletas e custos para a análise do solo, além de poder ser um indicador

para manejos diferenciados na mesma safra da lavoura de cana (Grego et al., 2019; Rodrigues et al., 2019a; Sanches et al., 2019, Speranza et al., 2019a); 3) estudo do uso de agricultura de precisão em sistemas de manejo de fibras e grãos no estado de Mato Grosso, com experimentos de resposta da cultura de algodão com relação à aplicação de diferentes doses de adubação nitrogenada nas parcelas virtuais (Ronquim, 2010); 4) aplicação localizada de inseticida na cultura de soja, resultando em economia de 17% no uso de inseticida quando comparado com o manejo integrado de pragas e 45% na comparação com o manejo tradicional (Roggia et al., 2020); e 5) desenvolvimento de sistemas automatizados aplicados à agricultura de precisão, visando ao planejamento, controle e monitoramento de doenças e pragas em diversas culturas, entre elas, milho e cana-de-açúcar, por meio de uma parceria entre a startup Bem Agro e a Embrapa Instrumentação (Rodrigues et al., 2020).

O capítulo Aplicação da Agricultura de Precisão em Cana-de-açúcar vai apresentar a adoção de técnicas ligadas à agricultura de precisão como uma grande oportunidade de tornar o sistema produtivo da cana-de-açúcar mais eficiente, aumentando a produtividade e reduzindo custos, considerando os benefícios e os desafios de seu uso.

Bioinformática e biotecnologia

A biotecnologia compreende a manipulação de microrganismos, plantas e animais, com vistas à obtenção de processos e produtos de interesse para a sociedade. Parte significativa dos resultados obtidos no incremento da produtividade, melhoria na qualidade e segurança bem como a criação de novos produtos agropecuários são consequência direta da utilização de ferramentas biotecnológicas, como marcadores moleculares, edição gênica, transgenia, microbioma e também técnicas de fenotipagem mais precisas e

em larga escala para aprimorar processos de avaliação, seleção e melhoramento genético, focando em características que afetam produtividade e qualidade dos produtos gerados. A biotecnologia tem sido fundamental para o avanço observado na agropecuária nos últimos 30 anos.

A Embrapa é uma das instituições públicas líderes em biotecnologia, com êxitos de pesquisa, como a clonagem de animais e o desenvolvimento pioneiro no Brasil de plantas geneticamente modificadas. A Empresa está desenvolvendo novas variedades geneticamente modificadas de feijão, cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e trigo, com tolerância à seca, um dos estresses que pode afetar as lavouras em um cenário de mudanças do clima (Embrapa, 2019).

De acordo com Zerlotini Neto et al. (2020), a bioinformática, área multidisciplinar responsável pela análise do grande volume de dados resultantes das tecnologias genômicas, tornou-se essencial nesse avanço. Com o advento das chamadas tecnologias de sequenciamento de nova geração, passou a ser produzido um volume extraordinariamente grande de dados genômicos. Na era da transformação digital, a capacidade de geração de dados biológicos cada vez mais rápida, com valores mais acessíveis e em maior volume, produz uma vasta quantidade de dados, o *big data*. Esse grande e crescente volume de dados exige soluções em pelo menos três âmbitos: 1) infraestrutura escalável, 2) gerenciamento dos dados e 3) uso inteligente desses dados.

A Embrapa conta com iniciativas importantes nessa área. Uma delas é o Laboratório Multiusuário de Bioinformática (LMB)¹¹, que tem o propósito de dar suporte em bioinformática a projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) e que tem atuado como parte fundamental em projetos de pesquisa da Embrapa

e de instituições parceiras, envolvendo mais de 20 culturas e criações estudadas em mais de 50 projetos de pesquisa. Uma peculiaridade importante é que, em bioinformática, cada projeto é único e a equipe do LMB trabalha para atender a essas demandas. Sua atuação em bioinformática baseia-se nas áreas de análise da expressão gênica; montagem e análise de genomas; identificação de marcadores moleculares; análise de transcriptomas e metagenomas; estudos de evolução; modelagem de sistemas biológicos; predição de estruturas proteicas e interação molecular; interação ou inibição de moléculas; entre outras atividades.

Pesquisas têm sido desenvolvidas no âmbito do LMB, envolvendo várias Unidades da Embrapa e instituições parceiras, a saber: a) estudos para determinar o grau de parentesco e pureza de espécie do tambaqui (Lobo et al., 2020), importante produto na cadeia produtiva de pescado cuja exportação, em 2021, foi de 225 toneladas, segundo o *Anuário PeixeBr da Piscicultura* (2022); e b) desenvolvimento de vacinas para o controle do carrapato bovino, entre outras. Há, ainda, o desenvolvimento de várias ferramentas de análise de dados, como a Machado¹² (Mudadu; Zerlotini Neto, 2020), que possui funcionalidade de carregamento para dados genômicos e, também para resultados de análises de softwares conhecidos no meio biológico, tais como Blast¹³ e InterproScan¹⁴. Estes softwares possuem uma interface web que contém uma poderosa ferramenta de busca a qual permite filtrar e ordenar os resultados de forma rápida. Outra ferramenta é o sistema web para recuperação de informação de pedigree, fenótipos e genótipos de animais, o qual, atualmente, encontra-se em

¹¹ Disponível em: <https://www.embrapa.br/laboratorio-de-bioinformatica>.

¹² Disponível em: <https://www.machado.cnptia.embrapa.br/plantannot>.

¹³ Disponível em: <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>.

¹⁴ Disponível em: <https://www.ebi.ac.uk/interpro/search/sequence>.

processo de homologação pelos usuários (Zerlotini Neto et al., 2020).

A segunda iniciativa é o Centro de Pesquisa em Genômica Aplicada às Mudanças Climáticas (do inglês *Genomics for Climate Change Research Center – GCCRC*), resultante da parceria entre Embrapa, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), unindo competências das duas primeiras instituições em biotecnologia agrícola. O centro tem como missão desenvolver, ao longo de 10 anos, ativos biotecnológicos que aumentem a tolerância de plantas à seca e ao calor, bem como transferir as tecnologias desenvolvidas ao setor produtivo. Os ativos biotecnológicos em desenvolvimento podem se encaixar em diferentes estratégias de proteção intelectual, que equilibram a captura de valor e o acesso à tecnologia. Esses ativos incluem, mas não estão limitados a genes, alelos e construções gênicas, inoculantes microbianos, comunidades sintéticas de microrganismos, novas tecnologias de suporte, como métodos e elementos reguladores de expressão gênica, além de know-how regulatório e patentário. A espécie escolhida como alvo dos trabalhos de pesquisa foi o milho, uma das mais importantes culturas agrícolas no Brasil e no mundo, e que possui ampla disponibilidade de recursos genéticos e genômicos. Entretanto, as tecnologias desenvolvidas poderão potencialmente ser transferidas para demais culturas agrícolas (Yassitepe et al., 2020).

Uma das pesquisas focou no estudo do aumento da tolerância da cana-de-açúcar ao estresse hídrico, e, atualmente, houve a liberação planejada e controlada no meio ambiente (LPMA) de dois eventos de cana-de-açúcar geneticamente modificados (GM). No momento, as plantas de cana GM estão sendo avaliadas para suas características agronômicas, morfológicas e genéticas (análises de expressão gênica) para a

seleção de três eventos por construção gênica com o melhor desempenho para os parâmetros descritos anteriormente. Na execução da segunda etapa, os três eventos selecionados serão utilizados para a montagem de um novo experimento no campo, onde as canas GM serão avaliadas em condições de seca e de irrigação contínua (Heleodoro et al., 2019).

Ecosistema de inovação da agricultura digital

Ciente da necessidade da promoção da agricultura digital no Brasil, a Embrapa Agricultura Digital propõe o ecossistema de inovação da agricultura digital, conforme ilustrado na Figura 2.1. Esse ecossistema permitirá a oferta de infraestrutura como serviço, plataforma como serviço e software como serviço. O serviço de infraestrutura será disponibilizado como um datacenter, oferecendo armazenamento em nuvem e compartilhamento de processamento. O serviço de plataforma é baseado na AgroAPI¹⁵ e permite que informações e modelos gerados pela Embrapa possam ser acessados por meio de APIs (do inglês *Application Programming Interface*), que são conjuntos de linguagens de programação que possibilitam a comunicação entre diferentes sistemas. O serviço de software será ofertado como aplicativos na loja da Google ou por aplicações web, como o sistema de informações agrometeorológicas Agritempo.

Esse ambiente colaborativo também tem como missão viabilizar soluções para programas de pesquisa e seus parceiros (estaduais ou federais) relacionados à bioeconomia, biotecnologia e climatologia de interesse do setor agropecuário.

A Embrapa propõe sua participação nesse novo ecossistema de inovação da agricultura digital, o qual é centrado na contribuição de novas tec-

¹⁵ Disponível em: <https://www.embrapa.br/agroapi>.

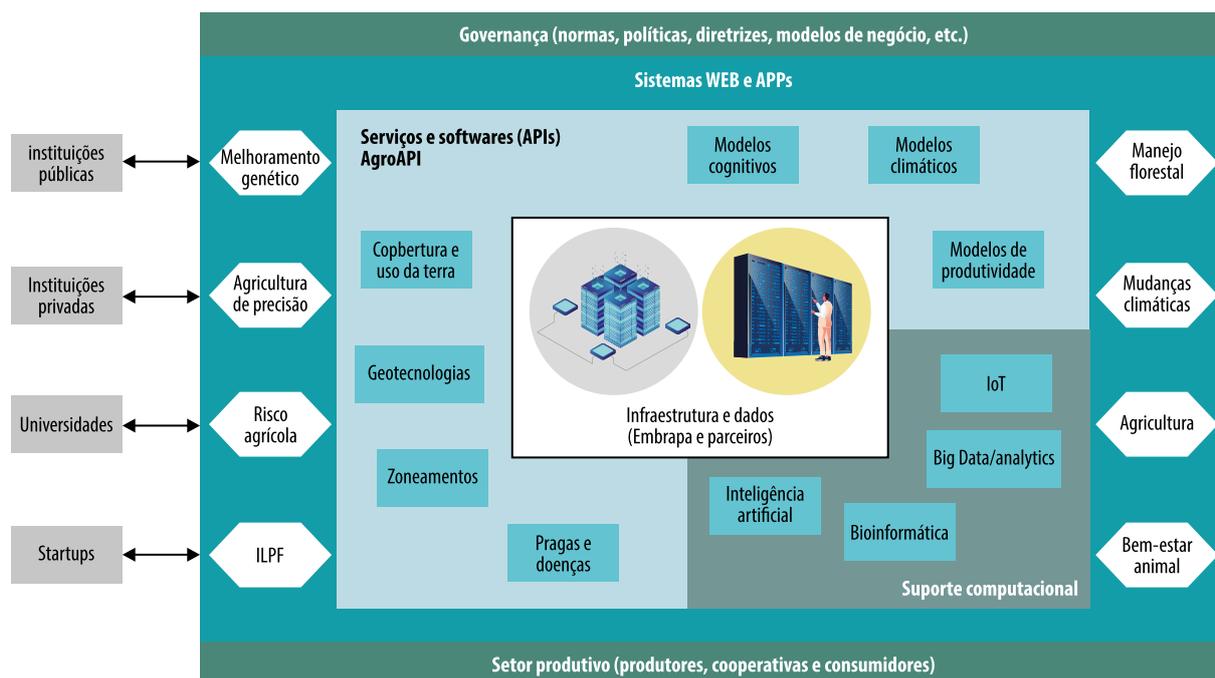


Figura 2.1. Ecossistema de inovação da agricultura digital.

Fonte: Massruhá et al. (2020b).

nologias disruptivas para a agregação de valor à produção, para o aumento da rentabilidade do agricultor e para a segurança alimentar. Essa realidade impõe novos desafios às entidades ligadas ao setor, como a Embrapa, as quais devem atuar cada vez mais em cooperação, compartilhando expertise e conhecimentos para o desenvolvimento de novas soluções, tecnologias e negócios. Como empresa pública de pesquisa, a Embrapa reúne condição de exercer um papel de facilitadora nesse ambiente de inovação aberta, fazendo a ponte entre seus diversos atores; um ambiente que inclui produtores rurais, setor público, instituições de pesquisa, startups e empresas da área de tecnologias da informação e comunicação (TICs) e do agro. Nesse ecossistema, a Embrapa se dispõe a oferecer serviços e conhecimentos que podem ser compartilhados por todo o agronegócio, visando à transformação digital no campo.

Os produtores, as cooperativas, os agricultores e as empresas de tecnologia, startups e de transformação se beneficiarão de toda essa infraes-

trutura, uma vez que terão acesso a uma vasta informação agregada, analisada e disponibilizada que auxiliará sua tomada de decisão.

Nesse contexto, também está sendo instituída a política de dados, que inclui: 1) valores; 2) propriedade; 3) controle de acesso; 4) compartilhamento; e 5) curadoria e proteção. Nesse sentido, estão sendo definidos: contrato de uso de dados que enderece a unicidade dos dados, acordo de uso, certificado e auditoria por terceira parte. Serão usados os critérios de volume, velocidade, variedade e veracidade para valorar os dados.

As Unidades da Embrapa atuarão no desenvolvimento e inovação voltados para a interface agricultura (atividades agrícolas, pecuárias, florestais e agroindustriais) e meio ambiente, conciliando as demandas dos sistemas produtivos com as necessidades de conservação de recursos naturais e preservação ambiental. Por meio desse ecossistema, a Embrapa poderá disponibilizar infraestrutura compartilhada de importantes laboratórios multiusuários, como o Laboratório Multiusuário de Bioinformática

(LMB), o Laboratório Nacional de Referência em Agricultura de Precisão (Lanapre), o Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNA), o Laboratório Multiusuário de Espectrorradiometria (Labspec), o Laboratório Multiusuário de Química de Produtos Naturais (LMQPN), o Laboratório Multiusuário de Biossegurança para a Pecuária (Biopec), o Laboratório Multiusuário de Biologia Molecular (LMBM), o Laboratório de Análise em Sistema Sustentável (Lass) e o Complexo Multiusuário de Bioeficiência e Sustentabilidade da Pecuária (CMB) composto por quatro laboratórios: a) Metabolismo e Impactos Ambientais da Pecuária; b) Biotecnologia e Ambiência; c) Pecuária de Precisão; e d) Saúde Animal.

Outra contribuição da Embrapa é a disponibilização de estrutura de campos experimentais que possibilitem a transformação digital no campo, por meio da colheita remota de dados, assim como o gerenciamento e tomada de decisão, viabilizada pela interação de animais eletronicamente identificados, equipamentos, atuadores e sensores. Todo esse ecossistema terá uma governança regida por normas, políticas e modelos de negócios acordados entre os parceiros e em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo governo federal.

No âmbito dessa proposta, várias iniciativas vêm sendo realizadas, incluindo a promoção do programa TechStart AgroDigital (TSAD)¹⁶, em parceria com a Venture Hub, o qual objetivou a aceleração das startups inscritas, tendo recebido mais de 160 inscrições desde o seu início em 2019. A Embrapa também tem se envolvido em muitas ações de mentorias no universo das AgTechs, como no âmbito do programa PIPE da Fapesp, no Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae-Piracicaba) e em rodadas de negócios estabelecidas nos even-

tos *100 Open-Startups* (2017) e *SBIAgroConect@* (2017 e 2019), os quais também foram importantes no intuito de aproximar equipes da Embrapa Agricultura Digital ao ambiente empresarial e, em especial, de startups (Romani et al., 2020). Em 2020, o consórcio formado pela Baita Aceleradora, Instituto Eldorado e a Embrapa Agricultura Digital foi um dos selecionados no Edital Softex nº 01/2020 – Edital de Qualificação de Instituições de Apoio ao Processo de Pesquisa, Desenvolvimento, Inovação e Aceleração de Projetos IA²MCTIC, que é um programa de inovação aberta com objetivo de aceleração tecnológica de soluções de impacto por meio da incorporação de inteligência artificial. O programa tem como áreas prioritárias: agronegócio, saúde, indústria e cidades inteligentes.

No que se refere à parceria com empresas, vários acordos de cooperação técnica têm sido estabelecidos visando ao desenvolvimento de projetos conjuntos que possam aproximar as pesquisas com a realidade do campo. Entre eles destaca-se o estabelecimento da cooperação com a Coplacana. O projeto tem como objetivos: 1) criação de um modelo de rastreamento e compartilhamento de dados da cadeia produtiva da cana-de-açúcar (cana convencional e cana-energia) utilizando-se tecnologia *blockchain*; 2) coleta, processamento, armazenamento e disponibilização de análises de imagens obtidas por Vants e/ou drones em lavouras de cana-de-açúcar; 3) modelagem da produtividade de canaviais utilizando-se parâmetros de fertilidade e física do solo associada ao método de diagnose do estado nutricional DRIS; e 4) avaliação do efeito per se e sinérgico de elicitores biológicos (oligonucleotídeos) na produtividade de cana-de-açúcar. Alguns resultados iniciais nesse projeto serão apresentados nos capítulos desta obra.

A Coplacana atua no ecossistema de inovação por meio do Avance Hub (Avance, 2020a), seu hub de inovação, com sede no AgTech Garage

¹⁶ Disponível em: <https://venturehub.se/techstart-agro-digital>.

em Piracicaba, SP. O Avance Hub tem o objetivo de conectar as empresas com tecnologias disponíveis para que façam ligação direta com os seus cooperados. Pelo hub é possível validar e disponibilizar comercialmente os produtos, serviços e soluções de diversos setores, como: agronegócio, saúde, telecomunicações, mineração, financeiro, inclusive abrangendo as pequenas e médias empresas. O Avance Hub da Coplacana atua na inovação com a visão baseada em quatro pilares:

- 1) Avanço tecnológico: busca soluções em tecnologia capazes de impactar e revolucionar os modelos de negócios e a sociedade (parceria da Embrapa e adoção de novas tecnologias).
- 2) Profissionais dedicados à inovação: valorização dos produtos, serviços ou soluções frutos de inovações criadas por pesquisadores, cientistas e empreendedores criativos, a fim de transformar e de oferecer bons negócios ao público-alvo. O Avance Hub dispõe de equipe altamente experiente e capacitada para avaliação das novas tecnologias apresentadas.
- 3) Apoio ao empreendedor: valorização de novas ideias, da diversidade de criações, de forma profissional e preparada para alavancar as soluções para o mercado.
- 4) Retorno à sociedade: uma aceleradora de novos negócios para trazer melhorias e soluções inteligentes em diversas áreas como contribuição para a evolução tecnológica da sociedade (Avance, 2020a).

Além disso, o Avance Hub prioriza a sustentabilidade econômica de startups, buscando um equilíbrio entre o faturamento e o investimento. Para o Avance Hub, apostar em produtos, serviços e soluções ambientalmente sustentáveis também é um fator essencial e relevante para as escolhas dos investimentos. As startups, apoiadas

pelo Avance Hub, contam com a Fazenda Digital na Estação Experimental da Coplacana para testar e validar suas tecnologias (Avance, 2020b). Investimentos em startups, como @Tech (@Tech, 2020) do setor da pecuária, e fomento à produção inovadora são algumas das apostas do hub, que também tem a vertente em ventures capital (Avance, 2020b).

Nesse contexto, o Avance Hub criou iniciativas para fomentar a cultura interna da inovação com os colaboradores da cooperativa, que participam do Programa de Inovação da Coplacana (PIC). Em andamento, o PIC já movimenta os colaboradores com suas ideias, sugestões e criatividade, apresentando alternativas e soluções que podem ser aplicadas na rotina da cooperativa (Avance, 2020b).

Desafios, tendências e oportunidades

Apesar do crescente interesse e esforço na implantação da agricultura digital, existem desafios científicos, tecnológicos, sociais e econômicos a serem superados, conforme apontado em Bolfe et al. (2020). Entre os desafios científicos e tecnológicos, podem-se citar: 1) a crescente demanda por serviços digitais online em que existe a preocupação com a segurança dos dados captados por esses serviços e a necessidade de sintonia entre a demanda dos produtores e a informação disponibilizada; 2) a gestão e o monitoramento da produção vegetal, incluindo o monitoramento de estresses de forma precoce, com vistas a, por exemplo, determinar a probabilidade de incidência de doenças; 3) a gestão e o monitoramento da produção animal, como no sistema extensivo de produção onde, por meio de uso de sensores afixados em animais, podem-se coletar informações para detectar doenças, definir programas de engorda ou determinar o ponto de abate. Por sua vez, o uso de drones pode auxiliar na contagem de animais

numa determinada área; e 4) o desenvolvimento de bases de dados agrícolas confiáveis para uso de programas de técnicas de aprendizado de máquina (Bolfe et al., 2020).

Entre os desafios socioeconômicos encontram-se a carência de conectividade no campo, a necessidade da diminuição dos custos das tecnologias digitais para torná-las acessíveis para um número cada vez maior de agricultores, o deslocamento da população rural para o campo alterando a sucessão hereditária no comando/gestão das propriedades e a demanda pela promoção do desenvolvimento rural de forma sustentável (Bolfe et al., 2020).

Nesse escopo vislumbram-se também tendências e oportunidades que vão impulsionar a implantação da agricultura digital, como: 1) a oferta e intensificação do uso das tecnologias digitais e disruptivas; 2) o aumento da oferta de capacitações, inclusive online, nesses temas; 3) o maior nível de informação dos consumidores demandando produtos mais nutritivos e funcionais, além da rastreabilidade quanto à forma como são produzidos; 4) o advento da economia digital com o uso de criptomoedas; 5) o surgimento da economia de baixo contato em razão da pandemia da covid-19; 6) o lançamento de plataformas digitais que integram informações de gestão da propriedade, da produção e da comercialização, e que estão disponíveis para acesso ao agricultor via computadores ou smartphone; 7) a disponibilidade de sistemas de projeções de riscos futuros; 8) a intensificação dos processos de rastreabilidade e certificação; e 9) a emergência de uma sociedade digital (Bolfe et al., 2020).

A expectativa é que, com o trabalho colaborativo de órgãos do governo e instituições públicas e privadas, os desafios sejam superados para que se possa implantar a agricultura digital no País.

Considerações finais

Este capítulo apresentou a transformação digital que impulsionou a quarta revolução industrial, provocando o surgimento da Indústria 4.0 e inspirando a implantação de novas tecnologias na agricultura e o consequente despontar da agricultura digital ou Agricultura 4.0.

Nesse contexto, a Embrapa e a Coplacana têm atuado em diferentes linhas de pesquisa, procurando trazer o conhecimento digital para o campo a fim de garantir, ou mesmo ampliar, sua capacidade de produção com sustentabilidade, ao mesmo tempo que atende à demanda por segurança alimentar e nutricional. Algumas linhas de pesquisa e seus resultados nas áreas de modelagem agroambiental, geotecnologias, computação científica, automação, biotecnologia e bioinformática foram apresentados.

Por entender que possui um papel importante na implantação da agricultura digital no País, a Embrapa está propondo o ecossistema de inovação na agricultura digital, no qual se coloca como um facilitador entre as empresas interessadas, no intuito de promover o trabalho colaborativo e a integração dos diversos segmentos e setores envolvidos. A Coplacana também investe na transformação digital do campo por meio das atividades do Avance Hub. Como resultante dos esforços de ambas as instituições, foi realizado um importante acordo de cooperação técnica entre a Coplacana e a Embrapa, visando ao desenvolvimento de tecnologias digitais voltadas para a área de cana-de-açúcar.

Por fim, foram apresentados os desafios e as tendências na área da agricultura digital para que todos os setores relativos ao agronegócio — envolvendo tanto grandes empreendedores como também a agricultura familiar e os pequenos e médios produtores — possam se beneficiar com a implantação das tecnologias digitais

no setor agrícola, garantindo a posição de grande exportador do Brasil.

Referências

@TECH: inovação tecnológica para a agropecuária.

Disponível em: <https://techagr.com>. Acesso em: 17 nov. 2020.

ABREU, U. G. P. de; LIMA, H. P. de; SANTOS, S. A.; MASSRUHÁ, S. M. F. S. **Protocolo: Índice Financeiro (IF) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS)**. Corumbá, MS: Embrapa Pantanal, 2015. 12 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 134). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1036669/1/DOC134.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.

ABSTARTUPS. **Tudo que você precisa saber sobre startups**. 2017. Disponível em: <https://abstartups.com.br/o-que-e-uma-startup>. Acesso em: 1 jun. 2020.

AGTECH GARAGE. **2º Censo AgTech Startups Brasil**: o maior levantamento de startups do agronegócio já realizado no Brasil. Disponível em: <https://www.agtechgarage.com/censo>. Acesso em: 2 jun. 2020.

ALMEIDA, C. A. de; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C. G.; DESSAY, N.; DURIEUX, L.; GOMES, A. R. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 3, p. 291-302, set. 2016. DOI: 10.1590/1809-4392201505504.

AMÂNCIO, C. O. da G.; ARAÚJO, M. T. B. D.; SANTOS, S. A.; NARCISO, M. G.; OLIVEIRA, M. D. de. **Protocolo: Índice de Bem-Estar Social (IBS) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS)**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2016. 16 p. (Embrapa Pantanal. Documentos 139). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1054996/1/DOC139.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.

ANUÁRIO PEIXEBR DA PISCICULTURA. São Paulo: Associação Brasileira de Piscicultura, 2022. 156 p. Disponível em: <https://www.peixebr.com.br>. Acesso em: 1 dez. 2022.

AVANCE. **Avance Hub**: 1 ano de conexão com o mundo da tecnologia. [2020b]. Disponível em: <https://www.avancehub.com.br/avance-hub-1-ano-de-conexao-com-o-mundo-da-tecnologia>. Acesso em: 17 nov. 2020.

AVANCE: tecnologia para o mundo. 2020a. Disponível em: <https://www.avancehub.com.br/avance>. Acesso em: 17 nov. 2020.

BAC, C. W.; HEMMING, J.; VAN TUIJL, B. A. J.; BARTH, R.; WAIS, E.; VAN HENTEN, E. J. Performance evaluation

of a harvesting robot for sweet pepper. **Journal of Field Robotics**, v. 34, n. 6, p. 1123-1139, Sept. 2017. DOI: 10.1002/rob.21709.

BARBEDO, J. G. A. Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning. **Biosystems Engineering**, v. 180, p. 96-107, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.02.002.

BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V.; SANTOS, T. T.; SANTOS, P. M. A study on the detection of cattle in UAV images using deep learning. **Sensors**, v. 19, n. 24, p. 1-14, Dec. 2019. DOI: 10.3390/s19245436.

BARBOSA, F. F. L. **HLB BioMath fase 2**: abordagem biomatemática como suporte a defesa fitossanitária e avaliação ex-ante de tecnologias de manejo. Cruz das Almas: Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura, 2015. 26 p. (Embrapa. Macroprograma 2 - Competitividade e Sustentabilidade Setorial. Projeto 02.13.03.007.00.00). Projeto concluído.

BARBOSA, F. F. L. **HLB BioMath fase 3**: biomatemática aplicada à otimização de tecnologias de interposição de barreiras, modificação microambiental e exclusão para manejo do huanglongbing dos citros. Cruz das Almas: Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura, 2019. 40 p. (Embrapa. Tipo II - Desenvolvimento e Validação. Projeto 20.18.03.044.00.00). Projeto em execução.

BIRRELL, S.; HUGHES, J.; CAI, J. Y.; IIDA, F. A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce. **Journal of Field Robotics**, v. 37, n. 2, p. 225-245, Mar. 2020. DOI: 10.1002/rob.21888.

BOLFE, E. L.; BARBEDO, J. G. A.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; SOUZA, K. X. S. de; ASSAD, E. D. Desafios, tendências e oportunidades em agricultura digital no Brasil. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 380-406. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126283/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap16.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

BOLFE, E. L.; LOPES, D. B.; CONTINI, E. Territórios & políticas públicas rurais. **Clima com Cultura Científica**, v. 3, n. 6, p. 1-15, ago. 2016. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1119014/1/TerritoriospoliticaspublicasruraisClimaCom.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

BRASIL. Decreto nº 9.841, de 18 de junho de 2019. Dispõe sobre o Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 4, 19 jun. 2019.

- BRASIL. Resolução nº 4.796, de 2 de abril de 2020. Estabelece medidas de caráter emergencial para os procedimentos de comunicação de perdas, de comprovação de perdas e de cálculo de coberturas para as operações enquadradas no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro) de que trata o Capítulo 16 do Manual de Crédito Rural (MCR). **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 84, 3 abr. 2020.
- CAMARGO NETO, J.; TERNES, S.; SOUZA, K. X. S. de; YANO, I. H.; QUEIROS, L. R. Uso de redes neurais convolucionais para detecção de laranjas no campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 12., 2019, Indaiatuba. **Anais...** Ponta Grossa: SBIAGRO, 2019. p. 312-321. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1125722/1/PC-Redes-neurais-SBIAGRO-2019.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2021.
- COMBA, L.; BIGLIA, A.; AIMONINO, D. R.; GAY, P. Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 84-95, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.compag.2018.10.005](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.005).
- COPLACANA: orgulho do Agro. 2020. Disponível: <http://www.coplacana.com.br>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- CUADRA, S. V.; VICTORIA, D. de C.; PELLEGRINO, G. Q.; BOLFE, E. L.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; ASSAD, E. D.; OLIVEIRA, A. F. de; FASIABEN, M. do C. R.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; BATISTELLA, M.; BARIONI, L. G.; NAKAI, A. M.; SILVA, F. C. da; MATSUURA, M. I. da S. F. Modelagem agroambiental e a transformação digital da agricultura. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 68-93. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126216/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap3.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- DIAS, C. N.; JARDIM, F.; SAKUDA, L. O. (coord.). **Radar AgTech Brasil 2019: mapeamento das startups do setor agro brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa; São Paulo: VP Ventures: Homo Ludens, 2019. 80 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1116167/1/RadarAgtech26112019.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.
- EMBRAPA. Secretaria Geral. Gerência de Comunicação e Informação. **Embrapa em números**. Brasília, DF, 2019. 140 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212612/1/Embrapa-em-Nu769meros.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2021.
- ESQUERDO, J. C. D. M.; ANTUNES, J. F. G.; COUTINHO, A. C.; SPERANZA, E. A.; KONDO, A. A.; SANTOS, J. L. dos. SATVeg: a web-based tool for visualization of MODIS vegetation indices in South America. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 1-9, Aug. 2020. DOI: [10.1016/j.compag.2020.105516](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105516).
- FERENTINOS, K. P. Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 145, p. 311-318, Feb. 2018. DOI: [10.1016/j.compag.2018.01.009](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.009).
- FORSMOO, J.; ANDERSON, K.; MACLEOD, C. J. A.; WILKINSON, M. E.; BRAZIER, R. Drone-based structure-from-motion photogrammetry captures grassland sward height variability. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 6, p. 2587-2599, Nov. 2018. DOI: [10.1111/1365-2664.13148](https://doi.org/10.1111/1365-2664.13148).
- FREIRE, F. J.; SILVA, F. C. da; VENEGAS, V. H. A. Modelagem para fertilização e calagem na cultura de cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C. da; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. de (ed.). **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. v. 1, p. 490-547.
- GREGO, C. R.; SPERANZA, E. A.; RODRIGUES, C. A. G.; NOGUEIRA, S. F.; BAYMA, G.; CIFERRI, R. R.; LUCHIARI JÚNIOR, A. Definição de zonas de manejo em cana-de-açúcar usando séries temporais de NDVI derivados do satélite Sentinel-2A. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019. 3 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1108752/1/PLDefinicaoGrecoetalSBSR2019.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- GREGO, C. R.; SPERANZA, E. A.; RODRIGUES, G. C.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; VENDRUSCULO, L. G.; RODRIGUES, C. A. G.; INAMASU, R. Y.; VAZ, C. M. P.; RABELLO, L. M.; JORGE, L. A. de C.; ZOLIN, C. A.; FRANCHINI, J. C.; RONQUIM, C. C. Tecnologias desenvolvidas em Agricultura de Precisão. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 166-191. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126469/1/Cap7-Tecnologias-desenvolvidas-em-agricultura-de-precisao.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- HELEODORO, T.; RIBEIRO, A. P.; MOLINARI, H. B. C.; KOBAYASHI, A. K.; VINECKY, F.; DE LUCA, P. C.; ARRUDA, P.; DANTE, R. A.; GERHARDT, I. R.; YASSITEPE, J. E. de C. T.; FERNANDES, F. R.; CANÇADO, G. M. de A. Liberação planejada no meio ambiente (LPMA) de plantas transgênicas de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2019, Campinas. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 1-9. nº 19605. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/>

[doc/1111591/1/19605TalitaGeraldoCIIC2019Oral.pdf](#). Acesso em: 4 nov. 2020.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240-254, July 2017. DOI: [10.1016/j.agsy.2016.05.014](#).

KAMIENSKI, C.; VISOLI, M. C. Swamp: uma plataforma para irrigação de precisão baseada na Internet das Coisas. **Fonte**, v. 15, n. 20, p. 76-84, dez. 2018. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1105001/1/APSvamp.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2021.

LOBO, I. K. C.; NASCIMENTO, A. R. do; YAMAGISHI, M. E. B.; GUIGUEN, Y.; SILVA, G. F. da; SEVERAC, D.; AMARAL, A. da C.; REIS, V. R.; O'SULLIVAN, F. L. A. Transcriptome of tabaqui *Colossoma macropomum* during gonad differentiation: different molecular signals leading to sex identity. **Genomics**, v. 112, n. 3, p. 2478-2488, May 2020. DOI: [10.1016/j.ygeno.2020.01.022](#).

MACARIO, C. G. do N.; ESQUERDO, J. C. D. M.; COUTINHO, A. C.; SPERANZA, E. A.; SILVA, J. dos S. V. da; ANTUNES, J. F. G.; VENDRUSCULO, L. G.; CRUZ, S. A. B. da. Geotecnologias na agricultura digital. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 94-118. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126226/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap4.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; EVANGELISTA, S. R. M. A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020b. p. 20-45. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126214/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap1.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020a. 406 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126213/2/LV-Agricultura-digital-2020.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2021.

MONTEIRO, J. E. B. de A. **Aplicação de métodos de controle de qualidade, imputação e espacialização de dados meteorológicos para geração de uma base de dados consistente e completa**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2015. 29 p. (Embrapa. Macroprograma 3 - Desenvolvimento de Técnicas Analíticas e Experimentais. Projeto 03.14.08.003.00.00). Projeto concluído.

MUDADU, M. de A.; ZERLOTINI NETO, A. Machado: open source genomics data integration framework. **GigaScience**, v. 9, n. 9, p. 1-16, Sept. 2020. DOI: [10.1093/gigascience/giaa097](#).

RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R.; SANCHES, G. M.; SPERANZA, E. A.; RONQUIM, C. C.; SILVEIRA, H. L. F.; LUCHIARI JUNIOR, A. Índices de vegetação (Sentinel-2) da cana-de-açúcar relacionados com a condutividade elétrica aparente de solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. **Ciência, inovação e mercado: anais**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2019a. p. 151-155.

RODRIGUES, G. C.; GREGO, C. R.; LUCHIARI, A.; SPERANZA, E. A. Caracterização espacial de índices de vegetação índice relativo de clorofila em áreas de produção cafés especiais no sul de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória, ES. **Pesquisa, inovação e sustentabilidade dos cafés do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2019b. 6 p.

RODRIGUES, N.; MAIO, A.; ROSSO, G.; GONÇALVES, D.; SILVA, J.; FRAGALLE, E. P. Pesquisa contribui para transformação digital da agricultura brasileira. [Brasília, DF]: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/51706860/pesquisa-contribui-para-transformacao-digital-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 24 jul. 2020.

RODRIGUES, N.; SILVA, J. **Brasil avança em tecnologia de irrigação de precisão com uso de internet das coisas**. [Brasília, DF]: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/54293512/brasil-avanca-em-tecnologia-de-irrigacao-de-precisao-com-uso-de-internet-das-coisas>. Acesso em: 24 jul. 2020.

ROGGIA, S.; VICENTE, L. E.; GREGO, C. R.; VICENTE, A. K.; MORAES, L. A. C.; LOEBMANN, D. G. dos S. W.; ARAUJO, L. S. de. Economize inseticidas e produza soja com melhor qualidade. **Jornal de Serviço Cocamar**, ano 42, n. 741, p. 27, jul. 2020.

ROMANI, L. A. S.; BAMBINI, M. D.; BARIANI, J. M.; DRUCKER, D. P.; MINITTI, A. F.; GONZALEZ, A. F.; KUROMOTO, V. M.; TELLES, G. A. de S.; ARAUJO, R. F.; DIAS, C. N.; ASSUNÇÃO, B. S. B. de; SOUZA, S. S. de; LUCHIARI JUNIOR, A.; MEIRA, C. A. A. Ecosistema de inovação em agricultura: evolução e contribuições da Embrapa. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R.

- de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 278-304. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126275/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap12.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 27 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 8). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/882598/1/BPD8.pdf>. Acesso em: 10 out. 2020.
- SA, I.; GE, Z.; DAYOUB, F.; UPCROFT, B.; PEREZ, T.; MCCOOL, C. DeepFruits: a fruit detection system using deep neural networks. *Sensors*, v. 16, n. 8, p. 1-23, ago. 2016. DOI: [10.3390/s16081222](https://doi.org/10.3390/s16081222).
- SANCHES, G. M.; PAULA, M. T. N. de; MAGALHÃES, P. S. G.; DUFT, D. G.; VITTI, A. C.; KOLLN, O. T.; BORGES, B. M. M. N.; FRANCO, H. C. J. Precision production environments for sugarcane fields. *Scientia Agricola*, v. 76, n. 1, p. 10-17, Jan./Feb. 2019. DOI: [10.1590/1678-992x-2017-0128](https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0128).
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.
- SANTOS, S. A.; CARDOSO, E. L.; CRISPIM, S. M. A.; SORIANO, B. M. A.; GARCIA, J. B.; BERSELLI, C. **Protocolo**: Índice de Conservação e Produtividade das Pastagens (ICPP) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS). Corumbá: Embrapa Pantanal, 2014a. 18 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 130). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1010365/1/DOC130.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- SANTOS, S. A.; LIMA, H. P. de; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; ABREU, U. G. P. de; TOMAS, W. M.; SALIS, S. M. de; CARDOSO, E. L.; OLIVEIRA, M. D. de; SOARES, M. T. S.; SANTOS JÚNIOR, A.; OLIVEIRA, L. O. F. de; CALHEIROS, D. F.; CRISPIM, S. M. A.; SORIANO, B. M. A.; AMANCIO, C. O. da G.; NUNES, A. P.; PELLEGRIN, L. A. A fuzzy logic-based tool to assess beef cattle ranching sustainability in complex environmental systems. *Journal of Environmental Management*, v. 198, part 2, p. 95-106, Aug. 2017. DOI: [10.1016/j.jenvman.2017.04.076](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.076).
- SANTOS, S. A.; LIMA, H. P.; BALDIVIESO, H. P.; OLIVEIRA, L. O. F. de; TOMÁS, W. M. GIS-fuzzy logic approach for building indices: regional feasibility and natural potential of ranching in tropical wetland. *Journal of Agriculture Informatics*, v. 5, n. 2, p. 26-33, 2014b. DOI: [10.17700/jai.2014.5.2.140](https://doi.org/10.17700/jai.2014.5.2.140).
- SANTOS, S. A.; OLIVEIRA, L. O. F. de; LIMA, H. P. de; ABREU, U. G. P. de; OLIVEIRA, M. D. de; ARAÚJO, M. T. B. D. **Protocolo**: Índice de Manejo e Bem-estar do Rebanho (IMBA) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS). Corumbá: Embrapa Pantanal, 2015. 20 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 135). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1036693/1/DOC135.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- SANTOS, T. T.; BARBEDO, J. G. A.; TERNES, S.; CAMARGO NETO, J.; KOENIGKAN, L. V.; SOUZA, K. X. S. de. Visão computacional aplicada na agricultura. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 146-164. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126261/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap6.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- SANTOS, W. G. dos; MARTINS, J. I. F. O zoneamento agrícola de risco climático e sua contribuição à agricultura brasileira. *Revista de Política Agrícola*, v. 25, n. 3, p. 73-94, jul./ago./set. 2016. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/152623/1/O-zoneamento-agricola-de-risco-climatico.pdf>. Acesso em: 10 out. 2020.
- SOARES, M. T. S.; OLIVEIRA, M. D. de; CALHEIROS, D. F.; SANTOS, S. A.; LIMA, H. P. de. **Protocolo**: Índice de Conservação de Corpos de Água Naturais (ICA) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS). Corumbá: Embrapa Pantanal, 2014. 22 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 128). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1009965/1/DOC128.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- SOUZA, K. X. S.; TERNES, S.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MOURA, M. F.; BARIONI, L. G.; HIGA, R. H.; FASIABEN, M. do C. R. A perspective study on the application of Data Science in agriculture. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 11., 2017, Campinas. **Ciência de dados na era da agricultura digital**: anais. Campinas: Editora da Unicamp: Embrapa Informática Agropecuária, 2017. p. 713-722. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1083412/1/Prospectivesbiagro2017.pdf>. Acesso em: 8 out. 2020.
- SPERANZA, E. A.; ESQUERDO, J. C. D. M.; SILVA, J. dos S. V.; ANTUNES, J. F. G.; LOURENÇO, F. V.; CEZAR, V. M. SISLA - Interactive system for environmental licensing support. *Geografia*, v. 36, p. 57-72, jun. 2011. Número especial. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/895460/1/artigo4.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2020.
- SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, C. A. G.; LUCHIARI JUNIOR, A.; RONQUIM, C.

- C.; SANCHES, G. M. Delineamento de zonas de manejo em cana-de-açúcar a partir de atributos do solo e da cultura e imagens georreferenciadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. **Ciência, inovação e mercado: anais**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019a. p. 175-179. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1118073/1/DelineamentozonasSiagro.pdf>. Acesso em: 8 out. 2020.
- SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; RODRIGUES, G. C.; LUCHIARI JUNIOR, A. Influência das diferentes faces de exposição ao sol nos índices vegetativos e relativo de clorofila em cafés especiais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 12., 2019, Indaiatuba. **Anais...** Ponta Grossa: SBIAGRO, 2019b. p. 361-370. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1125723/1/PC-Influencia-cafes-especiais-SBIAGRO-2019.pdf>. Acesso em: 8 out. 2020.
- SPRINGER. **Precision Ag definition**. [2019]. Disponível em: <https://www.springer.com/journal/11119/updates/17240272>. Acesso em: 1 jun. 2020.
- STARTUPBASE. **Encontre todas as startups do Brasil**. Disponível em: <https://startupbase.com.br/home>. Acesso em: 1 jun. 2020.
- TERNES, S.; MOURA, M. F.; SOUZA, K. X. S. de; VAZ, G. J.; OLIVEIRA, S. R. de M.; HIGA, R. H.; LIMA, H. P. de; TAKEMURA, C. M.; COELHO, E. A.; BARBOSA, F. F. L.; VISOLI, M. C.; MENEZES, G. R. de O.; SILVA, L. O. C. da; SANTOS, S. A.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; ABREU, U. G. P. de; SORIANO, B. M. A.; SALIS, S. M.; OLIVEIRA, M. D. de; TOMAS, W. M. Computação científica na agricultura. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 120-144. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126229/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap5.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- TRASPADINI, E. I. F.; PRADO, R. M.; VAZ, G. J.; SILVA, F. C. da; MANCINI, A. L.; SILVA, G. P. da; SANTOS, E. H. dos; WADT, P. G. S. **Guia prático para aplicação do método da diagnose da composição nutricional (CND): exemplo de uso na cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2018. 29 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Documentos, 160). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1103108/1/guiapraticodocumentos160.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- VAZ, G. J.; SILVA NETO, L. de F. da; LIMA, R. N.; MARQUES, F. A.; SANTOS, J. C. P. dos; OLIVEIRA, S. R. de M. Curadoria de dados de solos brasileiros por meio de um sistema especialista de classificação de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 37., 2019, Cuiabá. **Intensificação sustentável em sistemas de produção: resumos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019a. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1125625/1/PC-Curadoria-dados-CBCS-2019.pdf>. Acesso em: 4 out. 2020.
- VAZ, G. J.; SILVA NETO, L. de F. da; LIMA, R. N.; OLIVEIRA, S. R. de M. Uma API para a classificação de solos do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 12., 2019, Indaiatuba. **Anais...** Ponta Grossa: SBIAGRO, 2019b. p. 63-72. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1125720/1/PC-API-solos-SBIAGRO-2019.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2020.
- VAZ, G. J.; SILVA NETO, L. de F. da; OLIVEIRA, S. R. de M.; BOTELHO, F. P.; ARAUJO FILHO, J. C. de. Development of an expert system for classification of Brazilian soil profiles. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 21., 2018, Rio de Janeiro. **Soil science: beyond food and fuel: abstracts**. Viçosa, MG: SBCS, 2018. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1100967/1/Development-VAZ-WCSS-2018.pdf>. Acesso em: 4 out. 2020.
- WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSERA, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, Dec. 2012. DOI: [10.1016/j.geomorph.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021).
- WILLIAMS, H.; TING, C.; NEJATI, M.; JONES, M. H.; PENHALL, N.; LIM, J.; SEABRIGHT, M.; BELL, J.; AHN, H. S.; SCARFE, A.; DUKE, M.; MACDONALD, B. Improvements to and large-scale evaluation of a robotic kiwifruit harvester. **Journal of Field Robotics**, v. 37, n. 2, p. 187-201, Mar. 2020. DOI: [10.1002/rob.21890](https://doi.org/10.1002/rob.21890).
- WORLD ECONOMIC FORUM. **Digital transformation initiative in collaboration with Accenture: unlocking \$100 trillion for business and society from digital transformation: executive summary**. 2017. 70 p. Disponível em: https://www.accenture.com/t20170116T084450__w_/us-en/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/WEF/PDF/Accenture-DTI-executive-summary.pdf. Acesso em: 1 maio 2020.
- XIONG, Y.; GE, Y.; GRIMSTAD, L.; FROM, P. J. An autonomous strawberry-harvesting robot: design, development, integration, and field evaluation. **Journal of Field Robotics**, v. 37, n. 2, p. 202-224, Mar. 2020. DOI: [10.1002/rob.21889](https://doi.org/10.1002/rob.21889).
- YASSITEPE, J. E. de C. T.; DANTE, R. A.; GERHARDT, I. R.; FERNANDES, F. R.; SOUZA, R. S. C. de; ARMANHI, J. S. L.; SILVA, V. C. H. da; RIBEIRO, A. P.; SILVA, M. J. da; ARRUDA, P. Genômica aplicada às mudanças climáticas: biotecnologia para a agricultura digital. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.;

MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 258-276. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126269/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap11.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2020.

ZERLOTINI NETO, A.; NHANI JUNIOR, A.; VIEIRA, F. D.; CINTRA, L. C.; MUDADU, M. de A.; MUDADU, M. de

A.; FALCAO, P. R. K.; GIACHETTO, P. F. Aplicações da bioinformática na agricultura. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 234-257. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126268/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap10.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2020.

Manejo varietal na produção da cana-de-açúcar

Guilherme Rossi Machado Júnior | Arnaldo José Raizer | José Antonio Bressiani |
Ricardo Augusto de Oliveira | Fábio Cesar da Silva | Marcos Guimarães de Andrade Landell
| Fernando José Freire | Mauro Violante

Introdução

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes como fonte de alimento e energia, seu cultivo ocorre em regiões tropicais e subtropicais, envolvendo mais de 100 países, com significativa importância social e econômica. É uma planta de metabolismo fotossintético C₄, com elevada taxa fotossintética, sendo a cultura mais eficiente na conversão de energia radiante em energia química (Tew; Cobill, 2008).

Como produtos provenientes dessa matéria-prima, podem ser citados: açúcar, etanol, melaço, eletricidade, aguardente, bagaço, levedura, torta de filtro, vinhaça, composto fertilizante, gás carbônico, ácido cítrico, lisina, briquetes, aglomerados MDF, biogás e biometano oriundos da vinhaça, etanol, bioquímicos e nanocelulose oriundos do bagaço e da palhada residual, entre outros.

O cultivo da cana-de-açúcar tem 500 anos de história no Brasil. Portugal aproveitou esse enorme território e transformou-o em uma colônia agroindustrial do açúcar. Com grande retorno econômico nos dois primeiros séculos da colonização, o açúcar brasileiro deu mais divisas ao reino do que o ouro, numa época em que este mercado figurava como o mais importante das trocas marítimas internacionais (Instituto do Açúcar e do Álcool, 1972). A cana-de-açúcar é de grande importância para o Brasil, que é o maior produtor mundial dessa matéria-prima, e dos produtos açúcar, etanol e eletricidade. O País é também o maior exportador de açúcar e

etanol. O setor canavieiro brasileiro, baseado na biomassa da cana-de-açúcar, tem papel fundamental para o País (Bioetanol..., 2008; Empresa de Pesquisa Energética, 2012).

É bastante antiga a busca por formas varietais que apresentem maior teor de sacarose, destacando-se nessa contribuição a espécie *Saccharum officinarum*, que, até o início do século XX, era responsável por grande parte da matéria-prima mundial. No Brasil, cultivares como a Creoula, Bourbon, Caledonia e Cheri-bon, entre outras, foram cultivadas até o início do século XX (Figueiredo, 2008).

Os primeiros três séculos de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil ficaram conhecidos como “Ciclo da Creola” (Creoula, Crioula ou Mirim) pelo grande predomínio dessa variedade. Posteriormente ela foi substituída pela Caiana, que era mais rica em açúcar e mais produtiva (Miocque; Machado Júnior, 1977). Outras variedades foram introduzidas, como a Roxa, Salangor, Lou-sier e Cavangirie, que foram eliminadas por uma epidemia de “mosaico” na década de 1920. Esse episódio permitiu a introdução de variedades orientais (POJ), com destaque especial para POJ 36, POJ 213, POJ 2878 e POJ 2714, bem como para as importadas de Coimbatore (Índia), destacando-se a Co 281, Co 290, Co 331, Co 413, Co 419 e Co 421. A ocorrência de uma nova epidemia, dessa vez de carvão, tornou o cultivo dessas variedades praticamente inviável.

Em razão dessas inúmeras doenças, assumiu grande importância o melhoramento genético,

a partir de 1880. Para esse fim, utilizou-se dos cruzamentos interespecíficos, envolvendo espécies como *Saccharum officinarum*, *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. barberi* e *S. sinense*. Esse caminho proporcionou uma significativa alteração no perfil varietal (Brandes, 1956; Daniels; Roach, 1987).

Os programas de melhoramento gradualmente se empenharam na busca de novas plantas, antes sem capacidade de perfilhamento, que passaram a apresentar, a partir de então, não apenas essa característica, como também grande habilidade de brotação após seu corte. Colmos que apresentavam diâmetros grandes e baixíssimo teor de fibra passaram a ter diâmetros menores, com valores médios a altos de fibra. Com as hibridações manipuladas, o perfil varietal se distinguiu significativamente, oferecendo à indústria uma nova concepção de matéria-prima, principalmente para uma cultura que passou a ser intensamente mecanizada e cultivada em diversos e mais restritivos ambientes de produção.

O objetivo principal dos programas de melhoramento de cana-de-açúcar é prover novas cultivares que ampliem a produtividade de energia (açúcar, álcool, bagaço e resíduos vegetais). Novos clones são desenvolvidos a partir de hibridações direcionadas, seleções regionais e testes de sanidade, atendendo a objetivos econômicos e às condições edafoclimáticas da região, promovendo ganhos significativos, como novas cultivares para nichos específicos de produção. No Brasil, essa estratégia tem sido uma corrente prevalecente nos últimos anos, permitindo a expansão agrícola da cana-de-açúcar e gerando ganhos importantes para regiões antes relevadas a segundo plano pelo desenvolvimento tecnológico.

Destaca-se o grande potencial da cana-de-açúcar como fonte de matéria-prima principal (açúcares presentes nas fibras, do bagaço e resíduos vegetais) para a indústria de renováveis de se-

gunda e terceira geração (etanol, bioquímicos e nanocelulose). De importância energética estratégica, e crescente utilização também, tem-se o emprego do bagaço e, mais recentemente, dos resíduos vegetais para a produção de energia elétrica (Souza et al., 2013).

Histórico

A cana-de-açúcar é originária do sudeste da Ásia, especificamente, há uma hipótese de que seja da região de Assam e Bengala, que tem, entre outras justificativas, a do apoio linguístico e etnográfico. Bengala em épocas remotas era conhecida por Gaura, cuja capital era Gur, palavra que significa “cidade do açúcar” (Lippman, 1942). Aranha e Yahn (1987) esclarecem que a cana-de-açúcar era muito difundida na Índia Ocidental, devendo, portanto, originar-se de alguma espécie nativa daquela região. Já por volta dos anos 327 a.C., era uma cultura importante naquele país, tendo sido introduzida no Egito por volta de 641 de nossa era e em 755 na Espanha. Por sua vez, relata-se que era uma planta cultivada por horticultores neolíticos em Nova Guiné, sendo posteriormente difundida para a Índia (Fauconnier, 1991).

A origem proposta para *S. officinarum* a partir de acessos de *S. robustum* — selecionados para colmos mais grossos, com maior teor de sacarose e baixo teor de fibra, após domesticação em Nova Guiné — é aceita pela maioria dos melhoristas de cana-de-açúcar (Daniels; Roach, 1987).

Partindo da Nova Guiné, os acessos de *S. officinarum* se espalharam pela Indonésia, China, Índia, Micronésia e Polinésia, durante os tempos pré-históricos. Um oficial de Alexandre, o Grande, foi o primeiro a mencionar a presença da cana-de-açúcar na Índia em 325 a.C. Sua distribuição da Polinésia para o Havaí aconteceu entre 500 e 1.000 d.C. e da Indonésia para o sul da Arábia e leste da África provavelmente antes

de 500 d.C. Os melhoristas holandeses em Java chamaram os *S. officinarum* de canas nobres (Fauconnier; Bassereau, 1975).

Os ancestrais de *S. sinense* cultivados na China e na Índia foram utilizados para a produção de melão e açúcar, enquanto, no norte da Índia, eram cultivados *S. barberi*, com colmos mais finos e duros. Essas duas espécies cultivadas de cana-de-açúcar constituíram-se, provavelmente, a partir de híbridos naturais entre *S. officinarum* e *S. spontaneum* e surgiram há cerca de 1.000 anos a.C. A espécie *S. barberi*, na sequência, esparramou-se da Índia para o meio leste do Mediterrâneo e para o novo mundo na segunda viagem de Colombo em 1493. A variedade Crioula, híbrido natural entre *S. officinarum* e *S. barberi*, procedente da Índia, foi cultivada em colônias da França, da Espanha e de Portugal. Foi esta a primeira cultivar provavelmente introduzida no Brasil, proveniente da Ilha da Madeira. Atualmente, a cultivar Crioula e demais cultivares de *S. sinense* e *S. barberi* existem apenas nos bancos de germoplasma (Stevenson, 1965; Berding; Roach, 1987; Machado Junior et al., 1987; Walker, 1987; Heinz et al., 1994; Landell; Bressiani, 2008).

A cana Crioula foi rapidamente substituída pelo cultivo da nobre Otaheite (Bourbon), trazida para o Taiti da Jamaica por Bligh em 1793 (Machado Junior et al., 1987). Do Taiti a cana nobre esparramou-se para o Caribe e para as Américas. As canas nobres coletadas nas ilhas do Pacífico eram as únicas fontes de cultivares para o plantio comercial e foram responsáveis por manter a indústria mundial de açúcar por mais de 100 anos. Antes do início das instalações dos programas de melhoramento, as mais importantes cultivares nobres eram a Otaheite (ou Bourbon ou Lahaina) do Taiti, Cheribon (Louisiana Purple) de Java e Caledônia de Vanuatu, da Melanésia. Entretanto, todos esses exemplares apresentavam problemas fitossanitários: Bour-

bon era extremamente suscetível à podridão de raiz, mosaico e gomose; Cheribon era suscetível ao mal de "Sereh", mosaico e podridão de raiz; e Caledônia era suscetível ao mosaico (Stevenson, 1965). Todas essas cultivares foram rapidamente substituídas com o estabelecimento dos programas de melhoramento. Hoje, clones de *S. officinarum* são mantidos em bancos de germoplasma e cultivados como ornamentais (Irvine, 1999).

A cana-de-açúcar foi descrita inicialmente por Linneu em 1753 (Earle, 1928). Posteriormente foi estudada em detalhes por vários pesquisadores, entre eles, Barber (1916) e Artschwager (1925). O trabalho botânico descritivo mais completo foi realizado por Dillewijn (1952). Botanicamente é uma planta alógama que pertence à divisão Magnoliophyta, classe Liliopsida, subclasse Commelinidae, ordem Cyperales, família Poaceae (gramíneas), tribo Andropogoneae, sub tribo Saccharininae, gênero *Saccharum* (Cronquist, 1981). Segundo Fauconnier e Bassereau (1975), a classificação em espécies botânicas mais aceita é a de Jeswiet, que foi proposta em 1925 (Jeswiet, 1929) e que compreende as seguintes espécies: *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L., *Saccharum sinense* Roxb., *Saccharum barberi* Jesw., *Saccharum robustum* Jesw. e *Saccharum edule*.

Entre as principais culturas agrícolas globais (Tabela 3.1), a cana-de-açúcar tem, sem dúvida, o genoma mais complexo, acarretando desafios especiais para a pesquisa vegetal. Além do genoma complexo, a cana-de-açúcar também é propagada vegetativamente, têm ciclo longo, baixa fertilidade e relutância em florescimento em muitos genótipos. Isso traz restrições ao emprego de algumas ferramentas de biotecnologia e dos métodos mais empregados no melhoramento genético de culturas em geral. A identificação, a descrição e a utilização das espécies agrupadas como cana-de-açúcar têm

Tabela 3.1. Produção, área e consumo calórico das principais culturas alimentícias no mundo.

Cultivo	Produção (milhões de toneladas)	Consumo (Kcal por dia por habitantes)	Área cultivada (milhões de hectares)	(%)
Cana-de-açúcar	1.661	152,0	23,8	1,5
Milho	819	139,0	158,6	10,2
Trigo	685	530,0	225,6	14,4
Arroz	685	533,0	158,3	10,0
Batata	330	59,0	18,7	1,2
Mandioca	234	43,0	18,9	1,2
Beterraba açucareira	227	76,0	4,3	0,3
Soja	223	105,0	99,5	6,4
Óleo de palma	210	50,0	14,9	1,0
Tomate	153	9,2	4,4	0,3
Cevada	152	6,5	54,0	3,5
Batata-doce	102	22,0	8,2	0,5
Banana	97	19,0	4,9	0,3
Melancia	98	13,0	3,4	0,2
Total global	5.676	2.798,0	1.562,0	51,1

Fonte: Adaptado de Moore e Botha (2014) e FAO (2022).

sido complicadas por hibridizações, tanto naturais quanto antrópicas, entre si e com espécies aparentadas. Muitos membros dos grupos de cruzamentos têm estruturas genômicas diferentes que produzem formas intermediárias, e algumas dessas formas intermediárias têm estrutura genômica totalmente nova por causa dos diferentes tipos de transmissão cromossômica. A ampla hibridização resultou em uma mistura de euploides e aneuploides, dificultando os estudos de herança genética no melhoramento. Há ainda, nessa complexidade genética, contribuições das pressões de seleção aplicadas pela natureza e pelo homem para conduzir diferentes estruturas populacionais. Cultivares de cana-de-açúcar são híbridos de diferentes espécies do gênero *Saccharum* e podem incluir germoplasma de nove gêneros relacionados, *Imperata*, *Eriochrysis*, *Eccolipus*, *Spodiopogon*,

Miscanthidium, *Erianthus/Ripidium*, *Miscanthus*, *Sclerostachya* e *Narenga*, que estão incluídos na sub tribo Saccharinae (Daniels; Roach, 1987).

A espécie mais cultivada era a *Saccharum officinarum* L. No entanto, as cultivares dessa espécie eram pouco resistentes a doenças fitopatogênicas, principalmente o “mosaico”, e apresentavam muitas dificuldades de adaptação. Mundialmente, o melhoramento genético da espécie iniciou-se no final do século XIX, com os primeiros relatos registrados a partir de trabalhos realizados em Java e em Barbados. Em Java, Soltwedel realizou em 1885 a germinação de sementes de *S. spontaneum* e em 1887 realizou o cruzamento destas com a *S. officinarum*. Ao mesmo tempo, em Barbados, Harrison e Bovell Nucleus Animalium obtiveram plântulas por meio de sementes de canas coletadas no campo. Dessas pesquisas iniciais, resultaram os

híbridos interespecíficos (Gomes; Lima, 1964), oriundos dos programas de melhoramento genético, mais resistentes e adaptados às diversas condições climáticas, permitindo a expansão da cana-de-açúcar pelo mundo (Matsuoka et al., 1999; Machado Junior, 2002).

Dentre as zonas para as quais a cana-de-açúcar se expandiu no Ocidente, foi nas Américas onde mais se desenvolveu, ocupando extensas áreas e constituindo, desde os tempos coloniais, a principal atividade econômica de diversas regiões. Segundo Moore e Botha (2014), sua importância global é destacada como fonte principal de produção de biomassa, como alimentação e geração de bioenergia, mesmo assim ocupando pequena parcela da área agrícola do planeta (Tabela 3.1).

Historicamente, os primórdios do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil iniciaram-se com a descoberta e colonização do País, embora não se conheça com exatidão o local da costa brasileira onde teria sido cultivada pela primeira vez, nem a data da sua primeira importação (Junqueira et al., 1964). Segundo Costa (1958), Piggafetta, que participou da expedição de Fernão de Magalhães em 1519, relatou a presença de “canas doces” no Rio de Janeiro, que teria sido certamente introduzida em alguma expedição anterior. Corrêa (1926) menciona a sua introdução desde o ano de 1502, sem, entretanto, descrever o local e a fonte da informação. Por sua vez, Calmon (1935) relata que havia plantações de cana, bem como fabricação de açúcar, desde a segunda década do descobrimento do Brasil, entre 1510 e 1520, em Pernambuco, registrando, inclusive, a primeira exportação do produto para Portugal, que ter-se-ia realizado em 1521 por Pero Cápico.

Nos estados nordestinos, praticamente toda a área plantada com cana-de-açúcar foi remanescente da Floresta Atlântica, principalmente da floresta subperenifolia (Jacomine et al., 1973). A grande extensão do território brasileiro, bem como o cultivo de mais de 8 milhões de hectares

(Acompanhamento..., 2021), distribuídos por todos os estados, possibilitam que a cana-de-açúcar se desenvolva nos mais variados tipos de solo e clima.

Conforme Yates (1978), na prática, a cultura da cana-de-açúcar demonstrou ser bastante adaptável, sendo cultivada em solos de textura muito variável, desde os arenosos até os muito argilosos e, também, em solos com altos teores de matéria orgânica, como é o caso dos solos hidromórficos no Rio de Janeiro. Essa adaptabilidade a diferentes condições de solo e clima permite que a colheita da cana-de-açúcar seja realizada praticamente durante todo o ano, possibilitando uma ininterrupta produção de açúcar e álcool, o que favorece a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil em relação ao abastecimento do mercado internacional.

Importância da cultura no Brasil

A cultura da cana-de-açúcar foi uma das primeiras atividades de importância econômica do Brasil, compõe o mais antigo setor agroindustrial do País e ocupa uma posição de destaque na economia nacional. Sua produção é destinada, principalmente, à indústria do açúcar e do álcool e, dentre os mais diversos produtos agrícolas destinados à industrialização, a cana-de-açúcar destaca-se pela tradição, pela relevância socioeconômica, por sua potencialidade como energia renovável e pela distribuição geográfica por todo o País.

Associada ao processo de formação e consolidação do Brasil, a agroindústria da cana-de-açúcar foi expandindo-se gradativamente e, ao longo da história econômica do País, passou por diversas fases em que períodos de prosperidade e de crise se alteraram, quase sempre determinados pela conjuntura econômica mundial (Andrade, 1994).

As duas crises internacionais do petróleo ocorridas em 1973 e 1979, bem como as medidas

adotadas pelo governo brasileiro na superação dessas crises, principalmente na implantação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), refletiram significativamente na agroindústria da cana-de-açúcar. Em período muito promissor, a safra canavieira de 2007/2008 levou o Brasil a um novo recorde de produção de açúcar e álcool, com intenso ritmo de crescimento verificado na área cultivada no período de 2000/2001 a 2006/2007, com média de 8,4% ao ano, performance atingida por poucos setores da economia brasileira e inigualada no setor agroindustrial (Brasil, 2009). Nastari (2007) apontava como meta de crescimento sustentável, a médio prazo, 7,3% ao ano, que seria capaz de permitir ao setor produtor atingir uma produção com capacidade de atender à demanda projetada até 2013/2014, de aproximadamente 100 milhões de toneladas de açúcares totais recuperáveis (ATR) ou 700 milhões de toneladas de cana. Porém, os dados da última safra, 2020/2021,

apontaram uma produção total nacional de 655 milhões de toneladas, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), no 4º levantamento *cana-de-açúcar*, de maio de 2021 (Acompanhamento..., 2021).

O grande crescimento no cultivo de cana-de-açúcar no Brasil tem provocado afirmações de que a expansão da cultura e a produção de biocombustíveis, principalmente de etanol, causaria impactos negativos na produção e no aumento de preço dos alimentos e aumentaria o desmatamento da Amazônia com a utilização de novas áreas (Silva et al., 2013). Entretanto, tais informações devem ser confrontadas com os levantamentos de ocupação do território brasileiro, que mostram que a área total plantada com cana-de-açúcar ocupa apenas cerca de 2% da área agrícola do País. Ainda assim, 99,7% dessa área está a pelo menos 2.000 km de distância da Floresta Amazônica (Figura 3.1). A expansão da cana-de-açúcar nos últimos 25 anos

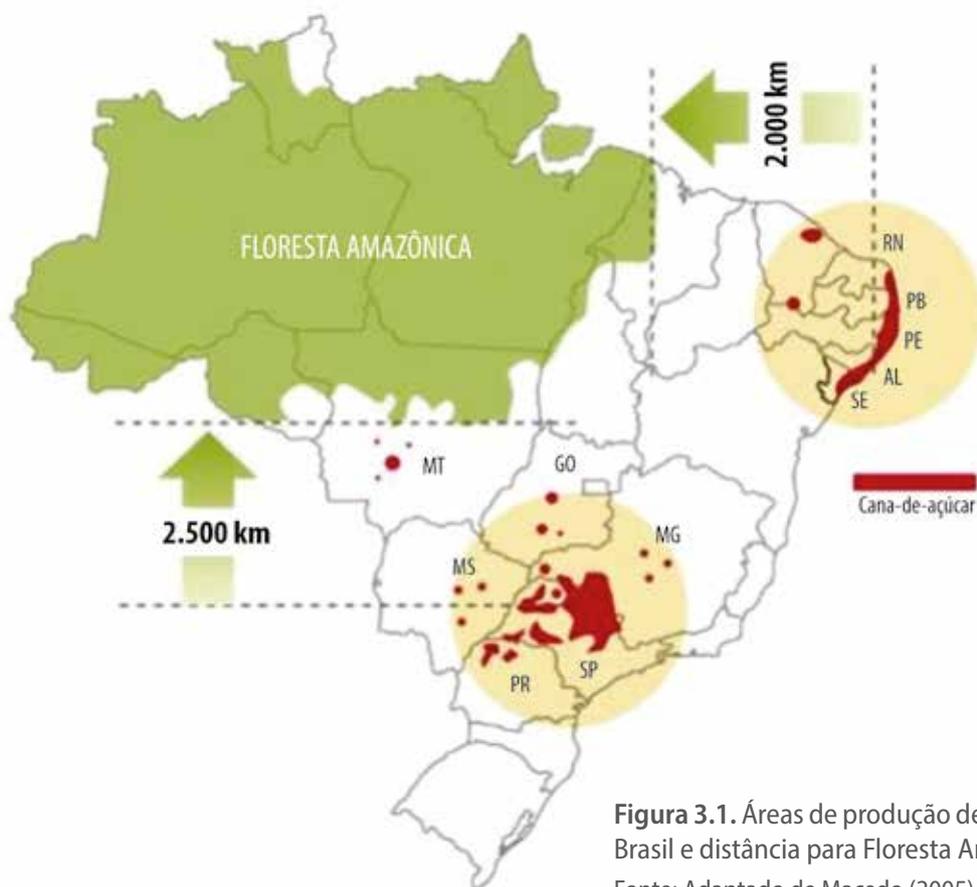


Figura 3.1. Áreas de produção de cana-de-açúcar no Brasil e distância para Floresta Amazônica.

Fonte: Adaptado de Macedo (2005) e IBGE (2022).

aconteceu principalmente no Centro-Sul do Brasil, em áreas muito distantes dos biomas atuais da Floresta Amazônica, Mata Atlântica e Pantanal (Figura 3.1).

Entre 1992 e 2009, no Centro-Sul, a expansão deu-se quase que totalmente (94%) em áreas que haviam sido utilizadas com cana-de-açúcar, com poucas aberturas de fronteiras agrícolas. Em São Paulo, responsável por 58% da produção do País, o crescimento ocorreu principalmente pela substituição de áreas de pastagens degradadas (Macedo, 2005; Silva et al., 2015).

Nos últimos anos, a cana-de-açúcar se expandiu nas regiões oeste e noroeste do estado de São Paulo, e nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, principalmente no Triângulo Mineiro. Poderão ser consideradas ainda como novas fronteiras agrícolas o Vale do São Francisco e o oeste do estado da Bahia, além dos estados do Tocantins, Maranhão e do Piauí (Goes; Marra, 2008). No Brasil, Silva et al. (2013) destacaram e exemplificaram a existência de 340 milhões de hectares de terra agriculturáveis e hoje ocupa-se apenas 63 milhões de hectares com lavouras, dos quais cerca de 9 milhões são dedicados a produzir cana-de-açúcar. Dessa forma, nenhum país tem potencial para agregar milhões de hectares de solo e qualidades climáticas como o Brasil, produzindo açúcar, energia e biocombustíveis, sem ameaçar áreas protegidas dos ecossistemas amazônicos, do pantanal, e sem interferir nas áreas usadas atualmente para produzir culturas alimentares. O Brasil, como outros países da América Latina e da África, tem condições de aumentar significativamente a produção de biocombustíveis, respeitando todas as condições socioeconômicas e ambientais.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) coordena estudos sobre aptidão e crescimento das áreas agrícolas, utilizando-se de modelos agrometeorológicos e biofísicos,

bem como dos resultados do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc). São considerados critérios ambientais usados como base para melhorar o setor de seguros e resseguros agrícola (Santos; Martins, 2016), podendo simular os potenciais produtivos da cana-de-açúcar e o sistema de certificação para produtores de biocombustíveis, fundamentais para conquistar mercados internacionais e oferecer suporte às políticas públicas.

Melhoramento genético no Brasil

Em 1590, o Brasil possuía 66 engenhos de açúcar, a maioria deles no Nordeste. A principal variedade largamente utilizada era a Crioula, resultado de uma hibridação natural entre *Saccharum officinarum* e *Saccharum barberi* (Bremer, 1932), situação que perdurou por mais de 200 anos, quando então foi substituída pela cultivar Caiana (*S. officinarum*), também conhecida como cana nobre. No século XIX e início do século XX, a Caiana e outras formas de *S. officinarum* (Bourbon, Imperial, Crystalina, Kavengirie, Rajada, Mapou Rouge, Rosa, Preta, Riscada, Bois Rouge, Sem Pelo, etc.) predominaram nos canaviais brasileiros (Landell; Alvarez, 1993). Com o aparecimento da gomose e do mal de “Sereh” no início do século XX e em razão da alta suscetibilidade das canas nobres a essas doenças, surgiram no mundo os primeiros programas de melhoramento genético de cana-de-açúcar (Landell; Bressiani, 2008).

Nessa época, a introdução de germoplasmas originários de outros centros mundiais consistia na maneira mais rápida e econômica de obter acréscimos na produção agrícola, via melhoramento genético de plantas. A introdução de cultivares de outros centros de origem e seleção utilizada, a princípio, de maneira aleatória e não criteriosa, passou a ser usada como método de melhoramento, quatro séculos após o início do

cultivo da cana-de-açúcar no Brasil. Nessa ocasião (1922–1928), grande parte das cultivares nobres foi dizimada pelo vírus do mosaico (Landell; Bressiani, 2008).

Em São Paulo, o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) realizou os primeiros estudos com a cultura, em 1894–1895, por intermédio de seu fundador, Franz Dafert, que conduziu ensaios de competição com 42 cultivares nobres introduzidas ou selecionadas por agricultores (Landell; Alvarez, 1993). Posteriormente, esse pesquisador ocupou-se em estudar a adaptação dos genótipos introduzidos da Ásia para caracterização deles para as condições paulistas. Saiu daí as informações das cultivares estrangeiras Co290 e Co419, assim como de cultivares produzidas em Campos: CB45-3, CB40-69, CB41-76 e CB47-355 (Landell; Bressiani, 2008).

No Brasil, dentre os primeiros centros de pesquisa com cana-de-açúcar, podem-se citar: a) Estação de Escada, em Pernambuco, em 1913; b) Estação de Campos, no Rio de Janeiro, em 1916; c) Estação Geral de Experimentação de Barreiros, Pernambuco, em 1920; e d) Escola Superior de Agricultura de São Bento em Tapera, Pernambuco, em data incerta. Em Campos, Artur Torres Filho criou as primeiras cultivares híbridas: CB3100 e CB3600, que vieram a competir com as canas nobres Bois Rouge e Sem Pelo, então em cultivo comercial. Em Barreiros, Pernambuco, Oscar Campos Góes coordenou o desenvolvimento de cultivares EB4, EB10, entre outras. Em Tapera, PE, também foram produzidas cultivares SBP por Apolônio Salles (Machado Junior, 1987). As estações de Escada e Campos foram fundadas por Nicholas Van Gorkum.

Na década de 1920, a epidemia do mosaico motivou uma ação conjunta de produtores de açúcar e do governo paulista. Assim, foi criada a Estação Experimental de Piracicaba, em 1928, que se ocupou a princípio em introduzir cultivares híbridas procedentes de programas de melhoramento já

existentes em Java e em Coimbatore na Índia. A bem da verdade, muitas dessas cultivares já existiam na Fazenda Guatapará, próxima à cidade do mesmo nome em São Paulo. Um intenso serviço de multiplicação se seguiu, permitindo que, em pouco tempo, as variedades nobres fossem substituídas pelas canas javanesas: POJ213, POJ2727 e POJ2878, entre outras (Landell; Alvarez, 1993). A partir da década de 1930, também foram importantes cultivares vindas de Coimbatore, na Índia, como as Co290, Co413, Co419, Co421 e Co331 (Landell; Bressiani, 2008).

Ao acompanhar aquilo que já ocorrera em Java, Barbados e Havaí, respectivamente em 1887, 1889 e 1905, seguiu-se a criação efetiva de programas de melhoramento de cana-de-açúcar no Brasil, os quais passaram a obter sementes e estabeleceram protocolos de seleção das diversas fases até a obtenção de cultivares (Segalla et al., 1964). Foram esses os programas das cultivares de sigla IAC (Instituto Agrônomo) e CB (Campos, Brasil), iniciados, de fato, na década de 1930. A primeira campanha de hibridação realizada pelo IAC foi feita em 1933–1934 em um local chamado Prainha, em Miracatu, litoral sul de São Paulo. O pesquisador responsável foi José Manoel Aguirre Júnior, que redigiu seu plano de trabalho em forma de *Boletim Técnico 34/IAC*, no qual consta uma extensa revisão bibliográfica e as linhas gerais do projeto (Aguirre Junior, 1936). As primeiras cultivares desse programa, IAC36-25 e IAC47-31, foram lançadas na década de 1950 sob a coordenação dos pesquisadores R. Alvarez e A. L. Segalla (Segalla et al., 1964), que haviam se unido ao esforço de Aguirre Júnior. Seguiu-se o lançamento das cultivares IAC48-65, IAC51-205, IAC52-150, IAC58-480 e IAC64-257, bastante importantes por ocasião do Proálcool, em razão da significativa expansão de área em direção aos solos de mais baixa fertilidade.

Simultaneamente, em Campos, no Rio de Janeiro, sob o comando de Frederico Veiga, foram

produzidas as primeiras cultivares híbridas que tiveram expressão comercial no Brasil a partir de 1955. Entre elas, destacaram-se CB45-3, CB40-69, CB41-76, CB47-355 e CB49-260. A doença produzida pelo fungo *Ustilago scitaminea*, conhecida como carvão, apareceu na década de 1940, alarmando os produtores brasileiros que enviamos esforços no sentido de acelerar os trabalhos de melhoramento conduzidos em Campos, RJ, e Campinas, SP. Também estimulou a criação do Instituto Agrônomo do Nordeste em 1946. (Figueiredo, 2008).

Nas décadas de 1950 e 1960, as cultivares em plantio eram basicamente das siglas Co (Co419, Co421, Co740 e Co775), CB (CB45-3, CB41-76) e IAC (IAC48-65, IAC51-205, IAC52-150).

No meio da década de 1970, iniciou-se o plantio em extensas áreas da cultivar argentina NA56-79, que viria a ser a mais cultivada por mais de 10 anos (atingiu 1 milhão de hectares), mudando o perfil qualitativo das cultivares de cana-de-açúcar no Brasil. Sem dúvida nenhuma, o elevado teor de sacarose associado a uma boa estabilidade agrícola da NA56-79 quebrou paradigmas e provocou a reflexão dos produtores, que, a partir de 1983, passaram a remunerar a matéria-prima pela qualidade. Este fato “empurrou” os programas de melhoramento em direção a essa demanda e produziu, nesses 25 anos, ganhos superiores a 40% no teor de sacarose (Landell; Bressiani, 2008).

Em 1969 e 1970, surgiram dois grandes programas de melhoramento no Brasil que mudariam a concepção da canavicultura brasileira. Foram eles o Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), em 1969, com sigla SP para as cultivares, assessorado pelo pesquisador Albert Mangelsdorf (Mangelsdorf, 1953), e logo depois o Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (Planalsucar), em 1970, com sigla RB para as cultivares, assessorado pelo pesquisador R. Urata (Urata, 1969). Os dois pesquisadores per-

tenciam ao Havaí, EUA. Juntos, esses programas representaram um vultoso investimento público-privado em desenvolvimento tecnológico, gerando um grandioso salto para a agroindústria canavieira. Posteriormente, em 1992, o Planalsucar foi transferido para as universidades federais, Companhia Nacional de Abastecimento (Ridesa) e a Copersucar, em 2004, abriu o centro à participação de mais usinas e associações de produtores, passando a se denominar Centro de Tecnologia Canavieira, com sigla CTC para as cultivares (Landell; Bressiani, 2008).

O ciclo das cultivares da Copersucar teve início na segunda metade da década de 1980, com variedades como a SP70-1143, SP70-1284, SP71-1406 e SP71-6163, logo após o aparecimento da ferrugem da cana-de-açúcar, em 1986.

Em 1995, o aparecimento da síndrome do amarelamento foliar acometeu a principal cultivar da Copersucar, SP71-6163, e promoveu a sua rápida substituição, dando oportunidade na utilização das cultivares do Programa Ridesa (ex-Planalsucar). As variedades RB passaram a dominar as áreas de plantio comercial, com destaque para a cultivar RB72454, que — pelas suas características, como produtividades agroindustriais e ampla adaptabilidade — foi, durante diversos anos, a mais plantada no Brasil, entre os anos de 1995 e 2005, ocupando mais de 20% da área cultivada (Barbosa, 2014; Braga Junior et al., 2017). A partir de 2005, outra variedade também da Ridesa, a RB867515, tem se destacado como a variedade mais cultivada no País (Landell; Bressiani, 2008) e, segundo Braga Junior et al. (2021), manteve essa posição na safra 2019/2020.

Em 2003, foi criado programa de melhoramento genético da CanaVialis, grupo privado (inicialmente Votorantim e depois Monsanto, em 2008), que permaneceu ativo até 2015, com foco na viabilidade econômica sustentada pela política de royalties, criada no País em 1997.

Também, buscando esta sustentabilidade econômica, a Copersucar, no ano de 2004, transformou o CTC num centro de pesquisa independente, que atualmente produz as variedades de sigla CTC (Revista Variedades CTC, 2011; Centro de Tecnologia Canavieira, 2013).

Em 2012, foi criado o programa de melhoramento genético da Granbio, grupo privado voltado para a produção de etanol e bioquímicos de segunda geração, com foco no desenvolvimento de cultivares de cana energia dos tipos 1 e 2, com a sigla Vertix.

Graças ao alto potencial produtivo dos programas de melhoramento existentes no Brasil, é grande o número de cultivares de cana-de-açúcar em cultivo, o que permite a disponibilidade de cultivares adaptadas às condições específicas de solo, clima, época de colheita e manejo agrônomico. Conforme dados da Tabela 3.2, em 21 anos, um total de 171 novas cultivares de cana-de-açúcar foram liberadas pelos programas de melhoramento do IAC, CTC, RB, CV e Vertix (Brasil, 2022).

A diversidade de cultivares oferecida aos produtores permite restrição natural e estratégica

Tabela 3.2. Cultivares de cana-de-açúcar lançados no período 2001 a 2021 no Brasil.

Período	IAC	Ridesa	Copersucar/CTC	CanaVialis/Syngenta	BioVertis/Vignis
2001 a 2010		2001: RB845197, RB845210, RB855036, RB865230, RB928064			
	2002: IAC86-2480	2003: RB858927, RB92579, RB93509, RB931530	2003: SP89-1115, SP90-1638, SP90-3414, SP91-1049	–	–
		2005: RB932520, RB943365, RB943538			
	2004: IAC91-2195, IAC91-2218, IAC91-5155, IACSP93-6006	2006: RB925211, RB925268, RB925345, RB935744	2005 e 2006: CTC1, CTC2, CTC3, CTC4, CTC5, CTC6, CTC7, CTC8, CTC9	–	–
	2005: IACSP93-3046, IACSP94-2094, IACSP94-2101, IACSP94-4004	–	2007 e 2008: CTC10, CTC11, CTC12, CTC13, CTC14, CTC15, CTC16, CTC17, CTC18	2009: CVS Grow, CVS Pegaso	–
	2010: IACSP93-2060, IACSP95-3028, IACSP95-5000, IACSP95-5094	–	2009: CTC19, CTC20 2010: CTC21, CTC22	–	–

Continua...

Tabela 3.2. Continuação.

Período	IAC	Ridesa	Copersucar/CTC	CanaVialis/Syngenta	BioVertis/Vignis
2011 a 2015		2010: RB937570, RB946903, RB956911, RB966928, RB965902, RB965917, RB931003, RB931011, RB951541, RB98710, RB99395, RB962962, RB002504			
	2012: IACSP96-2042, IACSP963060	2015: RB036066, RB036088, RB036091, RB961552, RB991536, RB992506, RB002754, RB975201, RB975242, RB975952, RB985476, RB987935, RB988082, RB969017, RB034045	2011: CTC23, CTC24	2013: CV6654, CV7231, CV0470	–
				2014: CV0618, CV4355, CV6945, CV6984, CV7107, CV7809, CV8091	2014: VG11145, VG1126,
	2014: IACSP967569, IACSP974039	–	2012: CTC9001, CTC9002, CTC9003		2015: Vignis 3, Vignis 4, Vignis 5, Vignis 6, Vignis 7
2016 a 2021	–	–	2013 a 2015: CTCE7, CTC25, CTC9004M, CTC9005HP	2015: CV7870, CV2546	2016: Vertex 1, Vertex 2

Continua...

quanto à área plantada por uma única cultivar, possibilitando uma redução da exposição aos riscos econômicos oriundos de possíveis epidemias. Como citou-se o que ocorreu na Austrália, entre 1999 e 2001, com a cultivar Q124 que ocupava 88% da região central de Queensland

e que, com o advento de uma nova raça da ferrugem conhecida como alaranjada (*Puccinia kuehnii*), manifestou uma grande susceptibilidade a esse patógeno, o que ocasionou perdas de aproximadamente 40% da produtividade agrícola nessa região.

Tabela 3.2. Continuação.

Período	IAC	Ridesa	Copersucar/CTC	CanaVialis/Syngenta	BioVertis/Vignis
2016 a 2021	2017: IACSP013127, IACSP015503	2021: RB006970, RB036152, RB056351, RB056380, RB961003, RB01494, RB011549, RB0442, RB07818, RB08791, RB943047, RB021754, RB041443, RB975033, RB975375, RB005014, RB015177, RB015935, RB987917, RB108519, RB064292	2017: CTC20BT	–	2017: Vertex 3, Vertex 4, Vertex 5, Vertex 6, Vertex 7, Vertex 8, Vertex 9, Vignis 8, Vignis 9
		–	–	–	2018: Vignis 11, Vignis 12, Vignis 13
		2019: IACCTC058069, IACCTC078008, IACCTC078044	–	2019: CTC9001BT	2019: SYN09 146, SYN09 114
	2020: IACSP046007	–	2020: CTC26, CTC9006, CTC9007, CTC961007, CTC022994, CTC9003BT, CTC7515BT	–	2020: Vertex 10, Vertex 11
Total	23	65	44	16	23

Fonte: Brasil (2022).

A sustentabilidade da produção agrícola da cana-de-açúcar no Brasil está fundamentada na capacidade das plantas em responder a pragas, doenças, variações climáticas, edáficas e questões nutricionais. Isso tem sido possível pela introdução contínua de variedades resistentes e adaptadas a diferentes condições climáticas e edáficas. Para tal, o melhoramento genético é a principal área do conhecimento agrícola e é fun-

damental para reduzir custos, trazer eficiência e aumentar produtividade (Souza Junior, 1995).

Assim, mais de 500 variedades de cana-de-açúcar aparecem em cadastros de áreas de cultivo no Brasil, considerando todas aquelas catalogadas em alguma unidade de produção no Brasil, e observa-se na Tabela 3.2 que 90 foram liberadas nos últimos 10 anos (Brasil, 2022). Mesmo que a área cultivada seja predominante para não mais do que 20 cultivares, a substituição e o aumento da

diversificação de variedades não só permitiram aumentos consideráveis de produtividade, como também conferiram segurança quanto à maior resistência a pragas e doenças que eram dizimadoras no passado (Moore, 1987; Macedo, 2005).

Os programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar conduzidos em diversos países, de forma geral, têm atualizado genética e tecnologias, sendo responsáveis por adaptações às novas demandas da agricultura e da indústria, aplicando estratégias de hibridação e seleção diferenciadas, associadas ao crescente uso de ferramentas de biotecnologia, como marcadores moleculares e transgenia. São eles que — atentos às novas demandas da canavicultura e, mais recentemente

ao mercado de energias renováveis — lançam-se no exercício de construir os cenários de médio e longo prazo, equivalente ao seu ciclo de produção tecnológica (Landell; Bressiani, 2008).

Caracterização botânica e varietal

Botânica da parte aérea

A parte aérea da cana-de-açúcar é basicamente formada pelo colmo e folhas que compõem a parte vegetativa (Figura 3.2) e as inflorescências que representam a parte reprodutiva. O colmo é geralmente cilíndrico, colorido e formado por

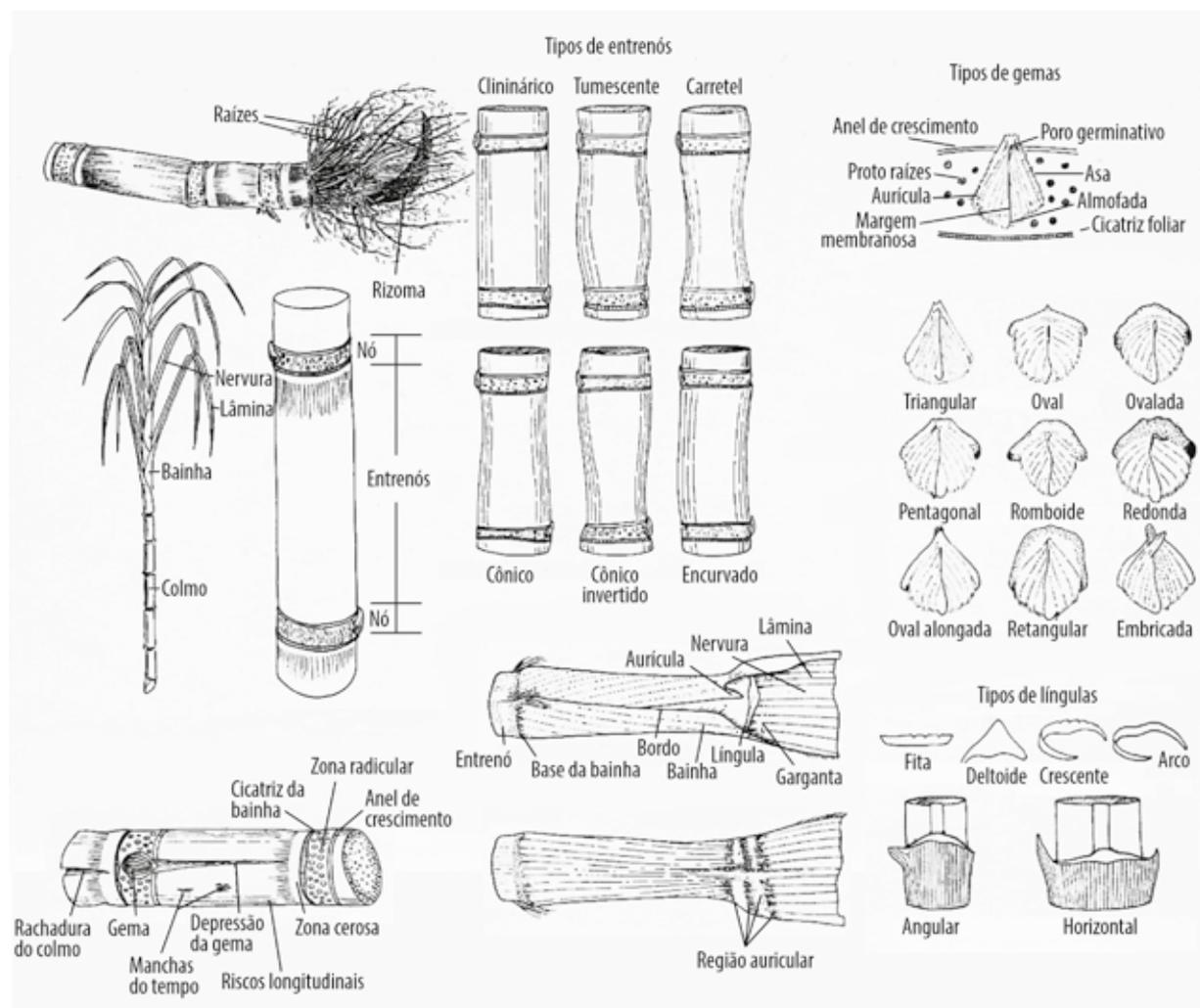


Figura 3.2. Parte aérea de cana-de-açúcar apresentando órgãos vegetativos, como colmos (nós e entrenós), folhas e bainhas.

Fonte: Adaptado de Segalla (1964).

duas partes, nó e entrenó, também chamado de internódio ou gomo. Seu diâmetro varia com a variedade e nutrição da cana. No nó, encontram-se a cicatriz foliar, a gema e a zona radicular, e o anel de crescimento.

A cicatriz foliar é a base de inserção da bainha da folha no colmo e pode ser saliente, reentrante, horizontal, inclinada e glabra. Ademais, pode estar situada no mesmo plano do nó; e possuir pelos.

As gemas que ficam localizadas na zona radicular são dispostas alternadamente no colmo, uma em cada nó. Possuem as mais variadas formas e tamanhos, podendo ou não apresentar asas e pelos. Sua classificação em tamanho relaciona-se com o anel de crescimento. São ditas pequenas quando não o atingem, médias quando chegam até ele e grandes quando ultrapassam o anel de crescimento. É na gema que se localiza o poro germinativo ou ponto germinal de onde emerge o broto. Dependendo da variedade, esse poro pode ser apical, subapical ou dorsal.

A zona radicular se encontra entre a cicatriz foliar (abaixo) e o anel de crescimento (acima), podendo ter cores variando do amarelo/verde ao roxo. O número de pontos (broto-raízes) é variável com a variedade e podem apresentar-se dispostos em linhas ou irregularmente.

No entrenó estão situados o anel de crescimento, a zona cerosa e o sulco ou depressão da gema. Os entrenós podem ser cilíndricos, em forma de barril ou tumescentes, com depressões no meio, encurvados, mais largos na base que no ápice ou o inverso. Adicionalmente, os entrenós podem apresentar listas verticais de cores diferentes e estar ou não revestidos com cera. O anel de crescimento e a zona cerosa apresentam espessura variável.

As características das gemas, juntamente com a cor e diâmetro do colmo, bem como o formato e a disposição dos entrenós, constituem caracte-

terísticas importantes na diferenciação de variedades (Figura 3.3).



Foto: Zanone Fraissat

Figura 3.3. Características de colmos de diferentes variedades de cana-de-açúcar.

Em plantas adultas, cessado o perfilhamento, tem-se a formação de touceiras, cujos colmos são dispostos de forma densa, média ou frouxa (Figura 3.4).

As folhas são órgãos responsáveis fundamentalmente pela fotossíntese, respiração e transpiração. Estão localizadas no colmo, alternadamente, uma para cada entrenó e se dividem em duas partes: bainha e folha propriamente dita. A bainha é que sustenta e fixa a folha no colmo. Seus bordos se sobrepõem na parte inferior, permanecendo um pouco abertos na parte superior. Nela se distinguem duas partes: a bainha propriamente dita e a zona de união com a folha (Figura 3.5).

A bainha propriamente dita é geralmente de cor verde, porém menos intenso que as folhas. Dependendo da variedade, pode apresentar, na face externa, coloração arroxeada, avermelhada ou manchas escuras. A face interna é branca amarelada com estrias longitudinais. A bainha, dependendo da presença ou não de cera, pode ser glauca e não glauca.

A zona de união com a folha encontra-se na parte superior da bainha e compreende a garganta, o colo, a lígula e as aurículas (Figura 3.5). A garganta, ou colar, é uma zona descolorida na face interna da axila da folha, onde se liga com a

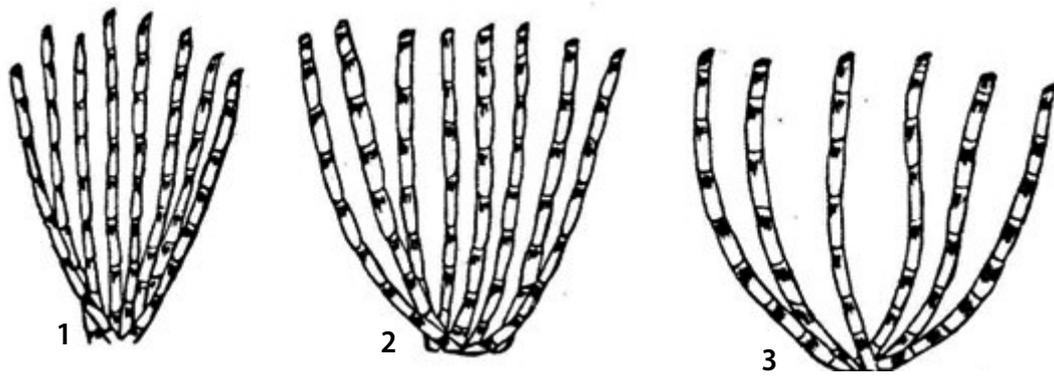


Figura 3.4. Formação de touceiras de cana-de-açúcar, com disposição de colmos de forma densa (1), média (2) e frouxa (3).

Fonte: Casagrande (1991).

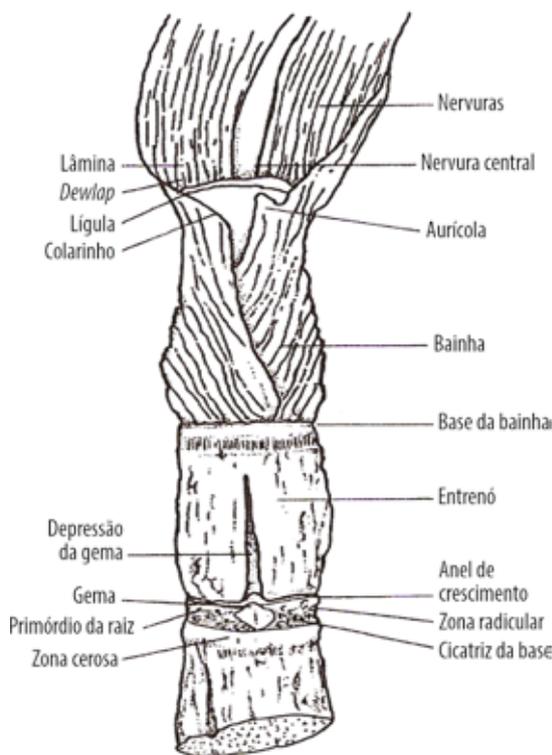


Figura 3.5. Representação esquemática da folha e sua inserção no colmo.

Fonte: Adaptado de Bacchi (1983).

bainha. O colo, ou região auricular, localiza-se na fase externa da zona de união com a folha que pode ou não alcançar a nervura central. A lígula é uma membrana circular curta que envolve o colmo na base da folha. As aurículas são lóbulos triangulares localizados nas extremidades superiores da bainha.

A folha propriamente dita apresenta comprimento e largura variáveis de acordo com os gêneros, o desenvolvimento da planta e sua localização no colmo. Seu afastamento do colmo forma o que se chama de ângulo de nobreza. Sua disposição é variável, podendo ser de arquitetura erectófila, intermediária ou mesófila e planófila (Figura 3.6).

A folha compreende duas partes, a lâmina e a nervura central, que a divide longitudinalmente em duas porções. As margens ou bordos normalmente são serrilhados e sua união constitui o ápice da folha.

Segundo Fauconnier e Bassereau (1975), a cana-de-açúcar, em seu estágio de máximo desenvolvimento, apresenta uma área foliar que corresponde a aproximadamente sete vezes a área de solo ocupada. Essa característica possibilita que a cultura se relacione intensamente com o

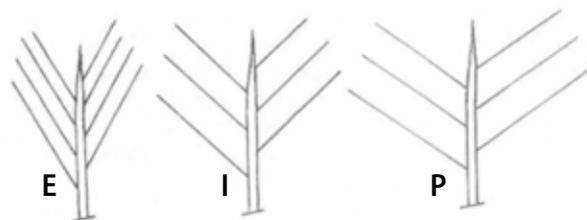


Figura 3.6. Arquitetura foliar do capitel de cana-de-açúcar, mostrando plantas erectófilas (E), intermediárias ou mesófilas (I) e planófilas (P).

Fonte: Adaptado de Câmara (1993).

ambiente, principalmente no que diz respeito à capacidade fotossintética.

Para padronizar estudos de crescimento e nutrição de plantas, por exemplo, identificar folhas índices ou diagnósticas, as folhas podem ser ordenadas de cima para baixo, cabendo-lhes uma numeração que as identifique.

Algumas características relacionadas com componentes vegetativos da cana-de-açúcar são efetivamente correlacionadas com a capacidade fotossintética e de produção. Por exemplo, o índice de área foliar (IAF) se relaciona com a produtividade, potencializando seu efeito, bem antes de alcançar o patamar de sua máxima expressão (Figura 3.7).

Assim, outras características que são desejáveis no perfilhamento, nas folhas e nos colmos podem significativamente influenciar o IAF e, conseqüentemente, a produtividade da cana-de-açúcar (Tabela 3.3).

A parte reprodutiva da cana-de-açúcar é basicamente formada pelas inflorescências e órgãos reprodutivos (Figura 3.8).

A inflorescência da cana-de-açúcar é uma panícula aberta denominada de flecha. Pode ser curta, comprida, larga, estreita em forma de pirâmide ou cilíndrica. O eixo principal da inflorescência, denominado raquis, é cilíndrico, diminuindo gradualmente seu diâmetro da base para o ápice. É um prolongamento do último entrenó do colmo. Nas ramificações do raquis, localizam-se as “espiguetas”, dispostas aos pares, sendo uma sésil e outra pedicelada. Cada “espiguetas” contém uma flor.

A flor da cana-de-açúcar é hermafrodita. O ovário tem forma ovalada, apresentando em sua extremidade dois pistilos terminados por estigmas plumosos. No ovário há um só óvulo, ligado à parede do ovário por uma placenta larga. O órgão masculino é constituído por três

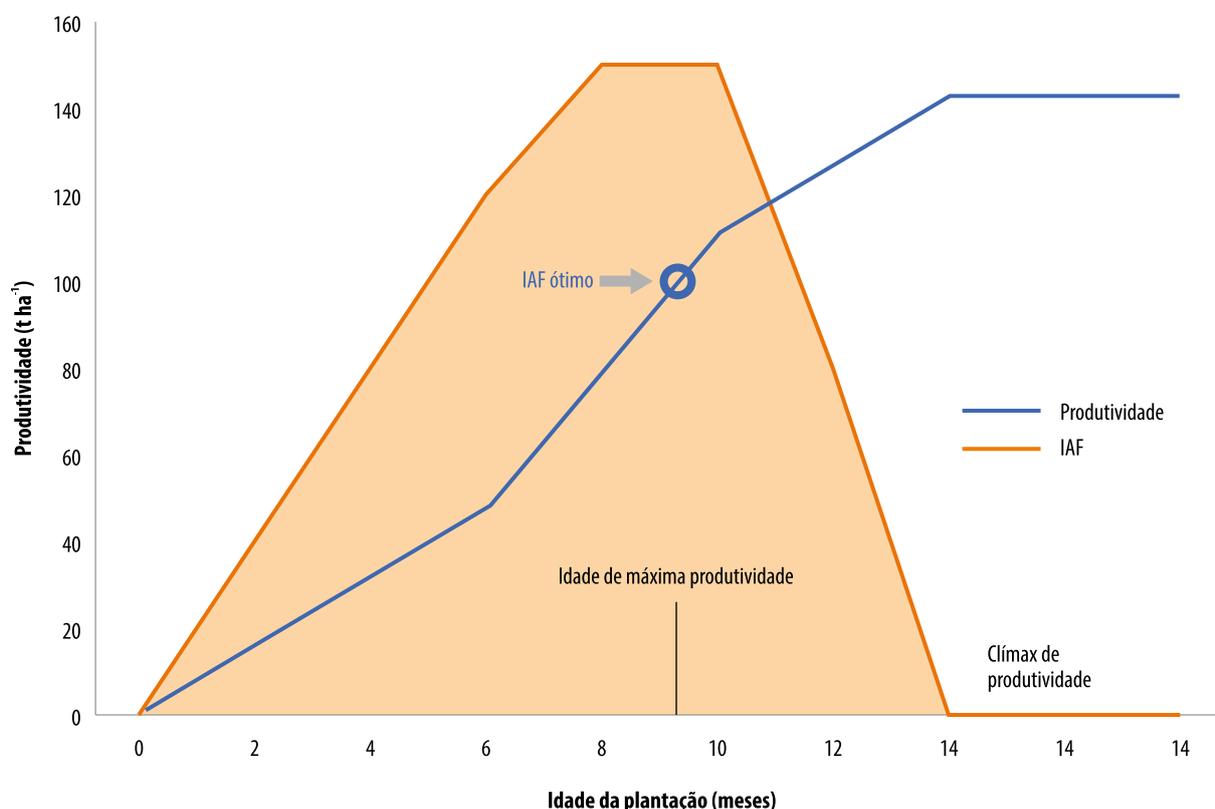


Figura 3.7. Índice de área foliar (IAF) e produtividade em função da idade da planta.

Fonte: Adaptado de Castro (2000).

Tabela 3.3. Componentes da parte aérea de cana-de-açúcar e características morfológicas desejáveis para obtenção de elevadas produtividades.

Componente da parte aérea	Característica desejável	Efeito na fotossíntese e na produtividade
Perfilho	Vertical e plantas erectófilas	Melhor distribuição de luz
	Alto perfilhamento	Rápido desenvolvimento do IAF
Folha	Espessa	Hábito mais ereto
	Curta e pequena	Associada a hábito mais ereto
	Ereta	Melhor distribuição de luz
Colmo	Dreno para sacarose	Alta produtividade
	Firme	Prevenção de acamamento

Fonte: Adaptado de Castro (2000).

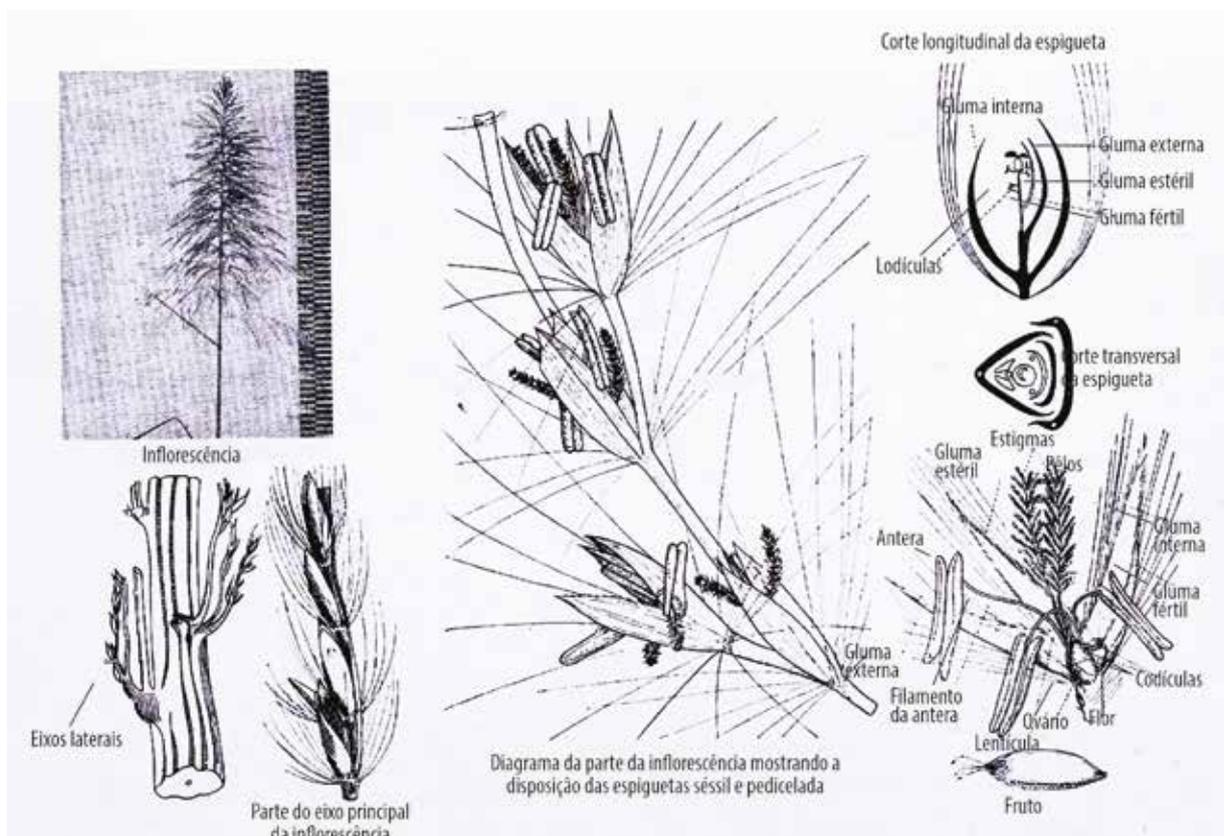


Figura 3.8. Parte reprodutiva de cana-de-açúcar apresentando órgãos reprodutivos, como inflorescência, flor e fruto.

Fonte: Adaptado de Segalla (1964).

estames. Cada estame sustenta uma antera linear fixa pelo dorso. As anteras estão divididas em dois lóbulos por uma depressão longitudinal que constitui a linha de abertura por ocasião de

sua maturação. As flores estão protegidas por duas brácteas, constituindo as glumas externa e interna. Dentro da gluma interna, na base da flor, existem duas lodículas ou glumelas que

constituem os vestígios do perianto e que, ao se intumescerem, provocam a abertura da flor.

Os grãos de pólen são esféricos, quando férteis, e prismáticos, quando inférteis. No pólen, encontra-se o poro germinativo, contendo em seu interior a massa protoplasmática, onde se localiza o núcleo vegetativo de forma esférica e o núcleo germinativo, alongado.

O fruto de cana-de-açúcar é uma cariopse de forma elíptica alongada. Na região do embrião, apresenta-se uma depressão, onde se localiza a cicatriz da semente e, do lado oposto, se localizam os resíduos do pistilo.

Botânica da parte radicular

Os sistemas radiculares vegetais têm sido, ultimamente, bastante estudados, por meio de estudos e metodologias que permitem se obter conclusões mais exatas sobre formatos, desenvolvimento e funções. Pesquisadores como Böhm (1979), Brown e Upchurch (1987), Persson (1990) e Majdi et al. (1992) destacaram-se

pela descrição dessas metodologias e permitiram, assim, que as raízes fossem morfológica e fisiologicamente mais compreendidas dentro do sistema solo/planta para muitas culturas de importância mundial.

Trabalhos pioneiros na década de 1920, como os de Weaver (1926) e Weaver e Bruner (1927), que tratavam do desenvolvimento de raízes, foram condicionantes para o estabelecimento de conceitos a respeito desse órgão de múltiplas funções.

Na realização de suas funções, as raízes crescem e exploram o solo, que pode oferecer restrições físicas e/ou químicas consideráveis (Figura 3.9). Particularmente, no caso da cana-de-açúcar, restrições físicas ao desenvolvimento de raízes de cana-soca são largamente referenciadas na literatura nacional e internacional, podendo explicar, em parte, a diferença na dinâmica de crescimento em relação à cana-planta.

Na cultura da cana-de-açúcar, estudos desse tema só foram pioneiramente iniciados por

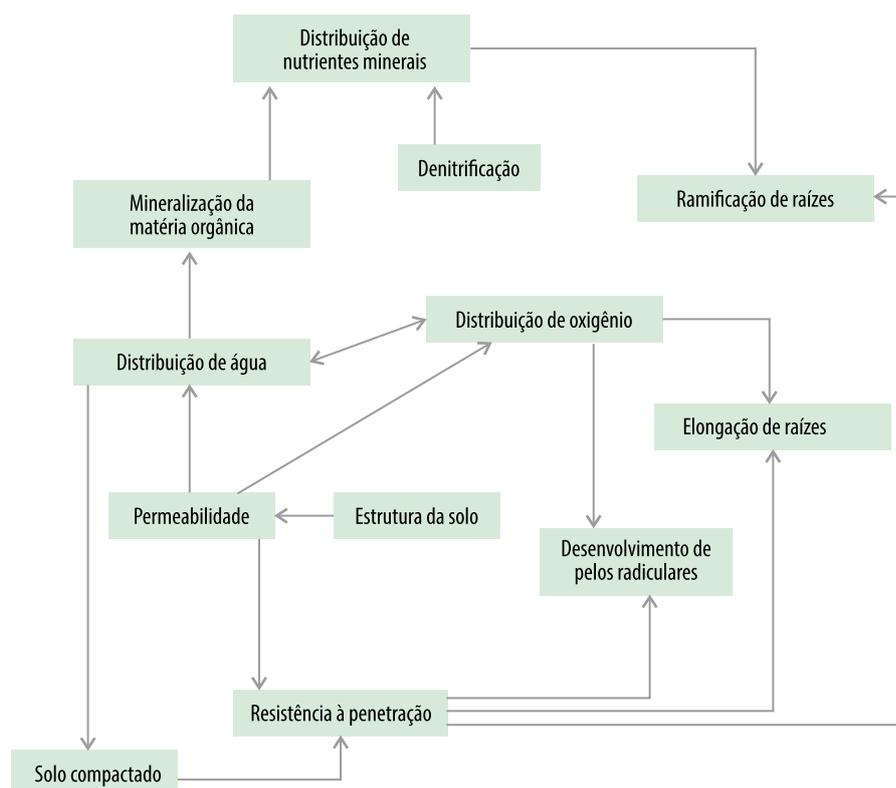


Figura 3.9. Influências das condições físico-químicas e estrutura do solo em características de crescimento de raízes.

Fonte: Adaptado de Goss et al. (1993).

Evans, em 1935, em Mauritius, com a publicação de dois trabalhos intitulados *Investigation on the root system of sugarcane varieties* e *The root system of the sugarcane. I. Methods of study*, ambos publicados como Boletim Técnico da revista *Sugar Cane Research* (Dillewijn, 1952).

O acesso aos resultados dessas publicações só foi possível por meio das revisões de Dillewijn (1952) e Humbert (1968) sobre o assunto. No Brasil, o primeiro trabalho que estudou a distribuição do sistema radicular em cana-de-açúcar no campo foi o dos pesquisadores Inforzato e Alvarez (1957), utilizando uma metodologia aplicada para café por Franco e Inforzato (1946), adaptando-a convenientemente à cana-de-açúcar. Posteriormente, na década de 1980, Ide (1981) e Korndörfer et al. (1989) voltaram a estudar a distribuição de raízes de cana-de-açúcar nos diferentes solos. Recentemente, Vasconcelos et al. (2003) e Faroni e Trivelin (2006) estudaram diferentes métodos de avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar, influenciando os trabalhos desenvolvidos por Otto (2007) e Rocha (2007). Nesses trabalhos, as pesquisas envolvem este órgão como característica de avaliação em resposta a tratamentos aplicados, como fertilizações, manejo de cultura e aplicação de corretivos.

Morfologicamente, quando uma estaca de cana-de-açúcar, comumente denominada de tolete, é posta em contato com o solo, inicia-se o desenvolvimento de dois tipos de raízes. As primárias são provenientes da estaca original e funcionam por um período curto de tempo até que as raízes secundárias se estabeleçam (Figura 3.10). Diferentemente das primárias, as raízes secundárias se originam das novas brotações ou perfilhos, que crescem a partir de gemas basais do estolho oriundo da estaca original. As raízes secundárias são mais grossas, vigorosas, menos fibrosas e mais leves. No entanto, segun-

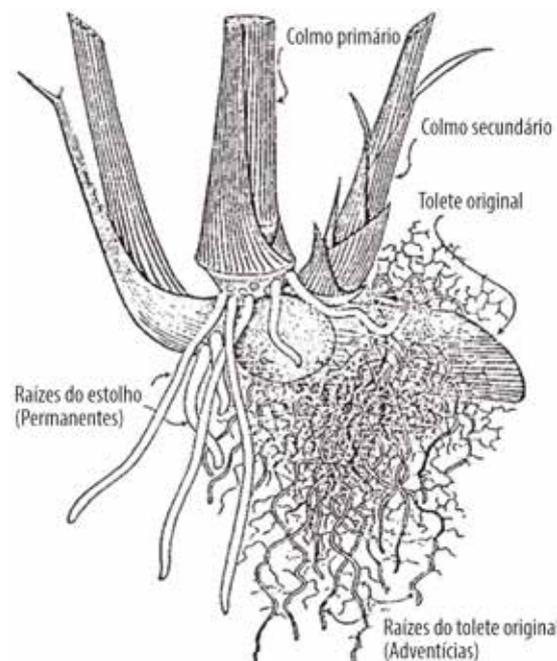


Figura 3.10. Representação esquemática da origem de raízes primárias e secundárias oriundas, respectivamente, da estaca original e dos novos brotos ou perfilhos (estolho).

Fonte: Adaptado de Dillewijn (1952).

do Dillewijn (1952), inicialmente, ambos os tipos de raízes são fundamentalmente idênticos.

Segundo Humbert (1968), após o corte da cana por ocasião da colheita, a soca se nutre, inicialmente, por intermédio do sistema radicular das plantas anteriormente colhidas, até que um novo sistema de raízes se adéque e cresça, sendo capaz de absorver água e nutrientes para o desenvolvimento da nova planta. As raízes velhas tornam-se escuras e vão sendo cada vez menos efetivas, finalmente morrem e se desintegram.

A substituição de raízes primárias por secundárias foi muito estudada por pesquisadores na Índia e no Havaí. Os pesquisadores encontraram que, nas idades de 37, 58, 81 e 104 dias após o plantio de cana-planta, o peso seco em gramas das raízes primárias foi de 0,8, 0,7, 0,4 e 0,1 g, respectivamente. O das raízes secundárias foi de 3,0, 12,0, 20,0 e 27,0 g. Os pesquisadores mostram que as raízes primárias, por si só, fornecem os nutrientes necessários para o primeiro mês,

após a germinação. Entre o primeiro mês e o final do segundo, há um período de transição, durante o qual a capacidade de suprimento é transferida das raízes primárias para as secundárias. Do final do terceiro mês em diante, a capacidade de suprimento de nutrientes é quase que totalmente dependente das raízes secundárias. É muito relevante, também, os dados desses pesquisadores em que a aplicação de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) a um solo deficiente nesses nutrientes fez decrescer o peso de raízes primárias, enquanto aumentou consideravelmente o de raízes secundárias. (Venkatraman; Thomas, 1922; Dillewijn, 1952).

A dinâmica de raízes em cana-planta mostra uma marcante influência dos nutrientes do solo no estabelecimento mais rápido de um sistema radicular mais eficiente para absorção e, conseqüentemente, para o desenvolvimento da planta de cana-de-açúcar. Após o estabelecimento completo do sistema radicular, Dillewijn (1952)

descreve três tipos básicos de raízes na cana-de-açúcar: a) raízes superficiais, ramificadas e absorventes; b) raízes de fixação, mais profundas; e c) raízes do tipo cordão, que podem atingir até 6 m de profundidade (Figura 3.11).

Sob condições favoráveis de água e nutrientes, o sistema radicular superficial é responsável por grande parte do processo de absorção. No entanto, sob condições de estresse, essas raízes perdem praticamente sua atividade, passando, então, para o sistema radicular mais profundo, a responsabilidade pela absorção de água e nutrientes. Dillewijn (1952) destaca, ainda, que o peso médio das raízes superficiais, ramificadas e absorventes foi de, aproximadamente, 1,5 kg por planta.

As raízes de sustentação sofrem, frequentemente, distorções em vários planos, aparentemente ajustando seu crescimento para, dessa forma, poder penetrar com facilidade em solos sob es-

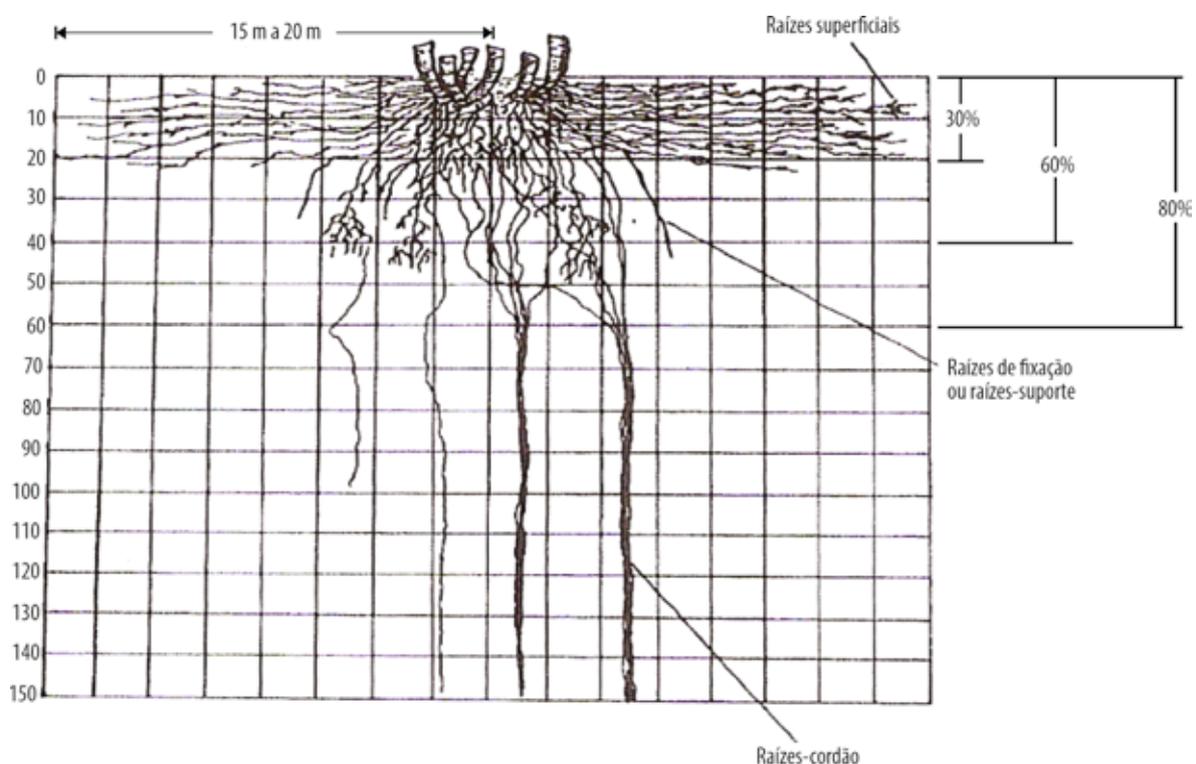


Figura 3.11. Sistema radicular de cana-de-açúcar mostrando os diferentes tipos de raízes: raízes superficiais, raízes de sustentação e raízes do tipo cordão.

Fonte: Adaptado de Dillewijn (1952).

trêsse hídrico. Pela sua direção de crescimento, natureza de suas ramificações e sua localização no subsolo, normalmente pobre em nutrientes, se conclui que sua função principal é de sustentação, apesar de que elas, indubitavelmente, podem absorver água e nutrientes, sendo esta função ainda mais pronunciada em condições de estresse hídrico e nutricional. Dillewijn (1952) determinou que o peso médio das raízes de sustentação é de, aproximadamente, 3,0 kg por planta, sendo, portanto, o dobro daquele determinado para as raízes superficiais.

O sistema de raízes em forma de cordão e outras raízes profundas é caracterizado pelo fato de que elas crescem verticalmente e formam feixes que podem conter 15 a 20 raízes. Dillewijn (1952) mostra que essas raízes podem atingir uma profundidade de 5 a 7 m, sendo responsáveis por um poder de absorção muito vigoroso, fazendo com que a planta resista a períodos longos de estresse hídrico.

O sistema radicular da cana-soca é mais superficial do que da cana-planta, no mínimo, até onde o sistema absorvente é considerado. Isso está associado com o fato de que a parte aérea da cana-soca origina-se a um nível mais alto do que na cana de primeiro ano (Figura 3.12).

Dillewijn (1952) descreve que — examinando o sistema radicular superficial de um campo de soqueira, uma semana após a colheita da cana-planta — percebeu que o solo, nas entrelinhas, estava completamente ramificado pelas raízes das plantas recentemente colhidas (Figura 3.13). A quantidade de ramificação mostrou-se maior nas entrelinhas do que próximo aos brotos. Em profundidade a partir de 15 cm, as superfícies das raízes apresentavam-se escuras e não possuíam pelos absorventes, contrastando com a exuberante quantidade de pelos encontrados nos primeiros 15 cm superficiais.

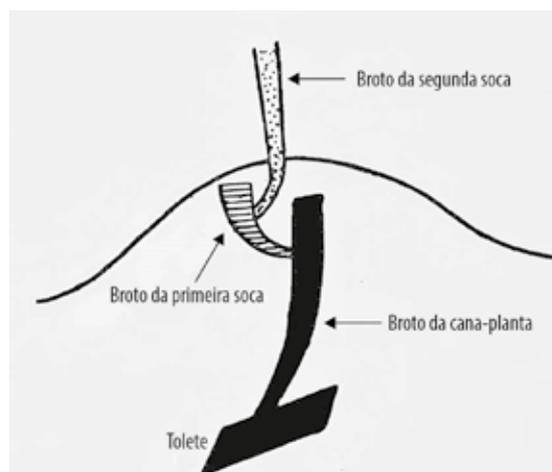


Figura 3.12. Ilustração do fato de que os ramos de cultivos sucessivos de soqueiras originam-se a níveis mais altos do que àquele da cana-planta original.

Fonte: Adaptado de Dillewijn (1952).

Essas observações mostram que, pelo menos no início do seu desenvolvimento, a cana-soca tem um poder limitado de absorção por explorar um volume de solo bastante reduzido. Outras observações de Dillewijn (1952), de fundamental importância para se entender a dinâmica de raízes em cana-soca, foram as que mostram uma considerável quantidade de raízes ativas da cana-planta após a colheita, estendendo-se por um período de até 3 meses.

Desse modo, pode-se esperar que o desenvolvimento do cultivo da soqueira tenha a vantagem do sistema radicular herdado da cana-planta pela formação de novas radículas sobre a estrutura principal previamente formada.

No entanto, isso ocorre durante um limitado intervalo de tempo, porque o sistema radicular velho passa a ser inativo e se degenera, enquanto um sistema de raízes completamente renovado é formado pelo desenvolvimento dos ramos da cana-soca. Porém, esse processo de substituição é gradual, com as raízes mais velhas herdadas do cultivo anterior funcionando lado a lado com as novas raízes emitidas pela soca. Dillewijn (1952) postula que há evidências de que as raízes mais

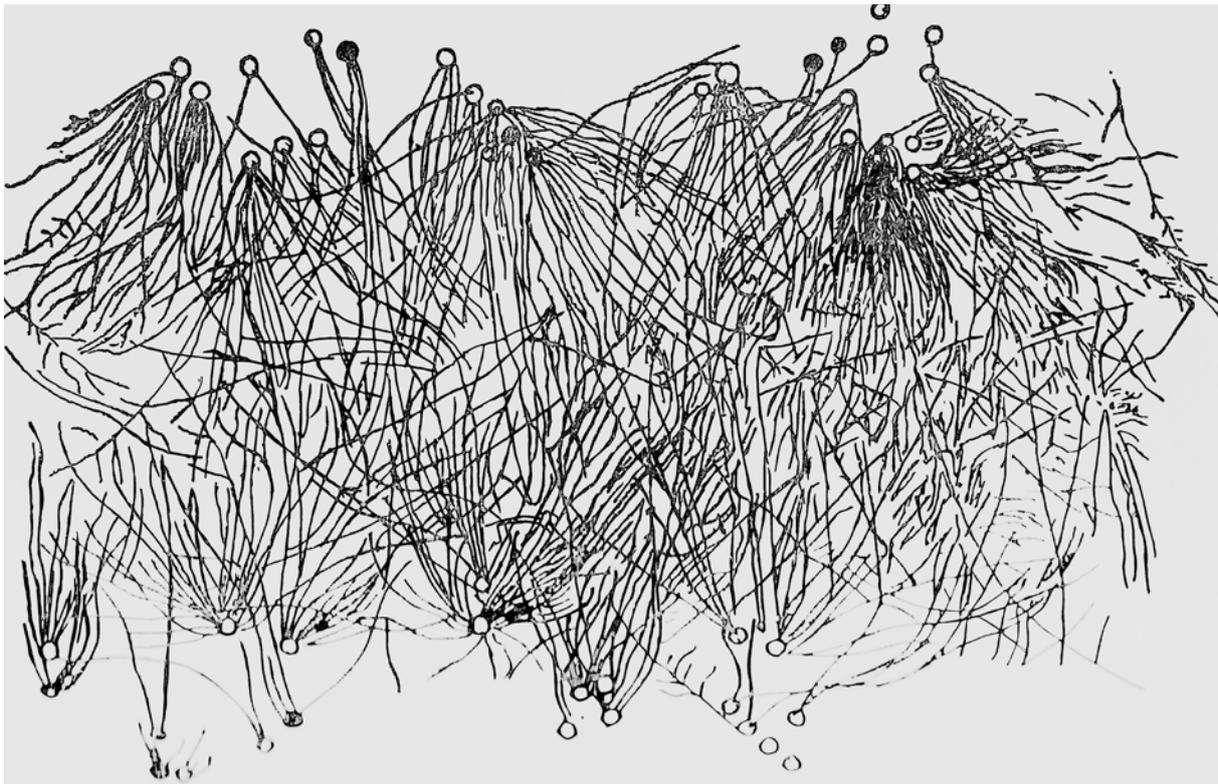


Figura 3.13. Distribuição de raízes na entrelinha de soqueira uma semana após o corte da cana-planta, mostrando um plano de raízes de até 15 cm de profundidade.

Fonte: Adaptado de Dillewijn (1952).

profundas da cana-planta permanecem ativas por um período ainda mais longo de tempo do que as superficiais.

Inforzato e Alvarez (1957), estudando a distribuição do sistema radicular de cana-de-açúcar aos 6, 12 e 18 meses, mostraram que a distribuição de raízes foi homogênea nas diferentes camadas de solo (Tabela 3.4). Os autores afirmam, também, que a maior concentração de raízes se deu nos primeiros 30 cm, com uma média, nas três idades, de 59,3%. No entanto, os dados mostram uma redução sistemática no peso de raízes em profundidade.

Por sua vez, se considerarmos, para este caso, peso como indicador de quantidade, na profundidade de 10 a 20 cm, é onde se encontra a maior concentração de raízes (peso por unidade de camada) em todas as idades estudadas, ou seja, 33,45, 180,50 e 208,00 g de raízes aos

6, 12 e 18 meses, respectivamente. A partir dessa profundidade, há uma redução sistemática no peso de raízes e/ou na quantidade. No entanto, o cálculo da média, acumulada até os 20 cm para as três idades, corresponde a 47,9%. Esse número poderia ser muito maior se não fosse o baixo acúmulo de raízes até os 20 cm iniciais de solo, que poderá ter sido proporcionado por um crescimento inicial de raízes mais pesadas e menos ativas.

Essa discussão é oportuna para que se possa questionar a que profundidade se deve amostrar um cultivo de cana-de-açúcar com o objetivo de recomendar corretivos e fertilizantes. Os dados de Inforzato e Alvarez (1957) sugerem que, como a maior concentração de raízes se encontra até 30 cm de profundidade, então, a amostragem, inquestionavelmente, teria de ser até essa profundidade. No entanto, o maior peso de raízes por volume de solo ocorreu até

Tabela 3.4. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em três idades, em Argissolo escuro do estado de São Paulo.

Profundidade (cm)	6 meses			12 meses			18 meses		
	Por camada		Acumulado	Por camada		Acumulado	Por camada		Acumulado
	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)
0–10	30,95	14,40	–	404,00	41,80	–	168,00	23,80	–
10–20	33,45	15,50	29,90	180,50	18,70	60,50	208,00	29,50	53,30
20–30	23,75	11,00	40,90	101,70	10,50	71,00	90,00	12,70	63,00
30–50	24,60	11,40	52,30	49,20	5,10	76,10	68,00	9,60	75,60
50–70	22,50	10,50	62,80	43,60	4,50	80,60	36,00	5,10	80,70
70–90	17,50	8,10	70,90	49,00	5,10	85,70	28,40	4,00	84,70
90–110	15,00	7,00	77,90	29,80	3,10	88,80	25,80	3,70	88,40
110–130	12,50	5,80	83,70	27,90	2,90	91,70	20,45	2,90	91,30
130–150	11,25	5,20	88,90	24,30	2,50	94,20	17,25	2,40	93,70
150–170	7,65	3,60	92,50	21,00	2,20	96,40	16,45	2,30	96,00
170–190	8,30	3,90	96,40	19,00	2,00	98,40	14,20	2,00	98,00
190–210	7,65	3,60	100,00	15,50	1,60	100,00	13,70	1,90	99,90
Total	215,10	–	–	965,50	–	–	706,20	–	–

Fonte: Inforzato e Alvarez (1957).

os 20 cm, o que poderia sugerir uma amostragem um tanto quanto segura nessa profundidade, como ainda é prática comum em algumas regiões canavieiras do País. Peso, entretanto, não pode ser sinônimo de quantidade e nem tão pouco de atividade, não justificando, então, amostragens nessa profundidade. Inforzato e Alvarez (1957) observaram, ainda, que, aos 6 meses, as raízes foram além de 2,10 m de profundidade, atingindo 3,30 m na planta adulta, ou seja, aos 18 meses de idade. O máximo de raízes vivas foi encontrado aos 12 meses, período de intenso crescimento da planta e, uma mortalidade acentuada aos 18 meses, principalmente nas camadas superficiais.

Os autores calcularam a quantidade de raízes que a cultura da cana-de-açúcar deixa incorporada ao solo após o corte da cana-planta e encontraram que, para uma produtividade final de 100 t ha⁻¹, aos 6 meses de idade, a cultura forne-

ce 1,8 t ha⁻¹ de raízes, atingindo, no final do ciclo, 8,0 t ha⁻¹. Esses números são muito significativos, principalmente no que diz respeito à ciclagem de nutrientes em cultivos sucessivos como o da cana-de-açúcar. Ao estudar a distribuição do sistema radicular das canas planta e soca, algumas diferenças foram claramente perceptíveis, principalmente do ponto de vista morfológico, que por si só refletem toda uma estrutura diferenciada na aquisição de água e nutrientes, especialmente em cana-soca. Morfologicamente, a soca leva uma teórica desvantagem para a cana-planta, pela superficialidade de seu sistema radicular, sendo, portanto, mais vulnerável às situações inesperadas de estresse. Adicionalmente, é provável que condições físicas do solo desfavoráveis à soca pelo manejo intensivo na colheita da cana-planta e operações de cultivo subsequentes, conjuntamente, sejam responsáveis pelas diferenças na dinâmica de raízes

entre cultivos sucessivos de cana-de-açúcar, sendo uma das razões para as menores produtividades das socarias.

Basicamente, a formulação de duas hipóteses pode, até certo ponto, elucidar o problema. A partir do primeiro corte e, sucessivamente, como mostrou Dillewijn (1952), a rebrota ocorre sempre numa posição superior à do cultivo anterior, refletindo numa orientação do sistema radicular mais superficial, formando uma malha de raízes até 15 cm de profundidade (Figuras 3.11 e 3.12). Se a soca não aprofunda efetivamente seu sistema radicular para além dessa camada de solo, é possível que o aproveitamento de água e nutrientes fique limitado. Explorações mais profundas do solo ficam, então, restritas às velhas raízes do cultivo anterior que, gradualmente, vão perdendo sua atividade e, conseqüentemente, sua capacidade de absorção. Esse "turnover" de raízes em cana-de-açúcar pode se estender por um período de até 3 meses, em condições normais de cultivo (Dillewijn, 1952). Teoricamente, quanto mais rápida for essa renovação do sistema radicular, maior será a capacidade de suprimento das raízes para atender à demanda de água e nutrientes da parte aérea, pois velhas raízes perdem, com o tempo, sua atividade. Todavia, há variação na proporção entre raízes vivas e mortas durante o ano, sendo que, no período de colheita, existem mais raízes mortas.

Se a colheita da cana-soca ocorre com aproximadamente 12 meses, em um quarto desse tempo, parte da absorção radicular fica dependente de um velho e pouco eficiente sistema radicular. Sendo assim, não se poderia esperar uma manutenção, nem muito menos ganhos de produtividade, com os cultivos sucessivos da cana-de-açúcar. Foi observado ainda, por Sampaio e Salcedo (1987), que se deve dar maior importância ao sistema radicular que permite uma renovação de raízes, porque é ele que serve de

reserva de nutrientes para a rebrota das socas. Nota-se na literatura que, de um modo geral, a cana-soca possui maior volume de raízes, e a isso é atribuído mais pontos de emissão, porém mais superficiais e menos vigorosos (Sampaio; Salcedo, 1987).

Para minimizar esse período de "turnover", a fertilização parece desempenhar um papel fundamental, intensificando essa troca gradual de raízes pouco ativas por um novo e mais vigoroso sistema de absorção de água e nutrientes. Sendo assim, socas bem fertilizadas, muito provavelmente, renovarão seu sistema radicular com maior rapidez, atendendo, dessa forma, em tempo hábil, toda a demanda nutricional de crescimento. Após o corte da cana-planta e demais cortes, o sistema radicular antigo mantém-se ainda em atividade por algum tempo, período em que é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira, sendo esse processo lento e gradual. As raízes das soqueiras são mais superficiais do que as da cana-planta já que os perfilhos brotam mais próximos da superfície do solo, pelo mesmo fato de que quanto maior o número de cortes, mais superficial se torna o sistema radicular (Bacchi, 1983). E, segundo Vasconcelos (2002), além dos impedimentos de origem física no solo, devido ao acúmulo de tráfego durante os cortes, a queda na produtividade das soqueiras também ocorre por causa do sistema radicular mais superficial, e do maior estresse à medida que a planta entra no período mais frio e seco da safra, no outono e inverno.

No entanto, estudos que relacionem fertilização e "turnover" de raízes em cana-de-açúcar, com o objetivo de conhecer qual a contribuição nutricional do sistema radicular e do solo no desenvolvimento e crescimento de brotações de cana-soca não foram pesquisados, como no caso de brotações de *Eucalyptus*, particularmente nos trabalhos de Martins (1995) e Teixeira (1996). O conhecimento desses processos,

certamente, proporcionará subsídios necessários para um manejo mais adequado da cana-soca e, conseqüentemente, incrementos significativos de produtividade.

Uma segunda hipótese, que se relaciona mais com o manejo da cultura, diz respeito à compactação de solos sob soqueiras, interferindo diretamente na distribuição do sistema radicular. Se, em cana-planta de 18 meses, Inforzato e Alvarez (1957) mostraram que a maior concentração de raízes se encontra até 30 cm de profundidade, em cana-soca, é provável que essa concentração ocorra a profundidades menores. De fato, nas pesquisas de Dillewijn (1952), parece que a concentração mais efetiva ocorre até 15 cm. Num sistema radicular a essa profundidade e com todo um tráfego de maquinaria agrícola sobre ele, é evidente a marcante influência da compactação na atividade das raízes. Portanto, ressalta-se que, a cada corte/colheita no seu ciclo de produção, um novo sistema radicular é formado (renovação), e cada vez é mais superficial.

Muitos pesquisadores têm estudado o assunto (Martinez; Lugo-Lopez, 1953; Wiersum, 1957; Meredith; Patrick Junior, 1961; Trowse Junior; Humbert, 1961; Monteith; Banath, 1965; Casagrande; Godoy, 1975; Fernandes, 1979) e mostrado os drásticos efeitos da compactação sobre o sistema radicular da cana-de-açúcar. Muitas delas recomendam, como condições físicas favoráveis, a presença de macroporos em níveis entre 15 e 25% e de densidade do solo não superiores a $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$, sendo quase que unânimes na recomendação da subsolagem, prática que, no entanto, só se utiliza na renovação de canaviais.

É marcante o número de trabalhos que apenas descrevem o sistema radicular, principalmente em cana-planta, com um déficit considerável para cana-soca, cuja dinâmica de crescimento é fundamental para incrementos de produtividade.

O estudo do sistema radicular, por ser muito trabalhoso, tem sido relegado a um plano secundário, apesar de sua importância. Os principais fatores para que isso ocorra são as grandes variabilidades de condições físicas, químicas e biológicas do solo, além das diferenças ambientais, varietais e durante as fases de desenvolvimento da cultura. No estudo do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, há também o agravante no que se refere à renovação de raízes entre ciclos, ou no mesmo ciclo, tornando-se necessária a identificação de raízes vivas ou metabolicamente ativas na massa total amostrada, segundo Vasconcelos et al. (2003) e Faroni e Trivelin (2006).

Descritores botânicos

A caracterização botânica das cultivares é uma das ferramentas que permite distinguir diferentes tipos de cana-de-açúcar. Requer um estudo metucioso dos vários aspectos organográficos. O conjunto dessas características permite a individualização de cada cultivar (Aranha; Yahn, 1987).

Os critérios para esse procedimento foram desenvolvidos durante o século XX, estabelecidos universalmente pelo trabalho do botânico Ernest Artschwager. O trabalho foi publicado em 1958 com o fitopatologista E. W. Brandes, ambos do Agricultural Research Service dos Estados Unidos da América (EUA), sendo utilizado até hoje como principal referência para construção de descritores botânicos da cana-de-açúcar em países como Austrália, EUA e Brasil (Artschwager; Brandes, 1958).

Foi esse mesmo trabalho de Artschwager e Brandes que constituiu a base para o desenvolvimento do documento *Descritores botânicos da cana-de-açúcar*, publicado no Diário Oficial da União, de 5 de março de 1998, Seção I, p. 95–98. Tal trabalho foi realizado por uma comissão constituída, naquela ocasião, pelos pesquisadores Sizuo

Matsuoka (UFSCar Campus Araras, SP), Gratuliano G. Calheiros (Universidade Federal de Alagoas, AL), José Luis C. Zambon (Universidade Federal do Paraná, PR), José Nelson L. Fonseca (Embrapa, DF), William L. Burnquist (Copersucar, SP) e Marcos G. A. Landell (Instituto Agrônomo – IAC, SP). Posteriormente, esse trabalho realizado pelos técnicos brasileiros serviu como ponto de partida para o desenvolvimento do documento TG186-1 (International Union for the Protection of New Varieties of Plants, 2005), da União Internacional para a Proteção das Obtenções Vegetais (Upov) desenvolvido entre os anos 1999 a 2002, coordenado por especialistas do Brasil e da Austrália.

No Brasil, um conjunto de leis foi promulgado visando estabelecer a proteção de praticamente todas as áreas da propriedade intelectual, entre elas: a Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996 (Lei de Propriedade Industrial), nela incluindo-se as patentes de invenção e de modelo de utilidade, as marcas, os desenhos industriais e as indicações geográficas; e a Lei nº 9.456, de 25 de abril de 1997, que instituiu a Lei de Proteção de Cultivares (LPC) (Brasil, 1996, 1997b, 2011).

Apesar dos avanços que a legislação proporcionou, e das mudanças geradas no mercado de sementes e mudas de importantes culturas agrícolas, alguns autores citam que obtentores têm tido dificuldade em exercer seus direitos sobre as cultivares protegidas (Bruch; Dewes, 2006; Fuck et al., 2006, 2007). Existem discussões e propostas de alguns autores para mudanças na legislação de cultivares, citando que, mais importante do que as mudanças legislativas, o que precisa ser mudado é a forma como o produtor encara a utilização de sementes no processo produtivo, como discutido por autores como Bruch e Dewes (2006), Fuck et al. (2006, 2007). Assim como os outros insumos, as sementes são desenvolvidas a partir do trabalho realizado por diversas instituições, que têm nos royalties uma importante fonte de recursos para

o financiamento de suas atividades. Além da dificuldade para a continuidade das pesquisas em melhoramento vegetal, a utilização de sementes ilegais pode comprometer, notadamente, após algumas safras, a produtividade e a sanidade das lavouras.

Os requisitos de uma nova cultivar são avaliados por testes de DHE, referentes à distinguibilidade (D), homogeneidade (H) e estabilidade (E), os quais, quando concluídos, possibilitam ao melhorista gerar uma descrição da cultivar candidata à proteção, utilizando as características relevantes da espécie, como altura da planta, ramificações e perfilhamento, cor e formato de partes vegetativas e reprodutivas, flores, frutos, etc. Devem ser baseados em diretrizes e documentos técnicos que definem os princípios nelas utilizados, tais como o delineamento experimental, as metodologias de análise, além das características a serem observadas. Quando do planejamento de ensaios de DHE, devem ser definidas as cultivares mais similares à cultivar candidata, visando à verificação de distinguibilidade, por meio de comparação direta em plantio lado a lado (Brasil, 2011).

Normatizações de botânica de cada espécie em particular, bem como coleções de referência, têm papel fundamental na identificação das cultivares mais similares à cultivar candidata. Para as espécies cujas diferenças morfológicas ou fisiológicas entre as cultivares não sejam suficientemente evidentes, os testes de DHE podem também se basear nas reações das cultivares a fatores externos, como doenças ou produtos químicos (exemplo: herbicidas). Nesses casos, é fundamental que a condução dos ensaios seja a mais rigorosa possível, a fim de isolar a influência ambiental, entre outros fatores externos. Para isso, metodologias apropriadas baseadas em protocolos científicos devem ser devidamente elaboradas.

Para uma cultivar de cana-de-açúcar ser protegida, ela deve atender aos requisitos de novidade, distinguibilidade, homogeneidade, estabilidade, denominação própria e cumprimento das formalidades legais. Os requisitos técnicos devem ser avaliados por meio do teste de DHE, definido pela Lei de Proteção de Cultivares (Brasil, 1997b). Para que seja possível a solicitação de proteção de uma cultivar no Brasil, o Serviço Nacional de Proteção de Cultivares (SNPC) deve divulgar previamente os descritores mínimos, que são parte da diretriz de DHE da espécie ou do gênero a que pertence. A descrição baseada em critérios morfológicos e botânicos é a maneira mais comum de caracterização de uma cultivar. Por vezes, no entanto, pode ser insuficiente para distinguir cultivares. Dessa forma, está previsto no SNPC a utilização de marcadores moleculares para comparar a cultivar em questão com exemplares mantidos em bancos de germoplasma homologados pelo SNPC. Existem descritores relacionados à touceira que fornecem uma visão mais contextual da cultivar. Seguindo para um maior detalhamento, são utilizados descritores para o colmo da cana, os quais abrangem todas as estruturas relacionadas, como gema, nó e entrenó. Finalmente, detalha-se a copa foliar caracterizando folhas, bainha e palmito. Para a descrição de uma cultivar de cana-de-açúcar, segundo o SNPC (Brasil, 2011), deve-se utilizar touceiras de cana de primeiro corte, de idade entre 10 meses e 12 meses. Essas touceiras deverão estar em condições normais de crescimento, isentas de estresse hídrico ou nutricional. Para as características relativas a entrenós, deverão ser descritos entrenós posicionados no terço médio dos colmos.

Cada avaliação deverá ser realizada numa parcela, contendo, no mínimo, quatro plantas. Para efeitos desses descritores morfológicos, entende-se por “palmito” a região compreendida entre o cotovelo (*dewlap*) da folha mais jovem (Folha + 1)

até a inserção da quarta folha (Folha + 4). Para facilitar a avaliação das diversas características, foi elaborado um esquema de código com valores que podem variar de 1 a 9, posicionado junto à descrição de cada parâmetro. A interpretação dessa codificação é a seguinte:

- 1) Quando as alternativas de código forem sequenciais, isto é, não existirem espaços entre os diferentes valores, a escolha para descrever a característica deve ser somente um dos valores listados. Exemplo: “Colmo: Seção transversal dos entrenós” tem na codificação o valor 1 para “circular” e valor 2 para “oval”. Somente essas duas alternativas são aceitas no preenchimento.
- 2) Quando as alternativas de código não forem sequenciais, isto é, existirem espaços, um ou mais, entre os valores propostos, a escolha para descrever a característica pode ser, além das previstas, variações intermediárias consideradas pelo avaliador.
- 3) Quando as alternativas, por exemplo, são 3-5-7, pode-se usar qualquer valor de 1 a 9, já que ambos os extremos da escala mostram que podem existir valores aquém e além dos indicados.

A seguir, na Tabela 3.5, há a relação das principais características utilizadas para descrição morfológica de cultivares de cana-de-açúcar, segundo o SNPC do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa).

Nas Figuras 3.14 a 3.20 ilustram-se os descritores botânicos de cana-de-açúcar, servindo de apoio para o preenchimento das características presentes na Tabela 3.5.

Nomenclatura de cultivares

A denominação de cultivares de cana-de-açúcar vem seguindo critérios relativamente uniformes em todo o mundo há muitas décadas. Para as

Tabela 3.5. Descritores morfológicos mínimos de cana-de-açúcar.

Característica (após 20/2/2019)	Identificação da característica	Código de cada descrição
1) VG ⁽¹⁾ Planta: hábito de crescimento da touceira (arquitetura)	Ereto	1
	Semiereto	3
	Intermediário	5
	Semiprostrado	7
	Prostrado	9
2) VG Planta: aderência da bainha foliar	Fraca	3
	Média	5
	Forte	7
3) VG Planta: perfilhamento	Baixo	3
	Médio	5
	Alto	7
4) VG Planta: folhagem	Muito esparsa	1
	Esparsa	3
	Média	5
	Densa	7
5) VG Planta: intensidade da coloração verde da folhagem	Clara	3
	Média	5
	Escura	7
6) MI ⁽²⁾ Colmo: altura (desde a base da haste à base da folha TVD)	Baixa	3
	Média	5
	Alta	7
7) MI Entrenó: comprimento do lado da gema	Curto	3
	Médio	5
	Longo	7
8) MI Entrenó: diametro do lado da gema	Fino	3
	Médio	5
	Grosso	7
9) VG Entrenó: formato	Cilindrico	1
	Tumescete	2
	Bobinado	3
	Conoidal	4
	Obconoidal	5
	Curvado	6
10) VG Entrenó: seção transversal	Circular	1
	Oval	2

Continua...

Tabela 3.5. Continuação.

Característica (após 20/2/2019)	Identificação da característica	Código de cada descrição
11) VG Entrenó: coloração quando exposto ao sol	Branco e verde	1
	Amarelo e verde	2
	Amarelo e roxo	3
	Verde	4
	Verde e amarelo	5
	Verde e roxo	6
	Roxo	7
	Roxo e amarelo	8
	Roxo e verde	9
12) VG Entrenó: coloração quando não exposto ao sol	Branco e verde	1
	Amarelo e verde	2
	Amarelo e roxo	1
	Verde	2
	Verde e amarelo	3
	Verde e roxo	4
	Roxo	5
	Roxo e amarelo	6
	Roxo e verde	7
13) VG Entrenó: profundidade da rachadura	Ausente ou muito rasa	1
	Média	3
	Profunda	5
14) VG Entrenó: expressão do ziguezague no alinhamento	Ausente ou muito fraco	1
	Fraco	3
	Moderado	5
	Forte	7
15) VG Entrenó: aspecto da superfície da casca	Liso	3
	Médio	5
	Rugoso (suberoso)	7
16) VG Entrenó: cerosidade	Ausente ou muito fraca	1
	Fraca	3
	Média	5
	Forte	7
17) VG Nó: largura da zona radicular (lado oposto da gema)	Estreita	3
	Média	5
	Larga	7

Continua...

Tabela 3.5. Continuação.

Característica (após 20/2/2019)	Identificação da característica	Código de cada descrição
18) VG Nó: coloração da zona radicular quando não exposta ao sol	Branco e verde	1
	Amarelo e verde	2
	Amarelo e roxo	3
	Verde	4
	Verde e amarelo	5
	Verde e roxo	6
	Roxo	7
	Roxo e amarelo	8
	Roxo e verde	9
19) VG Nó: enraizamento aéreo na zona radicular	Ausente	1
	Presente	2
20) VG Nó: zona cerosa	Ausente ou muito estreita	1
	Estreita	3
	Média	5
	Larga	7
	Muito larga	9
21) VG Nó: coloração do anel de crescimento quanto não exposto ao sol	Branco e verde	1
	Amarelo e verde	2
	Amarelo e roxo	3
	Verde	4
	Verde e amarelo	5
	Verde e roxo	6
	Roxo	7
	Roxo e amarelo	8
	Roxo e verde	9
22) VG Nó: largura do anel de crescimento	Estreita	1
	Média	3
	Larga	5
23) VG Nó: saliência do anel de crescimento	Baixa	1
	Média	3
	Alta	5

Continua...

Tabela 3.5. Continuação.

Característica (após 20/2/2019)	Identificação da característica	Código de cada descrição
24) VG Nó: formato das gemas (excluindo asas)	Triangular	1
	Ovalado	2
	Obovado	3
	Pentagonal	4
	Romboide	5
	Redondo	6
	Ovado	7
	Retangular	8
	Bicudo	9
25) VG Nó: proeminência da gema (na segunda folha senescente a partir da parte superior)	Muito fraca	1
	Fraca	3
	Média	5
	Forte	7
26) VG Nó: profundidade da canaleta da gema	Ausente ou muito rasa	1
	Rasa	3
	Média	5
	Profunda	7
27) VG Nó: posição do ápice da gema em relação ao anél de crescimento	Nunca ultrapassa	1
	Ocasionalmente ultrapassa	2
	Sempre ultrapassa	3
28) VG Nó: pubescência na gema	Ausente	1
	Presente	2
29) VG (Somente para cultivares com pubescência) Nó: posição da pubescência na gema	Basal	1
	Apical	2
	Lateral (entorno)	3
30) VG Nó: posição do poro da gema	Apical	1
	Subapical	2
31) VG Nó: almofada da gema (espaço compreendido entre a base da gema e a cicatriz foliar)	Ausente ou muito estreita	1
	Estreita	3
	Média	5
	Larga	7
32) VG Nó: presença de asa na gema	Ausente	1
	Presente	2

Continua...

Tabela 3.5. Continuação.

Característica (após 20/2/2019)	Identificação da característica	Código de cada descrição
33) VG (somente para cultivares com presença de asa) Nó: largura da asa da gema	Estreita	3
	Média	5
	Larga	7
34) MI Bainha foliar: comprimento (folha +6)	Curto	3
	Médio	5
	Longo	7
35) VG Bainha foliar: pilosidade (grupos 57 e/ou 60) folha +3	Ausente	1
	Presente	2
36) VG (somente para cultivares com pilosidade) Bainha foliar: posição da pilosidade (folha +3)	Dorsal	1
	Lateral	2
	Ambos (lateral e dorsal)	3
37) VG Bainha foliar: formato da lígula (folha +3)	Fita	1
	Deltoide	2
	Crescente	3
	Arqueado	4
	Assimétrico vertical	5
	Assimétrico horizontal	6
38) VG Bainha foliar: formato da aurícula subjacente (folha +3)	Transição	1
	Deltoide	2
	Dentoide	3
	Unciforme	4
	Calcariforme	5
	Lanceolado	6
	Falcado	7
39) MI Bainha foliar: tamanho da aurícula subjacente (folha +3) (medida a partir da bifurcação da base do dewlap)	Pequeno	3
	Médio	5
	Grande	7
40) VG Bainha foliar: cor do dewlap (folha +3)	Branco e verde	1
	Amarelo e verde	2
	Amarelo e roxo	3
	Verde	4
	Verde e amarelo	5
	Verde e roxo	6

Continua...

Tabela 3.5. Continuação.

Característica (após 20/2/2019)	Identificação da característica	Código de cada descrição
40) VG Bainha foliar: cor do dewlap (folha +3)	Roxo	7
	Roxo e amarelo	8
	Roxo e verde	9
41) VG Bainha foliar: formato do dewlap	Lanceolado	1
	Gola	2
	Triangular (com margem superior convexa)	3
	Retangular	4
	Triangular	5
	Degrau em corte	6
	Degrau em cunha	7
	Degrau curvo	8
	Degrau sinuoso	9
42) VG Lâmina foliar: arquitetura predominante	Ereta	1
	Ponta curva	2
	Arqueada	3
	Curvada na base	4
43) MI Lâmina foliar: largura no terço médio (folha +3)	Estreita	3
	Média	5
	Larga	7
44) MI Lâmina foliar: comprimento (folha +3)	Curto	3
	Médio	5
	Longo	7
45) VG Lâmina foliar: pubescência na margem (folha +3)	Ausente	1
	Presente	2
46) VG Lâmina foliar: serrilhado na margem (folha +3)	Ausente	1
	Presente	
47) MI Palmito: comprimento	Curto	3
	Médio	5
	Longo	7
48) VG Palmito: formato da seção transversal	Circular	1
	Oval	2

Continua...

Tabela 3.5. Continuação.

Característica (após 20/2/2019)	Identificação da característica	Código de cada descrição
49) VG Palmito: coloração	Branco e verde	1
	Amarelo e verde	2
	Amarelo e roxo	3
	Verde	4
	Verde e amarelo	5
	Verde e roxo	6
	Roxo	7
	Roxo e amarelo	8
	Roxo e verde	9
50) VG Palmito: cerosidade	Ausente ou muito fraca	1
	Fraca	3
	Média	5
	Forte	7
51) Transgenia	Ausente	1
	Presente	2

⁽¹⁾VG: avaliação visual mediante uma única observação de um grupo de plantas ou de pares de plantas.

⁽²⁾MI: mensuração de determinado número de plantas ou de partes de plantas, individualmente.

Fonte: Brasil (2011).

finalidades mais recentes, como a da proteção de novas cultivares de plantas, a denominação, ou seja, o fato de se dar um “nome” específico a uma nova cultivar, sempre mereceu destaque por parte dos especialistas envolvidos, dada a relevância que esse fato tem no processo de proteção de cultivares e na sua posterior comercialização. No Brasil, cabe ao Mapa, por intermédio do SNPC, da Secretaria de Desenvolvimento Rural, esclarecer as dúvidas sobre esse assunto. Considera-se, para os efeitos do art. 3º, da Lei nº 9.456/97, a qual rege os direitos dos obtentores de cultivares no Brasil, que (Brasil, 1997b):

a) Cultivar: a variedade de qualquer gênero ou espécie vegetal superior que seja claramente

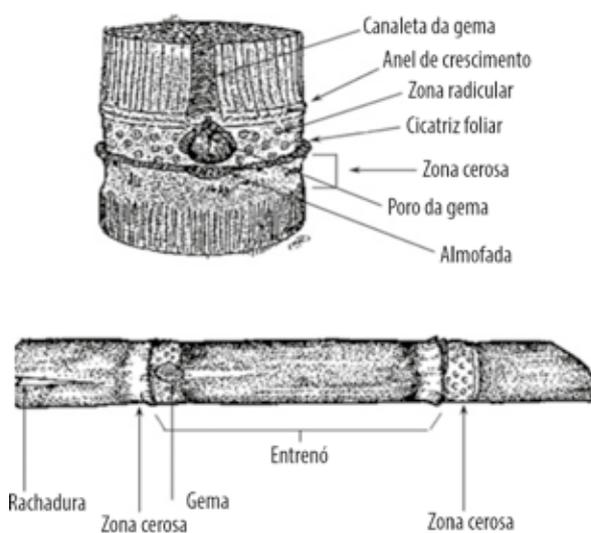


Figura 3.14. Detalhes do nó e entrenó do colmo.
Fonte: Artschwagner e Brandes (1958).

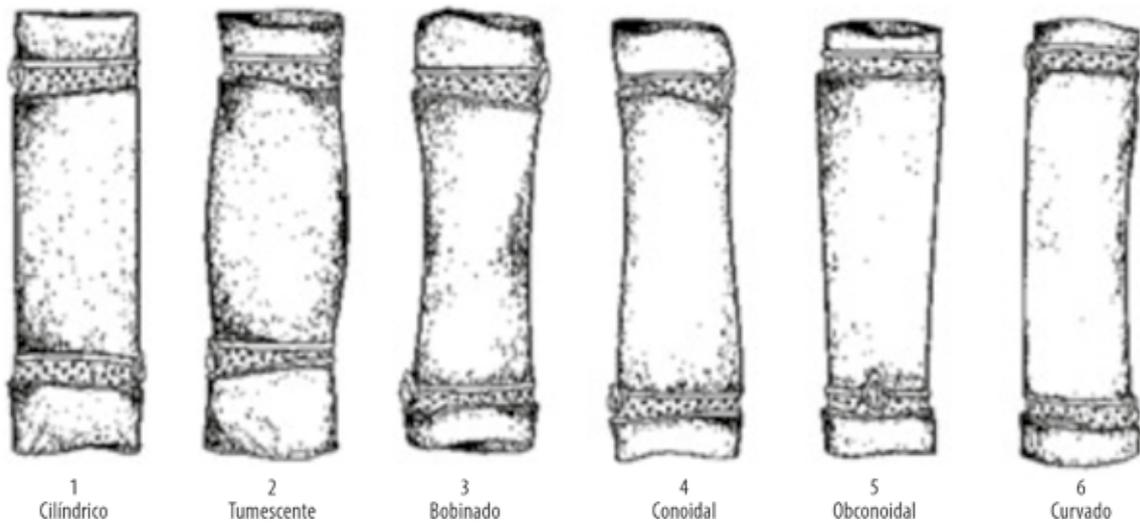


Figura 3.15. Tipos de entrenó do colmo.
Fonte: Artschwagner e Brandes (1958)

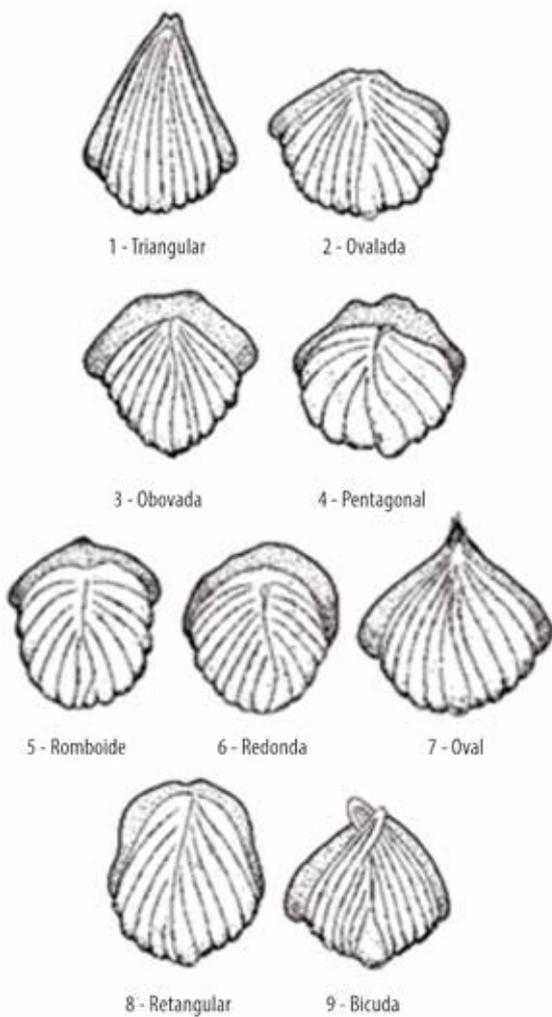


Figura 3.16. Tipos de gemas.
Fonte: Artschwagner e Brandes (1958).

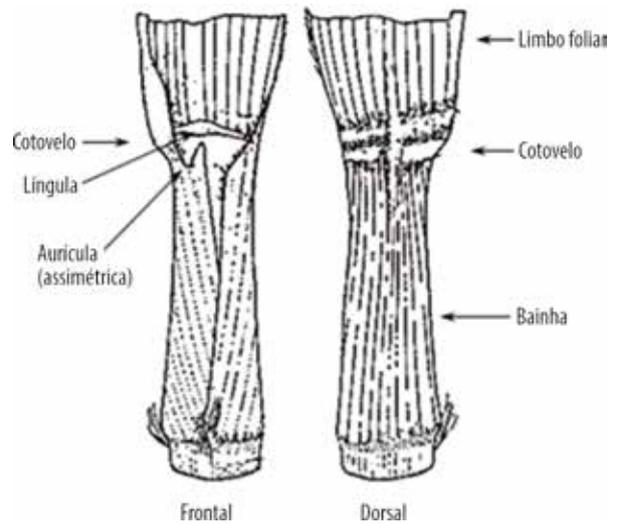


Figura 3.17. Detalhes da base foliar e bainha.
Fonte: Artschwagner e Brandes (1958).

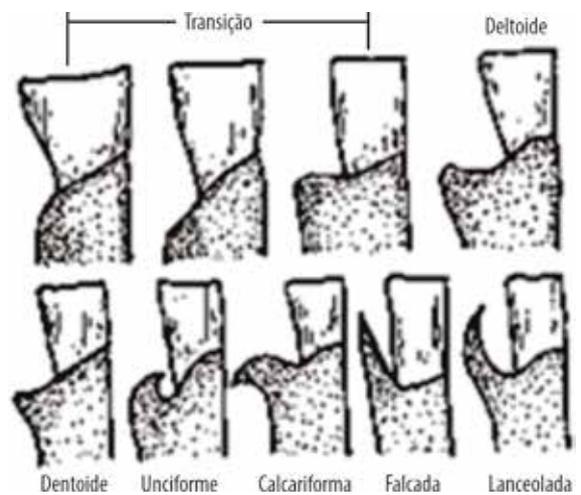


Figura 3.18. Tipos de aurícula.
Fonte: Artschwagner e Brandes (1958).

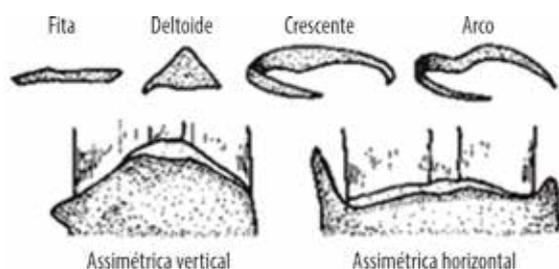


Figura 3.19. Tipos de lígula.

Fonte: Artschwagner e Brandes (1958).

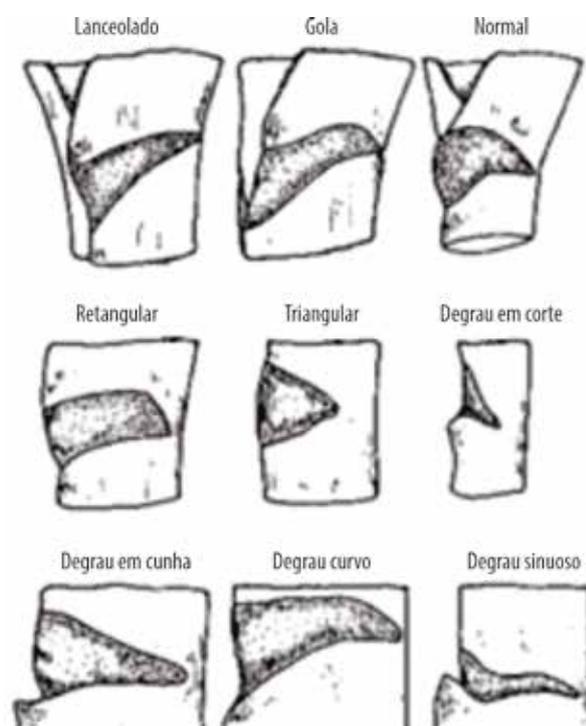


Figura 3.20. Tipos de Joelho.

Fonte: Artschwagner e Brandes (1958).

distinguível de outras cultivares conhecidas e identificadas por margem mínima de descritores, por sua denominação própria, que seja homogênea e estável quanto aos descritores, por meio de gerações sucessivas, e seja de espécie passível de uso pelo complexo agroflorestal, descrita em publicação especializada disponível e acessível ao público, bem como a linhagem componente de híbridos.

- b) Toda cultivar deverá possuir denominação que a identifique, destinada a ser sua de-

nominação genérica, devendo, para fins de proteção, obedecer aos seguintes critérios (Art. 15):

- Ser único, não podendo ser expresso apenas de forma numérica.
- Ter denominação diferente de cultivar preexistente.
- Não induzir ao erro quanto às suas características intrínsecas ou quanto a sua procedência.

Assim sendo, no art. 3º, denominação é parte importante do processo de proteção, não podendo existir duas cultivares com a mesma denominação. Também no art. 7º, do Decreto nº 2.366/97, estabelecem-se os critérios de distinção entre as denominações, detalhando as especificidades (Brasil, 1997a). Alguns critérios são indicados como:

- a) A cultivar deve ter apenas uma única denominação.
- b) Efetivamente, a denominação da cultivar não pode ser expressa apenas de forma numérica.
- c) A denominação não pode ressaltar qualidades intrínsecas, que a cultivar possua ou não, com o objetivo de auferir-lhe atributos que o destaquem comercialmente ante as demais cultivares da mesma espécie. Exemplo: Campeão, Superprecoce, etc.
- d) O mesmo raciocínio se aplica quanto à procedência da cultivar, vinculando-se sua denominação a pontos geográficos notadamente conhecidos. Exemplo: Rio de Janeiro, Rio Amazonas, Serra do Mar, etc.

Ainda existe a exigência de que, por ocasião da análise inicial do pedido de proteção, seja verificada, formalmente, a existência de sinonímia, ou seja, outra cultivar de mesma denominação, ou denominação assemelhada na escrita ou na locução, dentre as preexistentes e os protegidos

no Brasil, ou constantes da listagem de cultivares protegidas da Upov.

A Lei de Proteção de Cultivares confere aos obtentores (instituição de pesquisa e/ou melhoristas) o direito sobre a cultivar, obrigando a solicitação de autorização ao titular no caso de venda, reprodução, importação, exportação, bem como cessão, a qualquer título, de material de propagação de cultivar protegido, com denominação correta ou com outra.

A nomenclatura dos atuais híbridos de cana-de-açúcar normalmente informa: a) o país de origem e/ou a instituição responsável pelo cruzamento e seleção; b) o ano de cruzamento ou seleção; e c) o número específico do clone. Um exemplo é a cultivar IACSP94-4004 do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). A sigla contém a sigla de variedades do IAC mais a sigla do programa de origem do cruzamento que originou o indivíduo, no caso SP, do CTC ainda atuando como Copersucar, e 1994 foi o ano da hibridação e 4004 o número de seleção do respectivo clone. Além do IAC, a Ridesa também numera as cultivares dessa forma. Já os demais programas de melhoramento genético de cana do Brasil enumeram de forma sequencial e/ou em razão do agrupamento agrônomo ou de marketing das variedades.

Caracterização agrônoma

Cabe ao melhorista selecionar os indivíduos superiores, e essa tarefa muitas vezes é dificultada quando se trabalha em diferentes ambientes e não se tem a preocupação de caracterizá-los em relação ao seu potencial edafoclimático. Uma estratégia adotada é o desenvolvimento de pequenos programas regionais, reduzindo, assim, a diversidade ambiental e suas interações na população introduzida. Essa estratégia não impede que se selecionem genótipos de adaptação ampla, com base na média dos diversos locais. Mas a

opção por uma seleção específica para cada local considerado deverá proporcionar ganhos superiores como constatado por Bressiani (2001).

No Brasil, os programas de melhoramento de cana desenvolvidos pelo IAC, CTC, Ridesa e CanaVialis têm adotado uma estratégia de seleção regional, em que os indivíduos são adaptados de forma específica em cada uma das regiões onde existe o programa de melhoramento. Teoricamente, no final desse processo de seleção, tem-se uma cultivar regional, em um espaço de tempo mais exíguo (7 a 8 anos). Para tanto, o acúmulo de observações em anos sucessivos, abrangendo ciclos distintos das plantas (canas planta, soca e ressoca), interagindo com anos agrícolas subsequentes, é usada como principal ferramenta para o exercício do discernimento do melhorista (Landell et al., 2005). Estratégias semelhantes são utilizadas nos programas de melhoramento de cana da Austrália (Cox et al., 2000), África do Sul (South African Sugar Association, 2004) e do Caribe (Kennedy; Rao, 2000), citados por Landell e Bressiani (2008).

Considerando-se os dados edafoclimáticos das diferentes regiões canaveiras do Centro-Sul brasileiro, observa-se, por exemplo, que regiões como Ribeirão Preto, Assis e Piracicaba diferem acentuadamente nos parâmetros climáticos. Observa-se também que, na região de Ribeirão Preto, existe um maior excedente hídrico no período de crescimento vegetativo em relação às demais, o que, associado às elevadas temperaturas, justifica as altas produtividades aí alcançadas. A região de Assis, por sua vez, não apresenta déficit hídrico histórico no período de maturação, prejudicando esse processo fisiológico. Destaca-se, também, a grande diferença em relação às médias de temperaturas nos períodos de crescimento vegetativo e maturação (Landell; Bressiani, 2008).

Na Tabela 3.6 estão relacionadas as características inerentes às regiões de estudo que, no

processo de seleção, são metas peculiares a serem agregadas às outras características varietais prioritárias (Landell; Silva, 2004). Na região de Piracicaba, por exemplo, onde estão presentes solos de caráter químico ácido, portanto, com altos teores de alumínio em subsuperfície, existe um esforço no intuito de identificar genótipos com maior adaptação a essa condição química, o que normalmente está associado à capacidade de a cultivar desenvolver o sistema radicular mesmo com a presença do alumínio em níveis tóxicos à planta (Landell, 1989). Na região de Ribeirão Preto, que se destaca pelo grande déficit hídrico no período de maturação, agravado pela alta frequência de solos ácidos, buscam-se genótipos capazes de sobressair na brotação no período de seca e, posteriormente, no crescimento das touceiras. O oposto ocorre na região de Assis, onde uma grande ênfase é dada para o potencial de maturação, pois esse consiste na principal limitação para a produtividade agroindustrial competitiva (Landell; Bressiani, 2008).

Perfil agrônomo de uma cultivar

Segundo Borém (1998), a maioria dos programas de melhoramento de plantas objetiva o aumento da produtividade via:

- Eliminação dos defeitos da espécie cultivada.
- Melhorar a performance da população per se.
- Otimização das características morfofisiológicas das plantas.

Nos programas que visam ao aumento de produtividade per se, não há maior preocupação com determinadas características que podem estar associadas à produtividade. No caso da cana-de-açúcar, grandes progressos foram alcançados nas últimas três décadas no estado de São Paulo, no que diz respeito à produtividade agrícola (38,5%) e ao rendimento industrial (41%) (Landell; Vasconcelos, 2006). Grande parte desses ganhos pode ser atribuída ao perfil varietal, alterado drasticamente nas últimas dé-

Tabela 3.6. Características peculiares objetivadas no processo de seleção em cada uma das regiões de estudo do Programa Cana IAC.

Região	Característica peculiar priorizada	Problema fitossanitário priorizado por região
Piracicaba	Aumento do potencial de produção agrícola e tolerância ao alumínio em subsuperfície	Ferrugem
Ribeirão Preto	Maior capacidade de brotar em período de estresse hídrico	Mosaico e escaldadura
Jaú	Maior resistência às doenças fúngicas, maior capacidade de produção em solos de baixa fertilidade	Ferrugem, carvão e escaldadura
Mococa	Maior potencial de maturação em condições de baixo estresse hídrico	Ferrugem
Pindorama	Maior capacidade de brotação em período de estresse hídrico	Escaldadura e nematoides
Assis	Maior potencial de maturação em condições de baixo estresse hídrico	Mosaico, estrias de folhas e ferrugem
Adamantina	Capacidade de realizar grande acúmulo de massa verde no período de crescimento vegetativo	Carvão
Goianésia	Capacidade de suportar período de estresse hídrico e ausência de florescimento	Carvão

Fonte: Landell et al. (2005).

cadras pelos programas de melhoramento em atuação no Brasil. Talvez, a geração de modelos hipotéticos que tenham características associadas à produtividade, à semelhança do que foi realizado em culturas como milho e trigo, possa contribuir para novos saltos na canavicultura.

Uma cultivar de cana-de-açúcar deverá reunir um conjunto de características favoráveis. A produtividade superior de energia (açúcar, álcool e fibra), caráter associado ao acúmulo de biomassa e ao teor de sacarose, sem dúvida, é a maior virtude de uma nova cultivar, mas deve estar associada a outras, como (Landell; Bressiani, 2008):

- a) Resistência ou tolerância às doenças e pragas.
- b) Acúmulo elevado de sacarose nos períodos de colheita de outono e/ou inverno e/ou primavera.
- c) Tolerância à seca: possibilita ganhos de biomassa no período inicial de déficit hídrico, manutenção de colmos vivos até a colheita, e capacidade de brotação prolongada da soqueira.
- d) Ausência de florescimento e isoporização dos colmos: importante principalmente em cultivares com maturação médio-tardia e em regiões onde o déficit hídrico é muito acentuado.
- e) Teor de fibra médio-alto visando à maior produção de energia.
- f) Capacidade de brotação sob palha (toneladas de cana por hectare –TCH; longevidade).
- g) Uniformidade da altura e diâmetro de colmos, característica facilitadora do corte mecânico, que reduz impurezas vegetais e indica uma menor variação da idade dos colmos da touceira, proporcionando melhor qualidade na maturação.
- h) Hábito ereto de crescimento, relacionado à redução de perdas, maior rendimento do corte mecânico ou manual e redução de impurezas minerais.
- i) Velocidade de crescimento e capacidade de rápido sombreamento das entrelinhas, associado à redução de mato-competição.
- j) Brotação rápida, vigorosa e prolongada da soqueira. Mantém a população de colmos ao longo dos cortes e também reduz mato-competição.
- k) Densidade de colmos: redução de perdas no processo de limpeza do corte mecânico; redução do custo de transporte de cada tonelada de colmos.
- l) Despalha fácil ou espontânea: redução de impurezas vegetais.
- m) Palmito curto: redução de impurezas vegetais e melhor rendimento de corte.
- n) Diâmetro médio/grosso: aumento do rendimento de colheita e redução de perdas no processo de limpeza na colheita mecânica.
- o) Tolerância ao frio.

Caracterização quanto à maturação e período útil de industrialização

No Centro-Sul do País, a safra da cana-de-açúcar inicia-se em abril e termina em outubro/novembro. Na região litorânea do Norte/Nordeste, o período estende-se de setembro a abril. Por isso, é necessário o uso de cultivares que atinjam um nível ideal de açúcar para industrialização em diferentes épocas. Um dos primeiros pesquisadores a estudar as curvas de maturação no Brasil foi Franz Brieger, que estabeleceu as linhas de base do gráfico que conferem os parâmetros para a caracterização do período útil de industrialização (PUI). O PUI foi estabelecido para porcentagens de sacarose na cana medidos em Pol % Cana, entre

13 e 16%. O valor 13% corresponde à linha de base e, teoricamente, somente após a cana ultrapassar esse valor é que se deve iniciar o corte. No final da safra (safra de primavera), o corte deve ser feito antes que se inicie a queda do Pol para valores inferiores a 15%. (Brieger, 1968).

No período de inverno, quando as restrições ao desenvolvimento vegetativo são elevadas, é quando o valor da Pol % Cana aproxima-se bastante do teor real de sacarose. Nessa ocasião, a cana madura, normalmente, apresenta teor de glicose e frutose (açúcares redutores) inferiores a 0,5% (Fernandes, 2003). Na Figura 3.21 mostra-se a curva de Pol % Cana realizada na atualidade e a objetivada pelos programas de melhoramento. Na Figura 3.22 exemplifica-se essa busca, apresentando uma nova variedade a ser lançada, a cultivar IACSP95-3028, com elevado valor de Pol % Cana nos meses de abril e maio quando comparado a cultivar RB72454.

Os dados de maturação, bem como de produtividades mensais, são informações essenciais para realizar o planejamento otimizado de plantio e colheita. Como suporte da gestão agrícola, as ferramentas de planejamento são baseadas em modelos matemáticos, programação linear, entre outros, que consideram também logística,

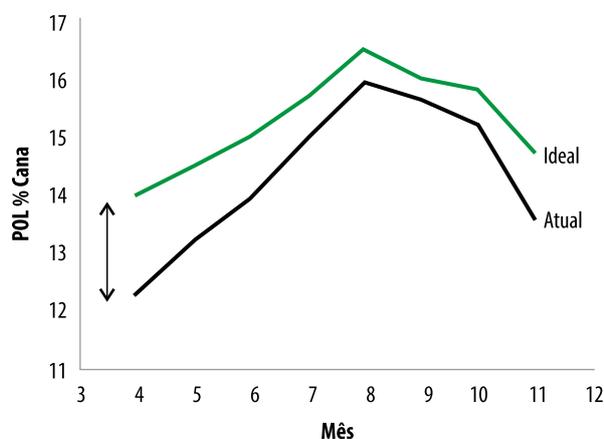


Figura 3.21. Curva de maturação da safra 2002/2003 (amostra de 20 usinas) comparada a uma curva idealizada.

Fonte: Adaptado de Scarpari et al. (2015).

capacidade de moagem, ambientes de produção, produtividades ao longo das safras, restrições de idade e manejo (cana bisada, geada, incêndios, etc.) ou características varietais (Scarpari et al., 2007, 2015).

Biometria

A produção de açúcar por hectare envolve os componentes:

- Produtividade de cana (TCH).
- Teor de sacarose na cana-de-açúcar (Pol % Cana).

O componente TCH pode ser subdividido em:

- Número de colmos por hectare.
- Peso médio por colmo.

O peso do colmo é composto pelo diâmetro, altura e densidade (ds). A altura de colmos (h), número de perfilhos (C) e o diâmetro de colmos (d) são componentes de produção determinantes para o potencial agrícola. Considerando-se a densidade do colmo igual a 1, a produtividade de colmos (TCH) pode ser estimada pela fórmula apresentada na Figura 3.23, na qual o espaçamento entre os sulcos é dado pelo valor E em metros.

Para estimativa do TCH biométrico, adotam-se os seguintes critérios (Landell, 1995):

- Altura do colmo: medido da base à inserção da folha +3 (determinada segundo o sistema de Kuijper), mostrando-se cinco colmos seguidos na linha.
- Diâmetro do colmo, estimado nos mesmos cinco colmos, mensurado no meio do internódio na altura dada por um terço de comprimento do colmo.
- Número de colmos, estimado com a contagem dos colmos de todas as linhas da parcela.

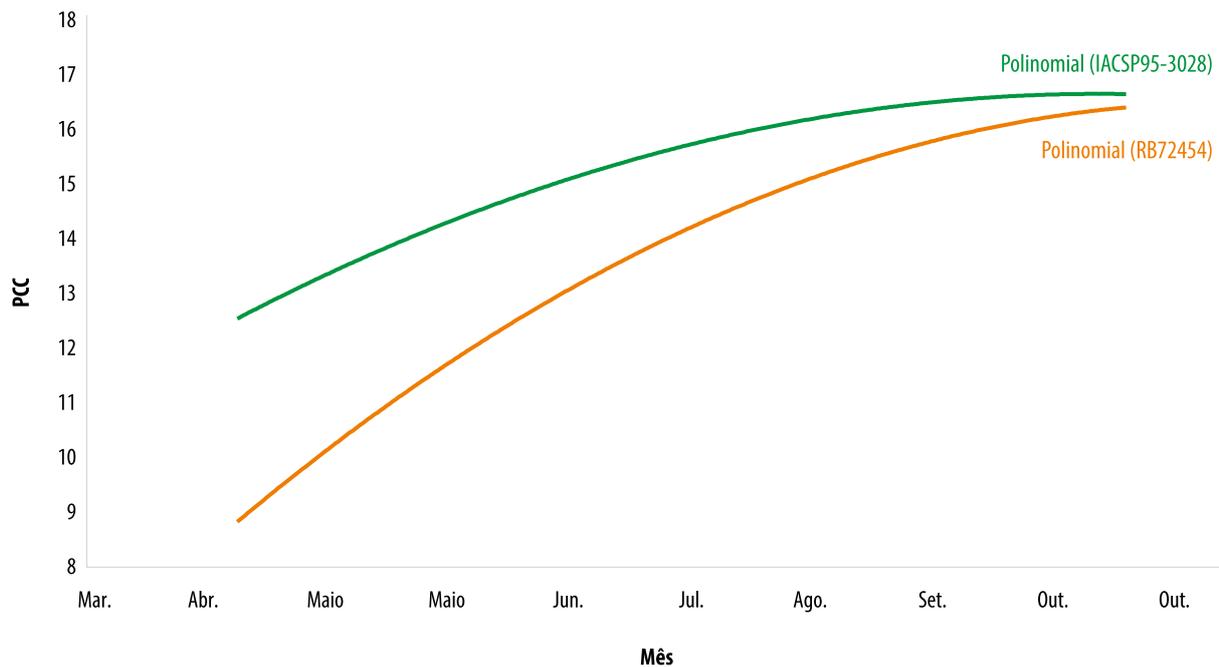


Figura 3.22. Curva de maturação (Pol % Cana) das cultivares IACSP95-3028 e RB72454, estimado por regressão polinomial a partir de 37 amostras no período de abril a novembro.

Fonte: Adaptado de Scarpari et al. (2015).

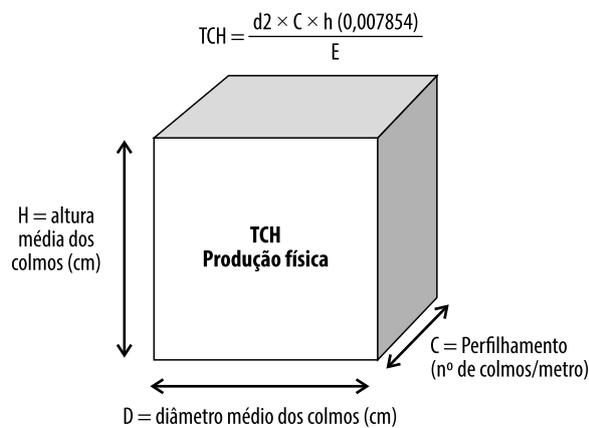


Figura 3.23. Componentes de produção em cana-de-açúcar e cálculo do TCH biométrico.

O TCH é uma medida de produtividade de cana (colmos mais impurezas) da cultura. Corresponde ao peso dos colmos produzidos numa área de 1 ha.

Fonte: Landell et al. (2005).

O uso de escalas conceituais envolve subjetividade, mas é bastante importante nas fases iniciais de seleção. A experiência do melhorista associada à aplicação de escalas pode ser bastante eficaz nessas fases.

A Tabela 3.7 é adotada no Programa Cana IAC para essa finalidade. A escala de conceito 1 é utilizada para características como altura, perfilamento, diâmetro de colmo, brotação de gemas e de soqueiras. A escala de conceito 2 é aplicada para avaliações fitopatológicas, como a ferrugem (Amorin et al., 1987). Conceituam-se, ainda, o florescimento e o hábito de crescimento de touceiras. Adota-se, para a cultivar padrão, a nota 4, no caso das características relacionadas à produção, tais como altura, diâmetro de colmos e perfilamento.

Novas cultivares ainda são caracterizadas em relação à reação às principais doenças. Para tanto, são acumuladas as observações, para cada clone, levantadas durante todo o processo de seleção, assim como também são desenvolvidos estudos epidemiológicos em campo, nas fases finais dos programas, permitindo uma orientação no manejo varietal.

A caracterização dos genótipos é feita em relação às doenças causadas por:

Tabela 3.7. Escala conceitual de notas para avaliação de clones em fase de seleção no Programa Cana IAC.

Grupo	Nota	Conceito 1	Conceito 2
Superior	1	Excepcional	Muito resistente
	2	Ótimo	Resistente
	3	Muito bom	Moderadamente resistente
Médio	4	Bom	Intermediária +
	5	Médio	Intermediária -
	6	Abaixo da média	Moderadamente suscetível
Inferior	7	Inferior	Suscetível
	8	Ruim	Muito suscetível
	9	Péssimo	Extremamente suscetível

Fonte: Landell et al. (2005).

a) Fungo:

- Ferrugem-marrom (*Puccinia melanocephala*).
- Ferrugem-alaranjada (*Puccinia kuehni*).
- Carvão (*Sporisorium scitaminae*).
- Podridão-vermelha (*Colletotrichum falcatum*).
- Mancha-parda (*Cercospora longipes*).

b) Bactéria:

- Escaldadura das folhas (*Xanthomonas albilineans*).
- Raquitismo da soqueira (*Leifsonia xyli* subsp. *xyli*).
- Estria-vermelha (*Pseudomonas rubrilineans*).
- Gomose (*Xanthomonas axonopodis* pv. *vasculorum*).

c) Vírus:

- Mosaico (*Sugarcane mosaic virus* – SCMV).
- Síndrome do amarelecimento foliar (*Sugarcane yellow leaf virus* – SCYLV).

Em cana-de-açúcar, a maioria das doenças é controlada via resistência genética (Maccheroni; Matsuoka, 2006), daí a importância de ser realizada a caracterização dos clones, fornecendo

essa informação ao fitotecnista, para que possa realizar o manejo varietal.

Em relação às pragas, a maioria é controlada de forma não genética, mas por meio de controle biológico, químico e cultural. Recentemente o CTC introduziu as primeiras variedades geneticamente modificadas (GMO) resistentes à broca-do-colmo, broca-gigante e outras lepidópteras de menor importância agrônômica. A seguir citam-se as principais pragas da cana-de-açúcar:

- Broca-do-colmo (*Diatraea saccharalis*).
- Broca-gigante (*Telchin licus licus*).
- Bicudo (*Sphenophorus levis*).
- Broca-da-raiz (*Migdolus fryanus*).
- Cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*).
- Cigarrinha-das-folhas (*Mahanarva posticata*).

O Programa Cana IAC também tem a maioria das cultivares caracterizadas em relação às espécies de nematoides mais importantes para a cultura da cana-de-açúcar: *Meloidogyne javanica*, *Meloidogyne incognita* e *Pratylenchus zae* (Dinardo-Miranda, 2006). Para tanto, são

realizados ensaios em campo e vasos (canteiros), segundo Landell e Bressiani (2008).

Caracterização quanto à estabilidade fenotípica

Uma nova cultivar também necessita ser caracterizada em relação ao seu desempenho em diversos ambientes de produção. A estimativa do comportamento de genótipos diante de variações ambientais pode ser determinada pela quantificação da interação “genótipo versus ambiente”. Sob o contexto genético, pode-se quantificar essa interação em função da instabilidade da expressão genotípica dos alelos homocigotos e heterocigotos (Cruz; Carneiro, 2003). Várias pesquisas concluíram que avaliar as respostas de cultivares, em diversos anos agrícolas, locais e cortes, é muito importante na seleção e recomendação (Jackson; Hogarth, 1992).

Trabalhando em ampla rede experimental de ensaios com clones de cana-de-açúcar, durante 5 anos, Raizer (1998) avaliou a interação genótipos x ambientes e diversas metodologias de estabilidade fenotípica. Dessa forma determinou que a metodologia de regressão bissegmentada deveria ser a preferida, por discriminar melhor o comportamento adaptativo dos genótipos, e auxiliou na classificação dos clones mais produtivos e estáveis para fins de liberação comercial. O estudo da estabilidade fenotípica permite sintetizar o enorme volume de informações obtido em uma rede experimental, caracterizando a capacidade produtiva, a adaptação às variações ambientais e a estabilidade de novas cultivares (Raizer; Vencovsky, 1999). Diversas pesquisas na área desenvolveram análises sobre conceitos e índices de estabilidade, sugerindo métodos para estimar a estabilidade fenotípica em plantas (Landell; Bressiani, 2008).

O termo estabilidade tem sido definido de diversas maneiras, estando relacionado ao enfoque

dado pelos melhoristas a esse fenômeno (Borém, 1998). Existem dois tipos de estabilidade, a estática e a dinâmica. A *estabilidade estática* é quando uma cultivar apresenta um comportamento constante, independentemente das variações do ambiente, não ocorrendo desvios em relação ao seu comportamento. A *estabilidade estática* é também denominada *estabilidade biológica* e está mais relacionada às características menos influenciadas pelo ambiente (características qualitativas), como o teor de fibra, curva de acúmulo de sacarose (maturação) e a coloração dos colmos, por exemplo. A *estabilidade dinâmica*, também denominada *estabilidade agrônômica*, está mais associada às características quantitativas (Vencovsky; Barriga, 1992). Ela é caracterizada quando uma determinada cultivar responde a uma variação do ambiente de maneira previsível. Devidamente estimada, essa estabilidade constitui-se em uma importante ferramenta para o manejo varietal.

Segundo (Borém, 1998), a “adaptabilidade” de uma cultivar refere-se à sua capacidade de aproveitar vantajosamente as variações do ambiente, enquanto a “estabilidade” refere-se ao comportamento previsível dessa cultivar nos diferentes ambientes alocados.

Cruz e Carneiro (2003) recomendam a utilização do termo geral *performance genotípica* para designar o desempenho, o comportamento e as flutuações de um genótipo quando avaliado em vários ambientes. O termo *desempenho* está mais relacionado a caracteres como produtividade agrícola (acúmulo de biomassa), enquanto *comportamento* se refere aos caracteres como resistência às doenças.

Existem diversos métodos para avaliar a *performance genotípica*. Um dos mais tradicionais é a análise de grupos de experimentos. Nesse método, o genótipo que apresentar menor variância será considerado o mais estável. No entanto, é bastante comum os genótipos de menor variância apresentarem baixa produtividade.

Os métodos baseados em regressão têm sido os preferidos, pois permitem descrever as respostas individuais dos genótipos em grupo de ambientes, estimarem indicadores de variabilidade e informarem tendências em gráficos. Esses métodos estimam um índice para cada ambiente estudado a partir da performance média dos genótipos. No entanto, para que a regressão seja de fato uma reta, teoricamente, tanto a produção como o índice ambiente devem ter distribuições normais. A seguir são citados alguns métodos.

Método de Finlay e Wilkinson (1963)

Propõe o cálculo da resposta para cada cultivar em relação ao índice ambiental, o qual será obtido pela média dos genótipos no dado ambiente. O coeficiente de regressão b será a estimativa da estabilidade do genótipo, a saber: $b = 1$ representa a estabilidade média (estabilidade agrônômica), $b = 0$ representa cultivar com completa estabilidade (estabilidade biológica). As melhores cultivares serão aquelas que associarem alta produtividade com $b = 1$.

Método de Eberhart e Russel (1966)

Fornece informações sobre a performance relativa de cada genótipo em relação às médias dos ambientes, bem como em relação a sua resposta linear. A cultivar ideal para os autores será aquela que apresentar produtividade média superior, adaptabilidade geral ou ampla ($b = 1$) e previsibilidade ou estabilidade alta ($\sigma^2 = 0$). A principal contribuição desse método foi permitir a estimação de um índice ambiental pela diferença da produção média de cada ambiente em relação à produção média geral, o que possibilita a estratificação dos ambientes de estudo, conforme apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Índices ambientais estimados no grupo de ensaios Estadual 2002 do Programa Cana IAC.

Local	Média	Índice ambiental
Us. Ester	92,19	4,20
Us. Alta Mogiana	92,82	4,83
Us. São Martinho	89,74	1,75
Us. Sta. Luiza	93,92	5,93
Us. Dedini	92,40	4,41
Us. Catanduva	85,79	-2,20
Us. Delta	92,95	4,96
Us. Goiasa	102,80	14,81
Us. Jalles Machado	85,75	-2,23
Equipav	50,54	-37,45
Us. Itamarati	81,44	-6,55
Faz. Nova Aliança	95,52	7,53

Fonte: Eberhart e Russel (1966) e Landell e Bressiani (2008).

Na Tabela 3.9 observa-se que o genótipo IACSP94-4004 apresentou a maior produtividade agrícola e alta responsividade ($b = 1,309$). A cultivar IACSP93-3046 caracterizou-se por associar alta produtividade agrícola com boa estabilidade e previsibilidade indicada pelo valor de R^2 . Essa análise ainda revelou ser a cultivar IACSP94-2094 um genótipo de baixa resposta a ambientes favoráveis ($b = 0,784$), caracterizando-se como rústica. Os termos adaptabilidade e estabilidade são frequentemente debatidos e muitas vezes interpretados de formas diferentes entre diferentes pesquisadores. O índice ambiental é uma ferramenta muito interessante, porém, é dependente do perfil de todos os genótipos que participaram do experimento, ou seja, não é estático.

Alguns autores reconhecem o genótipo ideal como aquele que tem alta capacidade produtiva e é responsivo para ambientes favoráveis, além de pouco afetado por condições desfavoráveis (Ex.: IACSP93-3046, conforme Tabela 3.9)

Tabela 3.9. Parâmetros, de estabilidade e adaptabilidade, estimados, segundo o método de Eberhart e Russel (1966), para 18 genótipos de cana-de-açúcar avaliados em 11 ambientes.

Genótipo	TCH	B	R ²
IAC87-3396	95,6	0,896	0,895
IACSP93-3046	97,0	0,876	0,903
IACSP93-3050	97,6	1,061	0,792
IACSP93-6035	68,4	0,667	0,713
IACSP94-2094	94,8	0,784	0,683
IACSP94-2101	92,1	1,271	0,852
IACSP94-4002	81,7	1,283	0,840
IACSP94-4004	101,7	1,309	0,793
IACSP94-5003	72,5	0,823	0,824
IACSP94-5041	89,3	0,948	0,909
IACSP94-5072	77,6	1,177	0,916
IACSP94-6010	80,1	0,932	0,794
IACSP94-6025	91,2	0,955	0,838
IACSP95-6087	92,7	1,369	0,927
IACSP95-6100	86,5	0,934	0,765
IACSP95-6114	85,1	0,804	0,601
RB72454	93,3	0,893	0,752
SP80-1816	86,9	1,018	0,840

Variável TCH estimada a partir da média de quatro cortes realizados no período de inverno.

TCH, toneladas de colmos por hectare; B, coeficiente de Regressão; R², coeficiente de determinação

(Verma et al., 1978; Raizer, 1998; Raizer; Vencovsky, 1999; Cruz; Carneiro, 2003). No entanto, há cultivares que, apesar de terem um comportamento mediano sob condições ambientais desfavoráveis, se sobressaem nos melhores ambientes, caracterizando-se como responsivas ou exigentes (Ex.: IACSP94-2101). Outros genótipos se destacam apenas em ambientes desfavoráveis e são denominados rústicos ou não exigentes (Ex.: IACSP94-2094). Frequentemente, as cultivares que se enquadram nesse último grupo têm menor potencial produtivo (Landell; Bressiani, 2008).

Método de Tai (1971)

Propõe metodologia que estima a adaptabilidade (resposta linear de determinado genótipo, b_i , sob os efeitos dos ambientes) e a estabilidade (desvio da resposta linear em termos da magnitude da variância do erro em relação ao erro associado à interação GA_{ij}). Um genótipo perfeitamente estável apresentaria $b_i = -1$ e $\lambda_i = 1$. Isso corresponde à estabilidade biológica, já definida, ou seja, é uma estabilidade teórica pouco provável de se encontrar para caracteres, de interesse agrônomo, ligados à produtividade.

Método de Verma et al. (1978)

É uma modificação nos métodos anteriores, dividindo os diversos ambientes de avaliação em dois subgrupos, que representam os ambientes desfavoráveis e favoráveis, de acordo com o desvio em relação à média geral dos locais. Assim, o método consiste em avaliar a resposta do genótipo por meio de regressões lineares em dois grupos de ambientes: desfavoráveis (índice ambiental negativo, b_1) e favoráveis (índice ambiental positivo, b_2). Para tanto, há necessidade de um grande número de ambientes, de modo que, em cada subgrupo, tenha um número mínimo de locais que proporcionem comparações estatísticas válidas. Segundo Verma et al. (1978), existem três tipos de genótipos:

- Genótipo ideal: com alta capacidade produtiva, baixa resposta aos ambientes desfavoráveis ($b_1 < 1$), e responsivo para ambientes favoráveis ($b_2 > 1$).
- Genótipos indicados para ambientes favoráveis: responsivos para ambientes favoráveis ($b_2 > 1$), porém sensíveis às condições adversas do meio ($b_1 > 1$).
- Genótipos indicados para ambientes desfavoráveis: não são responsivos para ambientes favoráveis ($b_2 < 1$), porém não são tão sensíveis às condições adversas do meio ($b_1 < 1$).

Método Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analysis (AMMI)

Tem conquistado cada vez mais adeptos na sua aplicação para melhoramento de plantas. Ele é um método matricial que constrói novas variáveis (AMMI0, AMMI1, AMMI2, ..., ou AMMIF) que são independentes umas das outras e captam as interações genótipo x ambiente. No geral, as primeiras duas AMMIs são suficientes para a captação da maior parte da variância GA e permitem a interpretação através de Biplots. Essa análise combina, em um único modelo, componentes aditivos para os efeitos principais (genótipos e

ambientes) e componentes multiplicativos para os efeitos da interação genótipo x ambiente. Portanto, é útil para identificação de genótipos de alta produtividade e largamente adaptados, assim como na realização do chamado zoneamento agrônômico (Duarte; Vencovsky, 1999).

A Figura 3.24 é um exemplo da aplicação desse método em cana-de-açúcar. Assim, a interpretação gráfica foi realizada considerando-se apenas o biplot AMMI1 (IPCA1 x TCH). No AMMI1, a abscissa representa os efeitos principais (médias de genótipos) e a ordenada representa o primeiro eixo de interação (IPCA1). Assim, genótipos com valores de IPCA1 próximos de zero são

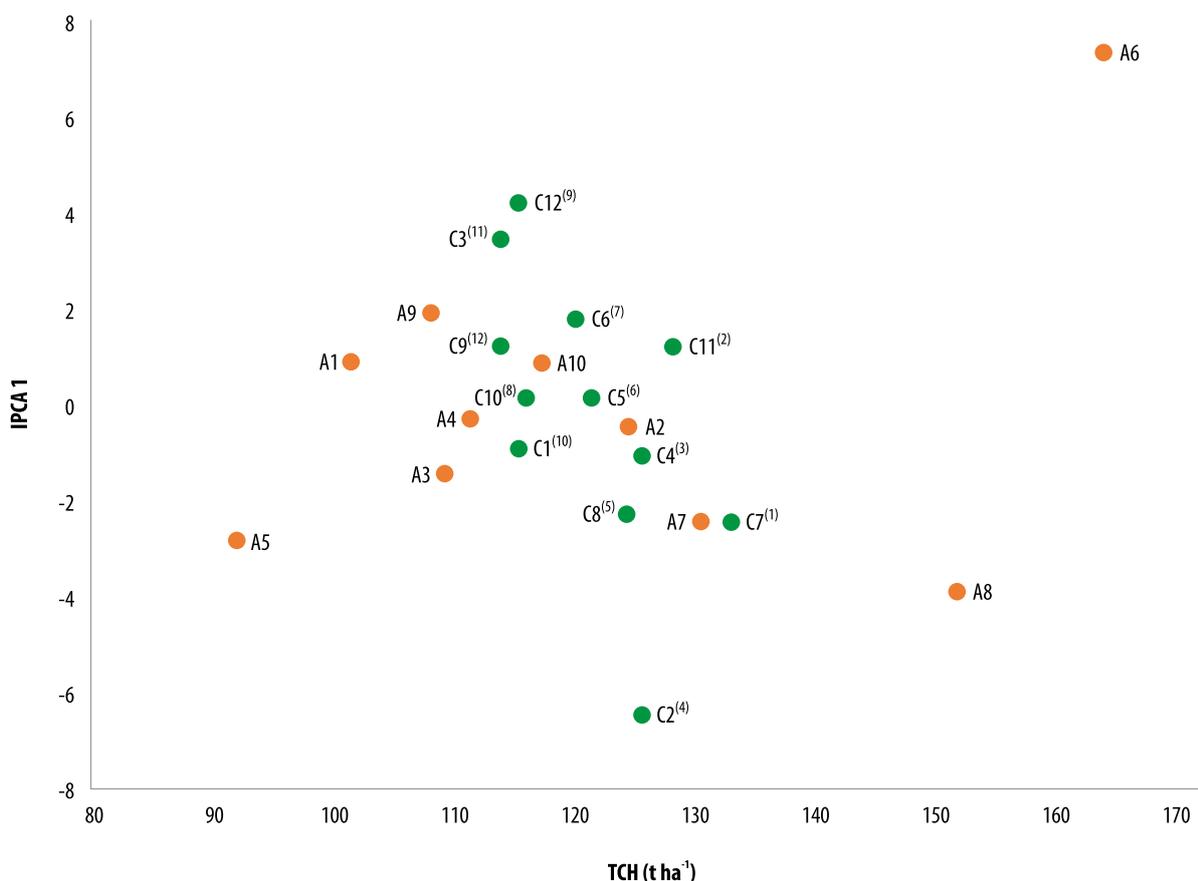


Figura 3.24. Biplot AMMI1 para TCH (toneladas de colmos por hectare) em 12 clones de cana-de-açúcar (C1 = RB975033, C2 = RB975039, C3 = RB975086, C4 = RB975157, C5 = RB975162, C6 = RB975184, C7 = RB975201, C8 = RB975242, C9 = RB975270, C10 = RB975932, C11 = RB867515 e C12 = SP81-3250) e dez ambientes (A1 = Tarumã, A2 = Nova Europa, A3 = Pradópolis, A4 = Guariba, A5 = Olímpia, A6 = Catanduva, A7 = Iracemápolis, A8 = Guaíra, A9 = Cosmópolis e A10 = Piracicaba); o expoente em C indica a posição do clone na lista de médias em ordem decrescente.

Fonte: Fernandes Júnior et al. (2013).

considerados de alta estabilidade nos ambientes de teste. Portanto os clones RB975932 (C10), RB975162 (C5), RB975157 (C4) e RB975033 (C1) apresentaram alta estabilidade fenotípica por estarem próximos da linha do eixo IPCA1. Entretanto, o clone RB975033 apresentou baixa produtividade, abaixo das testemunhas. Os clones RB975201 (C7) e RB975242 (C8) apresentaram estabilidade intermediária e adaptabilidade específica com o ambiente Iracemápolis (A7).

Assim, para definir uma cultivar em relação ao seu perfil de resposta agrônômica, é necessário associar o conhecimento dos ambientes de produção e o desempenho individual do genótipo. Dessa forma, a cultivar deve ser caracterizada da seguinte maneira:

- a) Capacidade produtiva: avaliada pela média de produção agrícola (TCH) da cultivar em um grande número de locais.
- b) “Responsividade”: dada pela estimativa da estabilidade utilizando-se alguns dos métodos já citados. A inclinação da reta de resposta da cultivar a partir do desempenho nos vários ambientes de produção (locais) pode caracterizar três tipos de cultivares:
 - Cultivares estáveis: são variedades que respondem a condições mais favoráveis de cultivo, mas também têm bom desempenho em condições desfavoráveis de produção.
 - Cultivares responsivas: são aquelas que têm grande resposta a condições favoráveis de cultivo, mas não se adaptam aos ambientes mais restritivos.
 - Cultivares rústicas: ao contrário das cultivares responsivas, são aquelas que se adaptam aos ambientes mais restritivos, mas não apresentam boa resposta a condições favoráveis de cultivo.

Método Genotype Main Effects and Genotype x Environment Interaction Biplot

A análise GGE (Genotype and Genotype-Environment Interaction) considera apenas os dois primeiros eixos da decomposição por valor singular da matriz formada pelos efeitos principais de genótipos mais o efeito da interação (confundidos). O efeito principal de ambiente é retirado da análise, pois se considera que ele não é relevante na seleção de cultivares. O biplot construído a partir da análise GGE possui a propriedade de que a característica em estudo pode ser interpretada pelo primeiro eixo singular (PC1) e a interação a partir do segundo componente principal (PC2), representando a maior parte da variância dos dados. Assim, essa análise identifica quais cultivares são superiores nos vários ambientes. A análise GGE biplot permite visualizar: desempenho de diferentes genótipos em um ambiente; adaptação relativa de um genótipo em diferentes ambientes; identificação do melhor genótipo para cada ambiente; estratificação de ambientes; desempenho médio e estabilidade dos genótipos; entre outros. Essa análise mostra que o genótipo ideal deve ter alto valor de PC1 (alta média de produtividade) e próximo de zero para o PC2 (mais estável). Assim, pode-se afirmar que o primeiro componente principal representa produtividade e o segundo, estabilidade. Esse modelo parte do princípio que, para a avaliação do cultivar, apenas o efeito principal de genótipo e o efeito da Genotype x Environment Interaction (GEI) são relevantes. Similar ao modelo AMMI, os genótipos e os ambientes são avaliados visualmente, simultaneamente, em um gráfico denominado biplot (Ferraudo, 2013).

Gauch Junior (2006), após uma comparação sistemática, usando teoria estatística e investigações empíricas e, também, considerando as melhores

práticas atuais, concluiu que o modelo AMMI é decididamente superior ao GGE biplot, não por razões estatísticas, mas sim por razões agrícolas. A AMMI particiona a variação geral sobre os efeitos principais de genótipos, efeitos principais de ambientes e a GEI. Essas três fontes de variação apresentam aos pesquisadores diferentes desafios e oportunidades, por isso, é melhor tratá-los separadamente, ao mesmo tempo que considera todos os três de uma forma integrada. AMMI e GGE biplot, e outras famílias de modelos baseados em Decomposição em Valores Singulares (DVS) são métodos, essencialmente, equivalentes, mas para determinar qual é o melhor modelo, as análises de diagnóstico de cada modelo são essenciais para cada conjunto de dados individuais. Yan et al. (2007) compararam GGE biplot com o modelo AMMI e concluíram que GGE biplot é superior ao AMMI na identificação de mega-ambientes e avaliação de genótipos porque ele explica melhor o efeito principal de genótipo e o efeito da GEI. Maiores detalhes sobre o uso, recomendações e cuidados a respeito dos modelos AMMI e GGE biplot podem ser encontrados em Yang et al. (2009, 2010).

Namorato et al. (2009) compararam os métodos AMMI, GGE biplot e Eberhart-Russel na interpretação da GEI para dados de milho. Os autores concluíram que AMMI e GGE biplot foram mais eficientes do que o método de Eberhart-Russel e, adicionalmente, GGE biplot explicou uma maior proporção da soma de quadrados da GEI sendo mais informativa no que se refere aos ambientes e desempenho das cultivares em relação ao modelo AMMI. Ramburan et al. (2011) utilizaram os métodos AMMI e GGE biplot para identificar fatores ambientais relevantes para a GEI em cana-de-açúcar na África do Sul. Os resultados deste estudo contribuíram na reestruturação da rede de ensaios multiambientes do programa de melhoramento genético de cana-de-açúcar da África do Sul, por meio da explo-

ração e direcionamento dos fatores ambientais relevantes nas diferentes regiões.

Modelos Mistos – REML/BLUP

Segundo Resende (2007), a avaliação de materiais genéticos em experimentos de campo tem dois objetivos: a) inferir sobre valores genotípicos de tais materiais; e b) ordenar os materiais genéticos com base em seus valores genotípicos, visto que a média fenotípica carrega os efeitos de blocos, parcelas e efeitos ambientais aleatórios que não se repetirão quando forem plantados novamente em plantios comerciais, mesmo que seja no mesmo local ou região da experimentação. Como esses efeitos estão embutidos em alguma proporção nas médias fenotípicas, isso prova que essas médias não são adequadas para inferência sobre os valores genotípicos dos materiais genéticos. Assim, na estimação e predição dos valores genotípicos, o mais importante é a escolha do método de estimação ou predição.

O modelo misto foi apresentado por Henderson (1973), mas foi concebido por volta de 1949 pelo próprio Henderson. Nesse modelo, os candidatos à seleção são variáveis aleatórias não observáveis pertencentes a mais que uma população, e o mérito de cada candidato é a soma da média da população mais o valor predito da variável aleatória associada ao candidato. Neste caso, a seleção depende, também, de efeitos fixos desconhecidos. Esse método foi formalmente e amplamente divulgado a partir da década de 1970 e ficou conhecido como Best Linear Unbiased Predictor (BLUP), em português, melhor predição linear não viciada ou não tendenciosa. O BLUP é um estimador do tipo *shrinkage*. Um estimador do tipo *shrinkage* pode ser visto como um coeficiente de confiabilidade que, no caso dos experimentos de desempenho genotípico, é função da herdabilidade ao nível de médias por meio das repetições. Em outras palavras, a média fenotípica é ajustada

pelo fator de confiabilidade, que é um estimador do tipo *shrinkage*.

Ressalta-se que o interesse do melhorista e do produtor rural é sobre os fenótipos que ainda não foram observados, uma vez que o número de locais para realizar experimentação é restrito e é impossível avaliar todas as condições ambientais existentes para se praticar uma seleção “perfeita”. Assim, ao realizar análises estatísticas sob modelos com efeitos fixos de genótipos, propicia inferências sobre os fenótipos que já foram observados. Somente a análise estatística sob modelos do tipo *shrinkage* (por exemplo, com efeitos aleatórios de genótipos) propicia inferências sobre os fenótipos que ainda não foram observados. O melhorista precisa, também, definir estratégias para conduzir da melhor maneira o programa de melhoramento genético e, para isso, faz-se necessário estimar os parâmetros genéticos tais quais a herdabilidade e correlações genéticas por meio da estimação de componentes de variância.

Entretanto, a experimentação de campo está associada ao desbalanceamento de dados devido a vários motivos: a) perdas de plantas e parcelas; b) rede experimental com diferentes números de repetições; e c) perda de locais sob avaliação na rede experimental fazendo que não seja possível a avaliação de todas as combinações de genótipos por ambiente, entre outros. Assim, conforme Resende (2007), o procedimento ótimo de avaliação genotípica refere-se ao REML/BLUP (máxima verossimilhança residual ou restrita/melhor predição linear não viciada), também denominado genericamente de método de modelo misto. Esses dois métodos são relacionados, uma vez que BLUP assume que os componentes de variância apropriados são conhecidos, enquanto o método REML estima os componentes de variância de uma forma iterativa a partir das estimativas BLUP de efeitos aleatórios. Embora as propriedades básicas dessas técnicas sejam conhecidas há

décadas, por causa das suas exigências computacionais, a sua aplicação prática é um fenômeno muito recente. BLUP tem sido o método dominante para estimar os valores genéticos (Lynch; Walsh, 1997).

Resende (2007) argumenta que, durante muito tempo, a análise de variância univariada (Anova) e a análise de regressão foram as principais abordagens para análise e modelagem estatística. Porém, essas técnicas têm limitações para lidar com dados desbalanceados e com parentesco entre tratamentos. O método REML, que é uma generalização da Anova para situações mais complexas, permite lidar com essa situação, permitindo maior flexibilidade e eficiência na modelagem. As principais vantagens práticas do REML/BLUP são:

- a) Permite comparar indivíduos ou variedades através do tempo (gerações, anos) e espaço (locais, blocos).
- b) Permite a simultânea correção para os efeitos ambientais, estimação de componentes de variância e predição de valores genéticos.
- c) Permite lidar com estruturas complexas de dados (medidas repetidas, diferentes anos, locais e delineamentos).
- d) Pode ser aplicado a dados desbalanceados e a delineamentos não ortogonais.
- e) Permite utilizar simultaneamente um grande número de informações, provenientes de diferentes gerações, locais e idades, gerando estimativas e predições mais precisas.
- f) Permite o ajuste de vários modelos alternativos, podendo-se escolher o que se ajusta melhor aos dados e, ao mesmo tempo, é parcimonioso (apresenta menor número de parâmetros).

Assumindo genótipos como efeitos aleatórios, é possível obter predições dos efeitos aleatórios da GEI, e então separar o padrão e ruído como fazem

os modelos AMMI. Nesse sentido, modelo misto e AMMI podem ser vistos como duas abordagens para atingir o mesmo objetivo. Entretanto, o modelo misto tem várias vantagens que contornam todas as limitações do AMMI. Piepho (1999) mostrou que o modelo misto é preditivamente mais acurado do que o AMMI, e também propôs o uso do modelo misto via REML, para a comparação entre os vários procedimentos tradicionais de estabilidade (Finlay; Wilkinson, 1963) e uma versão AMMI considerando os efeitos de locais como aleatórios. O autor concluiu que a maioria das medidas tradicionais de estabilidade podem ser enquadradas no modelo misto, assumindo os efeitos de genótipos como fixos e os efeitos de locais como aleatórios. O método REML é aplicado na estimação de parâmetros, fato que é vantajoso por causa da sua aplicabilidade para a situação de desbalanceamento dos dados e de heterogeneidade de variâncias. Adicionalmente, propicia uma escolha formal do melhor procedimento pelo uso do teste da razão da verossimilhança (REMLRT), visto que os vários modelos de análise se encaixam como submodelos de um modelo mais geral [o modelo de variância ambiental de Lin et al. (1986)], produzindo uma estrutura hierárquica de modelos. Assim, o problema de escolha de uma medida adequada de estabilidade e adaptabilidade equivale exatamente ao problema de identificação da mais apropriada estrutura de variância e covariância. A escolha do método mais adequado é dependente do conjunto de dados analisados (Resende, 2007). Mesma conclusão foi obtida por Gauch Junior (2006). Piepho et al. (2008) analisaram a aplicação do modelo misto BLUP no melhoramento de plantas e ensaios de variedades. O BLUP permite incluir o uso de informações de parentesco para modelar e explorar a correlação genética entre parentes e o uso de estruturas mais flexíveis da matriz de variância-covariância da GEI. Os autores demonstraram que o BLUP tem uma boa capacidade preditiva quando comparado a outros procedimen-

tos e, mesmo nos casos onde não foi utilizado a informação de parentesco, o BLUP demonstrou resultados perfeitamente razoáveis.

Ferraudo (2013), em sua tese de doutorado a partir de um estudo de simulação realizado no ambiente computacional R, apresentou uma comparação entre métodos: a) Eberhart-Russel; b) AMMI; e c) modelo misto (REML/BLUP), e verificou a eficiência de cada método na detecção da GEI e discutiu as particularidades de cada um deles do ponto de vista estatístico. No total, ele simulou 63 casos, os quais consideraram as mais diversas condições para a introdução da GEI, sendo que cada um dos três métodos avaliou mais do que 34.020.000 dados. Assim, a partir dos resultados encontrados neste trabalho, o autor concluiu que cada método detecta a GEI de uma maneira diferente e possui suas limitações. Os três métodos detectaram eficientemente a GEI, porém o modelo misto apresentou maior sensibilidade. Durante a aplicação prática, deve-se respeitar as limitações inerentes e verificar as suposições necessárias de cada método, concluiu o autor.

Dessa forma, as novas cultivares de cana-de-açúcar têm sido recomendadas com especificidade quanto aos diferentes ambientes de produção, com associação ao tipo de manejo agrícola e à época de corte no decorrer da safra. Essa especificidade permite explorar ao máximo o potencial genético das novas cultivares. Um exemplo de recomendação varietal encontra-se no item Principais Cultivares no Brasil, contendo cultivares recomendadas para a época de colheita e o tipo de ambiente de produção.

Manejo varietal

Conceitos gerais

A dinâmica da troca de variedades deve-se à disponibilização de novos híbridos, lançados

ano a ano, após mais de uma década de seleção e testes nos programas de melhoramento vegetal. Na etapa final de seleção, os melhores clones são validados nas áreas de produção das unidades produtoras de açúcar, etanol e energia. O caráter produtividade de colmos em TCH sem dúvida é o mais importante, pois o seu aumento é que vai proporcionar maior eficiência na produção de açúcar, fibra e demais produtos obtidos da cana-de-açúcar.

A produtividade agrícola em TCH de determinada cultivar é conhecida como a expressão fenotípica para o caráter em questão e é composta pelo genótipo da planta somado ao efeito ambiental e à interação desses dois componentes. O manejo varietal em cana-de-açúcar é uma estratégia que procura explorar os ganhos gerados pela interação genótipo versus ambiente, ou seja, tem como objetivo alocar diferentes cultivares comerciais no ambiente que proporcionem a melhor expressão produtiva no contexto considerado. Essa visão engloba um conhecimento especializado e multidisciplinar, sustentado por alguns elementos tácitos somados às informações geradas em um nicho específico (Landell et al., 2005).

Singels et al. (2005) sugerem que há um aumento na produtividade de açúcar alocando corretamente variedades, de acordo com as condições edafoclimáticas, gerenciando corretamente as épocas de maturação e colheita recomendadas para cada variedade, o que poderá proporcionar a máxima expressão do potencial genético.

De acordo com as variedades disponíveis e os ambientes de produção edafoclimáticos de cada região e usina, o planejamento agrícola deve ser realizado visando garantir o fornecimento de matéria-prima para a indústria durante todo o período da safra. Além do TCH, características importantes para a região de produção, tais como teor de sacarose, exigência em fertilidade, época de maturação, nível de florescimento, brotação no

plantio mecanizado e nas soqueiras, porte e nível de perdas na colheita mecanizada, tolerância à seca, resposta às principais doenças, são alguns dos fatores importantes no planejamento varietal de qualquer unidade produtiva. O planejamento da substituição varietal deve começar alguns anos antes, em trabalho investigativo de busca de informações junto às unidades de pesquisa, e depois com a avaliação do histórico, dados produtivos e de qualidade, e ocupação das áreas de reforma e a montagem de viveiros. É recomendado que as mudas sejam tratadas termicamente, gerando obtenção de plantas livres de doenças e com pureza genética. Por meio de técnicas de inspeção, condução, nutrição e plantios sucessivos nos viveiros, as unidades vão ampliando sua área até chegar aos talhões comerciais. No planejamento de plantio, é necessário levar em consideração principalmente a fertilidade das terras agricultáveis, a disponibilidade hídrica e o zoneamento climático. O planejamento varietal, ou seja, a escolha das variedades, é realizada após a determinação dos ambientes edafoclimáticos de produção e o ciclo de colheita (Margarido, 2006).

O manejo varietal da cana-de-açúcar tem como uma das finalidades alocar as cultivares recomendadas pelos programas de melhoramento genético aos ambientes de produção edafoclimáticos disponíveis na lavoura da unidade de produção, obtendo, assim, condições para melhorar o desempenho agrícola (Landell; Bressiani, 2008). O desempenho de variedades de cana-de-açúcar, em diferentes ambientes de produção, é estimado pelo nível de interação do genótipo com o ambiente, por diferentes testes propostos por melhoristas, tais como combinação de métodos paramétricos e não paramétricos ou método da média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (Bastos et al., 2007).

Alguns estudos indicam que o potencial biológico de produção da cana-de-açúcar é de aproximadamente 350 t ha⁻¹ de colmos no período

de 360 dias (Landell et al., 2005). A média de produtividade do estado de São Paulo na safra 2005/2006 foi próxima de 90 t ha^{-1} , e, mais recentemente, na safra 2020/2021, ficou próxima de 80 t ha^{-1} . Assim, observa-se que a produtividade atual equivale a cerca de apenas 22–26% do potencial biológico da cultura da cana-de-açúcar (Figura 3.25). Quais seriam, então, os fatores limitantes no ambiente de produção? Realizando essa análise, observam-se os fatores abióticos e bióticos interagindo como “gargalos” de restrição. Os fatores abióticos constituem o substrato físico-químico de um ecossistema, fornecendo os materiais e condições físicas que permitem aos fatores bióticos se desenvolverem. A ação conjunta desses fatores determina o *ambiente de produção*. Assim, *ambiente de produção* é o termo geral que abrange as condições sobre as quais as plantas se desenvolvem, e envolve solo, clima e fatores bióticos, como pragas e doenças, e manejo fitotécnico (Montalván; Montaño-Velasco, 1999). A qualificação do ambiente de produção fornece material essencial para essas interpretações, proporcionando a adoção de estratégias de manejo que reúnem ambientes mais homogêneos a partir da estratificação de sub-regiões equivalentes dentro das quais a interação genótipo versus ambiente é

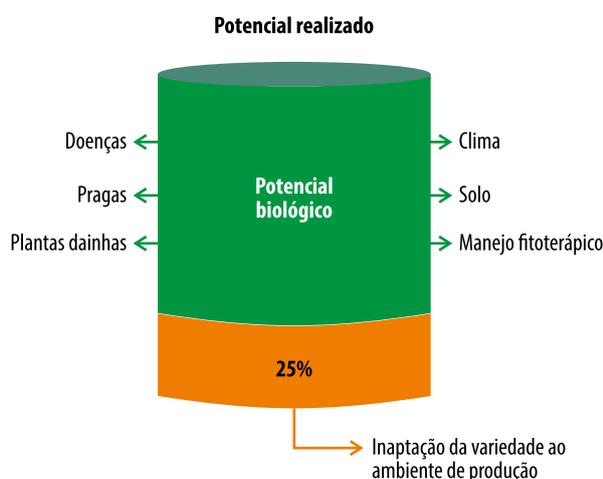


Figura 3.25. Potencial biológico da cana-de-açúcar e fatores de restrição.

Fonte: Landell et al. (2005).

menos significativa. A estratificação ou zoneamento ecológico é um procedimento útil, mas restrito em sua eficácia em razão da ocorrência de fatores incontroláveis nos ambientes, como temperatura e chuvas.

No Brasil, algumas regiões cultivadas com a cana-de-açúcar apresentam deficiências hídricas anuais próximas de 250 mm, associadas a temperaturas médias acima de $24 \text{ }^\circ\text{C}$. É o caso da região de Goianésia, no nordeste de Goiás. Condições similares ocorrem no sul do Tocantins e do Maranhão, regiões de expansão da canavicultura (Bufon et al., 2013). Nesse contexto, há necessidade de manejo complementar com irrigação logo após a colheita, quando essa é feita nos meses mais secos, visando promover a brotação da soca, da mesma forma que ocorre nos estados produtores do Nordeste, se chama “irrigação de salvamento”. As cultivares a serem utilizadas nessas regiões caracterizam-se pela grande capacidade de suportar esse período crítico, sem perda exacerbada de perfilhos e pela elevada capacidade de acumular biomassa no período que compreende o final da primavera e do verão.

Significativas áreas ocupadas com a cana-de-açúcar no Brasil se encontram inseridas em regiões onde o inverno é seco. No entanto, as temperaturas médias associadas a essa estação podem intensificar ou amenizar a condição de deficiência hídrica, principalmente quando associada à presença de solos arenosos. Períodos de estresse hídrico no solo são um dos fatores responsáveis pela elevada variabilidade dos índices de produtividade nas regiões do Nordeste, principalmente, mas também no Centro-Oeste e Sudeste. O risco de déficit hídrico para a cultura da cana-de-açúcar também varia conforme a capacidade de retenção de água de cada solo, sendo os de textura arenosa, ou compactados, os que apresentam maior risco em todos os locais e todas as épocas de plantio e corte. Nesses ambientes, a viabilidade da irrigação depende

mais da frequência de anos atípicos, com déficit hídrico mais acentuado, e do impacto do déficit dos anos secos na longevidade das soqueiras seguintes. Para que a adoção da irrigação promova, porém, os efeitos desejados quanto à redução da deficiência hídrica no solo, ela precisa ser efetuada com base nos preceitos técnicos mínimos da prática da irrigação. A cana-de-açúcar recebe irrigação, com algum tipo de reposição hídrica, em cerca de 1,7 milhão de hectares, podendo chegar a irrigar 29,5 milhões de hectares (Agência Nacional de Águas, 2012).

Diversos autores citam como essenciais os estudos e avaliações nas áreas: a) resposta e seleção de cultivares mais eficientes quanto ao uso da água; b) escolha do método de irrigação mais indicado para cada condição de cultivo; c) conhecimento da exigência hídrica da cultura em cada fase de desenvolvimento; d) emprego de um manejo racional de água e/ou de nutrientes aplicados via água (fertirrigação). Em ensaios exploratórios com cana irrigada em Goiás, Bufon et al. (2013) reportaram produtividades de cana de ano próximas a 200 t ha⁻¹ com uso de irrigação. Em diversos experimentos, em área comercial de unidade produtora do norte de Goiás, Santos et al. (2014) reportaram produtividades médias próximas a 260 t ha⁻¹ para uma determinada variedade de maturação tardia.

Nas condições do cerrado do norte de Goiás, as avaliações de resposta de cultivares à tecnologia são objetos de diversas investigações. Para avaliar o desempenho de variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar, Campos et al. (2014) estudaram o comportamento de 16 cultivares indicadas para a região, de diversos programas de melhoramento. Os autores avaliaram as características relacionadas à produtividade (perfilhamento, altura e diâmetro de colmos), à produtividade de biomassa e à qualidade tecnológica, sendo que o tratamento foi de irrigação suplementar para

suprir 50% da necessidade hídrica da cultura. Uma das conclusões do estudo foi pela seleção de oito cultivares que se destacaram, produzindo 25–30 t a mais no experimento.

Nas regiões do Paraná, sul do Mato Grosso do Sul e Vale do Paranapanema, em São Paulo, a cana-de-açúcar enfrenta outra realidade: a deficiência hídrica é baixa (4–30 mm/mês) e as temperaturas médias são mais amenas (20–24 °C). Essa condição é desfavorável à maturação da cana-de-açúcar; no entanto, é favorável ao acúmulo de biomassa, principalmente nas regiões onde a temperatura média é próxima de 24 °C.

Essa amplitude das condições climáticas associadas à diversidade de solos existentes gera um número contingente de ambientes de produção, os quais vão interagir com os genótipos neles alocados e serão determinantes para definições de época de plantio e colheita, por exemplo (Landell; Bressiani, 2008).

Mudança climática e produtividade

A atual abordagem climática não é importante apenas por debater a influência dos componentes do clima sobre produtividade e a produção agrícola, mas também os cenários de mudanças futuras, com adequação e estimativa da produção em função das possíveis adversidades climáticas. Em um possível cenário desafiador, o melhoramento genético e o manejo varietal serão determinantes na manutenção de produtividades satisfatórias sob condições de estresse abióticos.

Assad et al. (2008) têm advertido para anomalias na temperatura e nos padrões de precipitação, com consequências diretas nas atividades humanas e, especialmente, naquelas relacionadas à produção agrícola. Os autores fazem projeções de longo prazo e indicam que a temperatura média do planeta poderá aumentar

entre 1,4 e 4,8 °C nos próximos 100 anos, com implicações diretas em mudanças nos índices de risco para o desempenho das culturas agrícolas (Summary..., 2013).

Assad et al. (2008) estimam que ocorra redução da área para produção no Nordeste para as culturas do milho, arroz, feijão, algodão e girassol; a soja poderá sofrer perdas de produtividade em até 40% em 2070; o café sofrerá perdas de até 33% da área de baixo risco em São Paulo e Minas Gerais, podendo aumentar no Sul; a mandioca terá um ganho geral em produtividade, e a cana-de-açúcar dobrará sua produtividade nas próximas décadas.

Há incertezas sobre a dimensão desse fenômeno que implicam na necessidade de estudos com modelagem e análise de dados, segundo Ribeiro et al. (2009), analisando possíveis impactos das mudanças climáticas sobre as atividades humanas, recursos naturais e, particularmente, sobre a agricultura brasileira e o impacto das mudanças climáticas sobre a cultura da cana-de-açúcar. Além disso, autores observaram um aumento no número de colmos das plantas, segundo Silva et al. (2008), e também em termos de assimilação média líquida de dióxido de carbono (CO_2), aumentando 24% esse índice ($74.150 \text{ mL cm}^2 \text{ folha h}^{-1}$ versus $60.050 \text{ mL cm}^2 \text{ folha h}^{-1}$). Esse resultado está alinhado com a análise de Marin e Nassif (2013), considerando-se a base do conhecimento disponível na literatura, e indica que a cana-de-açúcar apresentaria uma resposta positiva em relação aos cenários de mudanças climáticas mais prováveis para o Brasil, tanto pela resposta direta da fotossíntese à elevação na concentração do CO_2 quanto pelo aumento da eficiência de uso da água.

Nas considerações de Gornall et al. (2010), as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas têm uma série de implicações para a produtividade agrícola, mas o impacto agregado delas ainda não é conheci-

do e, na verdade, muitos desses impactos e suas interações ainda não foram quantificados de forma confiável, especialmente em escala global. Um aumento na temperatura média pode ser esperado com segurança, mas os impactos na produtividade podem depender mais da magnitude e do tempo de temperaturas extremas.

A produtividade acumulada (rendimento, t ha^{-1} , TCH) ao longo de um ciclo de cana-de-açúcar mostrou curva exponencial (Figura 3.26). Os resultados da Figura 3.26 e da Tabela 3.9 indicam que a cana-de-açúcar aumentou a sua produtividade com elevação dos teores disponíveis de CO_2 . As estimativas e observações na produtividade na cana-de-açúcar (ambientes enriquecidos versus naturais) foram da ordem de 192 t ha^{-1} versus 168 t ha^{-1} (cana-planta) e 170 t ha^{-1} versus 137 t ha^{-1} (cana-soca).

O modelo foi calibrado com base em dados de assimilação de CO_2 a partir de experiência e de modelo para a fotossíntese de plantas C4 (Silva et al., 2008). As variáveis impulsionadas do modelo são as fotossinteticamente ativas, como radiação, temperatura do ar, precipitação e culturais variáveis, índice de área foliar, taxa de colheita e de ciclo de cultivo. Os modelos têm sido constantemente ajustados para estimar os efeitos do aumento do CO_2 sobre a previsão de desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar (Marin; Nasif, 2013).

Alguns autores consideram que, para corresponder aos novos cenários climáticos e demandas de energia renovável, a cana-de-açúcar deverá ser retomada como novo fenótipo ou conceito de planta ("cana de açúcar e de fibra"), a cana energia (Matsuoka et al., 2014). Novas cultivares deverão agregar alta produção de biomassa e atender com "resiliência" na produtividade, ou seja, produzir mais energia por área e em condições desfavoráveis de cultivo quanto aos estresses abióticos (Matsuoka, 2017).

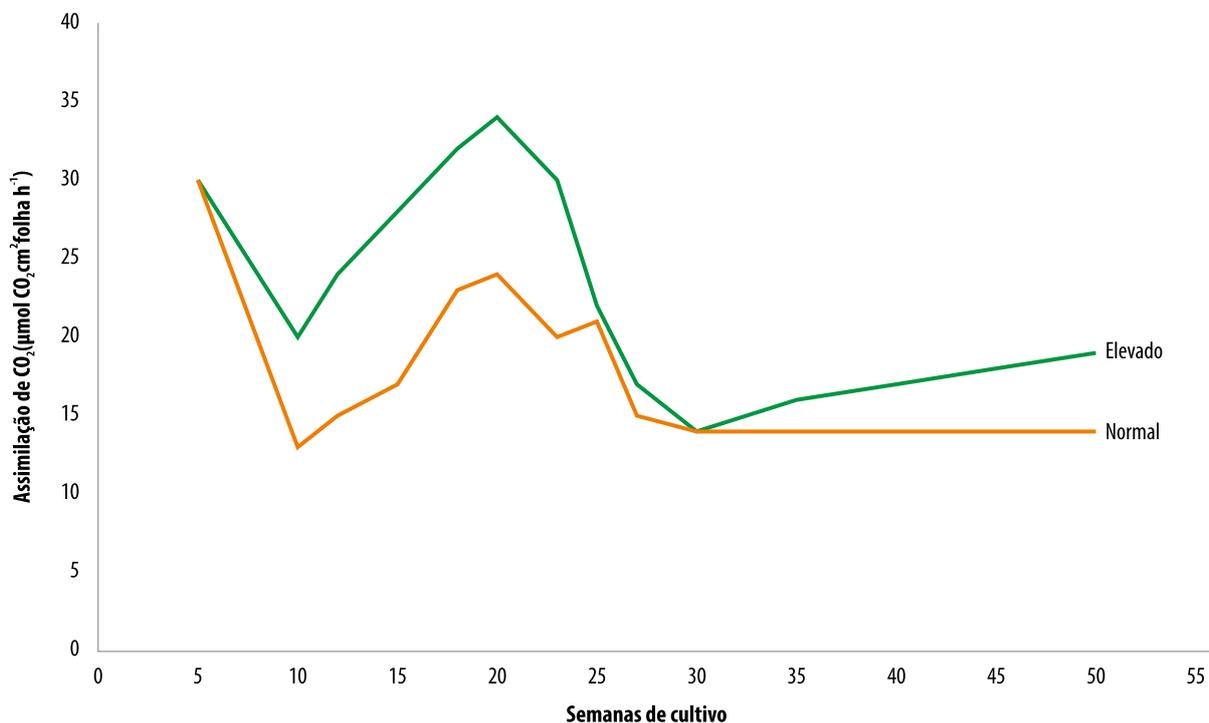


Figura 3.26. Desenvolvimento das canas planta e soca e produtividade durante o ciclo, no cultivo em estado natural e rica em fornecimento de dióxido de carbono (CO₂).

Fonte: Silva et al. (2008).

Tabela 3.9. Produtividade de cana-de-açúcar estimada (t ha⁻¹ de matéria seca) em quatro cenários do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) (A1BAIM, A2MES, B1MES e B2MES) em projetos para os anos de 2050 e 2070, em Piracicaba, Brasil, e com o dobro de concentração de dióxido de carbono (CO₂).

Cenário IPCC	CO ₂ (ppm)	Produtividade simulada (t ha ⁻¹)	
		2050	2070
A1	370	70,98	72,83
	720	72,71	74,80
A2	370	70,34	70,75
	720	72,08	74,20
B1	370	70,67	70,78
	720	72,81	76,30
B2	370	70,51	70,92
	720	72,51	75,80

Fonte: Silva et al. (2008).

Na questão das mudanças climáticas, a cana-de-açúcar no Brasil contribui significativamente na mitigação dos gases de efeito estufa com o

etanol combustível, e a cultura pode contribuir ainda mais com a combinação de um tipo de alto rendimento agrícola, a cana-energia, com o aperfeiçoamento do processo de produção de etanol de segunda geração (2G) a partir de folhas e bagaço e de outros bioprodutos (Carvalho-Neto et al., 2014).

Como algumas das principais oportunidades e características desejáveis em cultivares de cana energia, visando à produção de energia renovável, que contribui para mitigar o efeito estufa, temos:

- a) Alto potencial de produção de biomassa e conversão de carbono atmosférico para orgânico.
- b) Opção para cultivo na nova onda de mudança de paradigma da civilização, de energia fóssil para energia renovável.
- c) Alta densidade de energia, com liquidez energética, e economicamente uma matéria-

- prima mais eficiente do que aquela das culturas tradicionais alimentícias.
- d) Exploração de ambientes de menor capacidade de produção, solos degradados e áreas marginais, pastagem improdutivas, não oferecendo competição com a produção de alimentos.
- e) Possibilidade de facilitar a exploração do solo, agregar matéria orgânica, incrementar reserva hídrica, controlar erosão, devido ao sistema radicular fasciculado e exuberante, sendo cultura semiperene.
- f) Adaptação do manejo da colheita e do transporte aos mecanismos utilizados em grande escala na cana convencional.
- g) No manejo e no melhoramento genético, existem cultivares de alta produtividade em vários centros de pesquisa do Brasil e no exterior, com adaptação para diversas regiões. O processo de melhoramento não é tão complexo na cana energia, e inclusive, mais rápido e projetando-se ciclos de seleção de até 6 anos para desenvolver uma nova cultivar, já que a taxa de multiplicação é muito alta para as fases clonais.
- h) Em relação a outras culturas para biomassa, a cana energia pode praticamente ser processada o ano todo, gerando bagaço que pode ser armazenado.
- i) Para algumas cultivares de cana energia, é possível obter o dobro de fibra e com teor de açúcar próximo da metade da cana-de-açúcar tradicional.
- a) População de clones apresenta em alguns cruzamentos alta incidência da doença carvão (*Sporisorium scitamineum*).
- b) Alta ocorrência de florescimento.
- c) Baixa massa unitária e densidade no colmo.
- d) Dificuldades na colheita mecanizada devido à alta massa do material e alta fibra.
- e) Menor desempenho das moendas para extração do caldo.
- f) Menor teor de sacarose e alto teor de açúcares redutores dificultariam a cristalização do açúcar.

Épocas de plantio

No estado de São Paulo, tradicionalmente existem duas épocas de plantio: cana de ano e meio (plantada nos meses de janeiro a abril para ser colhida com mais de 12 meses de idade) e cana de ano (plantada nos meses de setembro e outubro para ser colhida com aproximadamente 12 meses de idade).

Atualmente, porém, alguns canavicultores plantam cana quase todo ano, com a finalidade de otimizar a estrutura de plantio e assim reduzir o custo de produção. Isso é possível, principalmente, em regiões onde as temperaturas no inverno não são limitantes para a boa brotação das gemas. A categoria antes denominada “cana de ano”, hoje está subdividida em:

- a) Cana de ano de inverno: o plantio é realizado nos meses de junho a agosto.
- b) Cana de ano de primavera: o plantio é realizado nos meses de setembro a novembro.

A condição climática prevalecente para o ciclo de crescimento da cana plantada no início do ano é mais favorável do que para aquela plantada no final do ano. Naturalmente, especial atenção deve ser dada à “cana de ano de primavera”. Assim, é recomendável realizar esse tipo de plantio

No entanto, apesar das perspectivas, alguns obstáculos podem ser citados em nível de melhoramento genético, manejo agrícola e processamento industrial da matéria-prima da cana-energia, segundo Oliveira et al. (2021):

apenas em solos de maior potencial de produção, ou seja, nos ambientes de produção superiores.

O plantio extemporâneo também pode ser favorecido pelo uso de resíduos da própria indústria sucroalcooleira, como a aplicação de torta de filtro no sulco de plantio ou da vinhaça e/ou da água residual da indústria para fornecer umidade ao solo. No caso do uso da vinhaça, a aplicação poderá ser feita antes e/ou após o plantio.

O plantio no período do inverno e primavera tem possibilitado a antecipação do cronograma de expansão em novas áreas. Na Tabela 3.10, estão enumeradas algumas vantagens e desvantagens do plantio da “cana de ano”.

Épocas de colheita e parâmetros de manejo

A colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e na região Centro-Sul do Brasil é realizada no período que compreende os meses de abril a novembro. Excepcionalmente, pode-se ter áreas colhidas em março e dezembro. O objeti-

vo no cultivo da cana-de-açúcar é obter a máxima produção de açúcar e/ou álcool em uma unidade de área. Para tanto, tem-se que considerar não apenas o volume de cana colhida, mas também a qualidade dessa matéria-prima. Esse longo período de colheita (abril a novembro) atravessa três estações do ano, iniciando-se no outono (abril a junho), passando pelo inverno (julho a setembro), e terminando na primavera (outubro a novembro). Essas três estações têm importante interferência nos parâmetros de qualidade e quantidade de matéria-prima, como pode ser visto na Tabela 3.11.

O ideal seria associar as produtividades agrícolas obtidas nos talhões colhidos no início de safra com os teores de sacarose de agosto e setembro. Como isso é impossível, tenta-se aproximar desse ideal pelo uso de técnicas diversas, como as descritas na Tabela 3.11.

Segue abaixo a descrição de características de cada uma das épocas de colheita e a peculiaridade de manejo.

Tabela 3.10. Vantagens e desvantagens do plantio da “cana de ano”.

Vantagem	Desvantagem
Retorno mais rápido do investimento	Plantio restrito a ambientes de produção superiores
Utilização intensa do solo	Continuidade de touceiras remanescentes, dificultando o controle de pragas e doenças da cana-de-açúcar
Melhor aproveitamento do adubo residual do ciclo anterior	Calendário restrito para a realização de um bom preparo de solo e incorporação de calcário e/ou gesso
	Restrição ao uso de cultivares “floríferos”
	Danos mais significativos quando da ocorrência de geadas severas

Tabela 3.11. Influência das diversas estações de colheitas do Centro-Sul do Brasil sobre os parâmetros produtividade (TCH) e teor de sacarose (Pol).

	Época de colheita		
	Outono	Inverno	Primavera
Produtividade agrícola (TCH)	Muito favorável	Favorável	Desfavorável
Pol maturação	Desfavorável	Muito favorável	Desfavorável/favorável

Safra de outono

Esse período compreende o início da safra e tem como principal característica a colheita de matéria-prima de pior qualidade, por causa da condição desfavorável para a maturação, predominante no período. No entanto, a colheita nessa época favorece a produtividade das socas. Isso se deve à condição de clima favorável à brotação da cana cortada no período do outono, que se aproveita de chuvas esparsas, importantes para a brotação, e também da umidade residual presente no solo. Dessa forma, a cana colhida nesse período sempre apresenta um melhor *stand* de lavoura, em comparação àquelas colhidas posteriormente. Outro aspecto importante é que os talhões colhidos no outono sofrem, nos primeiros 120 dias do novo ciclo (após o corte), um estresse hídrico minimizado pela baixa demanda de água da planta, que nesse período possui pouca biomassa, e, ainda, em diversas regiões, temos temperaturas favoráveis ao desenvolvimento vegetativo inicial da soqueira. Para maximizar a produção agroindustrial na safra de outono, recomenda-se utilizar as estratégias apresentadas na Tabela 3.12.

Safra de inverno

Esse período compreende o meio da safra e tem como principal característica a colheita de matéria-prima de ótima qualidade, por causa das condições climáticas muito favoráveis à maturação. Essas condições se relacionam ao estresse hídrico e às temperaturas mais baixas do período. No entanto, a colheita nesse período pode trazer prejuízos consideráveis às socas, principalmente em anos nos quais o período de seca é bastante prolongado, ou naqueles em que ocorrem severas geadas. Esse efeito negativo das condições do clima pode ser minimizado com o uso de vinhaça, águas residuais ou “irrigação de salvamento”, aplicados logo após a colheita. É fundamental o uso de cultivares com capacidade superior de brotação e perfilhamento, pois isso garantirá a longevidade dos canaviais colhidos durante o inverno. Na Tabela 3.12 são apresentadas algumas recomendações visando à maximização da produção agroindustrial na safra de inverno.

Safra de primavera

Esse período compreende os meses de outubro e novembro, em anos mais úmidos, com maior

Tabela 3.12. Estratégias na implantação do canavial para maximizar a produção nas diversas estações de colheitas do Centro-Sul do Brasil.

		Época de colheita		
		Outono	Inverno	Primavera
Produtividade agrícola (TCH)	Cultivares responsivas e estáveis		Cultivares estáveis	Alocação em ambientes favoráveis
			Cultivares sem florescimento e isoporização Uso de fertirrigação e/ou irrigação	Cultivares estáveis e rústicos Cultivares sem florescimento e isoporização Uso de matéria orgânica
Pol maturação	Cultivares precoces		Cultivares de alto teor de sacarose	Cultivares com maturação tardia
	Maturador fisiológico Alocação em solos de baixa fertilidade		Uso de inibidores de florescimento	Uso de inibidores de florescimento

TCH = Tonelada de cana por hectare; Pol = teor de sacarose.

produção na unidade, pode adentrar em dezembro. Essa época tem como principal característica a oscilação da qualidade e da produtividade ano a ano. Isso se deve à grande dependência que os canaviais da safra de primavera têm dos fatores climáticos. Quando o período de déficit hídrico perdura até novembro, a condição de maturação pode ser excepcional, aproximando-se daquelas encontradas na safra de inverno, porém a produtividade agrícola declina abruptamente por causa da paralisação do crescimento dos colmos que passaram pelo inverno seco e frio. Quando a retomada do período chuvoso ocorre mais precocemente, a maturação é prejudicada, podendo assemelhar-se àquelas atingidas no outono. A safra de primavera é aquela que apresenta maior variabilidade na produtividade, pois esses canaviais estão sujeitos a um curto intervalo no qual as condições são favoráveis ao acúmulo de biomassa, tornando-se extremamente vulneráveis a eventos como: veranicos nos meses de janeiro a março, e a extensão do período seco no outono-inverno.

Para maximizar a produção agroindustrial na safra de primavera, recomenda-se utilizar as estratégias apresentadas na Tabela 3.12. A alocação de cultivares de rápido crescimento pode se constituir em excelente estratégia para garantir uma boa produtividade do ciclo de primavera.

Matriz de ambientes de produção e estratégias de manejo

Cada um dos períodos de safra definidos para o Centro-Sul do Brasil impõe sobre a planta de cana-de-açúcar diferentes condições climáticas durante os estágios fenológicos. Para a Tabela 3.13, que associa os ambientes de produção qualificados segundo conceitos pedológicos, com os três ciclos de desenvolvimento (outono, inverno e primavera), dá-se o nome de matriz de ambientes, que define caselas a partir da

Tabela 3.13. Matriz de ambientes de produção, com nove caselas, dadas pelas combinações de solos e épocas de colheita.

Solo	Safra outono (1º/4 a 21/6)	Safra inverno (22/7 a 21/9)	Safra primavera (22/9 a 30/11)
Médios	3	4	8
Desfavoráveis	6	7	9

intersecção dos níveis dos fatores ambientes e épocas. Essa caracterização permite estabelecer estratégias de alocação varietal quando se conhece o perfil de resposta das cultivares aos ambientes. Portanto, a matriz de ambientes de produção é composta por combinações de tipos de solos e épocas de colheita.

O trabalho de Landell et al. (2003) indicou que a produtividade de ciclos mais avançados da cana-de-açúcar apresenta uma correlação do tipo linear com o gradiente de fertilidade em subsuperfície dos solos (Figura 3.27). Assim, a classificação pedológica pode se tornar importante ferramenta para previsão de produtividade, e principalmente para alocação de cultivares, conforme o seu perfil de resposta.

O grupo de solos favoráveis é composto por aqueles de maior potencial químico, como os eutróficos e mesotróficos, e aqueles com maior potencial de armazenamento de água, como os Cambissolos profundos. No grupo de solos médios, estão inclusos os distróficos e os álicos mais profundos com bom potencial de armazenamento de água. No grupo de solos desfavoráveis, estão os átricos, os Latossolos álicos com teor de argila entre 15 e 25%, os Neossolos Quartzarênicos, entre outros com restrições físico-químicas.

As caselas indicadas na Tabela 3.14 fornecem uma ideia de ordem do potencial agrícola para os ambientes compostos pelas combinações de solos e épocas de colheita. Há similaridade entre

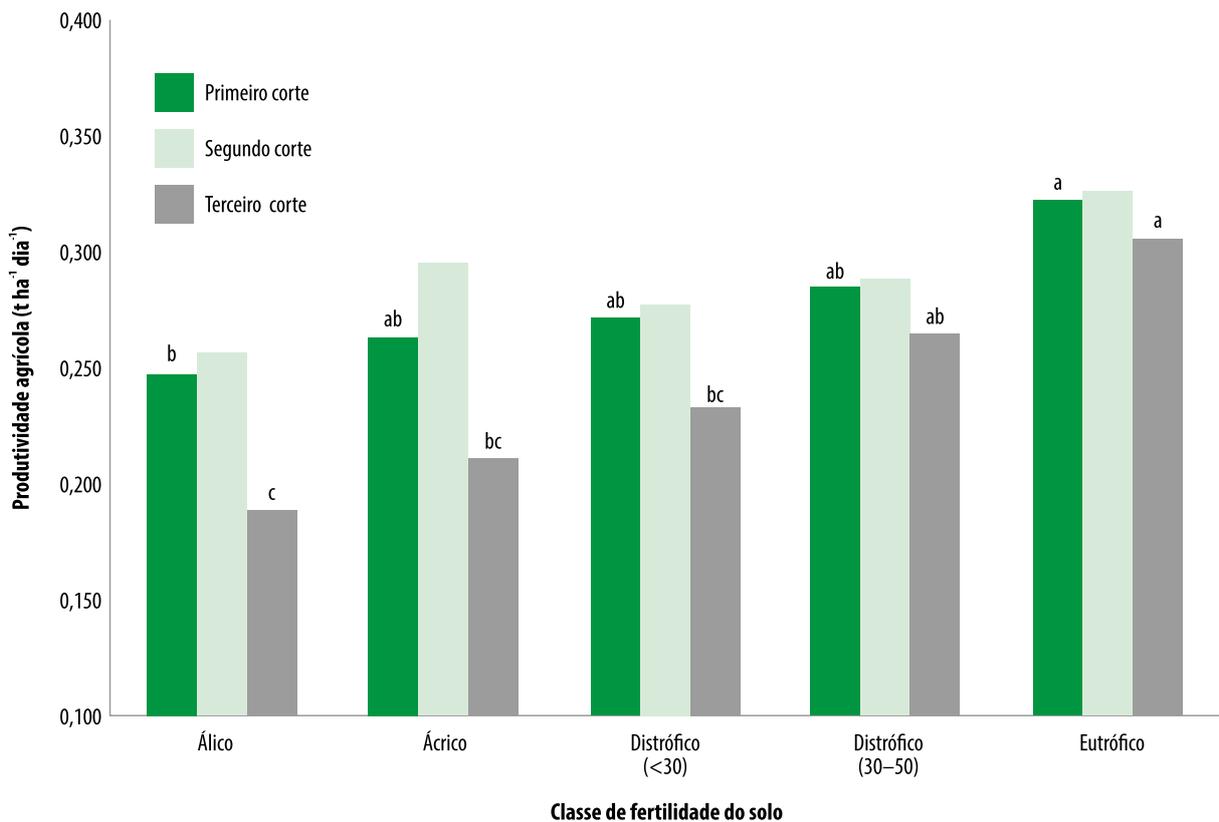


Figura 3.27. Produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}\ dia^{-1}$), média de clones, obtida a partir de 42 ensaios em diferentes classes de fertilidade do solo.

Fonte: Landell et al. (2003).

essa ordem e a dos valores de TCH apresentados na Tabela 3.14, embora com maior estratificação no fator de solos.

Associando os conceitos sobre perfil de resposta varietal e matriz de ambientes de produção, pode-se concluir pela alocação das cultivares, segundo a Tabela 3.14, ou seja, as cultivares responsivas devem ser alocadas nas caselas 1, 2 e 3,

e as cultivares rústicas devem ser plantados nas caselas 7, 8 e 9. No entanto, esta é apenas uma das estratégias possíveis, e necessita que haja de fato cultivares com um perfil rústico tal que, alocada nas caselas mais desfavoráveis, ainda apresentem produtividade compatível com o nível tecnológico atual. O que se observa, de uma maneira geral, é que as produtividades em

Tabela 3.14. Matriz de ambientes de produção adaptada para a estratégia de alocação, segundo o perfil de resposta das cultivares responsivas ou rústicas.

Solo	Safra outono (1º de abril a 21 de junho)	Safra inverno (22 de junho a 21 de setembro)	Safra primavera (22 de setembro a 30 de novembro)
Favoráveis	1 Responsivos	2 Responsivos	4
Médios	3 Responsivos	6	8 Rústicos
Desfavoráveis	5	7 Rústicos	9 Rústicos

socas alcançadas na casela 9 são de 30 a 40% inferiores às das caselas 1, 2 e 3. Evidencia-se, aí, a importância de os programas de melhoramento obterem genótipos mais tolerantes à seca e com maior produtividade para essa condição mais desfavorável.

Dessa forma, têm-se duas estratégias de alocação varietal:

- Alocação conforme perfil de resposta varietal – ela possibilita incorporar as altas respostas dos materiais responsivos, elevando a média agrícola da empresa. O uso de cultivares rústicas pode viabilizar ambientes desfavoráveis, como aqueles com elevado déficit hídrico, possibilitando a utilização das caselas 7, 8 e 9 (Tabela 3.14).
- Compensação de perdas – tem como objetivo atenuar os ambientes mais negativos, com a escolha de ciclo mais favorável ao acúmulo de biomassa. A Tabela 3.14 ilustra essa estratégia ao destacar as caselas ambientais com notas de 1 a 9. As caselas 1 a 3 são superiores para TCH; 4 a 6 são intermediárias e 7 a 9 restritivas.

Na atualidade, está se tornando bastante comum lançar mão da estratégia de compensação, que leva a eleger para uso as caselas 1 a 6, evitando as de valores elevados.

A estratégia de alocação conforme o perfil de resposta varietal pode ser ilustrada com o seguinte cenário: imaginem uma partida de futebol, onde as diferentes caselas ambientais equivalem ao time adversário; o fitotecnista, o técnico que decide a partir de um plantel de jogadores (cultivares) como escalar a sua equipe, aproveitando-se da especialidade de cada atleta e analisando as características de cada adversário (caselas) a ser enfrentado. Em outras palavras, tendo solos mais favoráveis e uma necessidade de produzir matéria-prima para os meses de primavera, é necessário “escalar” uma variedade responsiva que tenha uma curva de maturação média/tardia. Caso se tenha um “jogo duro”, ou seja, o ambiente disponível é um solo, de fertilidade bastante restrita, e pode-se “escalar” uma variedade rústica. A antecipação da colheita para o período do outono também constitui uma estratégia adequada para esse tipo de condição.

Na Tabela 3.15, com base nos conceitos discutidos, arbitram-se coeficientes negativos para as condições mais restritivas de produção (solos álicos, ácidos e para o ciclo de primavera) e outros positivos para as condições mais favoráveis (solos eutróficos, mesotróficos e para o ciclo de outono). Assim as caselas assumem valores positivos, nulos e negativos. A indicação na estratégia de compensação é que sejam evitadas

Tabela 3.15. Matriz de ambientes de produção com diferentes níveis dos fatores “solos” e “época de colheita” adaptada à estratégia de alocação, segundo critérios de compensação ambiental.

Solo	Safra outono (+1) (1° de abril a 21 de junho)	Safra inverno (0) (22 de junho a 21 de setembro)	Safra primavera (-1) (22 de setembro a 30 de novembro)
Eutrófico (+2)	+3	+2	1
Mesotrófico (+1)	+2	+1	0
Distrófico (0)	+1	0	-1
Álicos (-1)	0	-1	-2
Ácidos (-2)	-1	-2	-3

as caselas negativas, ou seja, se um ambiente é desfavorável (solos álicos e ácricos), deve-se planejar a colheita desses solos para o outono, pois essa condição minimiza os efeitos negativos dos piores solos e ainda antecipa a maturação.

Para os solos de maior fertilidade ou para aqueles que apresentam maior capacidade de retenção de água, existe maior flexibilidade para o planejamento de colheita, podendo compreender as três épocas. Por sua vez, o ciclo de outono promove maior produtividade, amenizando os efeitos restritivos dos solos álicos e ácricos para a cana-de-açúcar (Prado et al., 1998; Landell et al., 2003). A análise de 66.661 dados experimentais (Tabela 3.16) confirma a matriz proposta na Tabela 3.14.

Nota-se, então, que, mesmo nos solos eutróficos ou mesotróficos, haverá perdas para a colheita de primavera, mas essas perdas são relativamente menores que as dos álicos e ácricos, caracterizando o que chamamos de estratégia de compensação: “colhe-se antes as caselas mais negativas para se perder menos”.

Os dados apresentados na Tabela 3.17 referem-se à prospecção do comportamento varietal em empresa da região Centro-Sul, seguindo-se os critérios anteriormente definidos (Tabela 3.14). Cada casela ambiental apresenta dois valores de produtividade (média de cinco cortes), sendo à

esquerda a produtividade de todas as cultivares colhidas na condição da casela, e à direita está o valor obtido com as cultivares de melhor desempenho para cada casela ambiental. Ressalta-se que as cultivares relacionadas não se encontram cultivadas em todas as caselas, o que impede uma comparação mais apropriada. No entanto, o propósito dessa tabela é revelar que um simples exercício de realocação varietal pode promover ganhos bastante expressivos na produtividade agrícola. No caso presente, eles foram de 18,9% e foram obtidos por cultivares em uso na empresa. A utilização de cultivares mais adequadas e modernas, selecionadas segundo critérios regionais, pode promover ganhos ainda mais expressivos. A Tabela 3.18 mostra um comparativo da cultivar IACSP94-4004 com a RB72454, indicando que os ganhos mais expressivos foram obtidos na região de Mococa, Serra da Mantiqueira, onde a primeira cultivar foi originalmente selecionada.

O uso da matriz impõe por vezes o manejo de cultivares rústicas de maturação média/tardia para outono em ambientes desfavoráveis. O fato de estarem em ambientes restritivos promove de maneira natural uma melhor maturação, que pode ser intensificada, ainda, com o uso de maturadores. Assim, observem que, na casela 6 (outono x desfavorável), as cultivares com melhor desempenho são todas de média

Tabela 3.16. Matriz de ambientes de produção com diferentes níveis dos fatores “Solos” e “Época de colheita” aplicados aos dados acumulados no Programa Cana IAC nos últimos 10 anos (média do terceiro corte), em análise de 66.661 parcelas.

Grupo solo (quim.)	Outono	Inverno	Primavera
Eutrófico	85,31	84,21	78,93
Mesotrófico	86,53	84,82	72,18
Distrófico	81,97	80,19	69,00
Álico	78,25	77,01	66,15
Ácrico	75,59	62,85	55,48
Média	81,50	77,80	68,30

Fonte: Adaptado de Scarpari et al. (2015).

Tabela 3.17. Estratificação da produção agrícola (média de cinco cortes) registrada em empresa da região Centro-Sul do Brasil nos diferentes períodos de safra (outono, inverno e primavera) em ambientes de diversos potenciais de produção (dados referentes aos últimos 5 anos).

Ambiente	Outono		Inverno		Primavera	
	91,3	106,0	88,8	97,3	76,9	92,6
Favorável					IAC87-3396	
			RB855113		SP87-365	
	RB855453		RB867515		RB855113	
	SP91-1049		SP80-3280		RB855536	
			SP81-3250		SP83-2847	
	82,9	93,0	72,7	90,0	71,9	86,4
Médio		IAC86-2210		IAC87-3396		RB855536
		SP83-2847		RB867515		RB867515
		RB855453		SP81-3250		SP80-3280
		RB867515		SP84-1431		SP84-1431
		SP80-3280				
	76,3	84,2	66,5	84,0	62,1	79,3
Desfavorável		IAC87-3396		IAC87-3396		
		IAC91-5155		RB867515		IAC87-3396
		RB867515		SP83-2847		IAC91-5155
		SP83-2847		SP86-42		SP79-1011
		SP86-155		SP86-155		

Média atual da usina = 76,6 t ha⁻¹. Média com manejo varietal = 91,1 t ha⁻¹. Percentagem de aumento com cultivares usadas com manejo = 18,9%.

Tabela 3.18. Produtividade agroindustrial (TPH) da cultivar IACSP94-4004, lançado em 2005, em comparação a RB72454, em seis regiões canaveiras do Centro-Sul do Brasil (médias de quatro cortes com colheita na primavera).

Região	TPH	
	IACSP94-4004	RB72454
Goiás	16,01	14,96
Jaú	18,85	18,92
Mococa	19,02	14,82
Pindorama	17,52	15,13
Piracicaba	17,93	15,20
Ribeirão Preto	17,13	16,15

maturação (IAC87-3396, IAC91-5155, RB867515 e SP83-2847). Isso é possível utilizando-se os conceitos da matriz de ambientes, que provoca em solos restritivos, alterações no perfil de maturação das cultivares, possibilitando a antecipação.

“Ambiência” e o manejo da “matriz tridimensional (3º eixo em cana-de-açúcar)”

A matriz de produção tridimensional, também conhecida como matriz de terceiro eixo, constitui uma evolução da matriz de produção bidimensional, que considera os fatores épocas de

colheita e ambientes de produção, conforme já descrito neste capítulo.

O terceiro eixo foi originalmente descrito e tem sido divulgado e implementado pelos pesquisadores do Centro de Cana IAC, desde 2007, quando passaram a considerar um terceiro fator que é o ciclo da planta, considerando que este é determinante nas respostas da cultura a deficit hídrico e adaptação a situações restritivas do ambiente (Landell et al., 2010). Esse terceiro fator, que é o ciclo da cultura, denomina-se “terceiro eixo” e com ele o modelo passou a ser uma matriz tridimensional. O principal objetivo de implementar esse conceito é ter uma eficiente ferramenta para mitigar o deficit hídrico, considerando que quase 100% da nossa canavicultura é de sequeiro (Xavier et al., 2020).

Assim, conforme Xavier et al. (2020), o principal resultado tem sido o aumento da produtividade agrícola como um todo, decorrente da menor “desconstrução” das produtividades dos ciclos que se seguem, o que resulta em maior longevidade do canavial. Em outras palavras, o principal resultado tem sido o aumento de produtividade agrícola e agroindustrial de todos os ciclos, trazendo como consequência maior longevidade dos canaviais, resultando, assim, em maior sustentabilidade econômica da atividade. Para adotar a matriz tridimensional, temos que associar uma série de conhecimentos, o que traz uma complexidade um pouco maior às decisões. De uma maneira simplificada, podemos dizer que a antecipação da colheita dos ciclos mais jovens (1º e 2º cortes) é uma prática que deve ser adotada de maneira disciplinada. Isso traz inúmeras consequências no perfil varietal adotado, assim como no uso das estratégias de maturação, como a associação de produtos maturadores em ambientes mais restritivos com a finalidade de promover uma maturação mais “radical” em variedades com perfil de maturação média.

Dentre as consequências positivas desse manejo, Xavier et al. (2020) destacam:

- a) Aumento expressivo da população de colmos para os ciclos mais avançados.
- b) Aumento da produtividade agroindustrial nos cortes avançados, promovendo assim maior longevidade dos canaviais.
- c) Aspectos secundários, mas não menos importantes são: maior fechamento das entrelinhas, facilitando o manejo da matocompetição e promovendo melhor rendimento na colheita.

Os resultados da implantação da matriz tridimensional têm sido potencializados ao longo de 5 anos, mas os primeiros resultados são palpáveis na produtividade dos primeiros cortes a partir do segundo ano de adoção (Tabela 3.19). Teoricamente, a matriz do terceiro eixo pode ser implementada por qualquer produtor da região Centro-Sul, mas os modelos foram desenvolvidos a partir de unidades que ficam em regiões com estresse hídrico mais pronunciado, portanto, precisam de uma melhor validação para regiões como Mato Grosso do Sul, Paraná e sul de São Paulo nas regiões de Assis e Ourinhos (Xavier et al., 2020).

Aplicação de critérios para manejo varietal

A seguir são enumerados os passos ilustrados com um exemplo para que um projeto de manejo varietal seja aplicado em determinada região ou empresa:

- a) Caracterização dos ambientes de produção por meio de levantamentos pedológicos:
 - Proceder análise físico-químico dos solos nas áreas de plantio.
 - Analisar os dados climáticos regionais.
 - Caracterizar os ambientes de produção.

Tabela 3.19. Aplicação da matriz tridimensional com os três fatores: a) ambientes/solos; b) época/mês de colheita; e c) ciclo/corte do canavial.

	Abril			Maio			Junho			Julho			Agosto			Setembro			Outubro			Novembro		
	1ª D	2ª D	3ª D	1ª D	2ª D	3ª D	1ª D	2ª D	3ª D	1ª D	2ª D	3ª D	1ª D	2ª D	3ª D	1ª D	2ª D	3ª D	1ª D	2ª D	3ª D	1ª D	2ª D	3ª D
Favorável +							1º C	1º C	2º C	2º C	3º C	4º C	5º C	6º C	7º C	7º C	8º C	8º C	9º C	9º C	10º C	10º C	11º C	
Favorável							1º C	1º C	2º C	2º C	3º C	3º C	4º C	5º C	6º C	7º C	7º C	8º C	8º C	9º C	9º C	10º C	10º C	11º C
Favorável -						1º C	1º C	2º C	2º C	3º C	3º C	4º C	5º C	6º C	6º C	7º C	7º C	8º C	8º C	9º C	9º C	9º C	10º C	10º C
Intermediário +						1º C	2º C	2º C	3º C	4º C	4º C	5º C	6º C	6º C	7º C	7º C	8º C	8º C	9º C	9º C	9º C	10º C	10º C	
Intermediário					1º C	1º C	2º C	3º C	4º C	4º C	5º C	5º C	6º C	6º C	7º C	7º C	8º C	8º C	8º C	9º C	9º C	9º C	9º C	
Intermediário -				1º C	2º C	2º C	3º C	4º C	4º C	5º C	5º C	6º C	6º C	7º C	7º C	7º C	8º C	8º C	8º C	8º C	8º C	8º C		
Desfavorável +			1º C	2º C	2º C	3º C	3º C	4º C	4º C	5º C	5º C	6º C	6º C	7º C	7º C	7º C	8º C	8º C	8º C	8º C	8º C			
Desfavorável		1º C	2º C	2º C	3º C	3º C	4º C	4º C	5º C	5º C	6º C	6º C	7º C	7º C	7º C	8º C	8º C	8º C	8º C	8º C				
Desfavorável -	1º C	2º C	2º C	3º C	3º C	4º C	4º C	5º C	5º C	6º C	6º C	7º C	7º C	7º C	8º C	8º C	8º C	8º C						

Fonte: Xavier et al. (2020).

b) Prospecção do desempenho varietal nas condições locais:

- Em áreas comerciais, esse levantamento refere-se ao desempenho histórico das cultivares já utilizadas na empresa em questão. Os dados podem ser obtidos a partir de médias de cinco cortes (dados reais ou estimados), preenchendo as caselas ambientais compostas por ambientes (favoráveis, médios e desfavoráveis) e épocas de colheita (outono, inverno e primavera). Com a matriz preenchida, elegem-se as cultivares que mais se destacaram em cada casela nos quesitos TCH e TPH.
- Em ensaios de competição, estes dados devem receber análise similar às áreas comerciais, com as devidas restrições, por se tratarem de dados experimentais e, portanto, necessitarem de uma validação agrônômica.
- Classificar cultivares em prioridades 1, 2 e 3.

A partir das informações de áreas comerciais e experimentais, elegem-se as cultivares segundo prioridades de multiplicação, conforme critério abaixo:

- Prioridade 1 (Prio1): cultivares já validadas para as condições locais e que deverão ter a multiplicação acelerada por métodos “quebra-quebra” e plantio esticado (de 6 a 9 gemas m⁻¹).
- Prioridade 2 (Prio2): cultivares liberadas pelas instituições de pesquisa (IAC, CTC, Ridesa e CanaVialis), devendo atingir inicialmente áreas de até 200 ha para fins de validação no cultivo comercial.
- Prioridade 3 (Prio3): clones que se destacam nas condições locais, indicados pela rede experimental regional, com pos-

sibilidades de virem a ser cultivares. De forma geral, as áreas para cada genótipo não devem ultrapassar 10 ha.

c) Levantamento de áreas destinadas a viveiros de mudas:

- Quantificar áreas de plantio (reforma e expansão):
 - 1) Quais cultivares estão disponíveis em viveiros?
 - 2) Quantidade de cada uma.
 - 3) Qualidade de mudas.
- Verificar protocolos de *roguing* (doenças, mistura varietal, etc.) e avaliação quanto ao raquitismo da soqueira (*Leifsonia xyli* subsp. *xyli*).
- Instalar viveiros:
 - 1) Viveiros de introdução (“berçário”) de genótipos Prio2 e Prio3. Utilizado para receber as introduções de clones e novas cultivares.
 - 2) Viveiros satélites: devem ser instalados próximo às áreas de plantio do ano posterior (Prio1).
- Gerar carta de manejo varietal:
 - 1) Adequar o perfil de resposta das cultivares aos ambientes qualificados.
 - 2) Definir épocas de colheita de acordo com os ambientes de produção.
- Criar cenário de evolução das inovações e metas desejadas:
 - 1) Evolução do censo varietal.
 - 2) Quais cultivares serão substituídas?
 - 3) Quem entra no “jogo”?
- Estimar ganhos agroindustriais.

Principais cultivares no Brasil

A cada série de seleção encerrada, em projetos de pesquisa dos programas de melhoramento, disponibiliza-se anualmente ao setor um grupo significativo de novas variedades, divididas em regiões de adaptação (Centro-Sul e Norte-Nordeste), com performance nos ambientes de produção, nível de florescimento (Nordeste), época de colheita, com os principais destaques de manejo.

Na região Centro-Sul do País, nos principais estados produtores (Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo), apresenta-se um calendário específico de colheita, tendo usualmente o período entre abril e dezembro como aquele de maior concentração dessa atividade, e representa cerca de 90% de toda a produção nacional. Já na região Norte-Nordeste, nos maiores estados produtores (Tocantins, Pará, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Bahia, Rio Grande do Norte, Maranhão e Piauí), colhe-se a maior parte do volume produzido de agosto a março, tendo uma dinâmica diferente de produção e das operações pertinentes a ela, simbolizando quase 10% da safra brasileira. (Acompanhamento..., 2021).

Nas Tabelas 3.20 e 3.21, estão relacionadas as principais cultivares liberadas e as indicações pelas instituições obtentoras, IAC, CTC, Ridesa. É informado o perfil de resposta de cada cultivar, assim como os ambientes onde devem ser alocadas e a época de colheita mais apropriada conforme a curva de maturação.

Em eventos sobre variedades, divulgações de empresas ou em consultorias, são observadas revisões das indicações dos programas de melhoramento, ajustando recomendações de manejo com especialistas e produtores. Como exemplo, a Tabela 3.22 relaciona as principais

cultivares em uso e a recomendação de manejo, com base nas indicações das instituições obtentoras como IAC, CTC, Ridesa, CanaVialis e BioVertis. É informado o perfil de resposta de cada cultivar, assim como os ambientes onde devem ser alocadas, com a época de colheita mais apropriada conforme a curva de maturação específica.

Censo varietal no Brasil

Várias fontes de informação sobre área de cultivo das variedades de cana-de-açúcar estão disponíveis no Brasil. As informações e análises dos dados levantados junto às unidades produtoras permitem: a disseminação de tecnologia sobre as principais variedades cultivadas por região produtora e estado do País; o histórico de utilização e substituição varietal ao longo dos anos; avaliação da evolução do estágio médio de corte e participação do plantio em relação à área total cultivada; posicionamento das unidades produtoras em relação a vários índices de eficiência no uso de variedades, entre outros.

Nas Tabelas 3.23 a 3.26, observam-se vários dados sobre o Censo Varietal do Brasil, nas safras dos anos 2018 a 2020, baseado na área colhida no Centro-Sul e Nordeste, levantada pela Conab e pela área recenseada pelo IAC e pela Ridesa, informações baseadas em Acompanhamento... (2021), Braga Junior et al. (2021) e Oliveira et al. (2021).

Destaque para o estado de São Paulo, que tem a maior área de cana-de-açúcar do Brasil, seguido pelos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e os outros. Os estados do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul possuem uma pequena área da cultura e não foram recenseados (Tabela 3.24).

O Norte-Nordeste, regiões onde a cana-de-açúcar predominou no passado, conta hoje com uma área cultivada recenseada de 477.472 ha, sendo que as poucas unidades dos estados de

Tabela 3.20. Características agrônômicas das principais variedades de cana-de-açúcar na região Centro-Sul.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Época de colheita							
		A	B	C	D	E	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
SP77-5181	Precoce	■					■	■						
SP80-1816	Soqueira, cana crua	■	■	■						■	■	■		
SP80-1842	Soqueira		■	■						■	■	■		
SP80-3280	Soqueira		■	■							■	■		
SP81-3250	Rica, produtividade		■	■	■					■	■	■		
SP83-2847	Rusticidade						■				■	■	■	
SP83-5073	Rica, cana crua	■	■	■				■	■					
SP84-1201	Uniformidade	■										■	■	
SP84-1431	Rica, produtividade			■	■				■	■	■			
SP84-2025	Tardia, rica	■	■	■	■							■	■	■
SP86-42	Soqueira, produtividade	■	■	■	■							■	■	■
SP86-155	Rica, produtividade	■	■	■						■	■	■		
SP87-344	Rica, produtividade	■	■	■						■	■	■		
SP87-365	Rica, produtividade	■	■	■							■	■		
SP87-396	Precoce	■							■	■				
SP89-1115	Precoce, soqueira	■	■	■					■	■	■			
SP90-1638	Soqueira, produtividade	■	■								■	■	■	■
SP90-3414	Colheabilidade	■	■	■							■	■	■	■
SP90-1107	Precoce	■	■	■					■	■	■			
SP90-1161	Precoce	■	■	■					■	■				

Continua...

Tabela 3.20. Continuação.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Época de colheita							
		A	B	C	D	E	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
SP91-1049	Precoce	█			█		█							
CTC 1	Precoce	█				█	█							
CTC 2	Colheabilidade, perfilhamento	█			█					█				
CTC 3	Soqueira	█			█						█			
CTC 4	Rica, produtividade	█			█				█					
CTC 5	Precoce	█		█			█							
CTC 6	Produtividade	█			█					█				
CTC 7	Precoce	█			█		█							
CTC 8	Soqueira		█			█			█					
CTC 9	Precoce	█				█	█							
CTC10	Boa soqueira, rusticidade		█			█				█				
CTC11	Alta produtividade	█			█				█					
CTC12	Precocidade	█		█			█							
CTC13	Boa soqueira	█		█			█							
CTC14	Rusticidade	█			█					█				
CTC15	Rusticidade, tolerância à seca		█			█				█				
CTC16	Alto teor de sacarose, colheabilidade	█			█		█							
CTC17	Rusticidade, alto teor de sacarose		█			█		█						
CTC18	Ereta, tolerante à seca		█			█			█					
CTC19	Ereta, raro florescimento	█				█				█				

Continua...

Tabela 3.20. Continuação.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Época de colheita							
		A	B	C	D	E	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
CTC20	Alta produtividade, perfilhamento e longevidade	■							■					
CTC20BT	Proteção contra broca	■							■					
CTC21	Precoce e rica	■							■					
CTC22	Alta produtividade, precocidade	■					■							
CTC23	Alta produtividade, não floresce, tolera seca	■						■						
CTC24	Alta produtividade, não floresce	■								■				
CTC25	Desenvolvimento rápido, alta sacarose, porte ereto		■								■			
CT961007	Rusticidade, florescimento raro				■			■						
CT022994	Tardia, florescimento raro, porte ereto, tolerante à seca	■							■					
CTC9001	Produtividade, precocidade, PUI longo, não floresce		■				■							
CTC9001BT	Proteção contra broca		■				■							
CTC9002	Porte ereto e colheitabilidade	■							■					
CTC9003	Alto teor de sacarose, perfilhamento, não floresce	■						■						
CTC9003BT	Proteção contra broca	■						■						
CTC9004M	Alta produtividade		■						■					
CTC9005HP	Produtiva, rica e precoce	■					■							

Continua...

Tabela 3.20. Continuação.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Época de colheita							
		A	B	C	D	E	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
CTC9006	Rústica, responde à maturadores													
CTC9007	Precoce, baixo florescimento													
CTCE7	Alta fibra, cultivar tipo Cana Energia													
IAC86-2210	Alta sacarose, precoce													
IAC86-2480	Forageira, PUI longo													
IAC87-3396	Produtividade, soqueira													
IAC91-2195	Alta sacarose, precoce													
IAC91-2218	Alto perfilhamento													
IAC91-5155	Colheabilidade, tolerante à seca													
IACSP93-3046	Produtividade, PUI ⁽²⁾ longo													
IACSP93-6006	Produtividade													
IACSP94-2094	Rusticidade													
IACSP94-2101	Responsiva													
IACSP94-4004	Produtividade													
RB72454	Adaptabilidade													
RB835486	Rica													
RB845210	Rusticidade													
RB855035	Precoce, rústica													
RB855038	Produtividade													
RB855113	Produtividade													

Continua...

Tabela 3.20. Continuação.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Época de colheita							
		A	B	C	D	E	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
RB855156	Precoce													
RB855453	Rica, precoce													
RB855536	Soqueira, produtividade													
RB865230	Produtividade													
RB867515	Produtividade													
RB925211	Rica, produtividade													
RB925268	Colheita mecanizada													
RB925345	Rica, fibra													
RB935744	Rusticidade													
RB928064	Produtividade final safra													
RB965902	Riqueza, produtividade													
RB975033	Rica, produtividade, tolerância à seca													
RB975201	Crescimento rápido, produtividade, difícil florescimento													
RB975375	Rica, rústica													
RB987917	Rica, produtividade, florescimento baixo, tardia													
RB005014	Rica, colheitabilidade, sanidade													
RB006970	Rica, PUI longo													
RB015177	Rica, produtividade													

Continua...

Tabela 3.20. Continuação.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Época de colheita								
		A	B	C	D	E	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	
RB015935	Rica, produtividade	■			■		■								
RB036152	Rústica, tolerância à seca, produtiva		■	■				■							
RB056351	Rica, PUI longo	■			■		■								
RB056380	Rica, hiperprecoce	■		■			■								
RB064292	Produtividade, rústica	■			■				■						
RB108519	Rústica, tolerância à seca, produtiva		■	■					■						
CV0470	Média/tardia, rápido desenvolvimento, sanidade		■			■					■				
CV6654	Perfilhamento, colheitabilidade, sanidade	■			■				■						
CV7231	Precoce, porte ereto, colheitabilidade		■			■		■							
CV7870	Adaptabilidade ao plantio mecanizado, porte ereto, colheitabilidade		■			■			■						

⁽¹⁾ A = Solos de alta fertilidade a E = Solos de baixa fertilidade.

⁽²⁾ PUI = Período de utilização industrial.

⁽³⁾ Colheita nestes meses com o uso de maturadores.

Tabela 3.21. Características agrônômicas das principais variedades de cana-de-açúcar da região Norte-Nordeste.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Florescimento ⁽²⁾				Época de colheita							
		A	B	C	D	E	A	M	B	N	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	
RB72454	Adaptabilidade	■					■								■			
RB75126	Rica e tardia	■								■					■			
RB763710	Rusticidade			■					■				■					
RB813804	Rica e produtiva		■				■						■					
RB835486	Rica	■					■						■					
RB83594	Produtividade		■						■			■						
RB855113	Produtividade	■							■				■					
RB855536	Soca e produtiva	■								■		■						
RB863129	Rica, produtiva e adaptabilidade	■							■			■						
RB867515	Produtiva e tardia			■				■					■			■		
RB872552	Rica, produtiva e precoce	■							■			■						
RB92579	Rica, adaptabilidade e produtiva		■						■			■						
RB928064	Rica e produtiva	■							■			■						
RB931011	Produtividade		■					■				■						
RB931530	Rica	■					■						■					
RB932520	Rica e produtiva	■					■					■						
RB93509	Produtividade		■						■				■					
RB943365	Rica e precoce	■								■		■						
RB943538	Rica e produtiva		■							■			■					

Continua...

Tabela 3.21. Continuação.

Variedade	Destaque	Ambiente de produção ⁽¹⁾					Florescimento ⁽²⁾				Época de colheita						
		A	B	C	D	E	A	M	B	N	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.
SP77-5181	Rica e precoce	■						■									
SP78-4764	Produtiva	■	■	■						■							
SP79-1011	Rica, adaptabilidade e precoce		■	■	■	■		■									
SP80-1816	Rica e soca	■	■					■									
SP81-3250	Rica e produtiva		■	■	■			■									
SP83-2847	Rusticidade				■	■		■									
SP85-3877	Rica e produtiva	■	■					■									
SP86-42	Soca e produtiva		■	■	■					■							
SP91-1049	Precocidade	■	■	■				■									
B8008	Rica	■	■					■									
VAT90-212	Produtividade		■	■	■			■									

⁽¹⁾ A = Solos de alta fertilidade a E = Solos de baixa fertilidade.

⁽²⁾ A = alto, M = médio, B = baixo, N = nenhum.

Tabela 3.22. Recomendação de manejo de cultivares de cana-de-açúcar, segundo os critérios de época de colheita, ambientes de produção e responsividade para a região Centro-Sul do Brasil.

Ambiente	Programa	Posicionamento		
		Início	Meio	Fim
A	RB	015935, 975952	015935, 005014, 985476, 015177, 975201	005014, 985476, 015177, 975201
	IAC	05-2562, 04-6007	05-8069, 01-3127, 07-8044, 07-8008, 01-5503, 01-9561, 05-2562, 04-6007, 96-2042, 97-4039	01-5503, 96-2042, 95-5094
	CTC	9007, 9005, 9003	CT02-2994, 9007, 9005, 9003, 9002	CT02-2994, 9002
	CV/Vertex	618	6654	–
B	RB	015935, 975952	015935, 005014, 985476, 015177, 975201	005014, 985476, 015177, 975201
	IAC	05-2562, 04-6007	05-8069, 01-3127, 07-8044, 07-8008, 01-5503, 01-9561, 05-2562, 04-6007, 96-2042	01-5503, 96-2042, 95-5094
	CTC	9007, 9005, 9003, 9001	CT02-2994, 9007, 9006, 9005, 9004, 9003, 9002, 9001	CT02-2994, 9002
	CV/Vertex	618	6654, 0618	–
C	RB	015935, 975952, 975375, 975033	015935, 005014, 985476, 015177, 975201, 975375, 975242	005014, 985476, 015177, 975201, 975242
	IAC	05-2562, 04-6007, 97-4039	05-8069, 01-3127, 07-8008, 01-5503, 01-9561, 05-2562, 04-6007, 97-4039, 96-2042	01-5503, 97-4039, 96-2042, 95-5094
	CTC	9007, 9006, 9005, 9003, 9001	CT02-2994, 9007, 9005, 9003, 9002, 9004	CT02-2994, 9002
	CV/Vertex	618	7870, 0618, 6654	Vertex 3
D	RB	975375, 975033	975375, 975242	975242
	IAC	04-6007, 97-4039	07-8008, 04-6007, 01-5503, 97-4039	01-5503, 97-4039
	CTC	9006, 9001	CT96-1007, 9006, 9004, 9002, 9001	CT96-1007, 9002
	CV/Vertex	618	7870, 0618, Vertex 3	Vertex 3
E	RB	–	975242	975242
	IAC	97-4039	01-5503, 97-4039	01-5503, 97-4039
	CTC	–	CT96-1007	CT96-1007
	CV/Vertex	618	0618, Vertex 3	Vertex 3

Fonte: Adaptado de Nunes et al. (2020).

Ceará, Sergipe, Pará, Rondônia e Amazonas não foram recenseadas. Alagoas segue com a maior concentração de cana-de-açúcar no Nordeste, seguido do estado de Pernambuco. Nessa região aparecem algumas variedades que foram selecionadas localmente e predominam em estados diferentes. A variedade VAT90-212, desenvolvida no estado de Alagoas pela Usina Triunfo, tem sua área em ascensão (Tabela 3.25).

A seguir segue a listagem das variedades mais cultivadas no Brasil, desde o ano 2000 até 2017 (Machado Junior; Braga Junior, 2019), classificadas por sigla, mostrando as porcentagens de área das variedades que tiveram maior e menor longevidade na área comercial, baseados nas informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Conab (Tabela 3.26).

As variedades representam a espinha dorsal da indústria açucareira, mas, para obter o melhor resultado de cada uma delas, é necessário conhecer muito bem suas características, o ambiente de produção no qual serão exploradas e o manejo da lavoura com base na interação entre o genótipo e o ambiente. A adoção de novas cultivares, a evolução de cultivo e sua utilização comercial podem ser bem estudadas por meio dos dados de censo de variedades de cana-de-açúcar.

Dados agrupados e compilados sobre áreas de formação, colheita e cultivo de variedades fornecem relevantes análises. Por meio de levantamentos dos censos varietais regionais, obtém-se uma avaliação da aceitação das cultivares, determinando-se regiões de maior inovação em relação à tecnologia varietal, assim como a possibilidade de riscos biológicos por concentração de cultivo. Pelos dados da Tabela 3.26, claramente se observa a dinâmica de trocas varietais, que ocorrem principalmente pelas razões: perdas de produtividade por menor tolerância a doenças; baixa performance em novos sistemas de cultivo; surgimento de novas cultivares com melhores produtividades, boa adaptação regional e vantagens competitivas em relação às anteriormente cultivadas.

Tabela 3.23. Área de cultivo e proporção das principais variedades no Brasil, safra 2019/2020.

Classificação	Variedade	Área (ha)	(%)
1	RB867515	1.133.512	21,4
2	RB966928	676.693	12,8
3	RB92579	487.022	9,2
4	CTC4	446.538	8,4
5	RB855156	223.187	4,2
6	RB855543	178.168	3,4
7	SP83-2847	128.980	2,4
8	CTC9001	97.151	1,8
9	CTC15	91.775	1,7
10	RB855536	86.099	1,6
11	SP80-1816	72.753	1,4
12	IACSP955000	72.472	1,4
13	SP83-5073	72.422	1,4
14	SP81-3250	69.770	1,3
15	IAC911099	69.041	1,3
16	SP80-3280	68.418	1,3
17	CTC2	65.586	1,2
18	SP91-1049	62.321	1,2
19	CTC9003	54.990	1,0
20	RB835054	50.204	0,9
21	CTC20	49.462	0,9
22	CV7870	48.589	0,9
23	RB975201	44.691	0,8
24	RB965902	42.942	0,8
25	SP79-1011	42.238	0,8
26	SP80-1842	40.076	0,8
27	RB928064	38.979	0,7
28	SP78-4764	35.103	0,7
29	CTC9002	32.594	0,6
30	CV6654	27.910	0,5
Outras		676.934	12,8
Total geral		5.286.619	

Fonte: Oliveira et al. (2021).

Tabela 3.24. Área de cultivo na região Centro-Sul, por estado, na safra 2018/2019 (Conab/IAC), e percentual das principais variedades.

Variedade	Estado						
	Espírito Santo	Goiás	Mato Grosso	Mato Grosso do Sul	Minas Gerais	Paraná	São Paulo
	Área (ha)						
	47.245	640.171	166.402	611.696	613.284	513.565	3.823.369
(%)							
RB867515	3,7	22,6	50,0	35,8	19,4	45,3	18,3
RB966928	1,4	8,4	1,7	11,3	6,2	14,6	15,1
CTC4	0,0	0,0	4,1	0,0	7,4	3,7	8,0
RB92579	4,4	4,5	10,1	2,4	7,3	1,5	7,3
RB855156	0,0	1,1	0,0	6,0	4,2	5,3	5,3
RB855453	0,0	4,2	0,5	3,3	7,7	2,4	4,5
CTC15	0,0	2,4	1,4	0,7	3,3	0,0	3,0
SP83-2847	0,3	1,0	0,0	5,2	1,8	0,6	2,9
RB855536	2,0	1,2	3,5	4,9	3,4	0,9	2,1
SP81-3250	1,7	5,7	0,4	4,1	2,9	1,2	2,1
IACSP955000	0,0	3,2	0,3	0,0	1,1	1,1	1,8
CTC2	0,9	1,2	0,3	0,7	1,8	0,0	1,7
SP80-3280	3,9	0,0	0,0	0,0	1,0	0,6	1,6
SP80-1816	0,8	2,7	0,0	0,0	7,2	0,0	1,6
CTC9001	0,4	0,0	0,3	0,0	2,3	1,4	1,5
SP80-1842	3,9	0,0	0,0	2,1	3,3	0,0	1,2
IAC91-1099	0,0	6,5	3,9	0,0	1,2	0,0	1,2
CTC20	0,0	0,0	0,3	0,8	1,6	0,0	1,1
RB937570	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB925345	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SP83-5073	0,0	2,8	10,1	1,3	0,0	0,0	0,0
CTC9	0,0	1,3	1,9	0,7	1,3	0,0	0,0
IAC87-3396	0,0	1,8	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0
RB855054	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	3,1	0,0
RB928064	0,0	1,8	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Outras	3,7	3,1	6,3	3,6	0,0	12,8	2,1

Fonte: Acompanhamento... (2018) e Braga Junior (2021).

Tabela 3.25. Censo de variedades nas regiões Norte-Nordeste na safra 2018/2019 (Conab/IAC), e percentual das principais variedades.

Variedade	Estado				
	Alagoas	Bahia/Tocantins	Paraíba/ Rio Grande do Norte	Pernambuco	Piauí/Maranhão
	Área (ha)				
	200.109	43.481	92.341	115.879	25.662
(%)					
RB92579	38,0	0,0	57,8	27,0	48,2
VAT90-212	12,0	0,0	0,0	4,4	4,8
SP79-1011	11,0	0,0	4,3	10,3	0,0
RB867515	8,0	21,0	0,0	13,0	0,0
RB951541	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB931011	3,0	0,0	2,0	3,2	0,0
RB93509	3,0	0,0	1,7	2,7	0,0
SP81-3250	2,0	5,0	0,0	4,0	3,0
CTC2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB962962	1,0	0,0	1,2	0,0	0,0
RB98170	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SP78-4764	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CTC15	0,0	11,0	0,0	0,0	0,0
CTC4	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0
CTC9003	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0
CV7231	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
IACSP95-5094	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0
RB031130	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
RB855536	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0
RB962962	0,0	0,0	0,0	1,6	1,0
RB966928	0,0	3,0	0,0	0,0	25,0
RB992506	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0
SP83-5073	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0
SP86-3129	0,0	0,0	3,5	2,2	12,0
SP91-1049	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0
SP93-3094	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0
Outras	13,0	15,0	8,0	29,0	6,0

Fonte: Acompanhamento... (2018) e Braga Junior (2021)

Tabela 3.26. Participação percentual das principais variedades nas áreas comerciais de cultivo no Brasil, com base nos dados do IBGE (2000 a 2011) e da Conab (2012 a 2017).

Variedade	Percentual anual da área cultivada no Brasil (%)																	
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
CB45-3	1,9	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co997	0,8	0,6	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
CP51-22	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CTC15	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,4	1,9	2,1	2,6	2,7	2,8
CTC2	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,4	1,5
CTC20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
CTC4	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	1,7	2,4	3,5	4,0
IACSP95-5000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,2	1,4
NA56-79	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB72454	18	15,2	13,6	12,5	12,2	11,7	10,3	9,5	8,2	6,8	5,7	4,0	2,3	1,4	0,7	0,3	0,2	0,1
RB765418	0,9	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB785148	2,3	1,3	0,7	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB806043	2,4	1,8	1,1	0,5	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB825336	1,9	1,8	1,4	1,1	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
RB83102	1,5	1,2	0,9	0,6	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0
RB835054	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,4	1,8	1,8	2,0	2,0	2,1	2,0	1,9	1,6	1,3	1,3	1,3
RB835089	3,3	2,9	2,4	1,6	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0
RB835486	5,0	6,1	7,1	8,0	8,0	7,7	7,1	6,0	5,1	4,3	3,7	3,0	2,0	1,6	1,2	0,9	0,7	0,7
RB845210	0,2	0,6	0,8	0,9	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4

Continua...

Tabela 3.26. Continuação.

Variedade	Percentual anual da área cultivada no Brasil (%)																		
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
RB845257	2,2	2,3	2,3	1,9	1,6	1,2	0,7	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	
RB855113	2,3	2,7	3,0	2,9	2,7	2,1	1,8	1,2	0,9	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	
RB855156	0,6	0,8	1,2	1,6	1,8	2,2	2,4	2,3	2,5	2,8	2,9	2,9	3,2	3,4	3,4	3,8	3,9	4,0	
RB855453	0,6	0,9	1,1	1,9	2,4	3,2	3,8	4,7	5,2	5,7	5,9	6,1	5,9	5,6	5,5	4,3	4,5	4,6	
RB855536	3,9	5,6	6,6	6,7	6,3	5,7	4,7	4,1	4,0	3,7	3,7	3,3	3,1	3,0	2,7	2,4	2,6	2,6	
RB867515	0	0,1	0,5	1,7	3,0	5,5	8,9	13,9	17,3	19,7	21,1	23,3	24,6	25,2	26,9	26,9	25,8	26	
RB92579	0	0	0	0,3	0,5	1,2	2,2	3,2	3,3	3,8	4,5	5,4	6,3	7,0	7,8	8,4	9,3	8,9	
RB928064	0	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7	0,7	
RB966928	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,2	2,3	3,5	5,5	7,4	8,2	9,2	
SP70-1143	6,4	4,3	2,4	1,2	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SP70-1284	0,8	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SP71-1406	2,9	2,2	1,7	1,2	1,0	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	
SP71-6163	0,9	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SP71-6949	2,2	1,8	1,2	1,1	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	0	
SP78-4764	1,2	1,7	2,1	2,1	2,3	2,0	1,6	1,5	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,6	
SP79-1011	11	11,1	10,5	11,1	10,2	9,7	8,7	6,9	5,3	4,4	3,8	3,3	2,2	1,7	1,2	0,9	0,9	0,9	
SP79-2233	1,3	1,2	0,9	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	
SP80-1816	2,2	3,8	4,7	5,0	4,7	4,5	4,2	3,4	2,7	2,7	2,3	2,1	2,3	2,2	1,9	2,1	2,2	1,9	
SP80-1842	5,8	6,4	5,9	5,1	4,4	3,7	3,3	2,8	2,4	2,3	2,1	1,9	1,9	1,8	1,8	1,5	1,4	1,4	

Continua...

Tabela 3.26. Continuação.

Variedade	Percentual anual da área cultivada no Brasil (%)																	
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
SP80-3280	0,5	0,8	1,2	1,6	1,9	2,0	2,3	2,1	2,2	2,0	2,0	1,8	1,7	1,5	1,2	1,2	1,1	1,1
SP81-3250	4,3	7,4	9,1	9,9	10,9	10,9	10,4	10,1	10,9	11,6	12,2	13	13,4	13,1	11,2	8,4	7,4	5,7
SP83-2847	0,2	0,4	1,0	1,8	2,6	3,6	4,4	5,1	4,9	4,7	4,3	3,7	3,1	2,7	2,6	2,5	2,4	2,5
SP83-5073	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9
SP89-1115	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,1	1,1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0
SP91-1049	0	0	0,1	0,3	0,6	0,8	1,1	1,3	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	1,0	0,8	0,7	0,5	0,5
VAT90-212	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0,9	0,8	1,2	0,8	0,7
Outras	11,4	11,5	13,1	13,5	14,2	14,8	15,0	14,7	15,0	14,8	15,0	14,7	14,4	14,2	14,2	14,9	14,4	14,5
Área total (mil ha)	5.474	5.869	5.956	6.207	6.285	6.734	7.267	8.053	9.427	9.371	9.978	9.817	9.606	9.673	9.834	9.363	9.676	10.200

Fonte: Machado Junior e Braga Junior (2019).

Com base no censo varietal de 293 unidades produtoras de cana-de-açúcar, na safra 2011/2012, coletado pelo Centro de Tecnologia Canavieira, diversos índices de eficiência no uso de variedades foram determinados e discutidos, bem como a análise dos riscos e das potencialidades de ganhos com exploração de cultivares de geração mais moderna (Raizer et al., 2013).

Em projeto detalhado e elaborado para avaliação de censo varietal, com análise em cada região do estado de São Paulo e suas características ambientais, tais como pluviosidade e temperaturas, o IAC coletou informações em seis principais regiões canavieiras (Braga et al., 2017). Em 2016/2017 foram recenseados um total de 3.701.945 ha de cana-de-açúcar cultivada. Foi adicionado também o censo de variedades dessas regiões, da safra 2018/2019, com intuito de comparar e verificar o crescimento e diminuição de algumas variedades. Como referência adotou-se a característica climática da região central do estado, representada pela cidade de Bauru, SP (Tabela 3.27).

Definiu-se como a distribuição das regiões no estado de São Paulo: Assis – Sul; Araçatuba – Oeste; Jaú – Centro; Piracicaba – Leste; São José do Rio Preto – Norte e Ribeirão Preto – Nordeste (Figura 3.28).

As médias climáticas do estado de São Paulo, como uma região do Centro-Sul do Brasil (média de 30 anos), são apresentadas seguidas dos

censo regionais entre as safras 2016/2017 e 2020/2021 (Braga Júnior, 2017, 2021). Com as áreas de cultivo, bem como o plantel varietal e a evolução da proporção de variedades nesses 4 anos, pode-se avaliar como os diferentes climas e nichos de cultivo influenciam a adoção e evolução das variedades em cada região. Variações regionais estão baseadas nas condições edafoclimáticas e de manejo cultural, evidenciando a troca de variedades melhores substituindo outras já não tão produtivas/adaptadas (Tabelas 3.28 a 3.34).

As variedades destacadas são as protegidas pela Lei da Proteção de Cultivares, sancionada em 1997 (Brasil, 2011), e, para obtê-las e iniciar a exploração comercial, é necessário autorização do respectivo programa de melhoramento, que desenvolveu e registrou a cultivar, visto que é detentor dos direitos dessa patente vegetal.



Figura 3.28. Regiões de produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Fonte: Sachs (2015).

Tabela 3.27. Características climáticas da região central do estado de São Paulo (Localidade Bauru: alt. 537 m; lat. 22:19 S; long. 49:04 W; precipitação anual 1.357 mm).

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Temp. Média (°C)	24,1	24,1	23,2	21,2	18,5	17,4	17,3	18,8	20,2	21,5	22,8	23,5
Temp. Mínima (°C)	18,4	18,6	17,5	15,1	12,0	10,7	10,2	11,7	13,6	15,2	16,5	17,3
Temp. Máxima (°C)	29,8	29,6	29,0	27,4	25,1	24,2	24,4	26,0	26,9	27,9	29,2	29,7
Precipitação (mm): 1.357/ano	259	187	140	66	61	40	30	35	69	115	159	196
	Baixa		Regular	Média	Alta	Muito alta						
	<45		46–69	70–100	101–159	>160						

Tabela 3.28. Participação das principais variedades nas áreas de cultivo do estado de São Paulo, com base nos dados da Conab e do Censo Varietal IAC, nas últimas cinco safras.

Variedade	Ano safra					Tendência
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	
	Área total (ha)					
	3.617.437	3.700.029	3.823.369	3.375.511	3.466.511	
	(%)					
RB966928 ⁽¹⁾	11,2	13,0	15,1	17,0	17,0	≈
RB867515	22,5	21,0	18,3	14,0	12,0	↓
CTC4	4,3	5,8	8,0	11,0	12,0	↑
RB92579	7,1	6,9	7,3	6,0	6,0	≈
RB855156	5,3	5,4	5,3	6,0	5,0	≈
CTC9001 ⁽¹⁾	0,0	0,0	1,5	3,0	5,0	↑
RB855453	5,6	0,0	4,5	4,0	3,0	↓
SP83-2847	3,3	3,2	2,9	2,0	2,0	≈
CTC9003 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	↑
RB975201 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	↑
CV8770	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	↑
CTC9002 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	↑
CTC15 ⁽¹⁾	3,9	3,7	3,0	2,0	0,0	↓
CV7870	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	↓
RB855536	2,6	2,5	2,1	2,0	0,0	↓
SP81-3250	6,4	4,2	2,1	0,0	0,0	↓
SP80-1842	1,5	1,4	1,2	0,0	0,0	↓
CTC2	1,9	1,9	1,7	0,0	0,0	↓
IACSP95-5000 ⁽¹⁾	1,6	1,8	1,8	2,0	0,0	↓
SP80-3280	1,6	1,6	1,6	2,0	0,0	↓
CTC9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
SP83-5073	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
CTC20 ⁽¹⁾	0,9	1,1	1,1	0,0	0,0	↓
CTC17 ⁽¹⁾	1,1	0,9	0,0	0,0	0,0	↓
SP80-1816	2,1	1,8	1,6	0,0	0,0	↓
RB965902 ⁽¹⁾	0,0	1,0	1,1	0,0	0,0	↓
RB935744 ⁽¹⁾	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	↓
IAC91-1099 ⁽¹⁾	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	↓
Outras	14,6	21,1	17,6	29,0	30,0	↑

⁽¹⁾ Protegidas.

Fonte: Braga Junior et al. (2018, 2019, 2021) e Brunini e Carvalho (2018).

Tabela 3.29. Participação das principais variedades nas áreas de cultivo da região de Assis, no estado de São Paulo, com base nos dados da Conab e do Censo Varietal IAC, nas últimas cinco safras.

Variedade	Ano safra					Tendência
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	
	Área (ha) região Assis					
	372.979	373.963	413.053	399.078	359.953	
	(%)					
RB966928 ⁽¹⁾	12,3	13,1	16,2	17,0	17,0	≈
RB867515	20,6	21,4	18,0	16,0	15,0	↓
RB92579	13,1	10,3	13,4	12,0	10,0	↓
CTC4	9,9	10,8	10,1	10,0	9,0	≈
CTC9001 ⁽¹⁾	0,0	0,9	1,8	4,0	6,0	↑
SP83-2847	6,5	7,0	6,8	6,0	5,0	↓
RB855156	5,0	5,3	5,0	5,0	5,0	≈
CTC9003 ⁽¹⁾	0,0	0,0	1,7	3,0	4,0	↑
CTC9004AM ⁽¹⁾	0,0	1,3	1,4	2,0	4,0	↑
IACSP95-5000 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,9	0,0	2,0	↑
RB975201 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,8	1,0	1,0	↑
CTC9002 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	↑
CTC15 ⁽¹⁾	4,7	4,0	2,7	2,0	0,0	↓
RB855536	2,1	1,5	1,0	1,0	0,0	≈
SP81-3250	3,5	1,6	0,0	0,0	0,0	↓
RB855453	2,5	2,1	1,3	0,0	0,0	↓
SP80-1842	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	↓
CTC2	1,2	1,6	1,3	0,0	0,0	↓
SP80-3280	0,0	1,0	0,9	0,0	0,0	↓
CTC9	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
SP83-5073	1,5	0,0	0,8	0,0	0,0	↓
CTC20 ⁽¹⁾	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	↓
CTC17 ⁽¹⁾	1,2	1,0	0,0	0,0	0,0	↓
CTC7	1,4	1,3	1,0	0,0	0,0	↓
RB965518 ⁽¹⁾	1,3	2,2	1,3	0,0	0,0	↓
CTC11	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
CTC16 ⁽¹⁾	0,7	0,9	0,8	0,0	0,0	↓
Outras	9,4	11,1	12,8	21,0	26,0	↑

⁽¹⁾ Protegidas.

Fonte: Braga Junior et al. (2018, 2019, 2021) e Brunini e Carvalho (2018).

Tabela 3.30. Participação das principais variedades nas áreas de cultivo da região de Araçatuba, no estado de São Paulo, com base nos dados da Conab e do Censo Varietal IAC, nas últimas cinco safras.

Variedade ⁽¹⁾	Ano safra					Tendência
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	
	Área (ha) região Araçatuba					
	894.542	899.279	992.837	723.453	731.974	
	(%)					
RB867515	36,2	34,6	29,8	23,0	19,0	↓
RB966928 ⁽¹⁾	10,0	11,6	13,8	17,0	17,0	↑
CTC4	4,5	5,5	8,4	15,0	15,0	↑
RB92579	10,9	9,8	10,8	10,0	10,0	≈
CTC9001 ⁽¹⁾	0,0	0,9	0,0	4,0	8,0	↑
RB975201 ⁽¹⁾	0,0	0,0	1,0	3,0	4,0	↑
CTC15 ⁽¹⁾	3,6	3,8	3,6	2,0	2,0	↓
RB975242 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	↑
RB975033 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	↑
RB855156	1,6	1,1	1,2	1,0	1,0	≈
RB855453	3,8	4,8	3,8	3,0	1,0	↓
CTC9002 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	↑
SP83-2847	0,9	0,7	0,7	0,0	0,0	↓
CTC9003 ⁽¹⁾	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	↓
RB855536	0,6	1,1	1,3	0,0	0,0	↓
SP81-3250	7,9	6,3	3,4	1,0	0,0	↓
SP80-1842	1,6	1,8	1,6	0,0	0,0	↓
CTC2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
IACSP95-5000 ⁽¹⁾	0,0	0,7	0,9	0,0	0,0	↓
SP80-3280	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	≈
CTC9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
RB928064 ⁽¹⁾	0,7	1,1	1,6	2,0	0,0	↑
SP91-1049	0,8	0,8	1,2	1,0	0,0	≈
RB835054	0,9	1,1	1,3	0,0	0,0	↓
RB937570 ⁽¹⁾	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
RB835486	1,3	1,1	0,0	0,0	0,0	↓
RB965902 ⁽¹⁾	0,0	0,7	1,0	0,0	0,0	↓
RB935744 ⁽¹⁾	0,9	1,4	1,2	0,0	0,0	↓
RB855035	1,6	1,0	0,9	0,0	0,0	↓
Outras	9,9	10,1	10,6	17,0	18,0	↑

⁽¹⁾ Protegidas.

Fonte: Braga Junior et al. (2018, 2019, 2021) e Brunini e Carvalho (2018).

Tabela 3.31. Participação das principais variedades nas áreas de cultivo da região de Jau, no estado de São Paulo, com base nos dados da Conab e do Censo Varietal IAC, nas últimas cinco safras.

Variedade	Ano safra					Tendência
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	
	Área (ha) região Jau					
	634.583	638.518	632.162	522.893	589.463	
	(%)					
RB966928 ⁽¹⁾	13,5	16,0	17,7	18,0	17,0	↑
RB867515	23,2	21,8	21,0	18,0	17,0	↓
RB855156	10,9	11,0	10,7	11,0	9,0	≈
SP83-2847	9,5	8,8	8,1	8,0	6,0	↓
CTC4	1,2	2,1	3,0	4,0	5,0	↑
CTC9001 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,9	2,0	5,0	↑
CV7870	0,0	1,7	0,0	4,0	5,0	↓
RB92579	5,9	6,0	5,4	5,0	4,0	≈
SP80-3280	1,8	2,1	2,7	3,0	3,0	≈
CTC2	2,5	2,6	2,5	0,0	2,0	↓
RB855035	0,0	0,0	1,0	2,0	2,0	↑
IACSP04-6007 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	↓
CTC15 ⁽¹⁾	4,0	3,3	2,3	0,0	0,0	↓
RB855536	1,2	1,0	1,0	0,0	0,0	↓
SP81-3250	3,9	1,9	0,0	0,0	0,0	↓
RB855453	1,9	1,4	1,0	0,0	0,0	↓
SP80-1842	1,4	1,1	0,0	0,0	0,0	↓
IACSP95-5000 ⁽¹⁾	1,6	2,0	1,8	2,0	0,0	↓
CTC9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
CTC20 ⁽¹⁾	1,0	1,1	1,2	0,0	0,0	↓
CTC17 ⁽¹⁾	1,9	1,6	1,0	0,0	0,0	↓
CTC11	0,0	0,6	0,8	0,0	0,0	↓
CV6654 ⁽¹⁾	1,9	1,8	1,3	1,0	0,0	↓
SP80-1816	0,7	0,8	0,0	0,0	0,0	↓
RB965902 ⁽¹⁾	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
RB935744 ⁽¹⁾	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	↓
Outras	10,1	11,3	13,9	22,0	23,0	↑

⁽¹⁾ Protegidas.

Fonte: Braga Junior et al. (2018, 2019, 2021) e Brunini e Carvalho (2018).

Tabela 3.32. Participação das principais variedades nas áreas de cultivo da região de Piracicaba, no estado de São Paulo, com base nos dados da Conab e do Censo Varietal IAC, nas últimas cinco safras.

Variedade	Ano safra					Tendência
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	
	Área (ha) região Piracicaba					
	305.754	275.979	269.123	249.584	232.801	
	(%)					
RB966928 ⁽¹⁾	11,1	13,0	15,6	17,0	16,0	≈
CTC4	3,6	4,8	6,4	9,0	10,0	↑
RB855156	11,4	11,9	11,7	11,0	10,0	≈
RB867515	18,0	14,1	12,7	10,0	9,0	↓
CTC9001 ⁽¹⁾	0,0	0,0	1,4	3,0	6,0	↑
SP80-3280	5,5	5,4	5,1	5,0	4,0	≈
RB855035	0,0	1,0	1,8	3,0	4,0	↑
CTC20 ⁽¹⁾	2,4	3,1	3,1	3,0	3,0	≈
CV6654 ⁽¹⁾	7,5	5,6	4,7	4,0	3,0	≈
RB855453	4,7	4,3	3,7	4,0	2,0	↓
SP80-1842	1,2	1,5	1,6	0,0	2,0	≈
CTC11	2,8	3,6	3,2	3,0	2,0	↓
SP83-2847	2,2	2,3	2,1	0,0	0,0	↓
CTC15 ⁽¹⁾	4,4	4,1	3,2	0,0	0,0	↓
RB855536	2,4	2,3	2,1	0,0	0,0	↓
SP81-3250	2,2	0,9	0,0	0,0	0,0	↓
CTC2	2,0	1,9	1,6	0,0	0,0	↓
IACSP95-5000 ⁽¹⁾	1,5	2,0	2,2	2,0	0,0	↓
CTC9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
CTC17 ⁽¹⁾	3,5	3,5	2,7	0,0	0,0	↓
SP80-1816	1,0	1,4	1,5	0,0	0,0	↓
CV8770	2,7	2,6	2,3	0,0	0,0	↓
Outras	8,8	10,7	11,3	26,0	29,0	↑

⁽¹⁾ Protegidas.

Fonte: Braga Junior et al. (2018, 2019, 2021) e Brunini e Carvalho (2018).

Tabela 3.33. Participação das principais variedades nas áreas de cultivo da região de São José do Rio Preto, no estado de São Paulo, com base nos dados da Conab e do Censo Varietal IAC, nas últimas cinco safras.

Variedade	Ano safra					Tendência
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	
	Área (ha) região São José do Rio Preto					
	823.224	853.083	811.925	783.901	885.491	
	(%)					
RB966928 ⁽¹⁾	10,8	12,7	15,4	18,0	17,0	≈
CTC4	3,0	5,6	10,0	14,0	16,0	↑
RB867515	19,2	17,0	13,6	11,0	11,0	≈
RB92579	8,2	9,3	8,9	8,0	6,0	↓
RB855453	10,0	9,6	8,4	8,0	6,0	↓
CTC9001 ⁽¹⁾	0,0	0,0	2,1	3,0	5,0	↑
CV7870	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	↑
CTC9003 ⁽¹⁾	0,0	1,0	1,7	3,0	3,0	≈
RB975201 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,9	0,0	3,0	↑
RB855156	1,3	1,7	1,9	2,0	2,0	≈
RB855536	3,5	3,3	2,6	3,0	2,0	≈
SP83-2847	2,2	1,8	1,4	0,0	0,0	↓
CTC15 ⁽¹⁾	4,7	4,6	3,8	3,0	0,0	↓
SP81-3250	10,3	7,1	3,9	0,0	0,0	↓
SP80-1842	1,4	1,2	0,0	0,0	0,0	↓
CTC2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
IACSP95-5000 ⁽¹⁾	1,5	1,5	1,3	0,0	0,0	↓
SP80-3280	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
SP91-1049	1,6	1,4	1,1	0,0	0,0	↓
RB835054	1,4	1,3	1,2	0,0	0,0	↓
RB937570 ⁽¹⁾	0,0	1,3	1,4	0,0	0,0	↓
RB835486	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
SP80-1816	1,2	1,0	0,0	0,0	0,0	↓
RB965902 ⁽¹⁾	0,0	1,2	1,5	2,0	0,0	↓
RB935744 ⁽¹⁾	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	↓
CV8770	0,0	0,0	1,6	3,0	0,0	↓
IAC87-3396	1,1	1,2	0,0	0,0	0,0	↓
Outras	15,4	15,0	17,3	22,0	25,0	↑

⁽¹⁾ Protegidas.

Fonte: Braga Junior et al. (2018, 2019, 2021) e Brunini e Carvalho (2018).

Tabela 3.34. Participação das principais variedades nas áreas de cultivo da região de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, com base nos dados da Conab e do Censo Varietal IAC, nas últimas cinco safras.

Variedade	Ano safra					Tendência
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	
	Área (ha) região Ribeirão Preto					
	670.863	659.207	704.269	696.603	666.830	
	(%)					
RB966928 ⁽¹⁾	10,6	12,5	13,6	14,0	15,0	↑
CTC4	5,8	7,7	8,9	11,0	12,0	↑
RB855156	7,5	7,7	8,0	8,0	8,0	≈
RB867515	10,9	9,5	7,4	6,0	4,0	↓
CTC9001 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	↑
RB855453	8,1	7,4	6,1	5,0	4,0	↓
IAC91-1099 ⁽¹⁾	0,0	1,7	4,8	5,0	4,0	≈
CTC2	4,2	4,4	4,0	4,0	3,0	≈
IACSP95-5000 ⁽¹⁾	3,8	4,4	4,2	4,0	3,0	≈
SP80-1816	4,3	4,2	4,3	4,0	3,0	≈
SP80-3280	2,7	2,8	2,4	2,0	2,0	≈
CTC20 ⁽¹⁾	1,8	2,6	2,3	2,0	2,0	≈
RB92579	1,1	1,3	1,2	0,0	0,0	↓
SP83-2847	0,0	1,3	1,3	0,0	0,0	↓
CTC15 ⁽¹⁾	2,9	2,4	1,6	0,0	0,0	↓
RB855536	6,0	5,4	4,7	4,0	0,0	↓
SP81-3250	5,7	2,4	1,2	0,0	0,0	↓
SP80-1842	2,3	1,7	1,3	0,0	0,0	↓
CTC9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	↓
CTC7	1,6	1,3	0,0	0,0	0,0	↓
RB835054	1,2	0,0	1,2	0,0	0,0	↓
CV6654 ⁽¹⁾	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	↓
RB965902 ⁽¹⁾	1,2	1,4	1,7	0,0	0,0	↓
CTC14 ⁽¹⁾	1,4	1,4	0,0	0,0	0,0	↓
CTC9005HP ⁽¹⁾	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	↓
Outras	15,9	16,5	18,5	29,0	36,0	↑

⁽¹⁾ Protegidas.

Fonte: Braga Junior et al. (2018, 2019, 2021) e Brunini e Carvalho (2018).

Considerações finais

Todo o conhecimento botânico da cana-de-açúcar, aliado aos estudos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos, e os desenvolvimentos da genética e métodos de melhoramento, têm contribuído significativamente para determinar manejos diferenciados quando os ambientes produtivos exigem incrementos de produtividade.

Entende-se que também se faz necessário que estudos versem sobre o desenvolvimento de raízes de cana-de-açúcar, sendo mais efetivos e menos incipientes. Isso é resultado, certamente, da dificuldade para uma avaliação padronizada e eficiente do sistema radicular, principalmente devido ao uso intensivo da mecanização da lavoura, além da demanda de novas tecnologias de sensoriamento e avaliação da disponibilidade hídrica, nutrição orgânica e mineral no sistema de cana crua. No entanto, é preciso que se determinem diagnósticos e estratégias operacionais que possibilitem avaliações com considerável nível de sucesso, estabelecendo-se padrões que possam ser mais universalizados, principalmente no que diz respeito a métodos de amostragem e estimativas de crescimento e concentração de raízes.

Os programas de melhoramento genético dedicam bastante atenção e investem muitos recursos e capital humano nos estágios finais de seleção, quando as variedades já estão locadas em ambientes diversos, nos ensaios de validação instalados nas usinas e fornecedores de cana-de-açúcar. A maioria das usinas conta com profissionais para cuidar da parte de pesquisa e desenvolvimento, pois as variedades de cana-de-açúcar são a espinha dorsal da produção, cujos resultados estão atrelados ao clima da região, tipo e fertilidade dos solos, época em que são plantadas e colhidas, e pela melhor estimativa da interação genótipo-ambiente no manejo adotado na unidade.

É indispensável também um manejo fitossanitário adequado pois as doenças prevalentes devem ser mantidas sob controle, como no caso da quantidade e dispersão de inóculo, mecanismos de disseminação das doenças, ambientes de estresse em certas condições climáticas, e época e idade da planta nos momentos de maior agressividade das doenças, entre outras. O Brasil já teve surtos de doenças que inviabilizaram excelentes variedades de cana-de-açúcar, como tivemos o mosaico no passado (por volta de 1920), o amarelinho (vírus da síndrome do amarelecimento) na SP71-6163 na década de 1990, a ferrugem-marrom que comprometeu a SP79-1011 e a RB835486 (décadas de 1980 e 1990), a ferrugem-laranja que mais recentemente inviabilizou a SP81-3250 e a RB72454 e principalmente o carvão, que até hoje é preocupante em algumas regiões, e que no passado já desbancou variedades ótimas como a NA56-79, campeã de cultivo nos anos 1970 e 1980. Quanto às pragas, a broca tem sido a campeã em causar danos nos canaviais, assim como as cigarrinhas, o *Sphenophorus levis*, outras pragas de solo, além dos cupins, formigas, nematoides, entre outras.

As pesquisas em biotecnologia já conseguiram lançar quatro variedades BT resistentes à broca (CTC20BT, CTC9001BT, CTC9003BT e 7515BT), fruto de manipulação genética utilizando o gene inseticida do *Bacillus thuringiensis* com grande sucesso. A empresa CTCCanaveira já tem outras variedades transgênicas em experimentação para diversos tipos de ambiente e que são resistentes à broca.

Em outro contexto, os programas de melhoramento genético têm contribuído significativamente para o desenvolvimento da cana-de-açúcar no Brasil, principalmente porque genética moderna e plantas melhoradas são a forma mais econômica e prática de incrementar produtividade. Ano após ano, e após sucessivos ciclos de seleção, com uso de genitores com genética

cada vez melhor para produção e resistência, os ganhos genéticos são transformados em novas e melhores cultivares. Para avançar geneticamente em cana-de-açúcar, a transgenia é também ferramenta e caminho estratégico necessário para que se possa resolver questões relacionadas a susceptibilidade das variedades a problemas entomológicos e fitopatológicos, aliados a melhores eficiências nutricionais e de uso da água, visando um melhor aproveitamento em ambientes de produção desfavoráveis, além de incrementar a eficiência em cultivos nos bons ambientes produtivos e com novas técnicas agronômicas.

Há outras tendências aplicadas ao manejo varietal usando novas ferramentas, associadas a processos de fenotipagem (*high throughput*, automatização em larga escala), com o uso de sensores espectrais e termais não invasivos embarcados em drones, equipamentos que permitem análise quantitativa e/ou qualitativa de metabólitos, da estrutura e do funcionamento das plantas. A sua integração com a genômica permitirá a obtenção de resultados mais rápidos na pesquisa. A fenotipagem, neste caso, funcionaria como um suporte essencial aos programas de melhoramento genético e biotecnologia.

Referências

- ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] CANA-DE-AÇÚCAR: safra 2017/18: quarto levantamento, v. 4, n. 4, p. 1-73, abr. 2018. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/17026_e0504d08aca77ee13e86c2e7e7f43424. Acesso em: 2 mar. 2022.
- ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] CANA-DE-AÇÚCAR: safra 2020/21: quarto levantamento, v. 7, n. 4, p. 1-57, maio 2021. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/37136_b3e7df44d7d5e801238498af6b39d254. Acesso em: 2 mar. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2012. Brasília, DF: ANA, 2012. 215 p. Edição especial.
- AGUIRRE JUNIOR, J. M. de. **Criação de novas variedades de cana no Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1936. 64 p. (Boletim técnico, 34).
- AMORIN, L.; BERGAMIN FILHO, A.; SANGUINO, A.; CARDOSO, C. O. N.; MORAES, V. A.; FERNANDES, C. R. Metodologia de avaliação da ferrugem da cana-de-açúcar (*Puccinia melanocephala*). **Boletim Técnico Copersucar**, n. 39, p. 13-16, nov. 1987.
- ANDRADE, M. C. de. **Modernização e pobreza: a expansão da agroindústria canavieira e seu impacto ecológico e social**. São Paulo: Ed. da Unesp, 1994. 250 p.
- ARANHA, C.; YAHN, C. A. Botânica da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 4-31.
- ARTSCHWAGER, E.; BRANDES, E. W. **Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.): origin, classification, characteristics and description of representative clones**. Washington, DC.: United States Department of Agriculture, 1958. (Agriculture handbook, 122).
- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J.; MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q. Mudanças climáticas e a produção de grãos no Brasil: avaliação dos possíveis impactos. **Revista Plenarium**, ano 5, n. 5, p. 96-117, out. 2008.
- ASTSCHWAGER, E. Anatomy of the vegetative organs of sugarcane. **Journal of Agricultural Research**, v. 30, n. 2, p. 197-221, Feb. 1925.
- BACCHI, O. O. S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. p. 24-37. (Coleção Planalsucar, 2).
- BARBER, C. A. **Studies in Indian sugarcane**: sugarcane seedlings, including some correlations between morphological characters and sucrose in the juice. Calcuttá: Thacker Spink, 1916. (Memoirs of the Department of Agriculture in India. Botanical series, v. 8, n. 3)
- BARBOSA, G. V. de S. **Contribuição do melhoramento genético da cana-de-açúcar para a agroindústria canavieira de Alagoas**. 2014. 113 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BASTOS, I. T.; BARBOSA, M. H. P.; RESENDE, M. D. V. de; PETERNELLI, L. A.; SILVEIRA, L. C. I. da; DONDA, L. R.; FORTUNATO, A. A.; COSTA, P. M. de A.; FIGUEIREDO, I. C. R. de. Avaliação da interação genótipo x ambiente em cana-de-açúcar via modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 4, p. 195-203, dez. 2007.
- BERDING, N.; ROACH, B. T. Germoplasm collection, maintenance and use. In: HEINZ, D. J. (ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier Press, 1987. p. 143-210. (Developments in crop science,

- 11). DOI: [10.1016/B978-0-444-42769-4.50009-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42769-4.50009-6). [10.1016/B978-0-444-42769-4.50009-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42769-4.50009-6).
- BIOETANOL de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 314 p.
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 186 p.
- BORÉM, A. Interação genótipo x ambiente. In: BORÉM, A. **Melhoramento de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 1998. p. 105-116.
- BRAGA JUNIOR, R. L. do C.; LANDELL, M. G. de A.; SILVA, D. N. da; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N. da; THOMAZINHO JUNIOR, J. R.; SILVA, V. H. P. da. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil - safra 2016/17**. Campinas: Instituto Agronômico, 2017. 40 p. (Série tecnologia APTA. Boletim técnico IAC, 217).
- BRAGA JUNIOR, R. L. do C.; LANDELL, M. G. de A.; SILVA, D. N. da; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N. da; THOMAZINHO JÚNIOR, J. R.; SILVA, V. H. P. da. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil: safra 2017/18**. Campinas: Instituto Agronômico, 2018. 50 p. (Série tecnologia APTA. Boletim técnico IAC, 219).
- BRAGA JUNIOR, R. L. do C.; LANDELL, M. G. de A.; SILVA, D. N. da; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N. da; THOMAZINHO JÚNIOR, J. R.; SILVA, V. H. P. da; ANJOS, I. A. dos. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - safra 2017/18 e na região Centro-Sul - safra 2018/19**. Campinas: Instituto Agronômico, 2019. 64 p. (Série tecnologia APTA. Boletim técnico IAC, 221).
- BRAGA JUNIOR, R. L. do C.; LANDELL, M. G. de A.; SILVA, D. N. da; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N. da; SILVA, V. H. P. da; LUZ, A. M.; ANJOS, I. A. dos. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - safra 2018/19 e na região Centro-Sul - safra 2019/20**. Campinas: Instituto Agronômico, 2021. 64 p. (Série tecnologia APTA. Boletim técnico IAC, 225).
- BRANDES, E. W. Origin, dispersal and use in breeding of the Melanesian garden sugarcane and their derivatives, *Saccharum officinarum* L. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 9, p. 709-750, 1956.
- BRASIL. Decreto nº 2.366, de 5 de novembro de 1997. Regulamenta a Lei nº 9.456, de 25 de abril de 1997, que institui a Proteção de Cultivares, dispõe sobre o Serviço Nacional de Proteção de Cultivares - SNPC, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 25162, 6 nov. 1997a.
- BRASIL. Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996. Regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 8353, 16 maio 1996.
- BRASIL. Lei nº 9.456, de 25 de abril de 1997. Institui a Lei de Proteção de Cultivares e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 8241, 28 abr. 1997b.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **CultivarWeb**: Serviço Nacional de Proteção de Cultivares – SNPC. Disponível em: https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_protegidas.php. Acesso em: 3 mar. 2022.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. **Anuário estatístico da agroenergia**. Brasília, DF, 2009. 160 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. **Proteção de cultivares no Brasil**. Brasília, DF, 2011. 204 p.
- BREMER, G. On the somatic chromosome numbers of sugar-cane forms and the chromosome numbers of indigenous Indian cane. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 4, n. 20, p. 1-3, 1932. Disponível em: <https://issct.org/wp-content/uploads/proceedings/1932/1932%20Bremer,On%20the%20somatic%20chromosome%20numbers%20of%20sugar%20cane%20forms.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2022.
- BRESSIANI, J. A. **Seleção sequencial em cana-de-açúcar**. 2001. 133 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- BRIEGER, F. O. Início da safra: como determinar a maturação. **Boletim Informativo Copereste**, v. 4, p. 1-3, 1968. Número único.
- BROWN, D. A.; UPCHURCH, D. R. Minirhizotron: a summary of methods and instruments in current use. In: TAYLOR, H. M. (ed.). **Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics**. Madison: American Society of Agronomy, 1987. p. 15-30. (ASA special publication, no. 50). DOI: [10.2134/asaspecpub50.c2](https://doi.org/10.2134/asaspecpub50.c2).
- BRUCH, K. L.; DEWES, H. Limites do direito de propriedade industrial de plantas: um estudo de caso na videria. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 24., 2006, Gramado. **Anais...** Gramado: Anpad, 2006. 1 CD-ROM.
- BRUNINI, O.; CARVALHO, J. P. de. **Zoneamento agroambiental para o setor florestal: zoneamento edafoclimático: orientações técnicas e viabilidade de cultivo**. Campinas: Instituto Agronômico, 2018. 39 p. (Série Tecnologia APTA. Boletim técnico IAC, 218).
- BUFON, V. B.; MESQUITA, J.; ZUKETTA, R.; TELLES, L.; DOMINGOS, I. E.; MARIN, F. Sugarcane in the Brazilian

- Savanna (Cerrado): effects of irrigation on biomass production and partitioning. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2013, Kansas City. [Proceedings...]. Kansas City: Asabe, 2013.
- CALMON, P. O açúcar, sua história e influência na civilização brasileira. *Anuário Açucareiro*, v. 1, p. 7-12, 1935.
- CÂMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CAMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. **Produção da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Fealq, 1993. p. 31-64.
- CAMPOS, P. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; VELLAME, L. M. Response of varieties of sugarcane to deficit irrigation in Brazilian Savanna. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 3, n. 1, p. 31-36, jan./abr. 2014. DOI: [10.12702/ii.inovagri.2014-a148](https://doi.org/10.12702/ii.inovagri.2014-a148).
- CARVALHO-NETTO, O. V.; BRESSIANI, J. A.; SORIANO, H. L.; FIORI, C. S.; SANTOS, J. M.; BARBOSA, G. V. S.; XAVIER, M. A.; LANDELL, M. G. A.; PEREIRA, G. A. G. The potential of the energy cane as the main biomass crop for the cellulosic industry. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 1, n. 20, Oct. 2014. DOI: [10.1186/s40538-014-0020-2](https://doi.org/10.1186/s40538-014-0020-2).
- CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991. 157 p.
- CASAGRANDE, A. A.; GODOY, O. P. Cultivo mecânico e adubação na soqueira da cana-de-açúcar: efeito na planta. Científica: *Revista de Ciências Agrárias*, v. 3, p. 95-106, 1975.
- CASTRO, P. R. C. Curso da fisiologia vegetal aplicada a cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FIOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2000, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Stab, 2000. 10 p. 1 CD-ROM.
- CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Novas variedades CTC9000 aptas para o cerrado**. Piracicaba, 2013. 34 p.
- CORRÊA, M. P. **Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1926.
- COSTA, C. Primeiras canas e primeiros açúcares no Brasil. *Brasil Açucareiro*, ano 36, v. 52, n. 3, p. 160-168, set. 1958.
- COX, M.; HOGARTH, M.; SMITH, G. Cane breeding and improvement. In: HOGARTH, M.; ALLSOPP, P. (ed.) **Manual of canegrowing**. Indooroopilly: Bureau of Sugar Experiment Stations, 2000. p. 91-108.
- CRONQUIST, A. J. **An integrated system of classification of flowering plants**. New York: Columbia University Press, 1981. 1262 p.
- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. Interação Genótipos x Ambientes. In: CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 2003. v. 2, p. 435-529.
- DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D. J. (ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 7-84. (Developments in crop science, 11). DOI: [10.1016/B978-0-444-42769-4.50007-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42769-4.50007-2).
- DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane**. Waltham: The Chronica Botanica, 1952. 371 p.
- DINARDO-MIRANDA, L. L. Manejo de nematóides em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de. (org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 281-292.
- DUARTE, J. B.; VENCOSKY, R. **Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise "AMMI"**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1999. 60 p. (Série monografia, 9).
- EARLE, F. S. Sugarcane and its culture. New York: John Wiley & Sons, 1928. 355 p.
- EBERHART, S. A.; RUSSEL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, v. 6, n. 1, p. 36-40, Jan./Feb. 1966. DOI: [10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x](https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x).
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2012: ano base 2011: relatório final**. Brasília, DF: EPE, 2012. 281 p.
- FAO. **Food and agriculture data**. 2022. Disponível em: <http://faostat.fao.org/default.aspx>. Acesso em: 11 mar. 2022.
- FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, jun. 2006. DOI: [10.1590/S0100-204X2006000600017](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000600017).
- FAUCONNIER, R. **La canne à sucre**. Paris: Agence de coopération culturelle et technique, 1991. 165 p. (Le technicien d'agriculture tropicale, 17).
- FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. 2. ed. Piracicaba: Stab, 2003. 240 p.
- FERNANDES, J. **Subsolagem no controle da compactação do solo na cana-soca (*Saccharum spp*) variedade CB 41-76 e seus efeitos no rendimento agrícola e no sistema radicular**. 1979. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- FERNANDES JÚNIOR, A. R.; ANDRADE, J. A. C.; SANTOS, P. C.; HOMANN, H. P.; CHAPOLA, R. G.; CARNEIRO, M. S.;

- CURSI, D. E. **Adaptabilidade e estabilidade de clones de cana-de-açúcar**. *Bragantia*, v. 72, n. 3, p.208-216, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/brag.2013.033>.
- FERRAUDO, G. M. **Comparação de modelos mistos, AMMI e Eberhart-Russell via simulação no estudo da interação genótipo x ambiente em cana-de-açúcar**. 2013. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.
- FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 31-44.
- FINLAY, K. W.; WILKINSON, G. N. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 14, n. 6, p. 742-754, 1963. DOI: [10.1071/AR9630742](https://doi.org/10.1071/AR9630742).
- FRANCO, C. M.; INFORZATO, R. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solos do Estado de São Paulo. *Bragantia: Boletim Técnico da Divisão de Experimentação e Pesquisas*, v. 6, n. 9, p. 443-478, set. 1946.
- FUCK, M. P.; BECALTCHUK, B.; BONACELLI, M. B. M. Produção brasileira de sementes de soja, trigo e milho. *Seed News*, v. 10, n. 6, p. 28-30, 2006.
- FUCK, M. P.; BONACELLI, M. B.; CARVALHO, S. P. de. Propriedade intelectual em melhoramento vegetal: o que muda com a alteração na Lei de Proteção de Cultivares no Brasil? *Economia & Tecnologia*, ano 3, v. 11, p. 89-97, out./dez. 2007.
- GAUCH JUNIOR, H. G. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science*, v. 46, n. 4, p. 1488-1500, July/Aug.2006. DOI: [10.2135/cropsci2005.07-0193](https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193).
- GOES, T.; MARRA, R. **A expansão da cana-de-açúcar e sua sustentabilidade**. [2008]. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Expansao_cana_Goes_000fjd7bwaq02wyiv809gkz51l17qf66.pdf. Acesso em: 20 jan. 2022.
- GOMES, F. P.; LIMA, U. A. A cana-de-açúcar no mundo. In: MALAVOLTA, E.; SEGALLA, A. L.; GOMES, F. P.; BRIEGER, F. O.; PARANHOS, S. B.; RANZANI, G.; VALSECHI, O.; JUNQUEIRA, A. A. B.; CAMARGO, A. P. de; BERGAMIN, J.; TOFANNO, W. B.; PEIXOTO, A. M.; LIMA, U. de A.; DANTAS, B.; ORTOLANI, A. A.; HAAG, H. P.; LIMA, C. C. A.; OLIVEIRA, E. R. (ed.). **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1964. p. 11-26.
- GORNALL, J.; BETTS, R.; BURKE, E.; CLARK, R.; CAMP, J.; WILLET, K.; WILTSHIRE, A. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 365, n. 1554, p. 2973-2989, Sept. 2010. DOI: [10.1098/rstb.2010.0158](https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0158).
- GOSS, M. J.; MILLER, M. H.; BAILEY, L. D.; GRANT, C. A. Root growth and distribution in relation to nutrient availability and uptake. *European Journal of Agronomy*, v. 2, n. 2, p. 57-67, 1993. DOI: [10.1016/S1161-0301\(14\)80135-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80135-4).
- HEINZ, D. J.; OSGOOD, R. V.; MOORE, P. M. Sugarcane. In: ANRTZEN, C. J.; RITTER, E. M. (ed.). **Encyclopedia of Agricultural Science**. San Diego: Academic Press, 1994. v. 4, p. 225-238.
- HENDERSON, C. R. Sire evaluation and genetic trends. *Journal of Animal Science*, v. 1973, p. 10-41, 1973. Issue Symposium. DOI: [10.1093/ansci/1973.Symposium.10](https://doi.org/10.1093/ansci/1973.Symposium.10).
- HUMBERT, R. P. The nutrition of sugar cane. In: HUMBERT, R. P. (ed.). **The growing of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. p. 133-212.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <http://ibge.gov.br>. Acesso em: 18 mar. 2022.
- IDE, B. Y. **Sistema radicular**. Piracicaba: Copersucar, 1981. 20 p. Relatório Copersucar.
- INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar var. co. 290, em solo tipo terra roxa legítima. *Bragantia: Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo*, v. 16, n. 1, p. 1-13, out. 1957. DOI: [10.1590/S0006-87051957000100001](https://doi.org/10.1590/S0006-87051957000100001).
- INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL. **Brasil/açúcar**. Rio de Janeiro: IAA, 1972. 243 p. (Coleção canavieira, 8).
- INTERNATIONAL UNION FOR THE PROTECTION OF NEW VARIETIES OF PLANTS. **Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability: sugarcane (*Saccharum* L.)**. Geneva: Upov, 2005. 36 p. TG/186/1.
- IRVINE, J. E. *Saccharum* species as horticultural classes. *Theoretical and Applied Genetics*, v. 98, n. 2, p. 186-194, Feb. 1999. DOI: [10.1007/s001220051057](https://doi.org/10.1007/s001220051057).
- JACKSON, P. A.; HOGARTH, D. M. Genotype x environment interactions in sugarcane. I. Patterns of response across sites and crop-years in North Queensland. *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 43, n. 7, p. 1447-1459, 1992. DOI: [10.1071/AR9921447](https://doi.org/10.1071/AR9921447).
- JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; BURGOS, N.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: Divisão de Pesquisa Pedológica: Sudene-DRN, 1972-1973. 2 v. (Brasil. Divisão de Pesquisa

- Pedológica. Boletim técnico, 26; Sudene-DRN. Série Pedologia, 14).
- JESWIET, J. The development of selection and breeding of the sugarcane in Java. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 3, p. 44-57, 1929.
- JUNQUEIRA, A. A. B.; DANTAS, B.; MALAVOLTA, E. A cana-de-açúcar no Brasil. In: MALAVOLTA, E.; SEGALLA, A. L.; GOMES, F. P.; BRIEGER, F. O.; PARANHOS, S. B.; RANZANI, G.; VALSECHI, O.; JUNQUEIRA, A. A. B.; CAMARGO, A. P. de; BERGAMIN, J.; TOFANNO, W. B.; PEIXOTO, A. M.; LIMA, U. de A.; DANTAS, B.; ORTOLANI, A. A.; HAAG, H. P.; LIMA, C. C. A.; OLIVEIRA, E. R. (ed.). **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1964. p. 27-60.
- KORNDÖRFER, G. H.; PRIMAVEZI, O.; DEUBER, R. **Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho Amarelo**. São Paulo: Copersucar, 1989. p. 32-36. (Boletim técnico Copersucar, 47).
- LANDELL, M. G. A.; ALVAREZ, R. Cana-de-açúcar. In: FURLANI, A. M. C.; VIÉGAS, G. P. (ed.). **O melhoramento de plantas no Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1993. p. 77-93.
- LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; Melhoramento genético da cana-de-açúcar: 25 anos de evolução. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 25, n. 2, p. 30-32, 2006.
- LANDELL, M. G. de A. **Comportamento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), frente a níveis de alumínio, em solução nutritiva**. 1989. 117 f. Tese (Doutorado em Agronomia-- Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal).
- LANDELL, M. G. de A. Método experimental: ensaios de competição em cana-de-açúcar. In: MARTINS, A. L. M.; LANDELL, M. G. de A. **Conceitos e critérios para avaliação experimental em cana-de-açúcar utilizados no Programa Cana IAC**. Pindorama: Instituto Agrônomo, 1995. p. 2-14.
- LANDELL, M. G. de A.; BRESSIANI, J. A. Melhoramento genético e manejo varietal. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 101-156.
- LANDELL, M. G. de A.; MACHADO, R. S.; SILVA, D. N. da; SCARPARI, M. S.; XAVIER, M. A.; CRESTE, S.; ANJOS, I. A. dos; PRADO, H. do; PINTO, L. R.; BIDÓIA, M. A. P. A interação entre a cana-de-açúcar e ambientes de produção estressantes. In: CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. de A.; ROSSETTO, R.; SORATTO, R. P. (ed.). **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Fepaf, 2010. p. 34-42.
- LANDELL, M. G. de A.; PINTO, L. R.; CRESTE, S.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A. dos; VASCONCELOS, A. C. M.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, D. N. da; SILVA, M. de A. Seleção de novas variedades de cana-de-açúcar e seu manejo de produção. **Informações Agrônomicas**, n. 110, p. 18-24, jun. 2005. Encarte.
- LANDELL, M. G. de A.; PRADO, H. do; VASCONCELOS, A. C. M. de; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, M. de A.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agrícola**, v. 60, n. 4, p. 741-745, Dec. 2003. DOI: [10.1590/S0103-90162003000400020](https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000400020).
- LANDELL, M. G. de A.; SILVA, M. de A. As estratégias de seleção da cana em desenvolvimento no Brasil. **Visão Agrícola**, n. 1, p. 18-23, jan./jun. 2004.
- LIN, C. S.; BINNS, M. R.; LEFKOVITCH, L. P. Stability analysis: where do we stand? **Crop Science**, v. 26, n. 5, p. 894-900, Sept./Oct. 1986. DOI: [10.2135/cropsci1986.0011183X002600050012x](https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183X002600050012x).
- LIPPMAN, E. O. **História do açúcar**: desde a época mais remota até o começo da fabricação do açúcar de beterraba. Rio de Janeiro: IAA, 1942. 910 p.
- LYNCH, M.; WALSH, B. Genotype x environment interaction. In: LYNCH, M.; WALSH, B. **Genetics and analysis of quantitative traits**. Sunderland: Sinauer, 1997. p. 657-686.
- MACCHERONI, W.; MATSUOKA, S. Manejo das principais doenças da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de (org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006. p. 239-256.
- MACEDO, I. de C. (org.) **A energia da cana-de-açúcar**: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo: Unica, 2005. 235 p.
- MACHADO JUNIOR, G. R. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 165-186.
- MACHADO JUNIOR, G. R. Sugarcane varieties. **Sugar Journal**, v. 65, n. 2, p. 6-7, 2002.
- MACHADO JUNIOR, G. R.; BRAGA JUNIOR, R. L. C. Sugarcane cultivars grown from 1991 to 2017 in the Brazilian industry. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS' CONGRESS, 30., 2019, Tucumán. [Proceedings...]. Tucumán: SATCA, 2019.

- MACHADO JUNIOR, G. R.; SILVA W. M. da; IRVINE, J. E. Sugarcane breeding in Brazil: the Copersucar program. In: COPERSUCAR INTERNATIONAL SUGARCANE BREEDING WORKSHOP, 1987, Piracicaba. [Proceedings...]. São Paulo: Copersucar, 1987. p. 217-232.
- MAJDI, H.; SMUCKER, A. J. M.; PERSSON, H. A comparison between minirhizotron and monolith sampling methods for measuring root growth of maize (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, v. 147, n. 1, p. 127-134, Nov. 1992.
- MANGELSDORF, A. J. Sugarcane breeding in Hawaii. Part II – 1921-1952. **Hawaiian Planters' Record**, v. 54, p. 101-137, 1953.
- MARGARIDO, F. B. Planejamento agrícola em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de (org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 69-78.
- MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 232-239, 2013. DOI: [10.1590/S1415-43662013000200015](https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000200015).
- MARTINEZ, M. B.; LUGOZ-LÓPEZ, M. A. Influence of subsoil shattering and fertilization on sugarcane production and soil infiltration capacity. **Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 307-316, Apr. 1953.
- MARTINS, L. G. C. **Contribuição nutricional do sistema radicular e do solo para o desenvolvimento e o crescimento de brotações de eucalipto**. 1995. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- MATSUOKA, S. Free fiber level drives resilience and hybrid vigor in energy cane. **Journal of Scientific Achievements**, v. 2, n. 1, p. 1-35, Winter 2017.
- MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: BORÉM, A. (ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 1999. p. 205-251.
- MATSUOKA, S.; KENNEDY, A. J.; SANTOS, E. G. D. dos; TOMAZELA, A. L.; RUBIO, L. C. S. Energy cane: its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany**, v. 2014, p. 1-13, 2014. DOI: [10.1155/2014/597275](https://doi.org/10.1155/2014/597275).
- MEREDITH, H. L.; PATRICK JUNIOR, W. H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. **Agronomy Journal**, v. 53, n. 3, p. 163-167, May/June 1961. DOI: [10.2134/agronj1961.00021962005300030011x](https://doi.org/10.2134/agronj1961.00021962005300030011x).
- MIOCQUE, J. Y. L.; MACHADO JUNIOR, G. R. Review of sugar cane varieties and breeding in Brazil. **Sugar Journal**, v. 40, n. 7, p. 9-13, 1977.
- MONTALVÁN, R.; MONTAÑO-VELASCO, J. C. Interação Genótipo x Ambiente: Aspectos básicos. In: DESTRO, D.; MONTALVÁN, R. (org.). **Melhoramento genético de plantas**. Londrina: UEL, 1999. p. 131-140.
- MONTEITH, N. H.; BANATH, C. L. The effects of soil strength on sugarcane root growth. **Tropical Agriculture**, v. 42, n. 4, p. 293-296, 1965.
- MOORE, P. H. Breeding for stress resistance. In: HEINZ, D. J. (ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier Press, 1987. p. 503-542. (Developments in crop science, 11). DOI: [10.1016/B978-0-444-42769-4.50018-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42769-4.50018-7).
- MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (ed.). **Sugarcane: physiology, biochemistry and functional biology**. Ames: Wiley-Blackwell, 2014.
- NAMORATO, H.; MIRANDA, G. V.; SOUZA, L. V.; OLIVEIRA, L. R.; LIMA, R. O. de; MANTOVANI, E. E. Comparing biplot multivariate analysis with Eberhart and Russel's method for genotype x environment interaction. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 9, p. 299-307, 2009. DOI: [10.12702/1984-7033.v09n04a03](https://doi.org/10.12702/1984-7033.v09n04a03).
- NASTARI, P. M. Safra 2007/08: considerações sobre o balanço oferta/demanda de açúcar e álcool. **JornalCana**, n. 163, p. 18-27, 2007.
- NUNES, D.; RIBEIRO, A.; CHAPOLA, R.; LANDELL, M. G. A.; VIOLANTE, M.; BRESSIANI, J. A. **Guia para manejo de novas variedades de cana-de-açúcar**. Grupo Idea, 2020.
- OLIVEIRA, R. A. de; BARBOSA, G. V. de S.; DAROS, E. (org.) **50 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 30 anos de RIDESA**. Curitiba: Ed. da UFPR: Ridesa, 2021. 199 p.
- OTTO, R. **Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- PERSSON, H. Methods of studying root dynamics in relation to nutrient cycling. In: HARRISON, A. F.; INESON, P.; HEAL, O. W. (ed.). **Nutrient cycling in terrestrial ecosystems: field methods, application, and interpretation**. London: Elsevier, 1990. p. 198-217.
- PIEPHO, H. P. Stability analysis using the SAS system. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 1, p. 154-160, Jan./Feb. 1999. DOI: [10.2134/agronj1999.00021962009100010024x](https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100010024x).
- PIEPHO, H. P.; MÖHRING, J.; MELCHINGER, A. E.; BÜCHSE, A. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. **Euphytica**, v. 161, n. 1-2. p. 209-228, May 2008. DOI: [10.1007/s10681-007-9449-8](https://doi.org/10.1007/s10681-007-9449-8).
- PRADO H.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R.; CAMPANA, M. P.; ZIMBACK, L.; SILVA, M. A. Relation between

- chemical sub surface conditions of subsoils and sugarcane yield. In: WORLD SOIL SCIENCE CONGRESS, 16., 1998, Montpellier. [Proceedings...]. Montpellier: ISSS, 1998. v. 1, p. 232.
- RAIZER, A. J. **Interações genótipos x ambientes e estabilidade fenotípica em cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 1998. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- RAIZER, A. J.; BRAGA JUNIOR, R. L. C.; SELEGATO, S. M. Índices de eficiência no uso de variedades de cana-de-açúcar. *Revista RPAnews: Cana & Indústria*, ano 12, n. 151-152, p. 25-29, jul./ago. 2013.
- RAIZER, A. J.; VENCOSKY, R. Estabilidade fenotípica de novas variedades de cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 12, p. 2241-2246, dez. 1999. DOI: [10.1590/S0100-204X1999001200010](https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200010).
- RAMBURAN, S.; ZHOU, M.; LABUSCHAGNE, M. Interpretation of genotype x environment interactions of sugarcane: identifying significant environmental factors. *Field Crops Research*, v. 124, n. 3, p. 392-399, Dec. 2011. DOI: [10.1016/j.fcr.2011.07.008](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.008).
- RESENDE, M. D. V. de. Estimação e predição de modelos lineares mistos. In: RESENDE, M. D. V. de. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. p. 101-172.
- REVISTA VARIEDADES CTC. Piracicaba: CTC, 2011. 51 p.
- RIBEIRO, N. V.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C. Expansão da cana-de-açúcar no Bioma Cerrado: uma análise a partir da modelagem perceptiva de dados cartográficos e orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4., 2009, Natal. *Anais...* São José dos Campos: Inpe, 2009. p. 4287- 4293.
- ROCHA, A. T. da. **Gesso mineral na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar e implicações na produtividade agrícola e industrial**. 2007. 69 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. Eficiência de utilização de uréia-15N por cana-planta e três socas em tabuleiro costeiro de Pernambuco. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 4.; CONVENÇÃO DA ACTALAC, 7., 1987, Olinda. *Anais...* Olinda: STab, 1987. p. 46-49.
- SACHS, R.C.C. **Contribuição das inovações biológicas para a produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, 1998-2009**. 2015. 137 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- SANTOS, J. de M. dos; RODRIGUES, S. B. S.; FONTOURA, P. R.; BUFON, V. Z.; FEITOZA, W. de M.; SAGGIN, F.; SANTOS, R. S.; BUFON, V. B. Sugarcane production in Brazil: effects of water regime on biomass accumulation and partitioning. In: ASA, CSSA & SSSA INTERNATIONAL ANNUAL MEETING, 2014, Long Beach. [Abstracts...]. Long Beach: American Society of Agronomy, 2014.
- SANTOS, W. G. dos; MARTINS, J. I. F. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. *Revista de Política Agrícola*, ano. 25, n. 3, p. 73-94, jul./ago./set. 2016.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. de; MARCHIORI, L. F. S.; GARCIA, J. C. Planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C. da; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. de. (ed.). **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. v. 1, p. 548-561.
- SCARPARI, M. S.; LANDELL, M. G. A.; BEAUCLAIR, E. G. F. de. Optimised agricultural planning of sugarcane using linear programming. *Proceedings of the Internacional Society of Sugar Cane Technologists*, v. 26, p. 185-189, 2007.
- SEGALLA, A. L. Botânica, melhoramento e variedades. In: MALAVOLTA, E.; SEGALLA, A. L.; GOMES, F. P.; BRIEGER, F. O.; PARANHOS, S. B.; RANZANI, G.; VALSECHI, O.; JUNQUEIRA, A. A. B.; CAMARGO, A. P. de; BERGAMIN, J.; TOFANNO, W. B.; PEIXOTO, A. M.; LIMA, U. de A.; DANTAS, B.; ORTOLANI, A. A.; HAAG, H. P.; LIMA, C. C. A.; OLIVEIRA, E. R. (ed.). **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1964. p. 61-98.
- SILVA, F. C. da; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. de. (ed.). **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. v. 1. 586 p.
- SILVA, F. C. da; DIAZ-AMBRONA, C. G. H.; BUCKERIDGE, M. S.; SOUZA, A.; BARBIERI, V.; DOURADO NETO, D. Sugarcane and climate change: effects of CO² on potential growth and development. *Acta Horticulturae*, v. 802, p. 331-335, 2008. DOI: [10.17660/ActaHortic.2008.802.43](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.802.43).
- SILVA, F. C. da; DÍAZ-AMBRONA, C. G. H.; ITURRA, A. R. (ed.). **Desarrollo sostenible de la producción de bioetanol y azúcar: a partir de la caña de azúcar**. Madrid: Editorial Académica Española, 2013. 428 p.
- SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. *Field Crops Research*, v. 92, n. 2-3, p. 291-303, June 2005. DOI: [10.1016/j.fcr.2005.01.022](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.022).
- SOUTH AFRICAN SUGAR ASSOCIATION. **Plant breeding crossing and selection programmes**. SASA, 2004. Disponível em: www.sugar.org.za. Acesso em: 20 nov. 2021.
- SOUZA JUNIOR, C. L. de. **Melhoramento de espécies de reprodução vegetativa**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Genética, 1995. 41 p.

- SOUZA, A. P. de, LEITE, D. C. C.; PATTATHIL, S.; HAHN, M. G.; BUCKERIDGE, M. S. Composition and structure of sugarcane cell wall polysaccharides: implications for second-generation bioethanol production. *Bioenergy Research*, v. 6, p. 564-579, June 2013. DOI: [10.1007/s12155-012-9268-1](https://doi.org/10.1007/s12155-012-9268-1).
- STEVENSON, G. C. **Genetics and breeding of sugar cane**. London: Longmans, 1965. 284 p.
- SUMMARY for policymakers. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2013: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 3-29. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf. Acesso em: 20 jan. 2022.
- TAI, G. C. C. Genotype stability analysis and its application to potato regional trials. *Crop Science*, v. 11, n. 2, p.184-190, Mar./Apr. 1971. DOI: [10.2135/cropsci1971.0011183X001100020006x](https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100020006x).
- TEIXEIRA, P. C. **Dinâmica de crescimento radicular e suprimento de nutrientes pelas raízes e pelo solo em brotações de *Eucalyptus urophylla***. 1996. 37 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- TEW, T. L.; COBILL, R. M. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. In: VERMERRIS, W. (ed.). **Genetic improvement of bioenergy crops**. New York: Springer, 2008. p. 249–272. DOI: [10.1007/978-0-387-70805-8_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-70805-8_9).
- TROUSE JUNIOR, A. C.; HUMBERT, R. P. Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. *Soil Science*, v. 91, n. 3, p. 208-217, Mar. 1961.
- URATA, R. Seedling propagation and bunch size for field transplanting. In: EXPERIMENT Station, Hawaiian Sugar Planters' Association. **Annual Report**, 1969. p. 12.
- VASCONCELOS, A. C. M. de. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.
- VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 5, p. 849-858, out. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000500009](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500009).
- VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496 p.
- VENKATRAMAN, T. S.; THOMAS, R. Sugarcane root systems: studies in development and anatomy. *The Agricultural Journal of India*, v. 17, p. 381-388, 1922.
- VERMA, M. M.; CHAHAL, G. S.; MURTY, B. R. Limitations of conventional regression analysis: a proposed modifications. *Theoretical and Applied Genetics*, v. 53, p. 89-91, 1978. DOI: [10.1007/BF00817837](https://doi.org/10.1007/BF00817837).
- WALKER, D. I. T. Manipulating the genetic base of sugarcane. In: COPERSUCAR INTERNATIONAL SUGARCANE BREEDING WORKSHOP, 1987, Piracicaba. [**Proceedings...**]. São Paulo: Copersucar, 1987. p. 321-334.
- WEAVER, J. E. **Root development of field crops**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1926.
- WEAVER, J. E.; BRUNER, W. E. **Root development of vegetable crops**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1927.
- WIERSUM, L. K. The relationship of the size and structural rigidity of pores to the penetration by roots. *Plant and Soil*, v. 9, n. 1, p. 75-85, Sept. 1957. DOI: [10.1007/BF01343483](https://doi.org/10.1007/BF01343483).
- XAVIER, M. A.; LANDELL, M. G. de A.; PIRES, R. C. de M.; ROSSETTO, R.; DINARDO-MIRANDA, L. L.; PERECIN, D.; PRADO, H. do; GARCIA, J. C.; VITTI, A. C.; FRACASSO, J.; AZANIA, C. A. M.; ANJOS, I. A. dos; SUGUINO, E.; SCARPARI, M. S.; AFERRI, G.; KANTHACK, R. A. D.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, D. N. da; MATSUO, R. S.; NEVES, J. C. T.; PERRUCCO, D.; SILVA, V. H. P. da; SILVA, T. N. da; OHASHI, A. Y. P.; OLIVEIRA JUNIOR, G. B. de; MENDONÇA, J. R.; PETRI, R. H.; REIS, V. B. V. dos; BORGES, I. S.; RODRIGUES, P. E.; LUZ, A. M. da. **Gemas brotadas de cana-de-açúcar: produção sustentável e utilização experimental na formação de áreas de multiplicação**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2020. 52 p. (Documentos IAC, 115).
- YAN, W.; KANG, M. S.; MA, B.; WOODS, S.; CORNELIUS, P. L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, v. 47, n. 2, p. 643-653, Mar. 2007. DOI: [10.2135/cropsci2006.06.0374](https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374).
- YANG, R. C.; CROSSA, J.; BURGUEÑO, J. Reply. *Crop Science*, v. 50, n. 4, p. 1123, July/Aug. 2010. **Letter to the Editor**. DOI: [10.2135/cropsci2010.1123](https://doi.org/10.2135/cropsci2010.1123).
- YANG, R. C.; CROSSA, J.; CORNELIUS, P. L.; BURGUEÑO, J. Biplot analysis of genotype x environment interaction: proceed with caution. *Crop Science*, v. 49, n. 5, p. 1564-1576, Sept. 2009. DOI: [10.2135/cropsci2008.11.0665](https://doi.org/10.2135/cropsci2008.11.0665).
- YATES, R. A. The environment for sugarcane. In: FAO. **Land evaluation standards for rainfed agriculture: report of an expert consultation held in Rome, 25-28 October, 1977**. Rome, 1978. p. 58-72. (World soil resources report, 49).

Produção, plantio e condução de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar

Fábio Cesar da Silva | Ariovaldo Luchiari Júnior | Pedro Luís de Freitas | Willian Pereira | Jose Tadeu Coleti | Gustavo Costa Rodrigues | Mariana Lopes Carvalho | Daniel Chistofoleti

Introdução

Entre as diversas tecnologias desenvolvidas e pesquisadas para substituir o plantio tradicional em “toletes” de colmos de cana-de-açúcar, contendo entre 30 a 50 cm no fundo de sulco (Ripoli; Ripoli, 2004; Ripoli et al., 2007), destaca-se a adoção de mudas pré-brotadas (MPBs). Essa tecnologia de MPB traz aprimoramento no plantio de cana-de-açúcar com vantagens claras, como a redução significativa de mudas utilizadas no plantio. Além disso, resulta em diminuição dos riscos de disseminação de pragas e doenças, propiciando a formação de canaviais mais homogêneos e saudáveis.

A viabilidade do plantio comercial utilizando-se gemas individualizadas já foi demonstrada anteriormente por Ramaiah et al. (1978). Ela consistia no plantio de minitoletes ou minirrebolos, o qual se colocava ao solo de forma similar aos sistemas atuais de MPBs preconizadas pelo do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC (Landell et al., 2012). Todavia, os sistemas pioneiros de MPB não consideravam etapas de produção de mudas em condições controladas (May; Ramos, 2019). Esse sistema atual proporciona obter áreas de cultivo com alto perfilhamento, rendimento mais elevado e com melhor recuperação de socas. Todas as tecnologias têm em comum possibilitar a redução da quantidade de colmos utilizados por área plantada, a qual geralmente é acima de 20 t de colmos-semente por hectare plantado. Esses sistemas têm valores que são considerados muito altos quando comparados com o plantio mecanizado tradi-

cional, que utiliza uso intensivo de maquinário pesado para ajudar a distribuição de toletes na linha de plantio (May; Ramos, 2019).

No presente capítulo, são descritos diferentes métodos de produção, plantio e condução de MPB de cana-de-açúcar, além de elementos de nutrição e métodos de manejo cultural.

Produção de mudas pré-brotadas na biofábrica

O sistema inicial de multiplicação desenvolvido pelo Programa Cana do IAC e da AgMusa da Basf para produção de MPBs foi adaptado para modelos similares para produtores autônomos de mudas, em especial pela Schiavon Agro em Tambaú, SP. Tal sistema apresenta os mesmos princípios de multiplicação de plantas, trazendo consigo um conceito novo, ou seja, a realização do plantio para formação de viveiros a partir de uma planta desenvolvida em condições controladas.

Quanto à produção de MPBs, são necessárias quatro fases que, segundo Landell et al. (2012) e outros autores em trabalhos pioneiros, são as seguintes: a) corte do minirrebolo; b) tratamento químico; c) brotação; d) individualização ou repicagem; e) aclimação fase 1; f) aclimação fase 2. Tais fases duram cerca de 60 dias, as quais podem ser estratificadas em dois subgrupos básicos: pré-brotação e aclimação.

O primeiro subgrupo se constitui na fase mais crítica do processo quando devem ser investidos os maiores detalhamentos e níveis de

controle (Xavier et al., 2014). Tais preocupações nas fases críticas têm sido observadas na prática de produção pelos produtores autônomos de MPBs, como poderá ser observado no sistema de produção da empresa Schiavon Agro, detalhado no decorrer do texto, segundo descrito no projeto intitulado Desenvolvimento de soluções tecnológicas com escopo na recuperação da produtividade de cana-de-açúcar junto à Cooperativa dos Plantadores de Cana do Estado de São Paulo (Coplacana), desenvolvido em parceria com a Embrapa.

Formação de mudas pré-brotadas para viveiro

A orientação básica para produção de MPBs sadias de cana-de-açúcar é que tenham uma origem controlada, isto é, ser provenientes de viveiros isentos de doenças e pragas, bem como que sejam submetidas a tratamento térmico, não apresentem mistura varietal ou homogeneidade genética e tenham a idade adequada, na faixa de 6 a 10 meses.

A incidência fitossanitária de mudas pode ser observada em duas categorias básicas: a) primária — que vem com as mudas; e b) outras — que infectam as mudas após o plantio. Landell et al. (2012) ressaltam a necessidade de controle do raquitismo da soqueira por se tratar de doença de difícil diagnóstico e que não afeta o estabelecimento da cultura, mas que requer controle específico prévio pela prática da termoterapia que ainda poderá ser difundida na multiplicação vegetativa (Matsuoka et al., 2010). Todavia, outras doenças atuam na fase de formação do canavial, as quais requerem controle, tais como: o carvão, a escaldadura das folhas, o mosaico, a podridão-vermelha e a fusariose, que podem comprometer a qualidade das mudas (Landell et al., 2012).

Para iniciar a produção de mudas no chamado sistema MPB, são utilizados colmos produzidos

em viveiros básicos, com todos os cuidados fitossanitários necessários (Landell et al., 2012).

As quatro fases para produção do sistema MPB são descritas a seguir, utilizando-se como exemplo as operações de viveiro da empresa Schiavon Agro.

Primeira fase – Retirada dos colmos, corte e preparo de minirrebolos

A primeira etapa para o desenvolvimento de mudas sadias é a obtenção de “minirrebolos” em viveiros com idade fisiológica entre 6 e 10 meses (Casagrande, 1991), o que permite o maior aproveitamento possível de gemas aptas (Brambilla, 2013).

Em seguida, tem-se a secção por meio de cortes para a preparação dos “minirrebolos”, segundo Xavier et al. (2014), indicando a utilização de um sistema de guilhotina com lâmina dupla devidamente desinfestada.

O processo tem início no viveiro pré-primário, onde o tratamento térmico é realizado para combater a bactéria causadora do raquitismo da soqueira.

A empresa Schiavon Agro sugere um esquema operacional para minimização de custo do tratamento térmico na produção de mudas em viveiros (Anexo 1). Dessa operação se retiram as mudas que serão preparadas, cortadas e multiplicadas para o viveiro secundário.

As mudas passam por um processo de multiplicação no viveiro por meio da extração por corte e preparação do minirrebolo. Nessas condições, a brotação da gema envolve um tratamento exclusivo para que a gema se adapte às condições reais de plantio. No sistema Schiavon Agro, o espaçamento entre as lâminas determina o tamanho do minirrebolo, sugerido como sendo de 3 cm, o que viabiliza a utilização da gema individualizada na confecção dos tubetes necessários

durante a multiplicação (May; Ramos, 2019). Nessa fase, realiza-se a seleção dos materiais isentos de danos causados por pragas, doenças e demais injúrias mecânicas.

Na Figura 4.1 ilustram-se alguns detalhes para a produção de MPBs em viveiro e, cronologicamente, antecipam-se as informações que serão abordadas nos tópicos/sessões posteriores, os quais serão agrupados em quatro fases con-

templando as seguintes operações: a) corte do minirrebolo (Figura 4.1A); b) tratamentos do minirrebolo — banho térmico (Figura 4.1F) e com fungicidas; c) caixas de brotação com substrato, levadas a ambiente controlado em temperatura e umidade (Figura 4.1C); d) individualização — cada muda colocada em tubete próprio (Figura 4.1B) e repicagem da planta (Figura 4.1D); e) primeira fase de aclimatação em estufa para desenvolvimento das raízes; f) rustificação para

Foto: Daniel Chistofoleiti



A



B

Foto: Daniel Chistofoleiti

Foto: Daniel Chistofoleiti



C



D

Foto: Daniel Chistofoleiti

Foto: Daniel Chistofoleiti



E



F

Foto: William Pereira

Figura 4.1. Produção de mudas no viveiro da Empresa Schiavon Agro em Tambaú, SP: equipamento de corte da gema (A); substrato na bandeja (B); cobertura da gema com substrato (C); brotação (D); mudas já prontas para campo (E); detalhe da sala do banho térmico (F).

adaptação ao ambiente externo com irrigação reduzida, adubação e podas prévias; g) muda pronta para ser plantada (Figura 4.1E).

Segunda fase – Tratamento das gemas

As gemas são tratadas termicamente através de um banho, podendo a temperatura e o tempo variar de 50 °C por 2 a 3 horas ou 52 °C por 30 minutos (Gheller; Godoy, 1987; Matsuoka et al., 2010). Esse tratamento deve ser realizado em uma razão de 200 L de água para 30 kg de colmos de cana. A contagem do tempo do tratamento se inicia quando a temperatura da água atinge a temperatura preestabelecida, sendo necessária a manutenção dessa temperatura durante o procedimento. O controle da temperatura dentro do limite preestabelecido (50 a 52 °C) é realizado por meio de um termostato, o que garantirá que o tratamento térmico será corretamente aplicado.

Após imersão térmica, o material tratado deve sofrer um resfriamento até a temperatura ambiente. Na sequência, o material deverá receber um banho com um fungicida e um produto enraizador por 5 minutos. Esse banho é constituído por 100 L de solução, suficiente para encobrir 30 kg do material biológico (Figura 4.1F). Essa quantidade corresponde ao preenchimento de duas caixas plásticas até a metade da altura, como ilustrado na Figura 4.1C.

Entretanto, o método recomendado pelo IAC para o controle fitossanitário é a imersão em solução à base de azoxistrobina ou pyraclostrobin a 0,1% por 3 minutos (Xavier et al., 2014). Essa prática é parte do sistema de proteção dos minirrebolos. Para melhorar o vigor do material, podem ser usados outros defensivos agrícolas, o que, na maioria das vezes, está associado ao pacote tecnológico de produção de MPBs. Em condições de casa de vegetação, as mudas brotadas seguem para o transplantio sob orientação e

acompanhamento dos técnicos para a plataforma de tubetes (Figura 4.1B).

Terceira fase – Brotação

Esta etapa do processo ocorre em substrato, em caixas plásticas (Figura 4.1C), as quais podem ser alternadas com outros materiais e, até mesmo, fazer adaptações de locais. Tais “minirrebolos” serão distribuídos posicionados com as gemas voltadas para cima e cobertos com substrato na caixa plástica. Estas, por sua vez, são levadas para berçário e cobertas por substrato. Na sequência, são selecionadas em torno de 350 gemas a serem plantadas no substrato, de forma aleatória. Tal prática tem por objetivo garantir uma produção mínima de 280 mudas.

O tempo de permanência no local é em torno de 7 dias, o que vai depender das condições ambientais de temperatura, cujos valores ideais seriam entre acima de 20 °C e menores que 40 °C. O controle de temperatura pode ser feito pela circulação do ar do ambiente, isto é, com abertura e fechamento das portas de ventilação, em função do aumento ou diminuição da temperatura, respectivamente. Já no verão, utiliza-se sombrite a 50% para obter uma condição mais amena para melhorar a brotação.

No processo de preparo do “minirrebolo”, os colmos de cana são picados manualmente. Normalmente, se retira cerca de oito caixas no dia (em torno de 6.000 gemas), etapa que ocorre antes do banho térmico. Quando a muda é proveniente de viveiro secundário, o material vai direto para tratamento com fungicida.

Nessa fase, o molhamento deve ser suficiente para garantir a manutenção do processo de pré-brotção, com o cuidado de evitar o constante encharcamento da caixa de brotação. O período é variável na ordem de 7 a 10 dias, o que vai depender da variedade em questão e da idade fisiológica da gema a ser utilizada.

Em média, chega-se nessa fase cerca da metade das gemas tratadas no banho térmico com brotação adequada, isto é, a germinação é em torno de 50% após o banho térmico, o que já é uma pré-seleção. Depois de 7 dias, colocam-se as gemas de modo individualizado em bandejas com substrato.

A individualização ou “repicagem” ocorre imediatamente após o período de pré-brotação. Nessa fase são utilizadas bandejas apropriadas com tubetes, além de suportes para sustentá-las e do substrato. Ao substrato são adicionados fertilizantes com diferentes dinâmicas de liberação de nutrientes, de forma balanceada para se evitar a salinização do substrato. A composição do substrato pode ser formada por casca de pinus, vermiculita, areia e fertilizante NPK. De modo geral, se faz a complementação da adubação via pulverizações foliares semanais com fosfato monoamônio – MAP ($10\text{--}25\text{ g L}^{-1}$) e nitrato de cálcio ($15\text{--}25\text{ g L}^{-1}$).

Esse manejo fitotécnico contribui para o adequado desenvolvimento da nova planta. Destaca-se que, nessa etapa, há um segundo processo de seleção, onde as gemas que não brotaram são descartadas.

Quarta fase – Aclimação

Após a individualização, o tempo médio de aclimação das gemas brotadas será de 21 dias em casa de vegetação. Inicialmente, nos primeiros 7 dias em média, utiliza-se uma proteção na parte superior da casa de vegetação com tela de sombreamento a 50%, a qual é retirada no decorrer dessa etapa para aumentar a incidência de luz. A irrigação das plantas será definida de acordo com o seu desenvolvimento. Para o estímulo ao enraizamento e a redução da perda de água, é realizada, no final dessa fase, uma poda de cerca de 80% da área foliar. Esse procedimento deve ser realizado com ferramentas higienizadas, segundo o sistema IAC (Landell

et al., 2012), a fim de diminuir o potencial de transmissão de doenças, a exemplo do raquitismo da soqueira.

A última etapa do processo de aclimação ocorre em bancadas a pleno sol (Figura 4.1D). Nesta fase, o objetivo principal é a adaptação e rustificação das mudas para o plantio no campo. Para isso, as podas foliares são intensificadas nas três semanas seguintes. Em média, são necessárias três podas nesse período. O fornecimento de água é feito via irrigação, em geral por microaspersão (Figura 4.2), com aplicação média de 4 mm dia^{-1} ou com o manejo da irrigação baseado em 80% da evapotranspiração de referência, fornecidos em três ou quatro turnos de rega (Landell et al., 2012; Ohashi et al., 2020). No fim dessa etapa, a muda estará em condições de ser retirada e transportada para o plantio (Figura 4.1E). Na última fase de produção das MPBs, tem-se a atuação no campo; buscando-se o manejo correto, o produtor passa a contar com mudas para formação de um canavial sadio e com alto potencial de produtividade.

O processo de produção da muda varia em razão da época do ano no sistema de produção da Schiavon Agro. Nesse sistema de produção, a cana demora, no inverno, entre 60 a 90 dias para chegar ao ponto e, no verão, entre 30 a 40 dias. Para liberar a muda para ser plantada no campo, deve ser realizado um preparo prévio com 48 horas de antecedência, efetuando-se um tratamento com fipronil e a fertirrigação com Ajifer (Ajinomoto Interamericana Indústria e Comércio Ltda.), fertilizante organomineral líquido obtido a partir da fabricação do aminoácido essencial lisina como fonte de nitrogênio (N).

Antes do plantio em campo, as MPBs devem ser pulverizadas ainda na bandeja com solução de nutrientes e fipronil, na dose de 30 g por 100 L de água sobre as mudas. Caso o plantio seja feito para fins de sistema Método inter-rotacional ocorrendo simultaneamente (Meiosi), ou seja,

Foto: William Pereira



Figura 4.2. Etapa final do processo de aclimatação de mudas pré-brotadas em bancadas a pleno sol.

para ser usado como mudas para futuros plantios, o que será explicado em tópico adiante, não fazer aplicação foliar posterior.

Se o plantio da MPB for realizado para a produção de mudas a serem colhidas com 12 meses ou mais, realizar uma aplicação foliar de 100 g ha^{-1} da solução de nutrientes após 90% do perfilhamento já desenvolvido.

Tecnologia de produção de mudas pré-brotadas no campo

Planejamento do plantio

O planejamento das operações de plantio inclui a decisão quanto à época e os espaçamentos mais adequados, a fim de garantir a produção de matéria-prima e a longevidade do canavial. A seguir, são descritas as etapas de plantio e as formas mais adequadas de distribuição de mu-

das na área e no sulco de plantio, além da seleção de variedades para a produção de mudas.

Épocas de plantio

Tradicionalmente nomeiam-se duas épocas distintas de plantio: cana de ano e meio: 18 meses, e cana de ano: 12 meses. Essa caracterização se refere ao plantio que proporciona um canavial com maior massa quando iniciado nos meses de fevereiro a abril. A “cana de ano e meio”, com plantio no período de fevereiro a abril, é colhida com o maior período cronológico de crescimento, com tempo de crescimento entre 13 e 18 meses. Apresenta taxa de crescimento mínimo, ou mesmo nula ou negativa, de maio a setembro, no Centro-Sul, em razão das condições pouco favoráveis do inverno. Já com o início das precipitações, o aumento da intensidade luminosa e também da temperatura, a fase de maior desenvolvimento acontece de outubro a abril, com o pico do crescimento por volta de

dezembro a abril (Vitti; Mazza, 2002). Já a “cana de ano” é plantada em setembro–outubro, tem seu desenvolvimento máximo de novembro a abril, diminuindo após, por causa das condições climáticas adversas do período de inverno no Centro-Sul, podendo essa colheita ocorrer a partir de julho, isso em razão da cultivar.

Atualmente, práticas alternativas de manejo permitem o plantio durante o ano todo, desde que respeitado o período de baixas temperaturas que ocorrem em algumas regiões específicas. A restrição ao plantio ocorre apenas em 2 meses: junho e julho. Mesmo no noroeste de São Paulo e em toda a região Centro-Oeste do Brasil (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás), o plantio é viável durante todo o ano, desde que ocorra alguma precipitação antes ou logo após a operação; ou então que seja feita irrigação suplementar. Na Tabela 4.1 apresentam-se

as diferentes oportunidades de plantio e suas limitações, indicando que o melhor período para plantio se situa entre os meses de março a setembro e considerando-se a limitação hídrica logo após o plantio. Evita-se, assim, deixar a área em pousio, garantindo-se produtividades esperadas próximas da modalidade “ano e meio”. Um canavial implantado nesse período não sofrerá interrupção no seu crescimento, como ocorre no plantio de “ano e meio”, uma vez que o período de máximo desenvolvimento da cultura ocorre no período de maior pluviosidade.

Espaçamento entre linhas de plantio

A escolha do espaçamento mais adequado entre as linhas de plantio varia para cada tipo de solo. O relevo e o manejo influenciam a quantidade e a qualidade da matéria-prima produzida.

Tabela 4.1. Épocas de plantio e limitações climáticas para manejo em condição de deficiência hídrica durante e após plantio e no andamento da safra (7º e 9º mês) de cana-de-açúcar.

Época de plantio	Deficit hídrico no máximo desenvolvimento, número de dias	Necessidade de irrigação para qualidade de plantio	Deficit hídrico, limite da safra em curso, número de dias	Irrigação complementar em cana alta, 7º e 9º mês pós-plantio (indicação)
Janeiro	90–120	0	0	Evitar plantio
Fevereiro	120–150	0	0	Evitar plantio
Março	120	0	0	0
Abril	90	0	0	0
Maio	60	Eventual	0	0
Junho	30	Eventual	0	0
Julho	0	Necessária	30	0
Agosto	0	Necessária	60	0
Setembro	0	Eventual	60–90	Eventual
Outubro	30	0	90–120	Necessária
Novembro	30–60	0	120–150	Indispensável
Dezembro	60–90	0	150	Indispensável

Nota: abril a agosto = melhor época de plantio (laranja).
Fonte: Coleti et al. (2006).

Os espaçamentos simples (linha simples) podem variar entre 0,90 e 1,8 m. Em lavouras com colheita mecanizada, o espaçamento de 1,5 m é o mais adotado por facilitar a colheita e causar menor prejuízo às soqueiras (pisoteio pelos rodados de colhedoras e transbordo). Para a colheita manual, o espaçamento entre linhas com melhores resultados é de 1,40 m (Silva et al., 2013).

Espaçamentos duplos alternados ou combinados podem também ser adotados, buscando-se maior eficiência na colheita mecanizada e menor compactação do solo pelo tráfego de máquinas. Nesses espaçamentos, há alternância de duas linhas com espaçamento entre 0,50 a 0,90 m, e duas linhas com maior espaçamento entre linhas de 1,5 a 2,0 m (Ripoli et al., 2007). Espaçamento combinado adotado normalmente é o chamado "abacaxi", com distâncias de 0,50 e 1,5 m. Um sulco com largura entre 0,50 a 0,70 m pode ser usado (Silva et al., 2013). Outro espaçamento é o duplo alternado, com distâncias de 0,90 e 1,5 m (Figura 4.3).

Etapas de plantio

Na prática, a escolha das variedades a serem plantadas é feita regionalmente em razão das condições edafoclimáticas previamente conhecidas por meio da caracterização dos ambientes

de produção (Landell et al., 2006). De um modo geral, o ambiente de produção é definido em função das condições hídricas, físicas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos sob manejo adequado da camada arável, associadas com as condições de subsuperfície dos solos e ao clima regional (precipitação, temperatura, radiação solar, evaporação) (Landell et al., 2006; Prado et al., 2008; Bertolani et al., 2015).

Fatores que afetam o estabelecimento das mudas e a produtividade para geração de gemas

Necessidade hídrica para o estabelecimento do canavial

Uma das etapas fundamentais para o estabelecimento da MPB é a irrigação (Campbell et al., 2001). Esta pode ser realizada de diferentes formas, sendo as mais utilizadas por aspersão e por caminhões pipas (Figura 4.4). Estudo de Elia (2016) durante plantio de inverno, na região de Piracicaba, SP, sob diferentes lâminas de irrigação (10, 20, 30 e 40 mm), mostrou que lâminas de 10 mm aplicadas em quatro épocas garantem um índice de pegamento adequado e um alto vigor de plantas no estabelecimento e desenvolvimento das MPBs.



Foto: José Tadeu Coletti



Foto: Fábio Cesar da Silva

Figura 4.3. Canavial implantado no espaçamento combinado de 1,50 x 0,90 m.

Foto: Daniel Chistofoleiti



Figura 4.4. Molhamento da área de plantio de mudas pré-brotadas com caminhões pipas.

A eficiência da aplicação de lâminas de 10 mm em quatro épocas foi confirmada em experimento conduzido em Lençóis Paulista, SP, nos anos de 2014 e 2015 por Silva et al. (2016), com diferentes espaçamentos e distância entre mudas. Verifica-se uma estreita relação entre o índice de mortalidade de MPBs no plantio de inverno com a irrigação, fundamental para o estabelecimento e desenvolvimento de MPBs nos primeiros dias após o plantio.

População de mudas na área e o arranjo de plantas

O plantio de mudas pode ser realizado em dois sistemas: manual ou mecânico. Para o plantio

manual, após o preparo do solo (convencional, profundo com subsolagem ou profundo canteirizado, sulcação segundo o espaçamento escolhido — linha simples, duplo alternado ou combinado, adubação e aplicação de pesticidas, ou abertura de sulcos pouco profundos sob a palha de culturas de cobertura específicas — plantio direto), caixas com MPBs são distribuídas ao longo dos sulcos. Em seguida, as mudas são dispostas nos sulcos por uma ferramenta adaptada, convencionalmente denominada de “chucho” (Figura 4.5) ou de uma plantadeira manual (“matraca ou saraquá”), sendo que o chucho é o mais indicado pela facilidade operacional, chegando a um rendimento de 1.500 mudas plantadas por

Foto: Daniel Chistofoleiti



Figura 4.5. Plantio manual de mudas pré-brotadas com utilização de “chucho” para abertura das covas e plantio.

pessoa por dia. O plantio com plantadeira manual tem limitações por ser inconveniente se o preparo do solo tenha deixado torrões ou baixa qualidade do plantio e por requerer constantes trocas de operadores por ser mais pesada.

Para o plantio mecanizado, é necessário um excelente preparo de solo e nivelamento do terreno para que a plantadeira realize todas as operações, a começar do sulcamento. O solo em condições ótimas de plantio garante que as mudas não fiquem em sulcos rasos, expostas ao ressecamento. Em estudo realizado pela Embrapa em parceria com a empresa Basf na área de produção da PHD Cana/Grupo Zilor, de 2013 a 2015, avaliou-se o pegamento de mudas do sistema AgMusa com diferentes tipos de preparo do solo e diferentes espaçamentos entre linhas de cana e entre mudas de cana na linha (Silva et al., 2016; Almeida, 2019). Os autores verificaram que o preparo do solo e os espaçamentos entre linhas e entre MPBs influenciaram a fertilidade do solo (Tabela 4.2), no teor de fósforo (P) disponível extraído pela resina, no pH CaCl_2 , na saturação por bases — Ca, Mg, SB, V e CTC, em ambas as camadas (0–20 cm e 20–40 cm) de solo (Silva et al., 2017).

O sistema Penta apresenta teores de cátions trocáveis mais baixos na camada de 20–40 cm (Tabela 4.2). Por se tratar de um preparo intenso do solo, o sistema favorece a lixiviação no perfil com cinco funções simultâneas: subsola, aplica corretivo, aleira a palha, incorpora e destorroa (Silva et al., 2013). Desse modo, o preparo de solo em profundidade ocorre somente na faixa onde será instalada a cultura no espaçamento duplo alternado (0,90 x 1,50 m).

Verificou-se que, em todos os tratamentos, ocorreram na camada subsuperficial (20–40 cm), aos 9 meses após o plantio, teores muito baixos de potássio (<0,7) e baixos de magnésio (<4) e de sulfato (<4). Houve uma tendência de que o preparo profundo “canterizado” promova uma

menor fertilidade na superfície e na subsuperfície, em saturação de bases e nos teores de bases (Tabela 4.2).

A distância entre mudas influencia no número de colmos ou perfilhos por metro quadrado (Figura 4.6). A competição entre perfilhos na linha fica evidente ao compararmos nas épocas de 170 e 310 dias após plantio (DAP). No entanto, após o fechamento do canavial, há estabilização de 12 a 14 colmos por metro quadrado que se estende até a colheita.

O plantio de MPBs distanciadas de 0,55 m na linha produziu o maior número de gemas por hectare, o maior perfilhamento e a maior produtividade na cana-planta (Figura 4.7). O desenvolvimento de soqueiras de cana-de-açúcar a partir do plantio de MPBs foi obtido para mudas plantadas nas distâncias de 0,70 e 0,85 m no espaçamento duplo alternado (0,90 x 1,5 m) e em linha simples (1,5 m). No espaçamento combinado (“abacaxi”, de 0,50 x 1,4 m), a melhor distância entre mudas foi de 0,85 m (Figura 4.8).

O plantio de MPBs distanciadas de 0,55 m na linha produziu o maior número de gemas por hectare, o maior perfilhamento e a maior produtividade (Figura 4.7). O desenvolvimento de soqueiras de cana-de-açúcar a partir do plantio de MPBs foi obtido para mudas plantadas nas distâncias de 0,70 e 0,85 m no espaçamento duplo alternado (0,90 x 1,5 m) e em linha simples (1,5 m). No espaçamento combinado (“abacaxi”, de 0,50 x 1,4 m), a melhor distância entre mudas foi de 0,85 m (Figura 4.8).

Xavier et al. (2014), avaliando três cultivares de cana em três distâncias entre MPBs e duas distribuições de gemas, não encontraram diferenças na produtividade (TCH) entre os diferentes tipos de plantio e variedades. A quantidade de colmos por metro linear (média de perfilhos por metro) foi diferente para as variedades testadas, sendo que a IAC91-1099 teve a

Tabela 4.2. Influência do preparo de solo e do espaçamento sobre a fertilidade do solo aos 9 meses, na cana-planta.

Tratamento	Matéria orgânica (MO)	pH CaCl ₂	P _{assimilável} -resina	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Soma de bases (S)	Saturação por bases (V%)	S-SO ₄
	(g dm ⁻³)		(mg kg ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)	(%)	(mg dm ⁻³)
0–20 cm									
Linha simples (1,5 m), preparo convencional	10,8	5,6a	27	1,01	17,2	6,09 a	24,8	58,6	2,37
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m), convencional	9,9	5,2ab	17	0,87	15,5	5,33ab	21,6	53,3	2,15
Combinado (0,50 x 1,4 m), convencional	10,9	5,4ab	35	1,21	18,2	5,71ab	25,1	56,9	2,76
Combinado (0,50 x 1,4 m), preparo profundo	10,9	5,3ab	26	1,05	15,5	5,17ab	21,7	53,8	2,15
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m), preparo profundo canteirizado	9,1	4,9b	26	0,98	10,9	3,88b	15,7	42,6	2,49
20–40 cm									
Linha simples (1,5 m), preparo convencional	8,3	5,2	12	0,53	10,5	4,50 a	15,5	41,7	1,42
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m), convencional	7,9	4,7	9	0,48	9,4	3,62ab	13,5	34,8	1,26
Combinado (0,50 x 1,4 m), convencional	8,2	5,0	19	0,68	10,4	3,34ab	14,4	38,5	1,85
Combinado (0,50 x 1,4 m), preparo profundo	8,1	4,8	9	0,62	7,8	2,96b	11,4	32,5	1,79
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m), preparo profundo canteirizado	8,2	4,2	16	0,53	7,9	2,65b	10,5	31,2	1,52

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

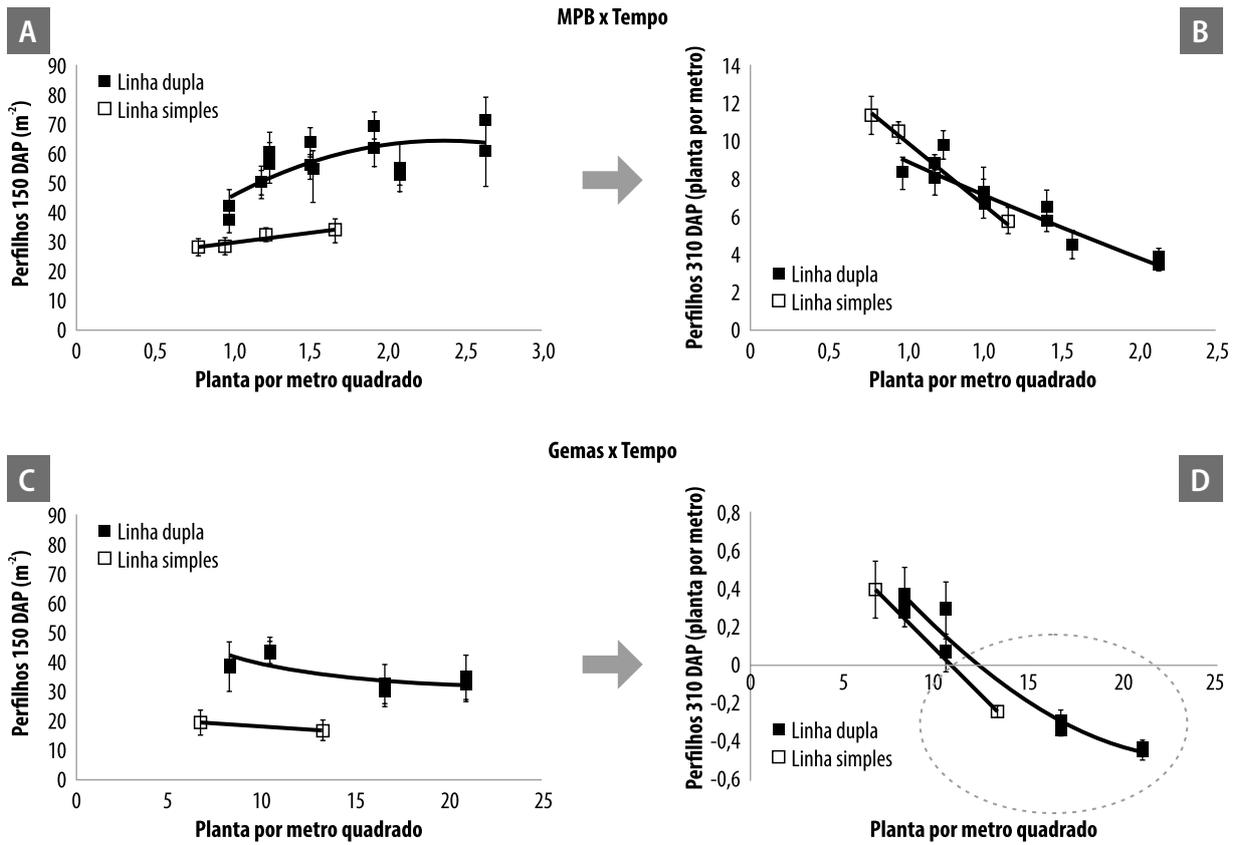


Figura 4.6. Influência da distância entre mudas, expresso em plantas por metro quadrado, nos espaçamentos duplo alternado (linha dupla) e linha simples, no perfilamento da cana-planta aos 150 e 330 dias após plantio. Contagem de perfilhos por metro quadrado aos 150 DAP (A) e aos 310 DAP (B), aumentando a densidade de plantas por metro quadrado; contagem de perfilhos por metro quadrado, em relação à população de gemas originais plantadas aos 150 DAP (C) e 310 DAP (D).

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017).

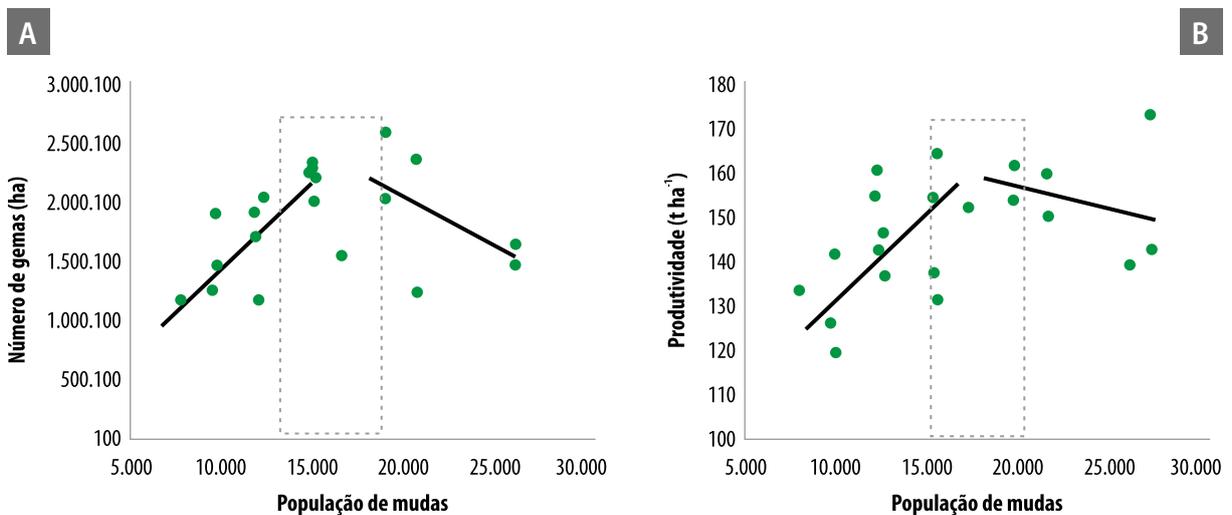


Figura 4.7. Influência da população de mudas pré-brotadas no plantio sobre a produtividade (A); produção de gemas por hectare do viveiro na cana-planta (B).

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017).

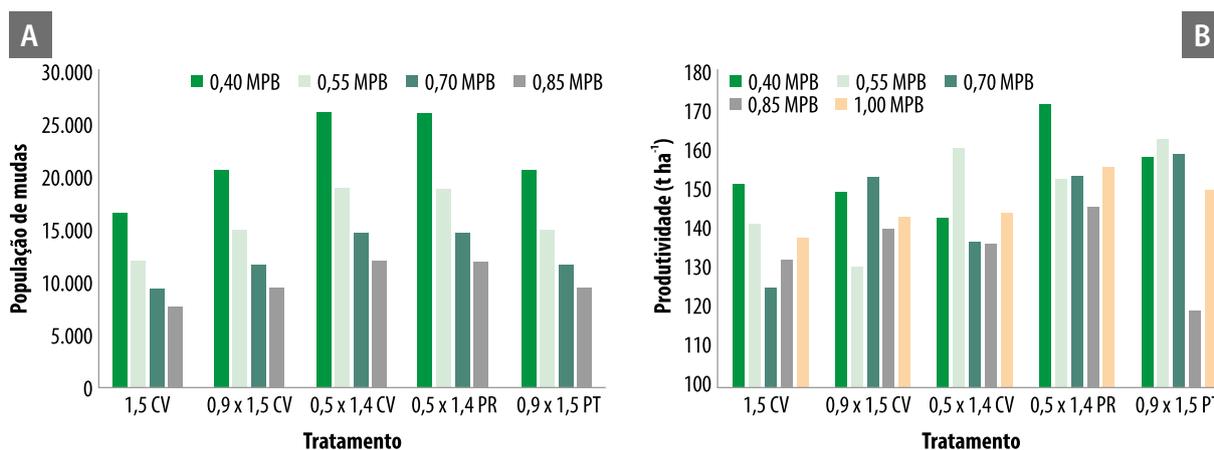


Figura 4.8. Influência da distância entre mudas pré-brotadas no sulco de plantio na produção de gemas para fazer mudas (gemas ha⁻¹) (A) e produtividade de colmos por hectare (t ha⁻¹), na cana-planta (B), em diferentes tipos de preparo do solo e espaçamento (1,5 CV – Linha simples, preparo convencional; 0,90 x 1,5 m CV – Duplo alternado, convencional; 0,5 x 1,4 m CV – Combinado, convencional; 0,5 x 1,4 m PR – Combinado, preparo profundo; e 0,90 x 1,5 m PT – Duplo alternado, preparo profundo canteirizado).

maior média (16,1 colmos por metro), seguida da IACSP95-5000 (15,4 colmos por metro), da IACSP95-5000 (15,1 colmos por metro) e da RB867515 (12,0 colmos por metro), que pode estar associado à produtividade (TCH).

O efeito do tipo de plantio utilizando-se segmentos de colmo (toletes) e MPBs na cana-planta e três canas-socas foi estudado por Silva et al. (2017) na área de produção da PHD Cana/Usina Zilor em Lençóis Paulista, SP. Maiores distâncias entre MPBs na linha (0,70 e 0,85 m) apresentaram as melhores produtividades de colmos (Figura 4.9). Os estudos realizados por Silva et al. (2017) permitem concluir que:

- A melhor produtividade foi obtida pelos arranjos de linhas duplas, com uma distância entre MPBs de 0,70 a 0,8 m; já no espaçamento combinado, a distância foi de 0,85 m entre mudas.
- A melhor distância entre MPBs foi de 0,70 m, produzindo um maior número de gemas por hectare e maior perfilhamento da cana.
- As melhores produtividades ocorrem naqueles tratamentos com população de MPB entre 15 a 18 mil plantas por hectare, resul-

tando em produtividades acima de 145 TCH na cana-planta.

Arquitetura foliar das plantas

Foram avaliados os efeitos de diferentes arranjos de plantas (espaçamento e população de MPBs) na produtividade de cana-de-açúcar, bem como em outros aspectos agrônômicos. Para tanto, um experimento foi planejado e executado pela Embrapa, em parceria com as empresas Basf e PHD Cana/Grupo Zilor, implantado em meados de setembro de 2014. Experimento descrito por Silva et al. (2016), no qual foi considerado o delineamento experimental de blocos ao acaso em parcelas subdivididas em esquema fatorial (variedade versus preparo do solo/espaçamento). Nessas condições, foi estudada a influência do fator variedade na interceptação de luz diferenciada em função da arquitetura de folha (prostradas/CTC 9001 ou eretas/CTC 9003), sendo cada parcela subdividida em quatro subparcelas cujos tratamentos são densidades na linha de plantio com mudas do sistema MPB: 40, 60 e 80 cm entre mudas. A recomendação da distância entre mudas foi de 0,55 e 0,70 m, mas a principal informação é a

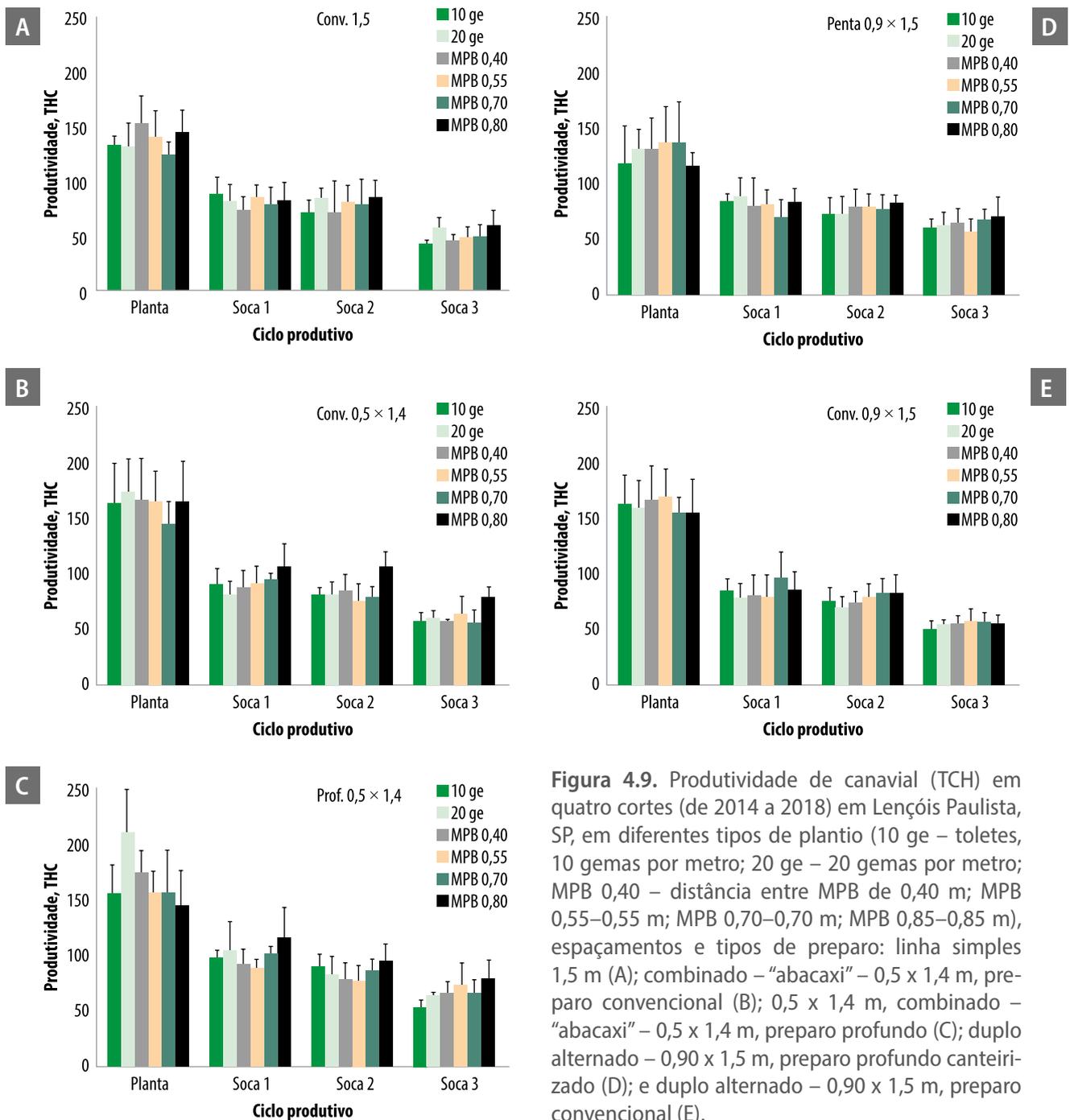


Figura 4.9. Produtividade de canavial (TCH) em quatro cortes (de 2014 a 2018) em Lençóis Paulista, SP, em diferentes tipos de plantio (10 ge – toletes, 10 gemas por metro; 20 ge – 20 gemas por metro; MPB 0,40 – distância entre MPB de 0,40 m; MPB 0,55–0,55 m; MPB 0,70–0,70 m; MPB 0,85–0,85 m), espaçamentos e tipos de preparo: linha simples 1,5 m (A); combinado – “abacaxi” – 0,5 x 1,4 m, preparo convencional (B); 0,5 x 1,4 m, combinado – “abacaxi” – 0,5 x 1,4 m, preparo profundo (C); duplo alternado – 0,90 x 1,5 m, preparo profundo canteirizado (D); e duplo alternado – 0,90 x 1,5 m, preparo convencional (E).

capacidade de suporte do ambiente em receber uma população acima de 100 mil colmos na colheita, sendo a população ideal de MPB variável com as variedades de distintas arquiteturas de folhas que chegaram as populações: 11.500 a 13.000 plantas para folhas mais prostradas (CTC 9001) e de 15.000 para folhas mais eretas (CTC 9003). Quanto ao preparo do solo, foram obtidos maiores valores de produtividade para os

tratamentos sob o sistema Penta em relação ao sistema convencional (Figura 4.10).

O espaçamento de plantio utilizado nas culturas deve ser definido em razão da maximização do índice de área foliar (IAF) relacionado com a interceptação da radiação solar (Tejera et al., 2007). Já para plantas cultivadas com diferenças varietais na arquitetura foliar, sugere-se a adoção de espaçamento de plantio diferente do

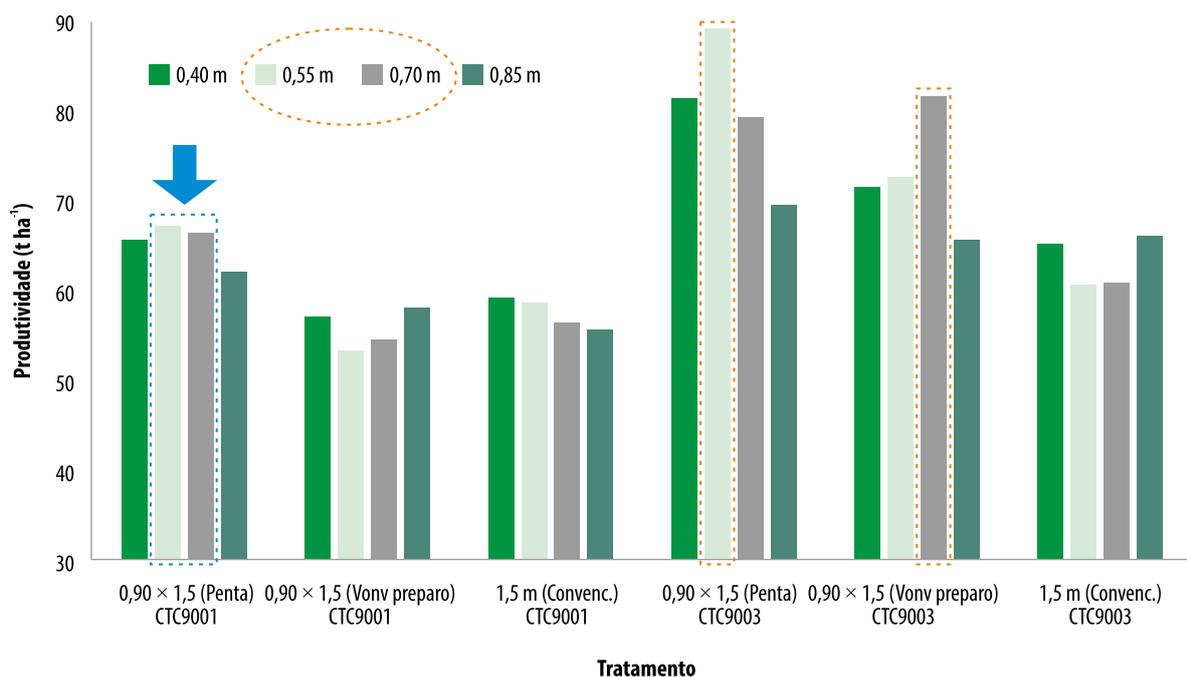


Figura 4.10. Produtividade agrícola da cana-de-açúcar sob influência dos sistemas de preparo do solo (Penta e Convencional), variedades (CTC9001 e CTC9003), e distância entre as MPBs na produtividade (0,40, 0,55, 0,70 e 0,85 m).

habitualmente utilizado (Campbell et al., 2001). O aumento do IAF em razão do adensamento de plantio favorece a interceptação da radiação solar, mas pode reduzir a produtividade da cultura em resposta à queda da fotossíntese global da planta (Campbell et al., 2001). Por sua vez, o aumento de produtividade pode ser obtido em virtude do adensamento de plantio em plantas com arquitetura de folhas mais eretas.

Os subtratamentos com as menores distâncias entre mudas (0,40 a 0,55 m) foram os de maiores valores em perfilhamento, em comparação a maiores distâncias entre as plantas (0,70 e 0,85 m) (Tabelas 4.3 e 4.4), valores observados na colheita. Para cana-de-açúcar, diferenças de produtividade são encontradas em função do espaçamento de plantio utilizado (Figura 4.6), e a maior produtividade na cana-planta de algumas variedades é com espaçamento de plantio adensado na cana-planta, como se observa amplamente na literatura (Bell; Garside, 2005). Ressalta-se que, nos estudos conduzidos na produção com ou sem queimada do canavial,

se conhece sobre a influência direta da arquitetura foliar sobre a produtividade das plantas (Marchiori et al., 2014) e possivelmente razões associadas às características de variedades. Nos resultados de presente experimento, esses fatores se refletiram na produtividade de colmo e de gemas, onde se observou que a arquitetura foliar mais ereta das plantas (CTC 9003) resultou num maior número de colmos e gemas. A recomendação da distância entre mudas foi entre 0,55 e 0,70 m (Figura 4.6), isto é, se for um plantio por muda pré-brotada, ou MPB, em linha dupla alternada, poderia ser 0,70 m entre plantas, se fizer um arranjo em “losango”, o que demanda dez vezes menos matéria-prima por hectare.

O sistema de produção no duplo alternado (0,90 x 1,5 m) mostrou-se como a melhor alternativa para ambas as variedades, em comparação aos sulcos simples (1,5 m), mas a melhoria promovida pelo preparo profundo não refletiu em ganho de produtividade da cana-planta, na comparação de médias no teste de Tukey.

Tabela 4.3. Análise de variância: teste de Tukey para médias de diferentes espaçamentos (Trat A) para produção de gemas, diâmetro médio e açúcar de cana (pol, ATR e TAH) na colheita da cana-planta.

Causa da variação	Total de gemas por hectare	Diâmetro	Pol % Cana	ATR	TAH
S Simples (1,5 m)	1377661AB	0.185	15.09A	149.5A	10.87 ^a
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m)	1481712A	0.175	14.88AB	147.4 AB	9.50 B
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m) Penta	1313982B	0.170	14.52B	144.1B	8.75 B
DSM a 5%	232478	0.0487	0.495	3.522	1.029
S Simples (1,5 m)	1377661AB	0.185	15.09A	149.5A	10.87 ^a
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m)	1481712A	0.175	14.88AB	147.4 AB	9.50 B
Duplo alternado (0,90 x 1,5 m) Penta	1313982B	0.170	14.52B	144.1B	8.75 B
DSM a 5%	232478	0.0487	0.495	3.522	1.029

Tabela 4.4. Análise de variância: teste de Tukey para médias de diferentes variedades (Trat B) para produção de gemas, diâmetro médio e açúcar de cana (pol, ATR e TAH), na colheita da cana-planta, a 5% de probabilidade.

Causa da variação	Produtividade	Peso total	Peso sem palha	Peso líquido	Número de colmos	Número de gemas/2TC	ATR	TAH
CTC 9001	59.7B	96.7	85.08	73.2B	72460B	252.7 B	149.1A	8.91B
CTC 9003	72.3A	129.3	101.0	90.7 A	90446 A	287.4 A	144.9B	10.51 ^a
DSM a 5%	4.60	34.4	16.38	13.77	5907	29.5	3.12	0.695

Sistema Método inter-rotacional ocorrendo simultaneamente (Meiosi)

O sistema Meiosi (acrônimo de Método inter-rotacional ocorrendo simultaneamente) constitui ferramenta de introdução rápida de novos materiais genéticos com a redução drástica de operações no plantio definitivo e significativa redução do custo de plantio. Na prática, o sistema Meiosi trata-se de um método utilizado pelos produtores de cana para a introdução de nova variedade por MPB em áreas comerciais. O dado mais relevante na sua escolha é a possibilidade de movimentar apenas 25% dos recursos num primeiro momento de plantio, em que toda a cana que seria destinada ao plantio, na data

convencional, passa a fazer parte do volume a ser industrializado.

Quando se menciona que 20 ou 25% da área devem ser mantidas com cana no plantio e o restante com uma oleaginosa, isso diz respeito ao espaço intercalar que se elege para o sistema. Para plantios de 15 de agosto a 15 de outubro, pode-se trabalhar com 20%, ou seja, duas linhas plantarão dez linhas definitivas após 6 meses; para plantio de 15 de outubro a 15 de novembro, sugere-se a relação de duas linhas plantando-se oito linhas definitivas.

Há uma redução no consumo direto de muda no plantio por instalar, inicialmente, apenas cerca de 20% da área de cana na lavoura. Toma-se, como exemplo, uma área de 100 ha. Para essa

área, a demanda normal seria de 1.600 t, pensando-se que a plantadora somente gaste 16 t ha⁻¹. Por sua vez, essa mesma área, planejada com sistema Meiosi, gastará apenas 320 t, que, após 6 meses, vai cobrir os restantes 80%. Na verdade, planta-se efetivamente apenas 20 ha, sobre uma área disponível de 100 ha. E se deixa para moagem na indústria praticamente a totalidade das 1.600 t que ganhará em peso pelo fato de ser colhida com idade normal (14 a 16 meses) e com a possibilidade de ainda colher a soca das 320 t.

Rotação com culturas anuais com sistema Meiosi

Outras culturas começam a fazer parceria com a cana-de-açúcar, como o amendoim, a soja, o girassol, e culturas de cobertura do solo, como as crotalárias (Figuras 4.11 a 4.13). No caso das crotalárias, a retirada da área ocorre 90–100 dias após o plantio no máximo, o que permite a desdobra das linhas-mães do sistema Meiosi.

O plantio em sistema Meiosi tem como objetivo central de formar o viveiro básico de muda de cana-de-açúcar dentro da própria área de renovação. Tal técnica de plantio pode ser realizada de forma manual ou mecanizada; se for de forma manual, utiliza-se um grupo de três pessoas no campo fazendo-se as operações de plantio em sequência.

Como iniciar o processo do sistema Meiosi

Haverá sempre o ponto de partida e este depende de um plantio anterior ou da utilização de soca de muda em bom estado de sanidade, pois, via de regra, não há muda pronta para a época de início do sistema Meiosi — julho a outubro —, a menos que se programe com um ano de antecedência ou se utilizem MPBs.

O segredo do sucesso da técnica, seja com mudas de tolete, seja com MPB, está fundamentado no



Foto: José Tadeu Coletti

Figura 4.11. Sistema Método intercalar-rotacional ocorrendo simultaneamente (Meiosi) com a cultura da soja, em 15/5/2010, Piracicaba, SP.



Foto: José Tadeu Coletti

Figura 4.12. Sistema Método intercalar-rotacional ocorrendo simultaneamente (Meiosi) com a cultura do amendoim, em 15/5/2010, Piracicaba, SP.



Foto: José Tadeu Coletti

Figura 4.13. Sistema Método intercalar-rotacional ocorrendo simultaneamente (Meiosi) com *Crotalaria spectabilis* (cultura de cobertura do solo), em 15/6/2010, Piracicaba, SP.

cuidado na implantação, provendo-se água suficiente para a germinação (no caso de toletes) ou para o pegamento, enraizamento e consolidação, no caso da MPB (Figuras 4.14 a 4.16).

O emprego da MPB se apresenta como uma alternativa para suprir a falta de material para



Figura 4.14. Muda pré-brotada com irrigação logo no plantio, em 15/5/2010, Piracicaba, SP.



Figura 4.15. Plantio do sistema Meiosi com muda pré-brotada, já consolidado, em 15/5/2010, Piracicaba, SP.



Figura 4.16. Duas linhas-mães do sistema Meiosi e a desdobra lateral, em 20/10/2010, Olímpia, SP.

plantio “fora de tempo”, como é o caso do sistema Meiosi, cuja época fosse de setembro–outubro, quando, normalmente, não existe material com qualidade de muda.

Manejo da fertilização

Soares et al. (2016) estudaram em sistema de plantio com mudas pré-brotadas (MPBs) para avaliar a produtividade em razão de fontes e

doses de nitrogênio em dois ciclos de cana com a variedade IACSP95-5000, cana-planta e cana-soca. Os autores demonstraram que, na cana-planta, não houve resposta à adubação nitrogenada. Por sua vez, no cultivo de cana-soca ocorreu resposta à dose de nitrogênio aplicado, atingindo o máximo de produção de colmos próximo à dose de 120 kg ha^{-1} de nitrogênio. Não houve diferenças entre as fontes de nitrogênio, ureia e nitrocálcio.

Outra abordagem é o uso de fertilizantes de liberação controlada na formação de MPBs de cana-de-açúcar. Estudo de Garcia et al. (2016) avaliou os efeitos de fontes, mostrando que elas não influenciaram o desenvolvimento inicial em altura de MPB de cana-de-açúcar.

Controle de plantas invasoras

Outro fator relevante é a utilização de controle químico adequado, o que implica a seleção de herbicidas baseados na seletividade desses produtos a serem aplicados em pós-emergência sobre MPBs de cana-de-açúcar, como estudado por Azania et al. (2015). Os autores estudaram a seletividade dos princípios ativos dos herbicidas hexazinone, ametryn, metribuzin, mesotrione e 2,4-D aplicados em pós-emergência da cana-de-açúcar, variedade IACSP95-5000 cultivada nos sistemas de plantio convencional (tolete) e de MPBs. Os herbicidas foram aplicados em pós-emergência com vazão de 220 L ha^{-1} . Os herbicidas hexazinone, ametryn, metribuzin, mesotrione, 2,4-D foram seletivos à cana-de-açúcar, variedade IACSP95-5000, no plantio convencional e no plantio com MPB, independente de a aplicação pós-emergente ter sido efetuada com a planta mais jovem (7 dias do plantio) ou mais desenvolvida (40 dias do plantio).

Considerações finais

De modo geral, o tratamento duplo alternado (0,90 x 1,5 m) mostrou-se superior ao convencional (espaçamento simples a 1,5 m), promovendo melhores perfilhamentos por metro linear ou quadrado, assim como na parcela como um todo — mensurado nas duas linhas centrais. Os subtratamentos com as menores distâncias entre mudas (de 0,40 a 0,55 m) foram as de melhores perfilhamentos no estabelecimento da cultura, em comparação a maiores distâncias entre as plantas (0,70 e 0,85 m). Entretanto, ao fim do ciclo, os tratamentos que obtiveram os maiores números de perfilhos e produtividade foram os de 0,70 e 0,85 m entre mudas, se considerar de três a quatro cortes do canavial. Tal aspecto é relevante porque se considera para a produção de mudas a utilização das gemas viáveis dos colmos colhidos na cana-planta. Entretanto, com o controle sanitário adequado rigoroso, poderiam se utilizar os materiais produzidos na primeira cana-soca, até ocasionalmente na segunda cana-soca.

Quando comparada ao plantio convencional, a MPB apresenta uma série de vantagens:

- a) Origina um estande homogêneo, com alto número de perfilhos e plantas vigorosas que elevam o potencial produtivo.
- b) Estabelece um canavial livre de doenças e pragas, partindo de muda sadia isenta de problemas fitossanitários.
- c) Simplifica as operações de plantio com mecanização racional da lavoura e otimiza o uso de mão de obra.
- d) Aumenta a velocidade na expansão de áreas, por causa da rapidez na introdução de novas variedades e na renovação do banco varietal, com maior retorno sobre o investimento.
- e) Apresenta maior produtividade de gemas nos viveiros.
- f) Exibe um menor consumo de mudas por hectare pelo ajuste de população ideal pela variedade e ambiente de produção.

Há ainda pouca participação das MPBs em áreas comerciais de cana-de-açúcar no País, mas, tornou-se uma realidade na formação de viveiros. É uma tecnologia para plantio promissora, em que os pesquisadores estão se dedicando há algum tempo, porém, é um tema muito amplo e ainda cabem muitos estudos.

Referências

- ALMEIDA, G. C. A. de. **Serviços ecossistêmicos do solo em sistemas agroflorestais: estado da arte e estudo de caso em São Gonçalo – RJ.** 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) – Universidade Estadual Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, RJ.
- AZANIA, C. A. M.; BIZZI, G. M.; VITORINO, R.; BELUCI, L. R.; AZANIA, A. A. P. M. Seletividade de diferentes herbicidas aplicados previamente ao plantio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **STAB**, v. 33, p. 36-38, 2015.
- BELL, M. J.; GARSIDE, A. L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 231-248, June 2005. DOI: [10.1016/j.fcr.2005.01.032](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.032).
- BERTOLANI, F. C.; JOAQUIM, A. C.; DONZELLI, J. L. Sistema de classificação edafoclimática para a cultura da cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C. da; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. de (ed.). **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos.** Brasília, DF: Embrapa, 2015. v. 1, p. 362-373.
- BRAMBILLA, W. P. **Estudo da fisiologia de gemas laterais de cana de açúcar durante o armazenamento.** 2013. 39 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Botucatu.
- CAMPBELL, C. S.; HEILMAN, J. L.; McINNES, K. J.; WILSON, L. T.; MEDLEY, J. C.; WU, G.; COBOS, D. R. Seasonal variation in radiation use efficiency of irrigated rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 110, n. 1, p. 45-54, Dec. 2001. DOI: [10.1016/S0168-1923\(01\)00277-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00277-5).
- CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar.** Jaboticabal: Funep, 1991. 157 p.
- COLETI, J. T.; CASAGRANDE, J. C.; STUPIELLO, J. J.; RIBEIRO, L. D.; OLIVEIRA, G. R. de. Remoção de macronutrientes

pela cana-planta e cana-soca, em argissolos, variedades RB835486 e SP81-3250. *STAB*, v. 24, n. 5, p. 32-36, maio/jun. 2006.

ELIA, P. **Estabelecimento e desenvolvimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação**. 2016. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) -- Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

GARCIA, J. C.; SOUZA, R. M. de; OHASHI, A. Y. P.; SILVA, L. P. M.; PIRES, R. C. de M.; XAVIER, M. A. Fertilizantes de liberação controlada na formação de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. *Anais...* Ribeirão Preto: Stab, 2016. p. 241-244.

GHELLER, A. C. C.; GODOY, O. P. Eficiência comparativa de dois sistemas de tratamento térmico na inativação do agente causal do raquitismo da soqueira em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 4., 1987. Olinda. *Anais...* Olinda: Stab, 1987. p. 257-266.

LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A. dos; DINARDO-MIRANDA, L. L.; SCARPARI, M. S.; GARCIA, J. C.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, D. N. da; MENDONÇA, J. R. de; KANTHACK, R. A. D.; CAMPOS, M. F. de; BRANCALIAO, S. R.; PETRI, R. H.; MIGUEL, P. E. M. **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2012. 16 p. (Documentos IAC, 109).

LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; PINTO, L. R.; CRESTE, S. Manejo varietal em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de (org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 57-68.

MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. *Field Crops Research*, v. 155, p. 30-37, Jan. 2014. DOI: [10.1016/j.cr.2013.09.025](https://doi.org/10.1016/j.cr.2013.09.025).

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J.; MACCHERONI, W.; FOUTO, I. Bioenergia da cana. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (ed.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool: tecnologia e perspectivas**. Viçosa, Mg: UFV, 2010. p. 548-577.

MAY, A.; RAMOS, N. P. **Uso de gemas individualizadas de cana-de-açúcar para produção de mudas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 18 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular técnica, 29). Disponível em: [https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197206/1/Andre-May-CT-29.pdf)

[item/197206/1/Andre-May-CT-29.pdf](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197206/1/Andre-May-CT-29.pdf). Acesso em: 1 fev. 2021.

OHASHI, A. Y. P.; PIRES, R. C. de M.; XAVIER, M. A.; PERECIN, D.; SILVEIRA, L. K.; PETRI, R. H. Irrigation management based on reference evapotranspiration for pre-sprouted plantlets of sugarcane cultivars. *Bragantia*, v. 79, n. 2, p. 293-304, Apr./June 2020. DOI: [10.1590/1678-4499.20190288](https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190288).

PRADO, H. do; PÁDUA JÚNIOR, A. L.; GARCIA, J. C.; MORAES, J. F. L. de; CARVALHO, J. P. de; DONZELI, P. L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p. 179-204.

RAMAIAH, B. B.; RAO, G. N.; RAO, G. H. P. Elimination of internodes in sugarcane seed piece. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16., 1977, São Paulo. *Proceedings...* São Paulo: ISSCT, 1978. p. 1509-1514.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2004.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. 2. ed. rev. ampl. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2007. 198 p.

SILVA, F. C. da; COLETI, J. T.; STOLF, R. Impacto de los sistemas mecanizados sin quema em la producción agroindustrial de azúcar y energia. In: SILVA, F. C. da; DÍAZ-AMBRONA, C. G. H.; ITURRA, A. R. (ed.). **Desarrollo sostenible de la producción de bioetanol y azúcar: a partir de la caña de azúcar**. Madrid: Editorial Académica Española, 2013. p. 149-194.

SILVA, F. C. da; CUADRA, S. V.; RODRIGUES, G.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FREITAS, P. L. de; ROSSETTO, H. C. P.; HIIPOLITO, G. Influência da arquitetura do dossel, espaçamento entre linhas e distância entre mudas pré-brotadas na produtividade agrotecnológica da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. *Anais...* Ribeirão Preto: STAB, 2016. p. 245-248. Disponível em: http://www.stab.org.br/congresso_nacional_stab/imagens/anais_congresso_nacional_stab_2016.pdf. Acesso em: 21 maio 2021.

SILVA, F. C. da; RODRIGUES, G. C.; CUADRA, S. V.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FREITAS, P. L. de; ROSSETTO, H.; HIPOLITO, G. Avaliação da produtividade da cana-planta sob diferentes espaçamentos entrelinhas, entre plantas pré-brotadas e arranjos em Cerrados do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 8., 2017, Piracicaba. [Trabalhos científicos]. Piracicaba: GAPE, 2017. p. 20.

SOARES, J. R.; MONTEZANO, Z. F.; CANTARELLA, H.; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; PINTO, L. R. N.; DEGASPARI, I. A. M.; GONZAGA, L. C. Produtividade de cana-de-açúcar em função de fontes e doses de N no sistema de plantio com mudas pré-brotadas. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: STAB, 2016. p. 228-232. Disponível em: <http://www.stab.org.br/congresso_nacional_stab/imagens/anais_congresso_nacional_stab_2016.pdf>. Acesso em: 21 maio 2021.

TEJERA, N. A.; RÓDES, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivares. **Field Crops Research**, v. 102, n. 1, p. 64-72, Apr. 2007. DOI: [10.1016/j.fcr.2007.02.002](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.02.002).

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura da cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, n. 97, p. 1-16, mar. 2002. Encarte técnico.

XAVIER, M. A.; LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; MENDONÇA, J. R. de, DINAROD-MIRANDA, L. L.; SCARPARI, M. S.; GARCIA, J. C.; ANJOS, I. A. dos; AZANIA, C. A. M.; BRANCALIÃO, S. R.; KANTHACK, R. A. D.; AFERRI, G.; SILVA, D. N. da; BIPÓIA, M. A. P.; CAMPOS, M. F. de; PERRUCCO, D.; MATSUO, R. S.; NEVES, J. C. T.; CASSANELI JUNIOR, J. R.; PERRUCCO, L.; PETRI, R. H.; SILVA, T. N. da; SILVA, V. H. P. da; THOMAZINHO JUNIOR, J. R.; MIGUEL, P. E. M.; LORENZATO, C. M. **Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotação IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar - Mudas Pré-Brotadas (MPB)**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2014. 22 p. (Documentos IAC, 113).

Elementos da diagnose foliar da cana-de-açúcar

Edilaine Istéfani Franklin Traspadini | Gilmara Pereira da Silva

Gelza Carliane Marques Teixeira | Renato de Mello Prado

Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande exigência nutricional, sobretudo, se considerarmos as variedades modernas das quais sofreram relevante melhoramento genético. Assim, a adequada nutrição da cultura é um dos principais aspectos responsáveis pela produtividade, tendo em vista a baixa fertilidade natural dos solos brasileiros (Silva et al., 2020a).

A principal fonte de nutrientes para as plantas é o solo, que inclui quantidades de nutrientes que estão presentes desde sua origem e aqueles provenientes da adubação e calagem. No entanto, é importante o uso de métodos que avaliem e calibrem a quantidade de fertilizantes a serem utilizados nos cultivos agrícolas, permitindo a realização de adubações racionais que visem a aumentos de produtividade com menor desperdício.

Nesse cenário, o planejamento e a avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar tornam-se de fundamental importância e podem ser realizados por meio da diagnose foliar. O uso da análise química de plantas para fins de diagnóstico baseia-se na premissa de que existem relações causais entre a taxa de crescimento vegetal e o conteúdo de nutrientes na massa de matéria seca das plantas (Rozane; Natale, 2014).

O planejamento, a avaliação e a calibração da adubação das culturas podem ser realizados por meio da diagnose nutricional de plantas. Na cultura da cana-de-açúcar a utilização de ferramentas voltadas para o diagnóstico de distúrbios relacionados a nutrição é de relevante

importância, considerando-se que o ciclo da cultura permite a correção da adubação nos cortes subsequentes (Silva et al., 2020a). Portanto, é necessário o uso de métodos que comparem padrões nutricionais adequados em função da resposta à fertilização da cultura (Franco-Hermida et al., 2020).

Dentre os métodos de interpretação do estado nutricional das lavouras, destacam-se os métodos univariados, como o nível crítico (NC) ou das faixas de suficiência (FS) para a interpretação dos resultados (Morais et al., 2019). De forma alternativa, o método Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (do inglês *Diagnosis and Recommendation Integrated System* – DRIS) e a Diagnose da Composição Nutricional (do inglês *Compositional Nutrient Diagnosis* – CND).

O DRIS é um método bivariado, que tem sido proposto como boa ferramenta de diagnóstico, por incorporar o conceito de balanço nutricional e por minimizar, na interpretação do estado nutricional das plantas, efeitos atribuídos aos fatores não nutricionais (Rodríguez; Rodríguez, 2000). além disso, o método DRIS pode ser eficiente e refletir ganhos no manejo da lavoura (Ribeiro et al., 2020).

No entanto, o método CND apresenta fundamentação estatística, no qual, utilizando-se a transformação da razão log centralizada (Parent; Dafir, 1992), é gerado um fator de correção para qualquer nutriente, colocando-se todos os elementos essenciais em análise (multivariado) (Parent, 2011). Desse modo, o CND expande o

conceito de um espaço bidimensional para um multidimensional (Parent et al., 2013).

Diante do exposto, o objetivo desse capítulo será apresentar os elementos de diagnose foliar da cana-de-açúcar, a partir de resultados obtidos em trabalhos científicos.

Diagnose visual

A diagnose visual é comumente difundida entre pesquisadores, técnicos e extensionistas, visto que é uma maneira rápida de identificar se uma planta está com deficiência ou toxidez de algum elemento químico, seja ele nutriente ou não (Silva et al., 2020a).

A identificação de sintomas relacionados a distúrbios nutricionais em campo requer relevante atenção e prática do técnico. Isso ocorre porque se exige a garantia de que o problema seja de natureza nutricional e não causado por pragas e outras doenças que possam “mascarar” o problema, produzindo sintomas semelhantes (Prado; Caione, 2012).

Prado (2020) descreve os critérios que definem os sintomas como de natureza nutricional, sendo eles:

- Dispersão:** os problemas nutricionais geralmente ocorrem no campo de forma homogênea. Em casos de pragas/doenças, a ocorrência pode ser limitada a plantas isoladas. As deficiências nutricionais raramente aparecem isoladamente em algumas plantas.
- Simetria:** os distúrbios nutricionais são simétricos nas folhas, enquanto ataques por insetos fitopatogênicos, ou lesões, provocam sintomas assimétricas.
- Gradiente:** em uma planta ou ramo, os sintomas aparecem em um gradiente, seguindo um fluxo de surgimento de sintomas, seja de folhas mais antigas para mais jovens ou o inverso, de acordo com a mobilidade do ele-

mento na planta. Os sintomas acentuam-se em razão do avanço do tempo, tornando-se generalizado.

Existem inúmeras vantagens na utilização da diagnose visual, relacionadas, sobretudo, ao baixo custo e a possibilidade de correção imediata do problema identificado, principalmente se a diagnose for em plantas perenes e para micronutrientes (Prado, 2020).

Contudo, a diagnose visual apresenta alguns aspectos negativos. Entre eles destaca-se o fato de que, quando as alterações são visíveis, fatalmente já terá havido danos econômicos. Isso se justifica porque há uma sequência de eventos biológicos (Figura 5.1) que ocorrem nas plantas sob condições de deficiência ou toxidez, culminando no dano visível e, conseqüentemente, levando a decréscimo na produção.

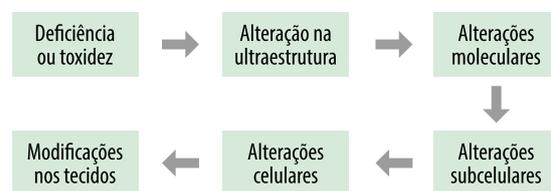


Figura 5.1. Sequência de eventos que conduzem aos sintomas em plantas sob condições de deficiência ou toxidez.

Fonte: Adaptado de Malavolta et al. (1997).

A cana-de-açúcar possui considerável importância econômica e é uma cultura potencialmente extratora de nutrientes. No entanto, existe uma carência de estudos envolvendo a omissão de nutrientes e seus reflexos nos sintomas visuais, no estado nutricional e no crescimento da cultura. As informações da literatura são restritas para alguns nutrientes, como nitrogênio (Vale et al., 2011), potássio (Vale et al., 2011; Cavalcante et al., 2015), ferro (Santos-Cavalcante et al., 2016) e outros gerais, em boletins técnicos (McCray; Rice, 2009; McCray et al., 2011).

Sintomatologia de deficiências e toxidez

A seguir será apresentado um resumo dos sintomas visuais em plantas de cana-de-açúcar com deficiências nutricionais para nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), molibdênio (Mo), ferro (Fe) e cloro (Cl), os quais foram definidos por Malavolta et al. (1997), Vitti et al. (2005), McCray et al. (2016), Cavalcante et al. (2015), Santos-Cavalcante (2016) e Prado (2020).

Nitrogênio

A deficiência de N em plantas de cana-de-açúcar é caracterizada inicialmente pelo amarelamento das folhas velhas; evoluindo para clorose generalizada, plantas tornam-se raquíticas (Figura 5.2A), em que as folhas definham e morrem (Prado; Pancelli, 2008). A bainha das folhas torna-se uniformemente verde-clara a amarela (Figura 5.2B) e os colmos ficam mais curtos e finos. Ocorre um atraso no desenvolvimento vegetativo e as pontas e margens das folhas mais velhas tornam-se necróticas (secam) prematuramente (Vale et al., 2011).

Excesso de N causa coloração verde-escura das folhas, folhagem abundante, acamamento, atraso na maturação, e o sistema radicular torna-se pouco desenvolvido. No entanto, não se tem relato de toxidez do nutriente na cultura.

Fósforo

Na deficiência de P, as plantas apresentam um desenvolvimento lento da parte aérea e do sistema radicular (Figura 5.3A); as folhas velhas apresentam pequenas áreas cloróticas com avermelhados nas pontas e margens das folhas expostas ao sol (Figura 5.3B). Os colmos ficam menores e finos e há diminuição do perfilhamento da planta, ou seja, ocorre raquitismo generalizado.

Potássio

Os sintomas da deficiência de K surgem inicialmente nas bordas das folhas mais velhas a partir de regiões amarelo-alaranjadas, tornando-se totalmente marrons com o progresso dos sintomas (Figura 5.4). Geralmente essa clorose evolui para necrose, deixando as folhas com aspecto de queimadas (Figura 5.4). Ocorre, também, afinamento dos colmos e a nervura central das folhas apresenta manchas de coloração marrom-

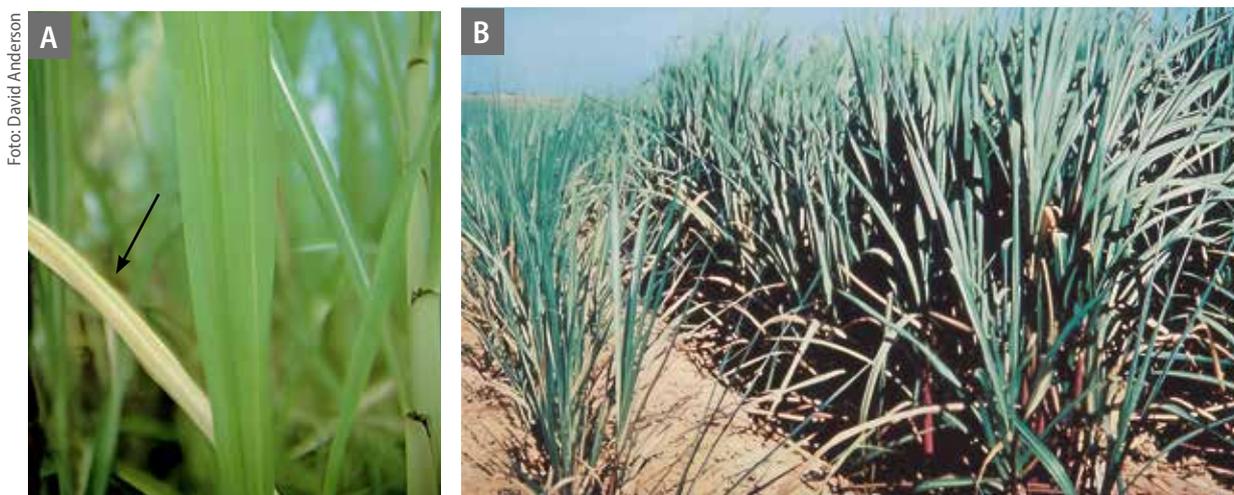


Figura 5.2. Plantas deficientes em nitrogênio com sintomas de amarelecimento em folhas mais velhas (A); menor desenvolvimento de plantas deficientes em nitrogênio (à esquerda) em relação a plantas sem deficiência (à direita) (B).

Imagens cedidas originalmente por Anderson e Bowen (1990) (A) e por Orlando Filho et al., (1994) (B)



Figura 5.3. Deficiência severa de fósforo evidenciada por plantas de desenvolvimento lento (A) e folhas estreitas e arroxeadas (B). Imagens cedidas originalmente por Rossetto e Santiago (2010) (A) e por Anderson e Bowen (1990) (B).



Figura 5.4. Folhas com bordas marrons.

-avermelhada. Um sintoma de deficiência de K ocorrido no final do ciclo é o ponteiro em forma de leque, conhecido como “topo de penca” (Figura 5.4) (Vale et al., 2011; Cavalcante et al., 2015).

Cálcio

Os sintomas de carência de Ca ocorrem em folhas novas, que assumem coloração esbranquiçada e se enrolam para baixo, formando um gancho (Figura 5.5). As folhas mais velhas podem ficar com aspecto enferrujado. Quando a deficiência fica mais aguda, notam-se um afinamento e amolecimento dos colmos.

Na deficiência de Ca, Vale et al. (2011) observaram que houve rápida emissão dos perfilhos,



Figura 5.5. Deficiência de cálcio nas folhas novas de cana-de-açúcar evidenciando a seca dos ponteiros. Imagem cedida originalmente por Anderson e Bowen (1990).

menor crescimento do sistema radicular e aparecimento de folhas secas no ponteiro, formando um “chicote”. Esses sintomas também foram descritos por McCray et al. (2016).

Magnésio

Os sintomas de deficiência de Mg aparecem nas folhas velhas na forma de pontuações cloróticas, que se iniciam nas pontas e ao longo das margens, surgindo lesões necróticas vermelhas com aparência de ferrugem. Além disso, a parte interna da casca do colmo apresenta coloração amarronzada (Figura 5.6) (McCray et al., 2016).

O fornecimento de Mg em níveis excessivos resulta em deposição do elemento na forma de

diferentes sais nos vacúolos celulares, e não são descritos na literatura, causando efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e produção das plantas.

Enxofre

O sintoma de deficiência de S é evidenciado nas folhas novas, que apresentam clorose generalizada, diminuição do seu tamanho e colmos muito finos (Figura 5.7). Esses sintomas estão relacionados às funções que o nutriente tem na planta, sendo responsável pela formação das proteínas vegetais, aminoácidos essenciais, vitaminas e enzimas (Vitti et al, 2008).

Boro

A deficiência de B causa uma deformação nas folhas novas, que se apresentam retorcidas chegando a formar “nó” entre as folhas. Surgem lesões translúcidas (sacos de água) entre as nervuras, e plantas novas emitem muitos perfilhos. As folhas, no geral, tendem a ficar quebradiças. As folhas do cartucho podem ficar cloróticas e, posteriormente, necróticas, semelhantes aos sintomas da doença conhecida como “Pokkah-boeng” (Figura 5.8).



Figura 5.6. Deficiência de magnésio nas folhas velhas de cana-de-açúcar.

Imagens cedida originalmente por Anderson e Bowen (1990).

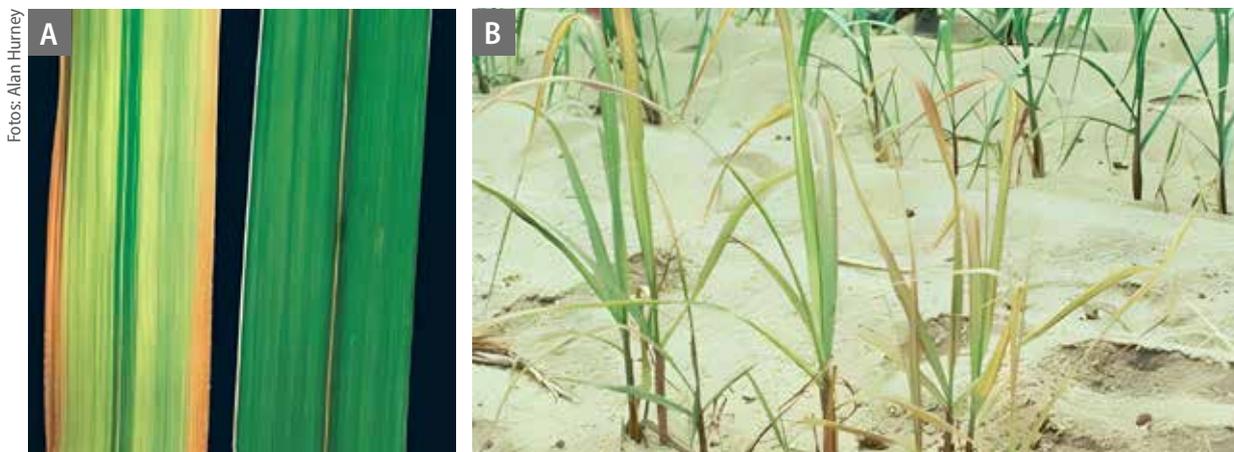


Figura 5.7. Sintoma de deficiência de enxofre em folhas novas de cana-de-açúcar.

Imagens cedida originalmente por Anderson e Bowen (1990).



Figura 5.8. Deficiência de boro em folhas novas de cana-de-açúcar. Imagem (A) cedida originalmente por Anderson e Bowen (1990).

Cobre

A deficiência de Cu leva à ocorrência de clorose em folhas novas na forma de “ilhas” ou manchas verde-escuras. As touceiras não conseguem se sustentar (touceira amassada) e os tecidos foliares perdem turgidez, fazendo com que as folhas fiquem caídas (sintoma de topo caído) (Figura 5.9). Deficiências severas podem causar amarelimento (ou coloração verde-azulada) das folhas; estas, por sua vez, podem ficar murchas ou com as margens enroladas para cima ou, ain-

da, ficam maiores que as normais, podendo até ocorrer a morte das regiões de crescimento dos ramos.

O excesso de Cu é expresso comumente no sistema radicular, menor ramificação e engrossamento das raízes.

Manganês

A deficiência de Mn torna as folhas novas com aspecto clorótico entre as nervuras, com

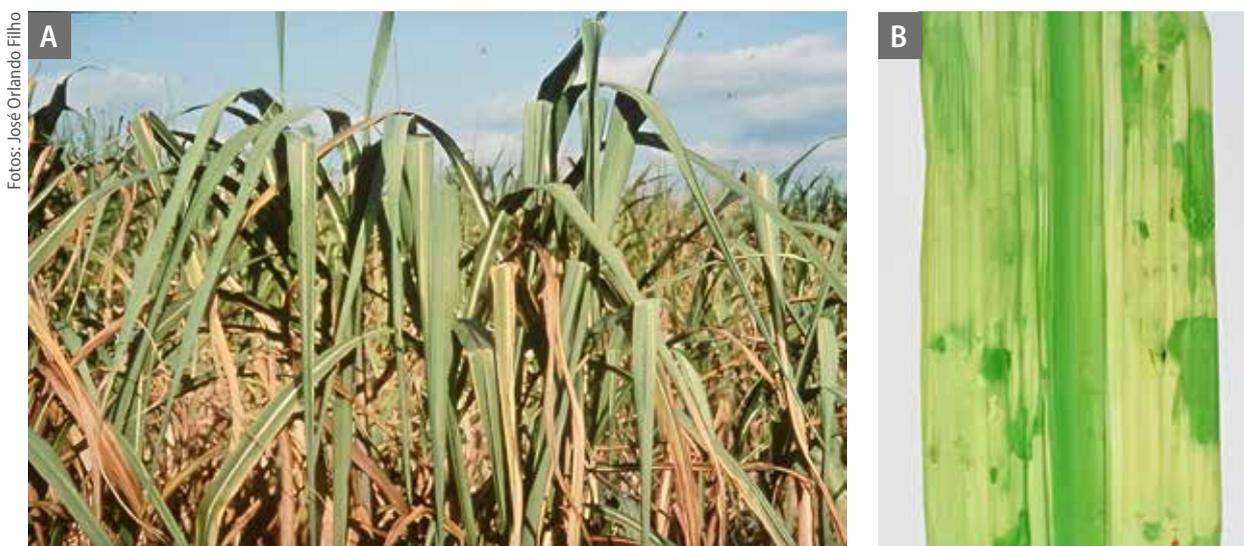


Figura 5.9. Deficiência de cobre em folhas de cana-de-açúcar apresentando o sintoma de topo caído (A) e clorose uniforme seguida de pontuações verde-escuras (B). Imagens cedida originalmente por Orlando Filho et al. (1994).

reticulado grosso (as nervuras formam rede verde espessa sobre um fundo amarelo), da ponta até o meio da folha, que evolui para necroses. Com o vento, ocorre o desfiamento das folhas (Figura 5.10).



Foto: José Orlando Filho

Figura 5.10. Deficiência de manganês nas folhas novas de cana-de-açúcar.

Imagem cedida originalmente por Anderson e Bowen (1990).

Zinco

Com a deficiência de Zn, surgem estrias cloróticas verde-claras nas folhas, formando uma faixa larga, sendo que a região bem próxima da nervura central e das bordas permanece verde, exceto quando a deficiência é severa. Além disso, surgem folhas curtas, assimétricas e largas na parte média. O perfilhamento é reduzido e os internódios mais curtos. Os colmos ficam mais

finos e podem perder a turgidez (sintoma de colmos moles) (Figura 5.11).

Molibdênio

A deficiência de Mo causa pequenas estrias cloróticas longitudinais, começando no terço apical da folha. As folhas mais velhas secam, prematuramente, do meio para as pontas (Figura 5.12). Em geral, ocorre uma clorose internerval, semelhante à deficiência de Mn, em que as margens das folhas tendem a curvar-se para cima ou para baixo.

A toxicidade de Mo em culturas não é comum, sendo encontrada apenas quando se verificam teores muito altos. Deve-se considerar que a toxicidade de Mo pode resultar em clorose internerval das folhas, semelhante à deficiência de Fe, e as folhas novas podem ficar torcidas.

Ferro

A deficiência de Fe pode causar clorose internerval nas folhas mais novas e, conforme a deficiência se acentua, toda a planta fica clorótica-esbranquiçada (Figura 5.13). O surgimento de clorose se deve à menor síntese de clorofila, e apenas as nervuras ficam verdes durante algum tempo, destacando-se como um reticu-



Foto: José Orlando Filho

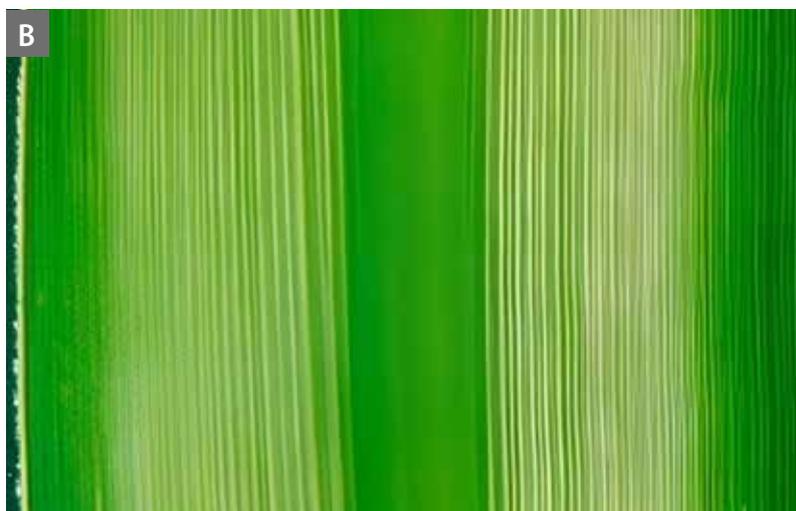


Foto: John Reghenzani

Figura 5.11. Deficiência de zinco nas folhas novas de cana-de-açúcar.

Imagens cedida originalmente por Orlando Filho et al. (1994) (A) e Anderson e Bowen (1990) (B).



Foto: John Bowen

Figura 5.12. Deficiência de molibdênio nas folhas de cana-de-açúcar.

Imagens cedida originalmente por Anderson e Bowen (1990).

lado fino (rede verde fina das nervuras sobre o fundo amarelo) e podendo evoluir para um “branqueamento”. Entretanto, com a evolução da sintomatologia, perde-se o gradiente e até as nervuras tornam-se cloróticas.

Em estudo sobre o efeito do Fe na nutrição de cana-de-açúcar, Santos-Cavalcante et al. (2016)

caracterizaram os sintomas de deficiência do Fe como clorose internerval das folhas jovens, que se transformou em manchas brancas (Figura 5.13B). As raízes apresentaram menor densidade e cor escura (Figuras 5.13C e 5.13D).

Os sintomas de deficiência de Cl podem variar em razão das espécies, mas, em geral, surgem inicialmente nas folhas mais novas, apresentando perda de turgidez, clorose, bronzeamento e deformação da folha, que toma aspecto de taça “Cupping”. Além disso, ocorre um menor desenvolvimento radicular, mas muitas raízes laterais (Figura 5.14).

Entretanto, dificilmente ocorrem problemas de deficiências de Cl nas culturas, pois, para exercer suas funções, as plantas exigem 100 g kg^{-1} , e, frequentemente, apresentam entre 20 a 200 vezes maior acúmulo do que a suas exigências, indicando que o Cl, ao contrário do que acontece com outros micros, não é tóxico quando em concentração relativamente alta.



Fotos: Valéria Cavalcante

Figura 5.13. Comparação entre plantas saudáveis e com sintomas de deficiência de ferro (A), caracterizado pela clorose internerval das folhas jovens, progredindo para manchas brancas (B) com cor escura e menor densidade das raízes de cana-de-açúcar (C e D).

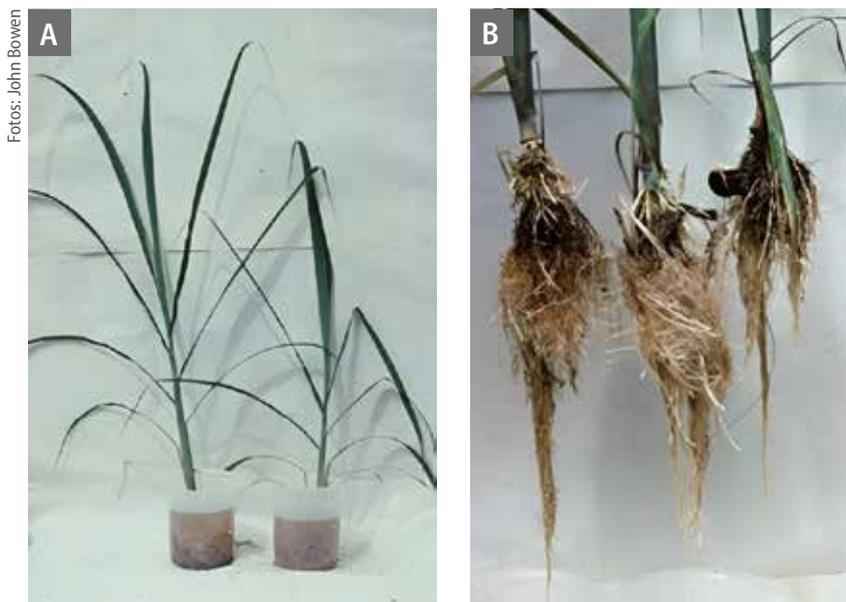


Figura 5.14. Deficiência e toxicidade de cloro em folhas jovens — da esquerda para a direita: 0 e 100 ppm Cl (A) e deficiência de cloro nas raízes, caracterizada pelo seu encurtamento anormal e aumento no número de raízes laterais (B).

Imagens cedida originalmente por Anderson e Bowen (1990).

Diagnose foliar

A diagnose foliar é apropriada para o monitoramento e avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar, pelo fato de a cultura ser de ciclo plurianual e pode ter, no monitoramento nutricional, um indicador apropriado para acompanhar as demandas nutricionais da planta ao longo dos anos de seu cultivo (Silva et al., 2020b).

A diagnose foliar é eficiente, uma vez que utiliza a própria planta como um extrator de nutrientes. Assim, complementa a análise química do solo e permite prever distúrbios nutricionais antes do aparecimento de sintomas visuais no tecido vegetal. No entanto, é necessário integrar as técnicas, ou seja, o uso combinado da análise química das plantas, análise química e física do solo, além do diagnóstico visual, para maximizar a eficiência da fertilização em termos de custo e prevenção de danos ambientais (Prado; Caione, 2012).

As etapas do processo da diagnose foliar, em linhas gerais, foram demonstradas por Traspadini et al. (2014), se dividindo em:

a) Amostragem das folhas, tecido ou órgão definido como objeto de avaliação por meio de um procedimento exequível e padronizado.

- b) Quantificação dos nutrientes na amostra por meio de uma rotina analítica verificável e reproduzível.
- c) Uso de padrões nutricionais para o diagnóstico nutricional, disponibilizados para cada espécie cultivada ou condição de manejo tecnológico.
- d) Processo confiável para a interpretação dos resultados analíticos a partir de padrões nutricionais.

Normalmente, as folhas são os principais órgãos utilizados para a diagnose do estado nutricional, dado que elas refletem de maneira mais representativa o conteúdo nutricional da planta, por ser neste órgão onde ocorrem às principais reações metabólicas, além de as alterações fisiológicas decorrentes de distúrbios nutricionais serem mais evidentes comparativamente a outros tecidos (Malavolta, 2006).

Amostragem foliar

A coleta de folhas para análise foliar é uma etapa crítica, considerando que a quantidade de nutrientes varia em razão da parte, idade e espécie de planta. Os resultados obtidos da análise foliar

somente são úteis e representativos se a amostragem for realizada corretamente (Prado; Caione, 2012). Portanto, a amostragem é uma prática que deve ser realizada de maneira cuidadosa, seguindo-se rigorosamente a padronização de coleta definida na literatura para a cultura.

É conveniente que as amostras sejam coletadas e analisadas quando as folhas se encontram na fase de maior desenvolvimento vegetativo. Portanto, o tipo de folha adequada e a época certa de amostragem são fatores muito importantes na definição dos critérios para a diagnose foliar, visto que a distribuição dos nutrientes na planta e em cada uma de suas partes não é homogênea. Mesmo ao longo da folha, podem-se observar teores diferenciados, em razão da mobilidade de cada elemento na planta, mostrando-se a necessidade de padronização das amostras.

Para a cana-de-açúcar, existem variações nos padrões de amostragem. Malavolta et al. (1997) consideram que as folhas devem ser coletadas no período entre 4 a 6 meses depois da germinação na cana-planta, ou aos 4 meses depois da brotação nas soqueiras, coletando-se a folha +3, no terço mediano dela, com descarte da nervura principal (Figura 5.15). Por sua vez, Raji et al. (1996) consideram amostrar 30 plantas durante a fase de maior desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, retirando-se os 20 cm centrais da folha +1 (folha mais alta com colarinho

visível – “TVD”), excluindo-se a nervura central (Figura 5.15).

A metodologia proposta por Raji et al. (1996) tem sido mais frequentemente utilizada em trabalhos científicos publicados mais recentemente utilizando a cultura da cana-de-açúcar, como nas publicações de Flores et al. (2014), Cavalcante et al. (2015), Moda et al. (2015), Pancelli et al. (2015) e Silva et al. (2015, 2017). Salientando que, independentemente da metodologia empregada na amostragem, deve-se atentar em utilizar, na diagnose nutricional, valores de referências que foram obtidos nas mesmas condições.

Lavagem e secagem

Após a amostragem correta das folhas, elas devem ser imediatamente encaminhadas para o laboratório, submetidas à lavagem com água deionizada, solução detergente (0,1% v/v), solução ácido clorídrico (0,3% v/v) e água deionizada, respectivamente. Deverão ser colocadas para secar em estufa de circulação forçada a 60 °C a 70 °C até atingir peso constante.

Determinação dos teores de nutrientes

As amostras devem ser moídas e pesadas para determinação dos teores nutricionais de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn e B, conforme Bataglia et al. (1983), simplificado na Figura 5.16.

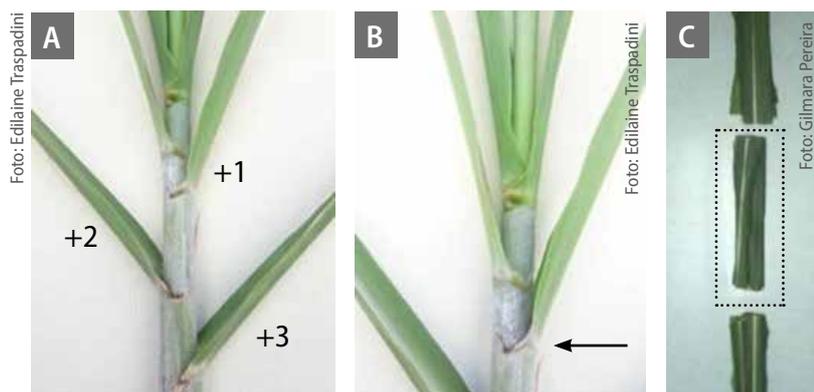


Figura 5.15. Processo de amostragem da folha diagnose padrão (folha +1 e +3) da cana-de-açúcar (A), das folhas que apresentam o colarinho visível (B), selecionando-se apenas o terço mediano da folha (C) e descartando-se a nervura central (D).



Figura 5.16. Simplificação dos métodos para a determinação química nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), molibdênio (Mo), boro (B), Cobre (Cu), ferro (Fe) manganês (Mn) e zinco (Zn) em amostras foliares.

Interpretação da análise foliar

A interpretação da análise foliar dá-se pela avaliação do estado nutricional, que pode ser estabelecida comparando-se a concentração de um nutriente na folha de uma planta e a concentração do mesmo elemento em plantas saudas e de elevada produtividade, no respectivo órgão, ao que se denomina valor de referência ou valor nutricional padrão (Kurihara et al., 2014).

O diagnóstico nutricional elaborado a partir de resultados de análise de tecido vegetal constitui-se um instrumento importante para detectar eventuais deficiências e auxiliar no processo de recomendação de fertilizantes (Prado; Caione, 2012). Os tecidos da planta mostram o estado nutricional da cultura, pois há relação entre a concentração foliar de um dado nutriente com o crescimento e a produtividade da cultura (Malavolta, 2006). Com base nessa relação, é possível determinar o teor adequado para o cultivo das culturas e, assim, fazer a interpretação do estado nutricional da planta.

Desse modo, surgiram os métodos de diagnose nutricional, que são utilizados para obter valores de referência que sejam confiáveis para a diagnose foliar. Dentre esses métodos, há os métodos convencionais: nível crítico (NCs) e faixa de suficiência (FS); e os métodos que dispensam a calibração local e obtêm o banco de dados a partir de lavouras comerciais: DRIS e CND.

Nível crítico e faixa de suficiência

Os valores de referências obtidos por estes métodos de interpretação exigem o estabelecimento de ensaio de calibração, que pode ser realizado em campo ou em casa de vegetação. Os ensaios de calibrações devem ser conduzidos em vários locais e em diversos anos, mantendo-se os demais fatores de produção, inclusive outros nutrientes, controlados e com suprimento adequado para o pleno desenvolvimento das plantas (Cantarella, 2007).

O método do nível crítico (NC) refere-se ao teor do elemento nas folhas, o qual está associado à máxima atividade de um determinado processo fisiológico relacionado à produção da cultura (Malavolta et al., 1997). Já a faixa de suficiência (FS) consiste em definir o intervalo que determinado nutriente pode ser absorvido sem causar perdas na produtividade.

Com base na Figura 5.17, é possível observar o limite inferior (LI) e o limite superior (LS) que delimitam a FS e indicam os teores críticos para os desequilíbrios, por deficiência ou excesso. Assim, a zona de deficiência, de suficiência e de excesso são definidas (Malavolta et al., 1997; Traspadini et al., 2014; Prado, 2020).

A zona de deficiência consiste na faixa de teores de nutrientes na folha abaixo do LI. Considera-se que, na zona de deficiência, a planta tende a aumentar sua produção com o fornecimento do nutriente, pois, com a sua absorção, os teores foliares teriam pequenos aumentos e a planta apresentaria uma resposta refletida no aumento do crescimento/produção. Nessa situação, o incremento por unidade de nutriente oferecido é alto (Prado, 2020).

Na zona de suficiência, o aumento da produção é pequeno ou nulo com o aumento da disponibilidade do nutriente, em situações em que pode haver aumento do teor sem qualquer aumento

da produtividade, motivo pelo qual essa zona denomina-se também de zona de consumo de luxo. Nessa zona ocorrem perdas econômicas, pois o produtor pode ter investido para que o aumento desses teores fosse efetivado por meio de aplicação de fertilizantes e corretivos, assim, a planta aumenta seus teores, porém, não eleva a produção (Figura 5.17).

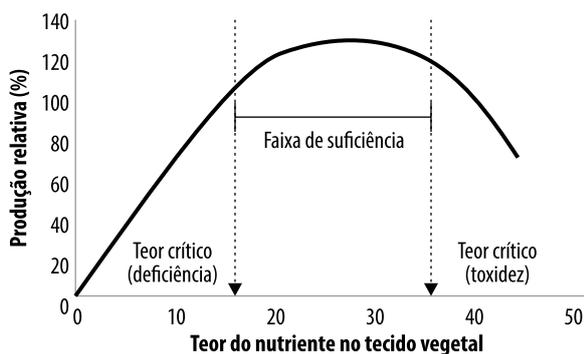


Figura 17. Produção relativa em razão do teor de nutriente no tecido.

Fonte: Adaptado de Ulrich e Hills (1967).

A zona de excesso nutricional, quando os teores dos nutrientes na folha estão acima do LS, ocorre quando o consumo de luxo finaliza e o aumento no teor do nutriente resulta em decréscimos produtivos por causa da toxidez ocasionada pelo desequilíbrio (Figura 5.17). Em caso de excesso do nutriente, o uso de fertilizantes não é indicado (Faquin, 2002).

A comparação entre a produção obtida e o nível de nutrientes extraídos da planta permite obter curvas de calibração. As curvas de calibração para os nutrientes representam a correlação entre as respostas das culturas aos nutrientes aplicados nas adubações e os teores nas folhas, servindo de base para a interpretação.

A interpretação das análises foliares é feita comparando-se os resultados das análises químicas efetuadas em amostras de tecido vegetal com os valores tabelados para a cultura. Esses valores são as FS e NC obtidos por diferentes autores

para diferentes culturas, como para a cana-de-açúcar (Tabela 5.1).

Os resultados encontrados serão comparados nutriente a nutriente com os padrões estabelecidos pelas pesquisas. Assim, o diagnóstico do estado nutricional é deficiente quando o nutriente apresenta teores abaixo da faixa de referência, em excesso quando apresentar acima e ideal quando estiver na faixa. Quanto mais nutrientes estiverem na FS da lavoura em estudo, mais bem nutrida estará (Wadt, 2012).

Vale ressaltar que, para alguns macronutrientes como o P, Ca e Mg e para os micronutrientes B, Zn e Fe, a faixa de teores considerados adequados é maior no *Boletim de Minas Gerais* do que no estado de São Paulo (Tabela 5.1). Uma hipótese para essa diferença pode estar na recomendação de coleta de folhas, que, no primeiro, utiliza a proposta por Malavolta et al. (1997), na qual considera que as folhas devem ser coletadas no período entre 4 a 6 meses depois da germinação na cana-planta, ou aos 4 meses depois da brotação nas soqueiras, coletando-se a folha +3, no terço mediano dela, descartando-se a nervura principal.

Rozane et al. (2008) avaliaram a influência dos tipos de folhas e das épocas de amostragens sobre o teor foliar de nutrientes da cana-de-açúcar, durante dois ciclos, submetida à aplicação de nitrogênio. Os resultados obtidos demonstraram que a amostragem da folha +3, coletada aos 4 meses após o corte da planta, mostrou-se mais adequada para a diagnose foliar na cultura.

No entanto, além de se considerar o método de coleta, as FS usadas para as comparações dos teores encontram-se desatualizadas, havendo divergências entre padrões adequados e alta produção. Flores et al. (2014) demonstraram os efeitos da adubação de K nos teores de macro e micronutrientes na "folha +1" aos 8 meses

Tabela 5.1. Faixas de suficiência de macro e microelementos considerados adequados para a cana-de-açúcar.

Nutriente/ Elemento	São Paulo			Minas Gerais ⁽³⁾
	Cana-planta ⁽¹⁾	Cana-soca ⁽¹⁾	Cana-planta e soca ⁽²⁾	
(g kg ⁻¹)				
N	19–21	20–22	18–25	20,3–22,8
P	2,0–2,4	1,8–2,0	0,15–0,30	2,1–2,5
K	11–13	13–15	10–16	8,8–15,2
Ca	8,0–10	5,0–7,0	2,0–8,0	9,4–11,5
Mg	2,0–3,0	2,0–2,5	1,0–3,0	2,2–4,5
S	2,5–3,0	2,5–3,0	1,5–3,0	1,3–2,8
(mg kg ⁻¹)				
B	15–50	–	10–30	15–50
Zn	25–50	25–30	10–50	25–50
Mn	100–250	50–125	25–250	50–250
Fe	200–500	80–150	40–250	100–500
Cu	8–10	8–10	6–15	8–10
Mo	0,15–0,30	–	0,05–0,20	0,15–0,30
Si	0,58 ⁽⁴⁾	0,58 ⁽⁴⁾	–	–

⁽¹⁾ Malavolta et al. (1997).

⁽²⁾ Rajj et al. (1996).

⁽³⁾ Martinez et al. (1999).

⁽⁴⁾ Anderson e Bowen (1992).

após a primeira e a segunda soqueira de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Nesse trabalho, na primeira soca, apenas o K e S estiveram dentro da FS. Já na segunda soqueira, essa adequação foi observada para o N, P, Cu e Zn. Considerando-se a produção, a fertilização de K produziu aumentos no rendimento do colmo na primeira e segunda soqueira, atingindo 87,0 e 132,9 t ha⁻¹ com o uso de 162 kg ha⁻¹ de K, respectivamente (Tabela 5.2).

Vale et al. (2017) avaliaram o efeito da fertilização nitrogenada no teor de nutrientes e na produção de cana-de-açúcar, considerando-se as folhas +1 e +3 coletadas aos 9 meses de brotação da segunda soca, colhida mecanicamente após 6 anos sem queima de palha. Nesse trabalho, apenas o N, P, Mn e Zn tiveram teores

considerados adequados na folha +3, e na folha +1 apenas o N, P e Zn, considerando-se a dose (120 kg ha⁻¹) de máxima produção (aproximadamente 140 t ha⁻¹) (Tabela 5.2).

Contudo, os limites inferior e superior da FS, para um dado nutriente, possibilitarão interpretar de forma segura o estado nutricional da lavoura somente se as condições de crescimento das plantas forem semelhantes àquelas utilizadas para obter a curva de calibração, seja no que diz respeito ao local de condução dos ensaios, à idade das plantas e do tecido, ao tipo de material genético, à posição do tecido na planta, à época do ano, à disponibilidade dos demais nutrientes, entre outras (Wadt, 2012).

Experimentalmente, esse controle é conseguido padronizando-se as causas primárias de

Tabela 5.2. Teores de nutrientes nas folhas +1 e +3 na cultura da cana-de-açúcar.

Nutriente	Flores et al. (2014) ⁽¹⁾		Vale et al. (2017) ⁽²⁾	
	1ª soca	2ª soca	folha +1	folha +3
(g kg ⁻¹)				
N	17,9	20,1	20,1	21,2
P	1,9	2,1	0,4	0,6
K	12,0	9,9	4,5	4,0
Ca	3,7	2,1	0,7	1,2
Mg	1,6	1,2	0,3	0,3
S	2,7	1,2	0,4	0,3
(mg kg ⁻¹)				
B	7	13	4	8
Zn	20	37	5	10
Mn	31	24	9	26
Fe	111	50	21	39
Cu	5	9	1	1
Mo	–	–	–	–

⁽¹⁾ Folha +1 coletada aos 8 meses após a brotação da soqueira.

⁽²⁾ Folha +1 e +3 aos 9 meses após a brotação.

variação (luz, temperatura, água, etc.) por meio de definição de época e região de plantio, procedendo-se ao fornecimento de todos os demais nutrientes via adubação e calagem e aplicando-se apenas doses crescentes do nutriente a ser calibrado (Wadt, 2012).

Apesar da facilidade nas interpretações desses métodos univariados, alguns cuidados devem ser tomados:

- Os padrões relacionados à idade da planta, à fase fenológica, à época do ano, etc. devem ser reais para a cultura em estudo (Wadt; Dias, 2012).
- A amostragem do material deve estar em conformidade com o padrão preestabelecido, principalmente em relação ao estágio fenológico da cultura.

- O acondicionamento e o envio até o laboratório precisam ser corretos.

A principal vantagem de utilização desses métodos é a simplicidade na diagnose do estado nutricional, pela forma independente com que os nutrientes são tratados (Baldock; Schulte, 1996). Essa praticidade nas interpretações dos resultados torna esses métodos um dos mais utilizados.

Somado a isso, deve-se considerar que, quando comparado com valores padrões bem estabelecidos, o método é muito confiável. Contudo, esses métodos não apresentam valores de referência atualizados e precisos para a cana-de-açúcar, uma vez que os padrões nutricionais de referências foram construídos na década de 1980, em um sistema de cultivo distinto e também com variedades diferentes das utilizadas atualmente.

Além disso, os métodos do NC e da FS são sensíveis aos efeitos de diluição e de concentração dos nutrientes, pois é considerada a concentração do nutriente em relação à biomassa total do tecido avaliado (Jarrel; Beverly, 1981). Dessa forma, a utilização dessas faixas pode levar à interpretação e recomendação de fertilizantes de forma errônea, bem como acabar favorecendo o desequilíbrio nutricional e, conseqüentemente, acarretando baixa produção e rendimento econômico.

Acrescenta-se que os valores críticos estabelecidos pelo método do NC e da FS não possuem aplicação universal, por causa de os fatores de crescimento das plantas mudarem sob várias condições ambientais, principalmente em virtude da interação com outros fatores, gerando diferenças na estimativa dos valores críticos (Leandro, 1998).

Com a finalidade de superar a limitação dos métodos do NC e da FS, têm sido desenvolvidos métodos alternativos para avaliação do estado nutricional das plantas. Uma alternativa é o uso do Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS).

Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação

O Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (do inglês *Diagnosis and Recommendation Integrated System* – DRIS) é um método alternativo de diagnóstico do estado nutricional de plantas, pelo qual os nutrientes não são considerados pelos seus teores individuais (análises univariadas), mas, sim, pelas relações binárias (análises bivariadas). O método permite identificar a ordem de limitação nutricional, agrupando-se os nutrientes desde o mais limitante por deficiência até aquele que está em níveis excessivos (Beaufils, 1973). Por esse método, identifica-se facilmente o balanço dos nutrientes numa planta, permitindo determinar se o crescimento da planta está sujeito à limitação de natureza nutricional ou não (Bataglia; Santos, 1990).

A avaliação nutricional das plantas com base no DRIS fundamenta-se na interpretação de índices calculados por meio das relações entre os nutrientes (Villaseñor et al., 2020). O primeiro passo para criação do sistema DRIS é a formação de um banco de dados com quantidade adequada de amostras contendo informações de análise foliar e produtividade de culturas sob boas condições nutricionais, a fim de que sejam estabelecidas normas ou padrões. As normas são valores médios de teores de nutrientes e das relações entre eles, com as respectivas variâncias, para um grande número de casos (Silva et al., 2020c).

A base de dados pode ser obtida tanto em experimentos de adubação como em áreas comerciais. Quando se emprega esse tipo de dado, a distribuição dos valores geralmente não segue a distribuição normal. Para normalizar a distribuição, Beaufils (1973) propôs a divisão da base de dados em dois subgrupos, um de alta produtividade e outro de baixa produtividade.

Os valores das concentrações e as relações entre concentrações dos nutrientes para o subgrupo mais produtivo permanecem normalmente distribuídos, bem como são utilizados como referência no estabelecimento dos padrões do DRIS. A média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação de cada subgrupo são calculados para todas as relações de nutrientes possíveis (Villaseñor et al., 2020).

O índice DRIS de um nutriente é a média aritmética das funções reduzidas dos quocientes do teor desse nutriente em relação aos teores dos demais nutrientes determinados na análise foliar. No cálculo do índice, as relações normais reduzidas têm valores positivos, se o nutriente estiver no numerador; negativos, se estiver no denominador; e zero, na ausência deste. Assim, é possível estabelecer, em ordem decrescente, aqueles nutrientes que são mais limitantes pelo índice DRIS. Valores negativos indicam deficiência do elemento em relação aos demais; valores positivos, excesso; e quanto mais próximo de zero estiverem esses índices, maior será o equilíbrio nutricional da planta (Silva et al., 2020b).

As relações diretas ou inversas entre dois nutrientes a serem empregadas no cálculo do índice são as que apresentam maior relação de variância entre os dois subgrupos (variância do subgrupo de baixa produtividade, sob variância do subgrupo de alta produtividade) (Silva et al., 2020b).

As diversas funções são ponderadas pela recíproca dos coeficientes de variação das respectivas populações de referência (alta produtividade). Walworth e Sumner (1987) asseguram que o coeficiente de variação pondera a variabilidade do subgrupo de alta produtividade. Quanto menor a base de dados, maior é o coeficiente de variação e, por conseguinte, menor a capacidade de discriminação do estado nutricional da cultura. A soma, em módulo, dos índices indica o índice de balanço nutricional (IBN). Quanto

menor for o IBN, mais próxima a amostra estará do equilíbrio nutricional (Silva et al., 2020a).

O diagnóstico de deficiências em plantas de alta produtividade é um dos principais problemas do método DRIS. Para solucionar esse problema e melhorar a precisão de diagnóstico, várias modificações nos procedimentos de cálculo dos índices têm sido propostas, podendo ser reunidas nos seguintes grupos: modificações no cálculo dos índices DRIS; modificações no cálculo das funções reduzidas; modificações na base de dados; e modificações na interpretação dos índices.

Portanto, ao aplicar-se o DRIS, tornam-se necessários: a) o estabelecimento do valor ótimo de cada relação binária; b) o conhecimento da variabilidade da relação binária no conjunto de plantas da população de referência; e c) a seleção das relações binárias que serão úteis ao diagnóstico nutricional.

Em relação à aplicação do DRIS, o método vem sendo empregado para diagnóstico nutricional de diferentes culturas, em especial para a cultura da cana-de-açúcar, sendo encontrados na literatura diversos trabalhos em nível internacional e nacional.

Na literatura internacional, são citadas normas DRIS para a cana-de-açúcar, na região da África do Sul, para solos minerais (Beaufils; Sumner, 1976) e para solos orgânicos da Flórida (Elwali; Gascho, 1983), apresentando uma similaridade entre seus valores, apesar das características distintas dos solos. Para a região dos Estados Unidos, Gascho (2009) apresenta valores tanto de normas DRIS quanto de NC e FS para recomendação de adubação para a cultura da cana-de-açúcar.

Na região da África do Sul, o uso do DRIS, como previsão de resposta da planta à produção, apresentou-se mais confiável do que o NC dos nutrientes, quando utilizado na fase inicial de

desenvolvimento da cultura. Observou-se também que o DRIS é importante para detectar desequilíbrios nutricionais na cultura da cana-de-açúcar (Meyer, 1981).

Ao avaliar o uso do DRIS na região da Flórida, nas safras de 2004/2005, 2005/2006 e 2006/2007, McCray et al. (2010) não encontraram respostas da cana-de-açúcar em produtividade de colmos e produção de açúcar para a complementação dos fertilizantes, conforme indicação dos índices DRIS. Os autores atribuíram essas não respostas à coleta das folhas e pela complementação dos fertilizantes ser feita no mesmo ciclo; no entanto, em época tardia, em que boa parte do ciclo da cultura já teria ocorrido, sugeriram que essas complementações de adubações fossem feitas no próximo ciclo da cultura, logo após a colheita da cana-de-açúcar.

No Brasil, são citados vários trabalhos sobre uso do DRIS para a cultura da cana-de-açúcar. Recentemente, iniciaram-se trabalhos sobre uso de medidas de acurácia para avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar. A exemplo, tem-se o trabalho de Silva et al. (2020b), em que o estudo foi realizado em cinco áreas experimentais sob avaliação do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas (Genplant) da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp). O trabalho foi desenvolvido em três municípios do estado de São Paulo: Catanduva, Santa Adélia e Santa Albertina (Moda et al., 2015; Caione et al., 2015).

Os solos das áreas experimentais foram classificados como Argissolo Vermelho eutrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (Catanduva), Latossolo Vermelho distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (Santa Adélia), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Santa Albertina) (Santos et al., 2013a). Foram utilizadas as variedades de cana-de-açúcar CTC 15, de ciclo médio/tardio (Catanduva e Santa Adélia),

e RB855453, variedade precoce (Santa Adélia e Santa Albertina).

Para gerar o banco de dados, foram considerados dois anos agrícolas (2013 e 2014) mediante o fatorial 3x4x2x2, sendo três fontes de fósforo (P): superfosfato triplo (44% de P_2O_5 total e 41% solúvel em ácido cítrico a 2%), fosfato natural de Araxá (22% de P_2O_5 total e 4% solúvel em ácido cítrico a 2%) e fosfato natural reativo Bayóvar (28% de P_2O_5 total e 14% solúvel em ácido cítrico a 2%); quatro doses de P_2O_5 considerando na aplicação a porcentagem de ácido cítrico (0, 90, 180 e 360 kg ha^{-1} de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2%); na ausência e na presença de torta de filtro decomposta, na dose de 7,5 t ha^{-1} , em base seca (equivalente a 15 t ha^{-1} , em base úmida), duas épocas de amostragem foliar (4 e 8 meses após a brotação), com três repetições por tratamento.

A partir das informações de análise química dos teores foliares e de produtividade das lavouras canavieiras, em cada ano agrícola (2013 e 2014), foi formado o banco de dados desse trabalho, composto por cinco populações de referência que apresentaram produtividades acima de 172, 193, 214, 235 e 256 t ha^{-1} . Esses valores de produtividade foram escolhidos porque representam a produtividade média; produtividade média + 0,5 desvio-padrão; produtividade média + 1,0 desvio-padrão; produtividade média + 1,5 desvio-padrão e produtividade média + 2,0 desvios-padrão, respectivamente, para as cinco populações de referências.

Foram realizados estudos de determinação da acurácia do diagnóstico dos estados nutricionais para o P, definido por três classes de interpretação: suficiência, deficiência e toxicidade, usando-se cada um dos cinco conjuntos de normas DRIS geradas nesse trabalho, no respectivo ano agrícola. A acurácia consistiu em determinar se o diagnóstico nutricional obtido por determinado procedimento de interpretação do estado

nutricional correspondia à resposta da planta, em termos de variação da produtividade, quando o nutriente avaliado tivesse sido adicionado.

Para tanto, os diagnósticos nutricionais de cada norma foram confrontados com a resposta da planta à aplicação de doses de P, comparando-se sempre uma situação com ausência de P (situação-controle) com outro tratamento, onde apenas houve a adição de P (situação-resposta), ou tratamento com dose menor de P (situação-controle) com tratamento com dose superior de P (situação-resposta).

As comparações foram realizadas sempre entre tratamentos que não receberam torta de filtro e que usaram o superfosfato triplo como fonte de P. Nesse subconjunto de dados, foram comparados os pares de parcelas, do mesmo bloco experimental, e que receberam os mesmos tratamentos, exceto pelas variações nas adubações fosfatadas.

Os diagnósticos da situação-controle foram classificados em suficiência, deficiência e toxicidade, conforme descrito anteriormente, no critério de interpretação dos índices DRIS pelo método do potencial de resposta à adubação. Os diagnósticos da situação-resposta foram classificados como adequado, insuficiente e em excesso. Insuficiente quando a adição de P resultou em aumento de mais de 10% da produtividade, entre a situação-resposta e a situação-controle. Os demais casos foram classificados como adequado ou em excesso.

Para a avaliação dos diagnósticos nutricionais, foram propostas sete medidas de acurácia, definidas em uma escala de 0 a 1, facilitando sua interpretação: acurácia global equivalente à acurácia proposta por Beverly e Hallmark (1992), porém, considerando três estados nutricionais possíveis: deficiência, suficiência e toxicidade; acurácia para insuficiência; acurácia para equilíbrio; acurácia para excesso; acurácia para

deficiência; acurácia para suficiência; e acurácia para toxicidade (Wadt; Lemos, 2010).

Acurácia global

Esta medida é uma mensuração genérica para a utilidade dos processos de diagnósticos e representa a média aritmética de diagnósticos corretos em relação a cada situação de estado nutricional possível para as plantas avaliadas.

A acurácia global (AG) foi avaliada pela expressão: $AG = (IV / \Sigma D + EqV / \Sigma S + ExV / \Sigma T) / 3$. Em que AG = grau de diagnósticos verdadeiros, na escala de 0 a 1; IV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para insuficiência nutricional; EqV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para equilíbrio nutricional; ExV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para excesso nutricional; ΣD = total de casos de deficiência nutricional; ΣS = total de casos de suficiência nutricional, e ΣT = total de casos de toxicidade nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Acurácia para insuficiência

Esta medida de acurácia indica o grau de acerto para os diagnósticos de insuficiência nutricional.

A acurácia para insuficiência (ACI) foi calculada pela expressão: $ACI = \{2 + (IV / \Sigma D - [IF(S) / \Sigma S + IF(T) / \Sigma T])\} / 3$. Em que ACI = grau de diagnósticos verdadeiros para insuficiência, na escala de 0 a 1; IV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para insuficiência nutricional; $IF(S)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para insuficiência em situações de reconhecida suficiência nutricional; $IF(T)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para insuficiência em situações de reconhecida toxicidade nutricional; ΣD = total de casos de deficiência nutricional; ΣS = total de casos de suficiência nutricional, e ΣT = total de

casos de toxicidade nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Acurácia para equilíbrio nutricional

Esta medida de acurácia indica o grau de acerto para os diagnósticos de equilíbrio nutricional.

A acurácia para equilíbrio nutricional (ACEq) foi calculada pela expressão: $ACEq = \{2 + (EqV / \Sigma S - [EqF(D) / \Sigma D + EqF(T) / \Sigma T])\} / 3$. Em que $ACEq$ = grau de diagnósticos verdadeiros para suficiência, na escala de 0 a 1; EqV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para equilíbrio nutricional; $EqF(D)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para equilíbrio em situações de reconhecida deficiência nutricional; $EqF(T)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para equilíbrio em situações de reconhecida toxicidade nutricional; ΣD = total de casos de deficiência nutricional; ΣS = total de casos de suficiência nutricional, e ΣT = total de casos de toxicidade nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Acurácia para excesso nutricional

Esta é uma medida semelhante a ACI, avaliando-se, todavia, o grau de acerto para os diagnósticos de excesso nutricional.

A acurácia para excesso nutricional (ACEx) foi calculada pela expressão: $ACEx = [2 + (ExV / \Sigma T - [ExF(S) / \Sigma S + ExF(D) / \Sigma D])] / 3$. Em que $ACEx$ = grau de diagnósticos verdadeiros para excesso, na escala de 0 a 1; ExV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para excesso nutricional; $ExF(D)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para excesso em situações de reconhecida deficiência nutricional; $ExF(S)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para excesso em situações de reconhecida suficiência nutricional; ΣD = total de casos de deficiência nutricional; ΣS = total de casos

de suficiência nutricional, e ΣT = total de casos de toxicidade nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Acurácia para deficiência nutricional

Esta medida de acurácia representa uma estimativa da eficiência do diagnóstico de deficiências nutricionais.

A acurácia para deficiência nutricional (ACD) foi calculada pela expressão: $ACD = \{2 + (IV/\Sigma I - [EqF(D) / \Sigma Eq + ExF(D) / \Sigma Ex]\} / 3$. Em que ACD = grau de diagnósticos verdadeiros para deficiência, na escala de 0 a 1; IV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para insuficiência nutricional; $EqF(D)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para equilíbrio em plantas com deficiência nutricional; $ExF(D)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para excesso em plantas com deficiência nutricional; ΣI = total de diagnósticos para insuficiência nutricional; ΣEq = total de diagnósticos para equilíbrio nutricional, e ΣEx = total de diagnósticos para excesso nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Acurácia para suficiência

Esta medida de acurácia representa uma estimativa da eficiência do diagnóstico de deficiências nutricionais.

A acurácia para suficiência nutricional (ECS) foi calculada pela expressão: $ECS = \{2 + (EqV / \Sigma Eq - [IF(S) / \Sigma I + ExF(S) / \Sigma Ex]\} / 3$. Em que ECS = grau de diagnósticos verdadeiros para suficiência, na escala de 0 a 1; EqV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para equilíbrio nutricional; $IF(S)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para insuficiência em plantas com suficiência nutricional; $ExF(S)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para excesso em plantas com suficiência nutricional; ΣI = total de diagnósticos para in-

suficiência nutricional; ΣEq = total de diagnósticos para equilíbrio nutricional, e ΣEx = total de diagnósticos para excesso nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Acurácia para toxicidade nutricional

Esta medida de acurácia representa uma estimativa da eficiência do diagnóstico de toxicidades nutricionais.

A acurácia para toxicidade nutricional (ACT) foi calculada pela expressão: $ACT = \{2 + (ExV / \Sigma Ex - [IF(T) / \Sigma I + EqF(T) / \Sigma Eq]\} / 3$. Em que ACT = grau de diagnósticos verdadeiros para toxicidade, na escala de 0 a 1; ExV = contagem do número de diagnósticos verdadeiros para excesso nutricional; $IF(T)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para insuficiência em plantas com toxicidade nutricional; $EqF(T)$ = contagem do número de diagnósticos falsos para equilíbrio em plantas com toxicidade nutricional; ΣI = total de diagnósticos para insuficiência nutricional; ΣEq = total de diagnósticos para equilíbrio nutricional, e ΣEx = total de diagnósticos para excesso nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Ao avaliar as medidas de acurácia dos diagnósticos para o P, observaram-se baixos valores de AG independente da norma e safra estudada, com AG média de 0,37 (37%) em relação às normas e à safra, que representa baixo desempenho global do método DRIS para avaliação do estado nutricional das plantas (Tabela 5.3).

A AG representa o desempenho geral dos diagnósticos realizados, ou seja, indica o número médio de diagnósticos corretos em relação aos verdadeiros casos de deficiência, suficiência e toxicidade, atribuindo pesos iguais a cada um desses estados nutricionais (Wadt et al., 2016).

Essa medida de acurácia indica que, quando ACI for elevada (próximo de 1), significa que a

Tabela 5.3. Medidas de acurácia para o fósforo, em 2 anos agrícola na avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar pelo método DRIS.

Norma	Medida de acurácia							Produtividade (t ha ⁻¹)
	2013							
	AG ⁽¹⁾	ACI ⁽²⁾	ACEq ⁽³⁾	ACEx ⁽⁴⁾	ACD ⁽⁵⁾	ECS ⁽⁶⁾	ACT ⁽⁷⁾	
N1 ⁽⁸⁾	0,34	0,66	0,37	0,65	0,21	0,97	0,43	-36,20
N2 ⁽⁹⁾	0,39	0,69	0,42	0,68	0,11	0,98	0,47	-27,30
N3 ⁽¹⁰⁾	0,38	0,62	0,67	0,46	0,04	0,32	0,93	-7,10
N4 ⁽¹¹⁾	0,36	0,65	0,67	0,40	0,21	0,29	0,96	-13,70
N5 ⁽¹²⁾	0,34	0,67	0,67	0,35	0,33	0,25	0,97	-20,30
	2014							
N1 ⁽⁸⁾	0,40	0,64	0,51	0,64	0,27	0,81	0,60	-29,70
N2 ⁽⁹⁾	0,47	0,71	0,55	0,68	0,44	0,94	0,58	-34,90
N3 ⁽¹⁰⁾	0,35	0,47	0,67	0,56	0,41	0,52	0,83	-3,50
N4 ⁽¹¹⁾	0,37	0,62	0,67	0,44	0,33	0,32	0,89	-11,11
N5 ⁽¹²⁾	0,34	0,56	0,67	0,45	0,26	0,45	0,89	-16,86

⁽¹⁾ AG: Acurácia global; ⁽²⁾ ACI: Acurácia para insuficiência; ⁽³⁾ ACEq: Acurácia para equilíbrio nutricional; ⁽⁴⁾ ACEx: Acurácia para excesso nutricional; ⁽⁵⁾ ACD: Acurácia para deficiência nutricional; ⁽⁶⁾ ECS: Acurácia para suficiência; ⁽⁷⁾ ACT: Acurácia para toxicidade nutricional; ⁽⁸⁾ N1: produtividade média; ⁽⁹⁾ N2: produtividade média + 0,5 desvio-padrão; ⁽¹⁰⁾ N3: produtividade média + 1,0 desvio-padrão; ⁽¹¹⁾ N4: produtividade média + 1,5 desvio-padrão; ⁽¹²⁾ N5: produtividade média + 2,0 desvio-padrão.

maioria dos diagnósticos para insuficiência foram corretos e há um baixo número de diagnósticos de insuficiência para plantas com nutrição pelo menos suficiente. Por sua vez, se a ACI for baixa (próximo de 0), significa que houve muitos diagnósticos falsos, com plantas com nutrição pelo menos suficiente, sendo diagnosticadas com insuficiência.

No manejo da adubação, uma baixa ACI significa que a recomendação de adubação resultante estaria acima da necessidade das culturas, pois plantas saudias estariam sendo diagnosticadas como em estado de insuficiência nutricional (Wadt; Lemos, 2010).

Em relação à ACEq, observou-se que o aumento da produtividade e do rigor da norma proporcionou aumento nos valores da ACEq, chegando a valores superiores a 0,6 (60%) com utilização das normas N3, N4 e N5 na safra 2013 e 2014.

Esta medida de acurácia indica o grau de acerto para os diagnósticos de equilíbrio nutricional, ou seja, quando a ACEq for elevada (próximo de 1), significa que a maioria dos diagnósticos para equilíbrio foram corretos e há um baixo número de diagnósticos falsos para insuficiência ou excesso (Wadt; Lemos, 2010).

Por sua vez, se a ACEq for baixa (próximo de 0), significa que houve muitos diagnósticos falsos para insuficiência ou excesso. Em termos do manejo da adubação, representa perda do potencial produtivo da lavoura (quando o falso diagnóstico não identificar corretamente a deficiência nutricional) ou impacto ambiental indesejável pelo uso excessivo de nutrientes (quando o falso diagnóstico não identificar corretamente a toxicidade nutricional) (Wadt; Lemos 2010).

Outra medida é para a ACEx, em que houve valores inferiores a 0,5 (50%) com a escolha de

normas de maior produtividade (N3, N4 e N5) na safra 2013, e N4 e N5 na safra 2014 (Tabela 5.3). Esse resultado sugere que o uso de normas com maior rigor e redução do número amostral pode favorecer diagnósticos falsos para excesso nutricional. Portanto, esse indicador sugere que normas de maior produtividade média são as mais indicadas.

Em relação à ACD, observaram-se valores inferiores a 0,5 (50%), independente da safra (Tabela 5.3). O resultado aponta que há baixa acurácia de deficiência (próximo de 0), significando que há muitas plantas deficientes sendo interpretadas como estando não deficientes. No manejo da adubação, uma baixa eficiência para o diagnóstico de deficiências nutricionais pode significar recomendação de adubação abaixo da real necessidade das culturas.

Quanto à ECS, verificou-se elevada acurácia de suficiência (próximo a 1), com a escolha das normas N1 e N2 independente da safra (Tabela 5.3), indicando que a maioria das plantas com suficiência nutricional está sendo corretamente identificada. A ACT também foi elevada (próximo a 1) com a escolha de normas acima da N3, independente da safra (Tabela 5.3); assim como no manejo da adubação, os diagnósticos de toxicidade nutricional foram corretos, evitando a recomendação de adubação acima da necessidade das culturas.

Ao avaliar o incremento de produtividade para o P, observou-se que todas as normas DRIS proporcionaram perda de produtividade para a avaliação do estado nutricional dos tratamentos. Entretanto, a menor perda de produtividade foi registrada com a utilização da norma N3, independente da safra, e as maiores perdas, com a utilização das normas N1 e N2, na safra 2013 e 2014, respectivamente, quando comparada com as demais normas (Tabela 5.3).

Assim, acreditamos que os resultados obtidos pelo método DRIS podem motivar pesquisado-

res a desenvolver métodos que permitam avaliar a utilidade do diagnóstico nutricional. Uma alternativa para melhorar o desempenho do método DRIS, com incrementos de produtividade, pode ser realizada com a modelagem das funções DRIS. Nesses procedimentos, mensura-se o desempenho do diagnóstico nutricional e ajusta-se o valor do fator k , até que se consiga melhorar o desempenho do diagnóstico nutricional a um determinado grau de acerto preestabelecido (Wadt; Lemos, 2010).

O método DRIS tem sido largamente estudado no Brasil, mas há menor intensidade de pesquisa em outras regiões produtoras de cana-de-açúcar do mundo. Contudo, sua efetiva adoção como ferramenta rotineira para o monitoramento nutricional ainda é insipiente, mesmo no País. As razões para essa baixa adoção são as mais diversas limitações, variando desde questões operacionais, como a época de amostragem foliar, até questões metodológicas, como definição das fórmulas, procedimentos matemáticos mais indicados ou mesmo a definição dos critérios para obtenção dos valores de referência e sobre a abrangência territorial desses padrões (Wadt et al., 2016).

Como alternativa às limitações do método DRIS, vem sendo adotado para avaliação do estado nutricional da planta o método da Diagnose da Composição Nutricional, do inglês *Compositional Nutrients Diagnosis* (CND).

Diagnose da Composição Nutricional

O método Diagnose da Composição Nutricional (CND) fundamenta-se em relações log-transformadas entre cada nutriente e a média geométrica da composição nutricional do tecido amostrado (Parent; Dafir, 1992). Constitui-se um método multivariado por analisar as relações de todos os nutrientes conjuntamente, tendo compatibilidade com posterior análise de estatística

multivariada. A ideia inicial desse método partiu da análise de dados composicionais, acrônimo: *Compositional Data Analysis* (CoDA) (Aitchison, 1986), que descreve um dado de forma quantitativa e relativa a um todo.

Tais dados são muito comuns em áreas de pesquisa como a geologia e a ciência do solo. Exemplo de dados composicionais é a distribuição do tamanho de partículas minerais (areia, silte e argila) de um solo, que o todo sempre é 100%. O CND também entende que o todo de uma amostra foliar é 100%. No entanto, para trabalhar em função da massa da amostra, o método utiliza um valor de referência para o todo (Aitchison, 1986).

O método CND apresenta como vantagem a maior facilidade de cálculo dos índices de balanço nutricional, os quais podem ser interpretados de forma semelhante aos índices DRIS, seja em função da ordem de limitação nutricional, pelo método do potencial de resposta à adubação, seja de forma semelhante ao método M-DRIS, comparando-se o valor do índice CND de um nutriente com o da matéria seca (representado, nesse caso, pelo valor R, complemento para 100% do somatório dos teores dos nutrientes, em dag kg^{-1}).

A interpretação do estado nutricional pelo índice CND considera três classes de interpretação: equilibrado, deficiente e em excesso. O nutriente é considerado nutricionalmente equilibrado quando o índice CND, em módulo, é menor ou igual ao índice de balanço nutricional médio (IBNm); deficiente, quando o índice CND, sendo negativo, é, também, em módulo, maior que o IBNm; em excesso nutricional, quando o índice CND, sendo positivo, é, também, em módulo, maior que o IBNm (Wadt, 2005).

Nesse cenário, o método CND vem sendo utilizado para avaliação do estado nutricional de várias culturas comerciais, em diferentes re-

giões do País (Dias et al., 2013; Politi et al., 2013; Partelli et al., 2014; Silva et al., 2020a). Entretanto, a eficiência do método CND no diagnóstico nutricional depende dos critérios utilizados para a definição dos valores de referência e, portanto, do conjunto de lavouras utilizadas para a obtenção desses valores, uma vez que esses padrões determinam, diretamente, a diagnose nutricional (Serra et al., 2013).

Diversos critérios são utilizados para definir a população de referência, de acordo com Beaufils (1973); no grupo de média produtividade, há melhor representatividade da variabilidade das relações entre nutrientes. Outros autores utilizaram, em sua base de dados, a média +0,5 desvio-padrão como critério para separar as subpopulações (Santos et al., 2013b; Wadt et al., 2013).

Além de definir os critérios de obtenção da população de referência, é preciso avaliar a qualidade dos diagnósticos nutricionais formados. Nesse contexto, Píperas et al. (2009) avaliaram os diagnósticos das populações escolhendo a melhor relação entre o IBN e a produtividade. Outros trabalhos avaliaram o desempenho dos diagnósticos utilizando outros parâmetros, como o índice CND e a produtividade (Queiroz et al., 2014; Barłóg, 2016).

O trabalho desenvolvido por Silva et al. (2020a) utilizando dados coletados em cinco áreas experimentais cultivadas com cana-de-açúcar do primeiro ciclo, em três municípios do estado de São Paulo, mostrou que a análise de dispersão entre os valores de IBNm e a produtividade dos talhões, para as diferentes normas CND, indicou não haver correlação linear entre o IBNm e a produtividade (Figura 5.18), uma vez que, para a faixa de baixos valores de IBNm, foram obtidos valores de produtividade variando de baixa a alta.

Esse resultado foi compatível com o modelo teórico sugerido por Beaufils (1973), o qual não prevê relação significativa entre produtividade

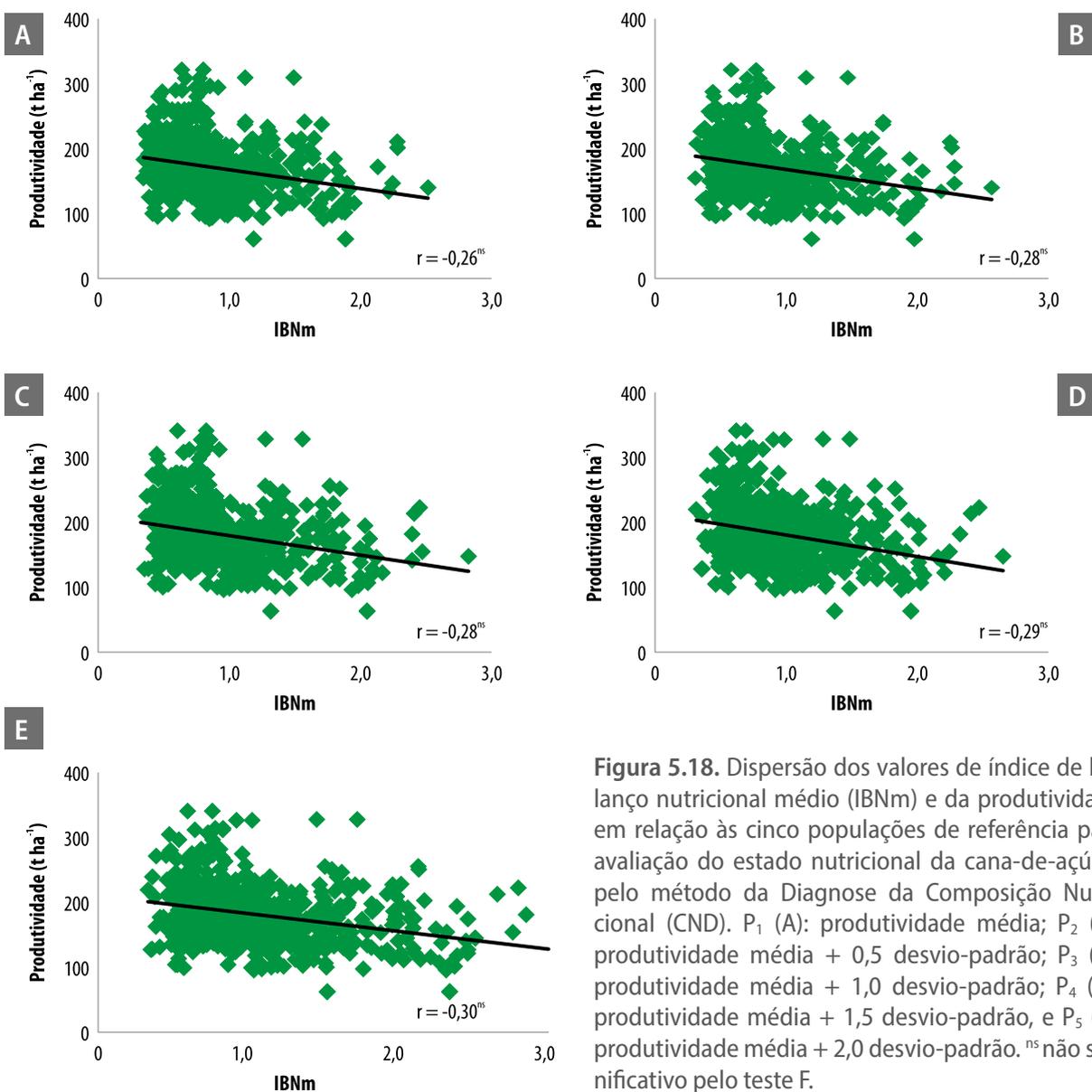


Figura 5.18. Dispersão dos valores de índice de balanço nutricional médio (IBNm) e da produtividade em relação às cinco populações de referência para avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar pelo método da Diagnose da Composição Nutricional (CND). P₁ (A): produtividade média; P₂ (B): produtividade média + 0,5 desvio-padrão; P₃ (C): produtividade média + 1,0 desvio-padrão; P₄ (D): produtividade média + 1,5 desvio-padrão, e P₅ (E): produtividade média + 2,0 desvio-padrão. ^{ns} não significativo pelo teste F.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2020a).

e IBN, uma vez que fatores não nutricionais podem resultar em baixa produtividade, apesar de alto equilíbrio nutricional (IBN baixo).

Ademais, a relação entre IBN e produtividade tem sido utilizada como critério para definição de normas ou para escolha de procedimentos de cálculos, julgando-se o modelo mais adequado aquele que apresenta a maior correlação. Autores que fizeram uso da relação entre IBN e produtividade, para definição de normas, foram: Serra et al. (2013, 2014), que trabalharam com lavouras comerciais de algodão da região sul de Mato Grosso; Píperas et al. (2009), que

trabalharam com cultivo de cana-de-açúcar em São Paulo, e Guindani et al. (2009), que trabalharam com arroz irrigado do Rio Grande do Sul.

Ao adotar procedimento semelhante, utilizando dados selecionados de talhões comerciais de cana-de-açúcar de alta produtividade para a verificação do modelo de dispersão entre IBNm e produtividade, observa-se que a utilização de um número menor de dados resulta em melhor definição da relação, em razão dos maiores valores de correlações (Figura 5.19), quando comparados aos valores de dispersão obtidos com todos os dados amostrais (Figura 5.18) (Silva et al., 2020a).

Ao avaliar apenas os dados da relação entre IBNm e a produtividade para condições específicas (menor número de dados), o desempenho das normas foi melhor à medida que somente plantas de maior produtividade foram utilizadas para a população de referência (Figura 5.19) (Silva et al., 2020a).

Todavia, avaliando-se o desempenho entre os dados específicos e o total de amostras, pode-se verificar que a melhor correlação entre a produtividade e IBNm poderia ser resultante do menor número de dados amostrais, refletindo em menor variabilidade dos fatores não nutri-

cionais, ou não necessariamente com o melhor desempenho do modelo (Silva et al., 2020a).

De modo semelhante, a avaliação gráfica da dispersão entre a produtividade e os índices CND de um nutriente pode ser utilizada para a avaliação do modelo ou das normas. Quando um grande número de dados é avaliado, deve-se esperar a maior amplitude de valores do índice do nutriente à baixa produtividade, e, à medida que a produtividade aumenta, a amplitude dos valores dos índices CND do nutriente reduz-se, tendendo a valores próximos de zero. Esse modelo foi reproduzido com os dados do presente trabalho

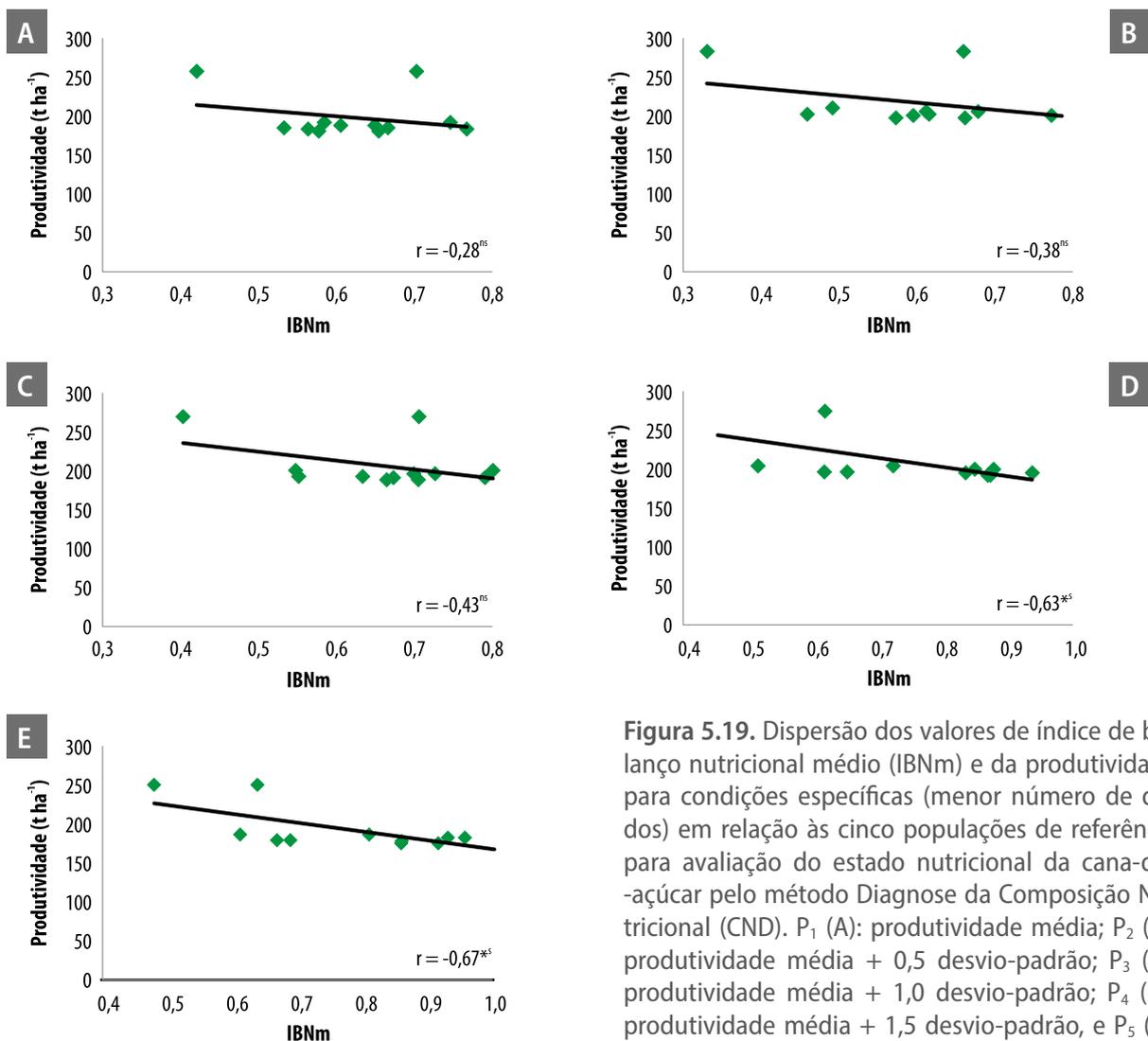


Figura 5.19. Dispersão dos valores de índice de balanço nutricional médio (IBNm) e da produtividade para condições específicas (menor número de dados) em relação às cinco populações de referência para avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar pelo método Diagnose da Composição Nutricional (CND). P₁ (A): produtividade média; P₂ (B): produtividade média + 0,5 desvio-padrão; P₃ (C): produtividade média + 1,0 desvio-padrão; P₄ (D): produtividade média + 1,5 desvio-padrão, e P₅ (E): produtividade média + 2,0 desvio-padrão. ns não significativo, * significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2020a).

(Figura 5.18), independentemente do tamanho da população de referência utilizada para a produção das normas CND (Silva et al., 2020a).

Embora alguns autores tenham utilizado esse critério para selecionar procedimentos de cálculo ou critérios para seleção de normas (Queiroz et al., 2014; Barlóg, 2016), normalmente com número reduzido de dados, quando se utiliza maior volume de informações, o modelo torna-se impreciso para esse propósito, dada a semelhança entre os casos avaliados, a exemplo dos resultados alcançados com as cinco populações de referência adotadas por Silva et al. (2020a).

A utilização desses critérios, para escolha de normas, não implica, necessariamente, que os diagnósticos sejam verdadeiros, já que os diagnósticos nutricionais para cada norma não foram avaliados quanto à acurácia, ou seja, não foram confrontados com a resposta da planta à aplicação de doses de nutriente. Portanto, a adoção desses critérios pode tornar-se arbitrária.

Considerações finais

Durante o desenvolvimento deste capítulo, notou-se que há uma carência de imagens na literatura que demonstrem os sintomas visuais de deficiência ou toxidez de maneira clara e nítida na cultura da cana-de-açúcar, bem como demonstrou-se que experimentos de omissão de nutrientes ainda são necessários. Principalmente porque, dentro de uma mesma cultura, pode haver variações de sintomas quando usadas variedades diferentes. Dessa forma, visto que a diagnose visual da cana-de-açúcar é uma maneira rápida de identificar uma planta com deficiência ou excesso de algum nutriente, e por apresentar baixo custo, pode ser complementar a diagnose foliar.

Nesse cenário, o processo de diagnose foliar torna-se uma ferramenta importante para a avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar,

auxiliando nas tomadas de decisões quanto ao manejo das adubações. Sendo evidente a partir do exposto, a necessidade de métodos alternativos para avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar, como o DRIS ou CND.

Entretanto, os métodos citados de avaliação dos diagnósticos nutricionais podem não resultar na definição do melhor conjunto de normas, por não avaliar objetivamente a resposta da planta à aplicação do nutriente. Dessa forma, são necessários trabalhos nessa linha de pesquisa, para maior confiabilidade nos diagnósticos nutricionais e utilização dessa técnica em larga escala pelos produtores de cana-de-açúcar.

Referências

- AITCHISON, J. **The statistical analysis of compositional data**. New York: Chapman and Hall, 1986. 416 p. (Monographs on statistics and Applied probability).
- ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Nutrição da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Potafos, 1992. 40 p.
- ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Sugarcane nutrition**. Atlanta: Potash & Phosphate Institute, 1990. 39 p.
- BALDOCK, J. O.; SCHULTE, E. E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 3, p. 448-456, 1996.
- BARŁÓG, P. Diagnosis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) nutrient imbalance by DRIS and CND-clr methods at two stages during early growth. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 1, p. 1-16, 2016. DOI: [10.1080/01904167.2014.964366](https://doi.org/10.1080/01904167.2014.964366).
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48 p. (Instituto Agrônomo. Boletim Técnico, n. 78).
- BATAGLIA, O. C.; SANTOS, W. R. dos. Efeito de procedimentos de cálculo e da população de referência nos índices do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 3, p. 339-344, 1990.
- BEAUFILS, E. R. **Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)**. Pietermaritzburg: University of Natal, 1973. 132 p. (Soil Science. Bulletin, 1).

- BEAUFILS, E. R.; SUMNER, M. E. Application of the DRIS approach for calibrating soil and plant factors in their effects on yield of sugarcane. **Proceedings of the South Africa Sugar Technologists Association**, v. 50, p. 118-124, 1976.
- BEVERLY, R. B.; HALLMARK, W. B. Prescient diagnostic analysis: A proposed new approach to evaluating plant nutrient diagnostic methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 23, n. 2, p. 633-640, 1992.
- CAIONE, G.; PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S.; MODA, L. R.; VASCONCELOS, R. L.; PIZAURO JÚNIOR, J. M. Response of sugarcane in a red ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. **The Scientific World Journal**, v. 2015, p. 1-10, 2015. DOI: [10.1155/2015/405970](https://doi.org/10.1155/2015/405970).
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.
- CAVALCANTE, V. S.; PRADO, R. M.; ALMEIDA, H. J.; CRUZ, F. J. R.; SANTOS, D. M. M. Gaseous exchanges, growth and foliar anatomy of sugarcane plants grown in potassium (K) deprived nutrient solution. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 7, p. 577-584, July 2015.
- DIAS, J. R. M.; TUCI, C. A. F.; WADT, P. G. S.; PARTELLI, F. L.; PEREZ, D.V.; ESPINDULA, M. C.; TOMIO, D. B. Antecipação do período de diagnose foliar em laranjeira 'pera' no Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 757-764, jul. 2013. DOI: [10.1590/S0100-204X2013000700008](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000700008).
- ELWALI, A. M. O.; GASCHO, G. J. Response to P, K, and DRIS corrective treatments on Florida histosols. **Agronomy Journal**, v. 75, n. 1, p. 79-83, Jan./Feb. 1983. DOI: [10.2134/agronj1983.00021962007500010020x](https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500010020x).
- FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. 2002. 77 f. Monografia (Especialização em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Agronegócio) – Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- FLORES, R. A.; DE MELLO PRADO, R.; PANCELLI, M. A.; ALMEIDA, H. J.; MODA, L. R.; BORGES, M. N.; SOUZA JUNIOR, J. P. de. Potassium nutrition in the first and second ratoon sugarcane grown in an Oxisol by a conservationist system. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 74, n. 1, p. 83-88, Mar. 2014. DOI: [10.4067/S0718-58392014000100013](https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000100013).
- FRANCO-HERMIDA, J. J.; QUINTERO-CASTELLANOS, M. F.; GUZMÁN, A. I.; GUZMÁN, M.; CABRERA, R. I. Validating integrative nutrient diagnostic norms for greenhouse cut-roses. **Scientia Horticulturae**, v. 264, n. 5, p. 1-10, Apr. 2020. DOI: [10.1016/j.scienta.2019.109094](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109094).
- GASCHO, G. J. Reference sufficiency ranges sugarcane. In: CAMPBELL, C. R. (ed). **Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States**. Raleigh: North Carolina Department of Agriculture and Consumer Services Agronomic Division, 2009. p. 35-38. (Southern cooperative series bulletin, 394).
- GUINDANI, R. H. P.; ANGHINONI, I.; NACHTIGALL, G. R. DRIS na avaliação do estado nutricional do arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 109-118, Jan./Feb. 2009. DOI: [10.1590/S0100-06832009000100012](https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100012).
- JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advanced in Agronomy**, v. 34, p. 197-224, 1981. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60887-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60887-1).
- KURIHARA, C. H.; STAUT, L. A.; MAEDA, S.; SANTOS, F. C. **Diagnose do estado nutricional de soja e algodoeiro, pelos métodos das Faixas de Suficiência e DRIS, em Mato Grosso do Sul e Mato Grosso**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 6 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Circular técnica, 29).
- LEANDRO, W. M. **Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) para a cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) na região de Rio Verde- GO**. 1998. 164 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. (ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 143-168.
- MCCRAY, J. M.; POWELL, G.; MONTES, G.; PERDOMO, R. Sugarcane response to DRIS-based fertilizer supplements in Florida. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 196, n. 1, p. 66-75, Feb. 2010. DOI: [10.1111/j.1439-037X.2009.00395.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00395.x).
- MCCRAY, J. M.; RICE, R. W.; EZENWA, I. V.; LANG, T. A.; BAUCUM, L. **Sugarcane plant nutrient diagnosis**. Gainesville: IFAS Extension/University of Florida, [2011]. (Sugarcane handbook). Disponível em: [SS-AGR-128/SC075: Sugarcane Plant Nutrient Diagnosis \(ufl.edu\)](https://ss-agr-128/sc075). Acesso em: 25 jan. 2023.
- MCCRAY, J. M.; RICE, R. **Nutritional requirements for Florida sugarcane**. Gainesville: IFAS Extension/University

- of Florida, [2009]. (Sugarcane handbook). Disponível em: SS-AGR-228/SC028: Nutritional Requirements and Fertilizer Recommendations for Florida Sugarcane (ufl.edu). Acesso em: 25 jan. 2023.
- MEYER, J. H. An evaluation of DRIS based on leaf analysis for sugarcane in South Africa. **Proceedings of the South Africa Sugar Technologists Association**, v. 55, p. 169-175, June 1981.
- MODA, L. R.; PRADO, R. M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S.; SILVA, E. C.; FLORES, R. A. Effect of sources and rates of phosphorus associated with filter cake on sugarcane nutrition and yield. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 6, p. 477-485, June 2015.
- MORAIS, T. C. B. D.; PRADO, R. DE M.; TRASPADINI, E. I. F.; WADT, P. G. S.; PAULA, R. C. D. de; ROCHA, A. M. S. Efficiency of the CL, DRIS and CND Methods in Assessing the Nutritional Status of *Eucalyptus* spp. rooted cuttings. **Forests**, v. 10, n. 9, p. 1-17, Sept. 2019. DOI: [10.3390/f10090786](https://doi.org/10.3390/f10090786).
- ORLANDO FILHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. **Seja o doutor do seu canavial**. [Piracicaba]: Potafos, 1994. 17 p. (Potafos. Arquivo do Agrônomo, n. 6). Encarte do Informações Agronômicas, n. 67, set. 1994. Disponível em: [https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3142/\\$File/Seja%20Canavial.pdf](https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3142/$File/Seja%20Canavial.pdf). Acesso em: 29 jan. 2023.
- PANCELLI, M. A.; PRADO, R. M.; FLORES, R. A.; ALMEIDA, H. J.; MODA, L. R.; SOUZA JUNIOR, J. P. Growth, yield and nutrition of sugarcane ratoon as affected by potassium in a mechanized harvesting system. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 10, p. 915-924, Oct. 2015.
- PARENT, L. E. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 1, p. 321-334, Mar. 2011. DOI: [10.1590/S0100-29452011000100041](https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000100041).
- PARENT, L. E.; DAFIR, M. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal American Society Horticultural Science**, v. 117, n. 2, p. 239-242, 1992.
- PARENT, S. E.; PARENT, L. E.; EGOZCUE, J. J.; ROZANE, D. E.; HERNANDES, A.; LAPOINTE, L.; GENTILE, V. H.; NAESS, K.; MARCHAND, S.; LAFOND, J.; MATTOS JUNIOR, D.; BARLOW, P.; NATALE, W. The plant ionome revisited by the nutrient balance concept. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 1-10, Mar. 2013. DOI: [10.3389/fpls.2013.00039](https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00039).
- PARTELLI, F. L.; DIAS, J. F. M.; VIEIRA, H. D.; WADT, P. G. S.; JUNIOR, E. P. Avaliação nutricional de feijoeiro irrigado pelos métodos CND, DRIS e faixas de suficiência. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 858-866, May/June 2014. DOI: [10.1590/S0100-06832014000300017](https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300017).
- PÍPERAS, G. V.; CRESTE, J. E.; ECHER, F. E. Uso do DRIS na avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 56, n. 6, p. 818-825, nov./dez. 2009.
- POLITI, L. S.; FLORES, R. A.; SILVA, J. A. S. da; WADT, P. G. S.; PINTO, P. A. da C.; PRADO, R. de M. Estado nutricional de mangueiras determinado pelos métodos DRIS e CND. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 11-18, jan. 2013. DOI: [10.1590/S1415-43662013000100002](https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100002).
- PRADO, R. de M. **Nutrição de Plantas**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Unesp, 2020.
- PRADO, R. de M.; CAIONE, G. Plant analysis. In: ISSAKA, R. N. (ed.). **Soil fertility**. Rijeka: IntechOpen, 2012. p. 115-134. DOI: [10.5772/53388](https://doi.org/10.5772/53388).
- PRADO, R. DE M.; PANCELLI, M. A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, v. 67, n. 4, p. 951-959, Oct./Dec. 2008. DOI: [10.1590/S0006-87052008000400018](https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000400018).
- QUEIROZ, A. A.; LUZ, J. M. Q.; OLIVEIRA, R. C.; FIGUEIREDO, F. C. de. Productivity and establishment of DRIS indices for tubers of the potato cultivar 'Agata'. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 2, p. 351-360, Apr./June 2014. DOI: [10.1590/S1806-66902014000200017](https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000200017).
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RIBEIRO, F. O.; FERNANDES, A. R.; GALVÃO, J. R.; de MATOS, G. S. B.; LINDOLFO, M. M.; SANTOS, C. R. C. dos; PACHECO, M. J. B. DRIS and geostatistics indices for nutritional diagnosis and enhanced yield of fertirrigated acai palm. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 12, p. 1875-1886, 2020. DOI: [10.1080/01904167.2020.1750643](https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1750643).
- RODRÍGUEZ, O.; RODRÍGUEZ, V. Desarrollo, determinación e interpretación de normas DRIS para el diagnóstico nutricional en plantas. Uma revisión. **Revista Faculdade de Agronomia**, v. 17, n. 6, p. 449-470, 2000.
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Cana: diagnose visual**. 2010. In: EMBRAPA. **Ageitec**: Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/diagnose-das-necessidades-nutricionais/diagnose-visual>. Acesso em 26 jan. 2023.
- ROZANE, D. E.; NATALE, W. Calagem, adubação e nutrição mineral de anonáceas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, p. 166-175, 2014. Special Issue 1. DOI: [10.1590/S0100-29452014000500020](https://doi.org/10.1590/S0100-29452014000500020).

- ROZANE, D. E.; PRADO, R. de M.; ROMUALDO, L. M.; PANCELLI, M. A.; FRANCO, C. F. Amostragem de folhas em cana-de-açúcar submetida à adubação nitrogenada. **Revista de Agricultura**, v. 83, n. 1, p. 8-18, 2008. DOI: 10.37856/bja.v83i1.253.
- SANTOS, E. F. dos; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M. de; LAVRES JUNIOR, J.; CAMACHO, M. A. Normal nutrient ranges for sugarcane by the methods CHM, DRIS and CND and critical level by reduced normal distribution. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1651-1658, Nov./Dec. 2013a. DOI: 10.1590/S0100-06832013000600021.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de (ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013b. 353 p.
- SANTOS-CAVALCANTE, V. S.; PRADO, R. de M.; VASCONCELOS, R. de L.; SILVA-CAMPOS, C. N. Iron concentrations in sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. **Agrociencia**, v. 50, n. 7, p. 867-875, Oct./Nov. 2016.
- SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; ENSINAS, S. C.; MORAIS, H. S. de; CONRAD, V. do A.; GUIMARÃES, F. C. N.; BARBOSA, G. P. de O. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) to assess the nutritional state of cotton crop in Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 4, p. 508-516, Feb. 2014. DOI: 10.4236/ajps.2014.54065.
- SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; ROJAS, E. P.; MORAIS, H. S. de; CONRAD, V. do A.; GUIMARÃES, F. C. N. Estabelecimento de normas DRIS para o algodoeiro com diferentes critérios de seleção da população de referência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 11, p. 1472-1480, nov. 2013. DOI: 10.1590/S0100-204X2013001100008.
- SILVA, G. P. da; PRADO, R. de M.; FIRMATO-ALMEIDA, T. B.; CAMPOS-NÓIA, N. R. de. Respuesta del cuarto cultivo de soca de caña de azúcar a la fertilización de nitrógeno, silicio y cal. **Agrociencia**, v. 49, n. 5, p. 533-544, jul./ago. 2015.
- SILVA, G. P. da; PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S.; MODA, L. R.; CAIONE, G. Accuracy of nutritional diagnostics for phosphorus considering five standards by the method of diagnosing nutritional composition in sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 10, p. 1485-1497, 2020a. DOI: 10.1080/01904167.2020.1730902.
- SILVA, G. P. da; PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S.; SILVA, F. C. da; VAZ, G. J.; MODA, L. R.; CAIONE, G. Accuracy measures for phosphorus in assessing the nutritional status of sugarcane using the comprehensive integrated diagnosis and recommendation system (DRIS). **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 9, p. 1287-1299, 2020b. DOI: 10.1080/01904167.2020.1849299.
- SILVA, G. P. da; PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S.; SILVA, F. C. da; VAZ, G. J.; MODA, L. R.; CAIONE, G. Modeling formulas of the Comprehensive Diagnosis and Recommendation System (DRIS) for phosphorus in sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 9, p. 1316-1329, 2020c. DOI: 10.1080/01904167.2020.1862192.
- SILVA, T. R. da; CAZETTA, J. O.; CARLIN, S. D.; TELLES, B. R. Drought-induced alterations in the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium, and the relation with drought tolerance in sugar cane. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 117-127, Mar./Apr. 2017. DOI: 10.1590/1413-70542017412029416.
- TRASPADINI, E. I. F.; WADT, P. G. S.; DIAS, J. R. M.; SCHMIDT, R.; PEREZ, D. V. **Aplicação da distribuição normal reduzida na definição de nível crítico**. Porto Velho: SBSCS, 2014. (Nutrição de plantas aplicada, v. 1).
- ULRICH, A.; HILLS, F. J. Principles and practices of plant analysis. In: SOIL ACIENCE SOCIETY OF AMERICA (Madison, USA). **Soil testing and plant analysis: part II: plant analysis**. Madison, 1967. p. 11-24. (SSSA special publication series, 2).
- VALE, D. W. do; PRADO, R. de M.; AVALHÃES, C. C.; HOJO, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 2, p. 189-196, Apr./June 2011. DOI: 10.5039/agraria.v6i2a550.
- VALE, D. W. do; PRADO, R. de M.; MORAES, J. R. da S. C. de; CRUZ, F. J. R. Nitrogen fertilizer effect in production, nutrient accumulation and nitrogen efficiency use of second ratoon sugarcane harvested without straw burning. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 5, p. 616-623, May 2017. DOI: 10.21475/ajcs.17.11.05.p483.
- VILLASEÑOR, D.; PRADO, R. de M.; PEREIRA, G. P. da; CARRILLO, M.; DURANGO, W. DRIS norms and limiting nutrients in banana cultivation in the South of Ecuador. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 18, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1080/01904167.2020.1793183.
- VITTI, G. C.; QUEIROZ, F. E. C.; OTTO, R.; QUINTINO, T. A. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. 2005. 78 p. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Nutricao+cana+GVitti_000fh3r3vzp02wyiv80rn0etnmc6zamd.pdf. Acesso em: 26 jan. 2021.
- VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. E. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: Gape, 2008. 104 p.

WADT, P. G. S. **Diagnose foliar e recomendação de adubação para lavouras comerciais**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2012. 69 p. (Embrapa Acre. Documentos, 120).

WADT, P. G. S. Relationships between soil class and nutritional status of coffee plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 227-234, May/Apr. 2005. DOI: [10.1590/S0100-06832005000200008](https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200008).

WADT, P. G. S.; ANGHINONI, I.; GUINDANI, R. H. P.; LIMA, A. S. T. de; PUGA, A. P.; SILVA, G. S. da; PRADO, R. de M. Padrões nutricionais para lavouras arrozeiras irrigadas por inundação pelos métodos da CND e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 145-156, Jan./Feb. 2013. DOI: [10.1590/S0100-06832013000100015](https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100015).

WADT, P. G. S.; DIAS, J. R. M. Normas DRIS regionais e inter-regionais na avaliação nutricional de café Conilon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 822-830, jun. 2012. DOI: [10.1590/S0100-204X2012000600013](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000600013).

WADT, P. G. S.; LEMOS, C. de O. Medidas de acurácia para diagnósticos nutricionais e seu impacto no manejo da adubação. In: PRADO, R. de M.; CECÍLIO FILHO, A. B.; CORREIA, M. A. R.; PUGA, A. P. (ed.). **Nutrição de plantas: diagnose foliar em hortaliças**. Jaboticabal: Unesp, Genplant, 2010. p. 213-236.

WADT, P. G. S.; TRASPADINI, E. I. F.; MARTINS, R. A.; MELLO, F. de B.; OLIVEIRA, I. J. de; RODRIGUES, J. E. L. F.; BASTOS, E. A.; ARAÚJO, S. M. B. Medidas de acurácia na qualificação dos diagnósticos nutricionais: teoria e prática. In: PRADO, R. de M.; CECÍLIO FILHO, A. B. (org.). **Nutrição e adubação de hortaliças**. Jaboticabal: Fcav/Capes, 2016. v. 1, p. 373-392.

WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). In: STEWART, B. A. (ed.). **Advances in soil sciences**. New York: Springer-Verlag, 1987. v. 6, p. 149-188.

Diagnose nutricional da cana-de-açúcar por diferentes métodos de interpretação

Edilaine Istéfani Franklin Traspadini | Paulo Guilherme Salvador Wadt |

Luiz Antonio Falaguasta Barbosa | Renato de Mello Prado | Fábio Cesar da Silva | Naara Rosa Martins

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção estimada de 568 mil toneladas na safra 2021/2022 (Acompanhamento da safra brasileira [de] cana-de-açúcar, 2022) e, com viés de crescimento, em face da elevada demanda resultante da sua dupla aptidão como fonte de alimento e combustível (Bordonal et al., 2018a).

O crescimento da produção pode ocorrer tanto pela expansão territorial das áreas de cultivo como pelo incremento da produtividade. Contudo, a expansão territorial é limitada por diversos fatores, como políticas restritivas ao cultivo da cana-de-açúcar nas áreas de fronteira agrícola; a necessidade de uma série de investimentos com logística de transporte, serviços e industrialização; e a competição com outras cadeias de produção agropecuárias, que estão em constante expansão.

Por sua vez, o aumento da produtividade implica melhorias incrementais nas cadeias de produção local, portanto, com menor custo de investimento e consequente redução da relação custo benefício para o capital investido (Cardozo et al., 2018). Assim, há uma busca por estratégias para intensificação sustentável da produção por meio da verticalização da cadeia de produção (Fachinelli; Pereira Júnior, 2015).

Entre os fatores que afetam a composição dos custos na produção de cana-de-açúcar, destaca-se a prática de adubação, que pode representar

até 30% do custeio anual com a cultura (Zambello Júnior et al., 1980; Silva et al., 2017), o que corresponde a aproximadamente 15% do consumo de fertilizantes comercializados no País (Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 2018). Estima-se que a utilização desse insumo com maior eficácia, além de melhorar a relação custo benefício, pode ocasionar incrementos de produtividade de até 50% (Gopalasundaram et al., 2012).

Além disso, por causa da alta produtividade de biomassa, a cana-de-açúcar cicla no sistema solo-planta elevadas quantidades de nutrientes (Calheiros et al., 2012; Mishra et al., 2014; Meena et al., 2015). Assim, o adequado manejo das adubações com a ciclagem in situ consiste em uma prática essencial para que a cultura alcance elevados rendimentos e competitividade no mercado alimentício e energético.

Entre as ferramentas disponíveis para o monitoramento nutricional, a análise foliar se destaca por ser um método de boa exatidão e precisão, de baixo custo operacional e de fácil interpretação do estado nutricional da cultura da cana-de-açúcar (Silva et al., 2017). O monitoramento nutricional, que consiste na avaliação do estado nutricional de forma contínua no espaço e no tempo, é a ferramenta que avalia a eficácia das tecnologias de manejo de adubação adotadas na lavoura (Oliveira et al., 2019), contribuindo para o uso racional dos insumos, melhorando o equilíbrio nutricional da planta e proporcionando aumentos na produtividade e na segurança do uso

dos fertilizantes (Santos et al., 2013), bem como provocando melhoria da saúde do solo e da qualidade ambiental (Sanyal et al., 2014).

Além disso, ao integrar a avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar e a análise da fertilidade do solo, é possível obter melhores prognósticos e uma melhoria na eficácia da gestão dos processos de recomendações de adubação na cultura da cana-de-açúcar (Gopaldasundaram et al., 2012; Abdel-Hady, 2015). Isso é uma consequência do fato de que o estado nutricional reflete as interações do ambiente, do manejo, do material genético e das práticas culturais, inclusive da adubação, as quais não são completamente avaliadas pelo processo de interpretação da fertilidade do solo (Beaufils, 1973; Rodríguez; Rodríguez, 2000).

A eficácia no uso de fertilizantes requer recomendações técnicas baseadas na resposta da planta ao manejo fitotécnico adotado, na disponibilidade de nutrientes e no clima (Silva et al., 2020a). Esses fatores permitem identificar os ajustes necessários na recomendação dos nutrientes, definindo-se as doses indicadas para cada situação particular e sempre tomando como base o comportamento produtivo da planta, e não apenas os valores tidos como referência para diagnose nutricional.

A avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar pode ser obtida por diferentes metodologias de interpretação das análises foliares. Entre estas, têm-se os métodos univariados Nível Crítico (NC) e a Faixa de Suficiência (FS), que são independentes de interações entre nutrientes (diagnósticos absolutos) (Orlando Filho, 1983; Malavolta, 2006); o método bivariado: Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação, do inglês *Diagnosis and Recommendation Integrated System* (DRIS); e o método multivariado: Diagnose da Composição Nutricional, do inglês *Compositional Nutrient Diagnosis* (CND) (Zambello Junior et al., 1980; Reis Júnior; Monnerat,

2002a, 2002b; Silva et al., 2020b). Tanto os métodos bivariados como os multivariados são interpretados com base na interação entre os nutrientes, e, portanto, os diagnósticos são sempre considerados não absolutos. Cabe mencionar que, para cada um dos métodos citados (NC, FS, DRIS e CND), existem diversas variações disponíveis na literatura.

De um modo geral, para os métodos NC e FS, os valores de referência (padrões nutricionais) podem ser obtidos por ensaios de calibração (experimentos de campo) e por processos matemáticos, como o critério da Distribuição Normal Reduzida (DNR) (Maia et al., 2001) ou o critério da Chance Matemática (ChMat) (Wadt et al., 1998). Já para os métodos DRIS e CND, os padrões nutricionais podem ser obtidos em condições de campo, desde que sejam representativos, tanto quanto possível, de todas as interações entre as variabilidades ambientais e os fatores de crescimento (nutricionais e não nutricionais) que afetam a fisiologia (crescimento e desenvolvimento) da cultura (Rodríguez; Rodríguez, 2000).

A fraqueza da técnica de avaliação do estado nutricional pela análise foliar está em sua sensibilidade a variações no processo de amostragem dos canaviais, bem como na ausência de valores de referência que sejam representativos do perfil tecnológico da cultura da cana-de-açúcar. A falha, seja na amostragem, seja no uso de valores de referência inadequados, resulta em diagnósticos de baixa acurácia, portanto, levando a decisões equivocadas na recomendação da adubação. Como consequência, pode-se não alcançar o ganho de produtividade almejado.

Nesse contexto, este capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão ampla sobre o processo de avaliação do estado nutricional das culturas e discutir sua aplicabilidade na cultura da cana-de-açúcar, como parte de um processo fundamental para o desenvolvimento de sistemas de recomendação de adubação mais confiáveis e eficazes para a cultura da cana-de-açúcar.

Diagnose do estado nutricional de plantas

Diagnose foliar

A avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar pode ser realizada por diferentes técnicas, como pelo uso de clorofilômetro, pela análise visual dos tecidos foliares e da planta, e pela interpretação da análise do conteúdo dos nutrientes em diferentes tecidos ou órgãos da cana-de-açúcar. Ao processo de interpretação dos teores dos nutrientes nas folhas da cana-de-açúcar denominamos de diagnose foliar. A diagnose foliar é também conhecida como interpretação da análise química foliar ou interpretação das análises dos teores nutricionais foliar.

Dado que a cana-de-açúcar possui ciclo plurianual, a técnica da diagnose foliar provê um indicador apropriado para acompanhar as demandas nutricionais da planta ao longo dos anos de seu ciclo de crescimento e em safras sucessivas.

A vantagem da diagnose foliar sobre a diagnose visual é que — dada sua precisão e exatidão analítica, e pelo fato de que variações nos teores dos nutrientes podem ser monitoradas e identificadas antes do surgimento das desordens fisiológicas, em escala visual — permite realizar a diagnose antes que o sintoma associado ao distúrbio nutricional provoque perdas significativas da produtividade (Prado, 2021).

A diagnose foliar representa a capacidade fisiológica da planta em realizar seus processos metabólicos associados à absorção e processamento da energia solar, com reflexo direto na produtividade corrente da cultura. Adicionalmente, nas folhas, as alterações fisiológicas decorrentes de distúrbios nutricionais costumam ser, na maior parte dos casos, mais evidentes quando comparados a outros tecidos ou órgãos (Malavolta, 2006).

A diagnose foliar é um processo sequencial que se inicia com a amostragem das folhas (ou outro tecido ou órgão definido como objeto de avaliação), por meio de um procedimento exequível e padronizado. À amostragem segue-se a quantificação dos nutrientes na amostra, por meio de uma rotina analítica. Os resultados analíticos podem, então, ser comparados com valores de referência que reflitam condições consideradas de plantas saudáveis e produtivas, utilizando um, ou mais, dos diferentes métodos de interpretação disponíveis (Prado, 2021).

Em todas as culturas agrícolas, a coleta de folhas para análise foliar é uma etapa crítica, dado que os teores dos nutrientes no tecido vegetal variam, para uma mesma espécie vegetal, em função do tecido vegetal, de sua posição na planta, do nível de insolação direta ou indireta, da idade, da planta e do tecido vegetal (Meyer, 1975). Disso decorre que os resultados da análise química foliar somente são úteis e representativos se a amostragem for realizada corretamente, seguindo-se rigorosamente a padronização de coleta definida para a cultura (Prado; Caione, 2012).

As amostragens adotam procedimentos comuns à maior parte das culturas, com a indicação de que seja realizada na fase de maior crescimento vegetativo e no órgão vegetal que esteja na fase de maior atividade fotossintética (folhas recém-maduras). Disso decorre que a fase de desenvolvimento da folha, a sua posição na planta e no campo de cultivo e a época de amostragem quanto ao estágio de desenvolvimento da cultura devem ser rigorosamente definidas. Ainda, a amostragem deve ser representativa da área a ser avaliada, de forma que a quantidade de amostras a ser obtida deve ser em número suficiente para reduzir o erro amostral a um mínimo aceitável (Jones et al., 1981; Prado, 2021).

Na cultura da cana-de-açúcar, recomenda-se a amostragem da folha +3 (coleta de 20 a 30

folhas, em talhão uniforme, no período entre 4 a 6 meses depois da emergência do broto, coletando-se a folha +3 — terceira folha mais alta com o colarinho visível — no terço mediano, descartando-se a nervura principal (Figura 6.1) (Malavolta, 2006); ou a folha +1 (coleta de 30 plantas durante a fase de maior desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar), retirando-se os 20 cm centrais da folha +1 *Top Visible Dewlap* (“TVD”), excluindo-se a nervura central (Rajj et al., 1996).

Ao considerar que a época de coleta da folha na fase de maior desenvolvimento da planta é uma condição muito afetada pelas variações climáticas e genéticas, e dado que pode ocorrer de 4 a 10 meses após a emergência do broto, há nessas duas recomendações diferenças metodológicas que podem resultar na alteração no teor dos nutrientes na cultura (Prado, 2021). Por esse motivo, McCray et al. (2018) indicam a amostragem da folha +1 como o tecido vegetal mais adequado para o processo de análise foliar da cana-de-açúcar (Figura 6.1).

No momento da diagnose foliar, deve-se atentar em utilizar padrões nutricionais cujos valores de referência tenham sido obtidos a partir de folhas coletadas usando o mesmo critério de amostragem adotado para a amostra em análise (Traspadini et al., 2018).

Relação do sistema produtivo e o estado nutricional das plantas

O local de cultivo (Lira et al., 2019; Reis Júnior; Monnerat, 2002b), os diferentes tipos de solos (Moura Filho et al., 2014), as variedades utilizadas, as condições climáticas e o manejo e a correção da fertilidade do solo influenciam na exigência nutricional das culturas (Santos et al., 2013). Além disso, as diferenças entre fontes de nutrientes minerais e orgânicas podem apresentar efeitos residuais importantes, que devem ser considerados no processo de recomendações de adubações (Gopalsundaram et al., 2012).

Contudo, apesar desse conjunto de condições determinantes das adubações, os avanços obtidos pelo melhoramento genético da cana-de-açúcar e o cultivo de materiais mais responsivos à oferta de nutrientes (Oliveira et al., 2016) têm sido considerados como responsáveis pelos aumentos na produtividade, no ciclo da vida da cana-planta, em consequência de incrementos de até 300% na fertilização nitrogenada (Fortes et al., 2013b).

As variedades de cana-de-açúcar também têm apresentado variabilidade quanto à quantidade do nutriente requerido para o adequado crescimento vegetativo e quanto aos teores dos

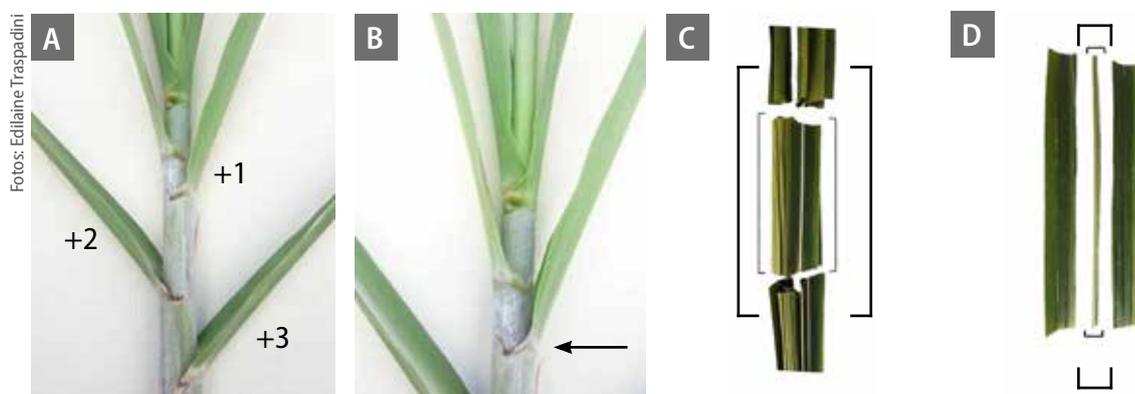


Figura 6.1. Processo de amostragem da folha diagnose padrão +1, +2 e +3 (A); das folhas que apresentam o colarinho visível (B); selecionando apenas o terço mediano da folha (C); descartando a nervura central (D) da cana-de-açúcar.

nutrientes relacionados à máxima produtividade da cana-de-açúcar (Oliveira et al., 2013), em especial no que se refere à eficiência das variedades na resposta à aplicação de fertilizantes nitrogenados (Santana et al., 2020).

Interações entre fontes de nutrientes podem também afetar a produtividade da cana-de-açúcar (Vasconcelos et al., 2014; Moda et al., 2015). Por exemplo, a aplicação de torta de filtro associada ao fósforo (P) pode impedir a absorção desse nutriente pelos colóides do solo (Moda et al., 2015) e aumentar as concentrações de nutrientes no solo, nas folhas e nas partes aéreas de plantas em 47, 7 e 36%, respectivamente (Vasconcelos et al., 2014). Nesse mesmo sentido, desde a adoção da colheita mecanizada, cerca de 10 a 20 mg ha⁻¹ de palhada da cana-de-açúcar permanecem no campo anualmente, afetando a relação carbono:nitrogênio (C:N) e carbono:fósforo (C:P) e, portanto, a imobilização e mineirização dos nutrientes (Leal et al., 2013a).

Assim, a retenção integral ou parcial da palha na superfície do solo é essencial para suportar diversas funções do solo (Carvalho et al., 2017; Satiro et al., 2017), como o controle da compactação do solo (Satiro et al., 2017); a retenção de água (Anjos et al., 2017); o sequestro e armazenamento de carbono (Bordonal et al., 2018b); a ciclagem de nutrientes (Fortes et al., 2013b); as atividades biológicas (Paredes Junior et al., 2015); e o controle da erosão (Valim et al., 2016), além de afetar a qualidade do solo (Aquino et al., 2018; Bordalet et al., 2018a; Lisboa et al., 2018). Todos esses fatores podem ser acompanhados mediante avaliação de seus efeitos na saúde do sistema solo-planta, por meio do monitoramento do estado nutricional da cultura.

Até mesmo a falta de efeito de determinado processo pode ser importante para melhorar o manejo das adubações. Nesse sentido, embora a remoção da palha da cana-de-açúcar possa ter pouco impacto no conteúdo de nutrientes

no tecido foliar, Lisboa et al. (2018) relatam variação na amplitude de 5 a 15 g kg⁻¹ para potássio (K) e de 2 a 6 g kg⁻¹ para cálcio (Ca). Ainda, a própria ciclagem de nutrientes no solo pode tamponar as taxas de remoção da palha em curtos períodos de tempo, o que pode ser constatado pela manutenção do estado nutricional ao longo do período do monitoramento realizado (Satiro et al., 2017).

Todavia, efeitos de diluição e concentração podem afetar a interpretação do estado nutricional, exigindo que os métodos de interpretação sejam adequados para cada situação a ser avaliada. Por exemplo, Lisboa et al. (2018) relatam que a remoção da palhada em 25% induziu redução no teor de P no tecido foliar maior que o observado com a remoção de 50% da palhada. Isso poderia ser atribuído à maior imobilização de P por causa da maior relação C:P no solo; porém, os autores alertam que a produtividade foi menor com a maior remoção da palhada, implicando que teores mais elevados de P e nitrogênio (N), no tratamento com maior remoção, foram em decorrência do efeito de concentração: taxa de absorção do nutriente maior que a taxa de assimilação de carbono fotossintético.

O uso de maturadores químicos para acelerar e melhorar a maturação da cana-de-açúcar — por possuírem em sua composição elementos como o boro (B), o silício (Si), o P e o K (Silva; Caputo, 2012; Siqueira, 2014; Silva, 2018) — pode também afetar os teores dos nutrientes (Silva, 2018). Em relação a influências locais, como as áreas litorâneas, local onde ocorre mistura da água do mar com a água doce, deixando-a salobra ou salgada, é comum observar problemas de salinização do solo (Lira et al., 2018), resultando em distúrbios nutricionais, afetando o metabolismo vegetal, com alterações nas taxas de acumulação e de exportação de nutriente, com consequente impacto na produtividade (Lira et al., 2019).

Todos os fatores citados anteriormente podem afetar o estado nutricional da planta e, conseqüentemente, podem ter efeito sobre os processos de diagnose foliar. Por isso, faz-se necessário o uso das ferramentas de diagnose e recomendações importantes para guiar as práticas de manejo das culturas nas suas diversas condições de cultivos.

Interpretação do estado nutricional

Atualmente, os métodos usados para a interpretação dos teores nutricionais estão divididos em três grupos principais: univariados, bivariados e multivariados.

Método univariado

Há uma forte relação entre a concentração do nutriente na planta e sua produtividade, sendo possível indicar o estado nutricional da cultura a partir da análise dessa relação (Bataglia; Santos, 1990). Os métodos univariados analisam o nutriente isoladamente, sem levar em consideração as relações e as interações com os demais nutrientes (Gott et al., 2017; McCray et al., 2018).

Fazem parte desse grupo os métodos do Nível Crítico (NC) e da Faixa de Suficiência (FS), cujos valores críticos adotados como referência consistem em classificar a cultura em estado de deficiência ou suficiência (NC), ou deficiência, suficiência e toxicidade (FS) (Malavolta, 2006). Níveis de deficiência sugerem que a adição do nutriente resultará em aumento da produtividade; nível suficiente indica que as quantidades disponíveis são adequadas, e nível de toxicidade indica que as quantidades disponíveis são excessivas.

Tradicionalmente, os valores de referência estabelecidos pelos métodos univariados são obtidos por meio de ensaios de calibração, em que os fatores determinantes do desenvolvimento

e do crescimento da cultura são fixados (mantidos constantes) e somente o nutriente em calibração é variável (Baldock; Schulte, 1996).

Na cultura da cana-de-açúcar estão disponíveis valores de referência obtidos pelo uso de ensaios de calibração para a interpretação do estado nutricional (Oliveira et al., 2013; Santana et al., 2020). Oliveira et al. (2013), no estado de São Paulo, realizaram a calibração para interpretação dos teores foliares de N, nos ciclos de produção da cana-planta e primeiro ano da cana-soca, estabelecendo os Níveis Críticos (NCs) de 19,0 g kg⁻¹ de N e 20,3 g kg⁻¹ de N de matéria seca, respectivamente. De forma semelhante, Santana et al. (2020), para cana cultivada em Pernambuco, determinaram como os NCs os valores de 13,0 g kg⁻¹ de N e 12,5 g kg⁻¹ de N de matéria seca, para as variedades RB92579 e RB867515, respectivamente. Mesmo que esses estudos tenham sido estabelecidos na última década (Oliveira et al., 2013; Santana et al., 2020), geralmente, os valores de referência, presentes na literatura e obtidos por ensaios de calibração, foram estabelecidos há mais de cinco décadas, como os valores estabelecidos por Orlando Filho (1983) e Malavolta (2006) (Tabela 6.1) e por Raij et al. (1996) (Tabela 6.2), bem como têm sido replicados, difundidos e, rotineiramente, utilizados para diagnose de plantas, mesmo que não reflitam adequadamente as condições tecnológicas e práticas agrícolas atualmente adotadas (Silva et al., 2017).

A utilização desses valores de referência pode resultar em elevada quantidade de diagnósticos imprecisos, ou seja, incapazes de identificarem corretamente o verdadeiro estado nutricional da planta, conduzindo a recomendações equivocadas, com riscos de perda de produtividade e desperdício de recursos financeiros pelo uso excessivo e desnecessário de fertilizantes (Beverly; Hallmark, 1992; Traspadini, 2016). Essa possibilidade pode ser facilmente observada a

Tabela 6.1. Teores de macro e micronutrientes considerados adequados para a cana-de-açúcar e suas respectivas épocas de amostragem (3 ou 4 meses).

Época de amostragem	Mês	Nutriente					
		N	P	K	Ca	Mg	S
		(g kg ⁻¹)					
Cana-planta	4(1)	10–21	2,0–2,4	11–13	08–10	2–3	2,5–3,0
Cana-soca	4(1)	20–22	1,8–2,0	13–15	5–7	2–3	2,5–3,0
Cana-planta	4(2)	23	1,7–1,8	8,8–10	–	–	–
Cana-soca	4(2)	20–22	2,1–2,2	10–15	–	–	–
Cana-planta	3(3)	20–22	2,0–2,4	11–13	9–11	2–3	2–3
Cana-soca	3(3)	20–22	2,0–2,4	01–11	9–11	2–3	2–3

Época de amostragem	Mês	B	Cu	Zn	Mn	Fe	
		(mg kg ⁻¹)					
		Cana-planta	4(1)	–	–	15–26	–
Cana-soca	4(1)	–	–	23–24	–	–	
Cana-planta	4(2)	–	8–10	–	–	245–507	
Cana-soca	4(2)	–	8,0–11	–	–	86–140	
Cana-planta	4(3)	–	9,5–13,7	–	–	–	
Cana-soca	4(3)	–	11,5–12,7	–	–	–	
Cana-planta	4(4)	–	–	–	–	160–335	
Cana-soca	4(4)	–	–	–	–	174–392	
Cana-planta	-(5)	–	–	–	–	192–249	
Cana-soca	-(5)	–	–	–	138–222	–	
Cana-planta	4(6)	15–50	8–10	25–30	100–250	200–500	
Cana-soca	4(6)	–	8–10	25–50	50–125	80–150	

Os valores foram obtidos pela coleta da folha na posição +3 (1, 2, 3, 4, 5) e da folha +1 (6), retirando-se os 20 cm centrais e excluindo-se a nervura central.

Fonte: Adaptado de Reis Júnior e Monnerat (2002a).

partir das discrepâncias entre as faixas de suficiência recomendadas por diferentes autores, especialmente quando se considera o cálcio (Ca), o cobre (Cu), o manganês (Mn) e o zinco (Zn) (Tabela 6.2).

Na prática, sendo as condições edafoclimáticas e o nível tecnológico dos sistemas atuais de produção da cana-de-açúcar distintos daqueles para os quais foram obtidos os padrões nutricional

nais, a aplicabilidade do uso desses valores de referência é cada vez mais reduzida (Mostashari et al., 2018). Outra fraqueza desse processo de diagnóstico é que o uso do ensaio de calibração pressupõe que o desenvolvimento, o crescimento e a produtividade da cultura estejam vinculados unicamente à disponibilidade do nutriente no solo (Kurihara et al., 2013), enquanto, em condições reais, vários fatores atuam e

Tabela 6.2. Faixa de Suficiência (FS) de macro e micronutrientes em folha de cana-de-açúcar.

Nutriente	Malavolta (2006) ⁽¹⁾	Raij et al. (1996) ⁽²⁾
	(g kg ⁻¹)	
N	19,0–21,0	18,0–25,0
P	2,0–2,4	1,5–3,0
K	11,0–13,0	10,0–16,0
Ca	8,0–10,0	2,0–8,0
Mg	2,0–3,0	1,0–3,0
S	2,0–3,0	1,5–3,0
(mg kg ⁻¹)		
Cu	8,0–10,0	6,0–15,0
Mn	100,0–250,0	25,0–250,0
Zn	25,0–50,0	10,0–50,0

⁽¹⁾ Amostragem da folha + 1 (folha mais alta com colarinho visível "TVD"), retirando-se os 20 cm centrais e excluindo-se a nervura central, no período entre 4 a 6 meses depois da emergência do broto. ⁽²⁾ Amostragem da folha +3 (terceira folha mais alta com colarinho visível), no terço mediano da folha, com descarte da nervura central, durante a fase de maior desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar.

interagem em cada unidade de produção (Rodríguez; Rodríguez, 2000).

Além disso, o custo de implantação dos ensaios de calibração, sejam eles o tempo, o financeiro ou o intelectual, contribui para a baixa velocidade de atualização dos valores-padrão. No intuito de superar essas limitações e obter valores de referência mais representativos das condições atuais de cultivo, sem a necessidade de se implantar ensaios de calibração, foram desenvol-

vidos procedimentos matemáticos para estimar esses valores de referência: Distribuição Normal Reduzida (DNR) (Maia et al., 2001) e Chance Matemática (ChMat) (Wadt et al., 1998). A inovação desses métodos está na utilização de dados de monitoramento nutricional de lavouras comerciais em substituição aos obtidos por meio de ensaios de calibração.

Distribuição Normal Reduzida

O método da Distribuição Normal Reduzida (DNR) tem como premissa a relação entre o teor nutricional e a produtividade, ao assumir que, dentro de alguns limites, um aumento no teor nutricional corresponderá a uma variação direta e proporcional na produtividade da cultura. Com base nessa relação, é obtido o NC para um teor que corresponda a 90% da produtividade máxima (Maia et al., 2001). Esse procedimento foi utilizado para obter valores de referências a partir de canaviais do município de Campos dos Goytacazes, RJ (Tabela 6.3) (Santos et al., 2013).

Método da Chance Matemática

Enquanto o método da DNR visa estimar o NC, o método da Chance Matemática (ChMat) tem como finalidade obter os valores de referência para as faixas de suficiência (Wadt et al., 1998, 2013). O procedimento consiste em determinar

Tabela 6.3. Nível crítico (NC) para macro e micronutrientes obtido pelo método da Distribuição Normal Reduzida (DNR) para cana-de-açúcar, em 1996–1997.

Macronutriente						Micronutriente		
N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn
(g kg ⁻¹)						(mg kg ⁻¹)		
14,5	1,8	9,9	4,0	2,4	1,6	4,8	79,5	12,9

Valores obtidos da coleta da folha na posição +3, retirando-se os 20 cm centrais e excluindo-se a nervura central; coleta de plantas com 4 meses de desenvolvimento. Fonte: Santos et al. (2013).

as classes dos teores nutricionais, ou faixa de suficiência (FS), que correspondam à maior probabilidade de se obter lavouras de alta produtividade (Wadt et al., 2013). O processo consiste em avaliar como se distribui a relação de lavouras de baixa e alta produtividade e a frequência de lavouras de elevada produtividade, nas diferentes classes de teores nutricionais, em que classes de teores de nutrientes que apresentam uma chance matemática relativa acima de determinado valor (por exemplo, 40%) são consideradas como adequadas, sendo consideradas classes de deficiência e de excesso as demais classes de teores (Wadt et al., 2013).

Na cana-de-açúcar, o método da ChMat foi utilizado para determinar as faixas de suficiência de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) (Tabela 6.4), em canaviais cultivados na região de Alagoas, estabelecidos por Moura Filho et al. (2010), citado por Moura Filho et al. (2014). Os valores obtidos pela técnica foram consistentes com aqueles obtidos em outros trabalhos usando o procedimento do ensaio de calibração (Orlando Filho, 1983; Malavolta, 2006).

Outro trabalho, no mesmo sentido, foi realizado por Santos et al. (2013), que estimaram a FS para macro e micronutrientes, na cana-de-açúcar (Tabela 6.4). Eles identificaram que a amplitude das classes de teores nutricionais

para os teores de suficiência foi mais estreita que aquelas relatadas na literatura, principalmente em comparação com os valores indicados por Raij et al. (1996) e Malavolta (2006).

Outros procedimentos utilizados para a obtenção dos valores de referência univariados

Padrões nutricionais para a interpretação do NC ou FS também podem ser obtidos, matematicamente, utilizando-se como critério a identificação de faixas de valores adequados para os teores dos nutrientes, em lavouras nutricionalmente sadias e produtivas, usando-se os métodos DRIS ou CND para identificar a condição de sanidade nutricional. Nesse procedimento, parâmetros estatísticos média e desvio-padrão das lavouras nutricionalmente sadias são adotados para definir os valores de NC e da FS.

Ao usar essa abordagem, Santos et al. (2013) determinaram faixas de suficiências para macro e micronutrientes utilizando-se o DRIS e o CND para identificar as lavouras nutricionalmente sadias, e a partir destas, a faixa de teores adequados em canaviais de cana-planta e cana-soca, na região do município de Campos dos Goytacazes, RJ (Tabela 6.5).

As faixas de suficiência obtidas, tanto pelo DRIS como pelo CND, foram de menor amplitude que aquelas obtidas pelos ensaios de calibração

Tabela 6.4. Faixa de suficiência (FS) para macro e micronutrientes obtida pelo método da Chance Matemática (ChMat) para cana-de-açúcar, em 1996–1997.

	Macronutriente						Micronutriente		
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn
	(g kg ⁻¹)						(mg kg ⁻¹)		
(¹)	12,5–20,8	1,0–2,1	8,9–14,7	1,7–4,0	0,1–1,4	0,7–1,8	–	–	–
(²)	13,0–15,0	2,5–2,8	11,2–14,3	2,6–3,6	3,7–4,3	1,9–2,3	4,6–6,6	56,7–73,0	24,8–27,9

(¹) Valores de referência para macronutrientes Moura Filho et al. (2010), citado por Moura Filho et al. (2014).

(²) Valores de referência para macro e micronutrientes (Santos et al., 2013).

Valores obtidos da coleta da folha na posição +3, retirando-se os 20 cm centrais e excluindo-se a nervura central; coletas de plantas com 4 meses de desenvolvimento.

Tabela 6.5. Faixa de Suficiência (FS) para macro e micronutrientes obtida pelo Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS) e Diagnóstico da Composição Nutricional (CND) para cana-de-açúcar.

	Macronutriente						Micronutriente		
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn
	(g kg ⁻¹)						(mg kg ⁻¹)		
DRIS	12,6–15,2	1,8–2,3	9,6–12,5	2,6–3,6	2,0–3,0	1,5–1,9	3,8–5,0	55,9–78,3	12,6–14,8
CND	12,6–16,5	1,5–2,2	7,6–12,0	3,3–4,8	1,6–3,2	1,3–1,8	3,8–5,6	52,7–86,3	13,0–16,4

Valores obtidos da coleta da folha na posição +3, retirando-se os 20 cm centrais e excluindo-se a nervura central; coleta de plantas com 4 meses de desenvolvimento.

Fonte: Santos et al. (2013).

pelo método da ChMat; o que pode ser vantajoso quando considerada a probabilidade de se reduzir casos de diagnóstico “adequado” para plantas com baixa produtividade (Santos et al., 2013), aumentando-se a frequência de recomendação de ajustes na adubação.

Convém, contudo, ressaltar que para todos os procedimentos utilizados em substituição aos ensaios de calibração, inclusive com os critérios DNR e ChMat, não há validação de campo para os valores de referência propostos, o que implica um elevado grau de incerteza quanto à adequação desses padrões nutricionais.

Métodos bivariados

Métodos de diagnóstico bivariados são caracterizados por correlacionar os nutrientes, par a par, um nutriente com os demais, como aplicado no método DRIS, que utiliza relações nutricionais em vez de teores nutricionais isolados para interpretar a análise de tecidos (Beaufils, 1973).

Essas relações duais são quocientes (e, em alguns casos, produtos) entre os teores dos nutrientes, podendo ser apresentados na forma direta (X/Y) ou indireta (Y/X), quando se tem o nutriente X em análise. Essas relações são normalizadas por meio de funções e podem também passar por transformação logarítmica (Beverly, 1993a). Beaufils (1973) recomenda que sejam testadas todas as formas de relações possíveis entre os

nutrientes a fim de se identificar quais possuem maior capacidade de discriminar plantas nutricionalmente sadias daquelas não sadias.

As funções DRIS descrevem essas relações por meio de indicadores padronizados e adimensionais. Denomina-se por índice DRIS a média aritmética de todas as funções DRIS de um determinado nutriente com os demais nutrientes avaliados, ou mais especificamente a média dos desvios das relações que contêm esse nutriente em relação aos seus respectivos valores ótimos (Bailey et al., 1997). Esses índices, quando o valor tende a zero, indicam o estado de equilíbrio nutricional; valores negativos e afastados de zero expressam a tendência à insuficiência, e valores positivos e afastados de zero indicam a tendência ao excesso (Wadt, 2005). Quanto mais negativo for um índice para um determinado nutriente, mais provável é que o nutriente esteja presente em níveis insuficientes em relação a outros nutrientes (McCray et al., 2019).

Uma das vantagens do uso de relações binárias é que a variação no teor do nutriente em virtude das taxas de acumulação de matéria seca é minimizada. Dada uma relação entre os teores de dois nutrientes quaisquer (n_x, n_y), expressa pelo teor do nutriente em base da matéria seca da planta (q_x/MS e q_y/MS), ao se calcular a relação binária (n_x/n_y), tem-se que ($q_x/MS / q_y/MS$) resulta em q_x/q_y . Ou seja, relações binárias entre nutrientes têm como vantagem isolar os efeitos

não controlados sobre a acumulação de biomassa, focando a diagnose nas taxas de acumulação dos nutrientes (Hallmark et al., 1987).

Esse artifício é muito vantajoso na avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar, dado à alta plasticidade ambiental dessa espécie em relação à produção de biomassa. Com esse artifício, minimizam-se variações ambientais por causa do momento da coleta das amostras foliares, que quando interpretadas pelos métodos univariados, podem resultar em falsos prognósticos (falsa deficiência ou falso excesso), induzindo a erros na interpretação do estado nutricional, o que acaba por desencorajar seu uso pelos produtores, fato muito frequente no setor sucroalcooleiro do Brasil.

De acordo com Savita et al. (2016), o método DRIS recebeu atenção considerável desde a sua introdução, pois é descrito como um sistema abrangente, que identifica todos os fatores nutricionais que limitam a produção agrícola. Assim, o método tem sido utilizado para diversas culturas e por diversos países (Traspadini et al., 2018), inclusive para cana-de-açúcar, que possui trabalhos usando-se o método na África (Meyer, 1975; Beaufils; Sumner, 1976), na Flórida (Elwali; Gascho, 1984; McCray et al., 2018, 2019), no México (Ruíz-Bello; Cajuste, 2002), na Venezuela (Galíndez et al., 2009) e no Brasil (Zambello Júnior; Orlando Filho, 1979; Píperas et al., 2009; Calheiros et al., 2018a, 2018b; Silva et al., 2020a, 2020b, 2020c).

Ao trabalhar com cana-de-açúcar, na África do Sul, Meyer (1975) estudou o efeito da posição da folha na planta, da idade e da época de coleta das amostras e de variedades sobre os diagnósticos obtidos pelo método DRIS. O autor concluiu que, a partir de estudos de correlação, uma interpretação baseada em várias proporções de N, P e K pode melhorar as chances de um diagnóstico correto, desde que as condições de amostragem tenham sido padronizadas. Já Sumner e Beaufils (1976) observaram que o

DRIS poderia ser aplicado independentemente da idade da cultura, da flutuação sazonal e do regime interno de umidade, com base nos efeitos do rendimento da cana-de-açúcar. Eles estabeleceram normas para as relações entre os nutrientes N, P, K, Ca e Mg, baseadas em observações de campo obtidas de produtores de cana-de-açúcar da, África do Sul (Tabela 6.6).

Tabela 6.6. Normas DRIS estabelecidas para cana-de-açúcar por Beaufils e Sumner (1976) para cana-de-açúcar, na África do Sul.

Relação	Média	CV (%)
P:N	0,122	16,0
N:K	1,511	21,0
N:Ca	7,813	28,0
N:Mg	8,607	27,0
P:K	0,183	24,0
Ca:P	1,146	28,3
P:Mg	1,039	28,6
Ca:K	0,205	34,7
Mg:K	0,186	36,2
Ca:Mg	1,158	31,5

CV: coeficiente de variação.

Valores de N, P, K, Ca e Mg expressos em g kg⁻¹.

Valores obtidos da amostragem da folha mais alta com colarinho visível (TVD).

Fonte: Adaptado de Beaufils e Sumner (1976).

Em trabalho realizado no sul da Flórida, Estado Unidos (EUA), Elwali e Gascho (1984) estabeleceram as normas DRIS para as relações de macro e micronutrientes de amostras foliares obtidas de campos comerciais e parcelas experimentais de culturas de cana-planta e primeira-soca (Tabela 6.7).

Em seu estudo, Elwali e Gascho (1984) utilizaram a resposta produtiva da cana-de-açúcar, em função da aplicação de P e K, para avaliar a qualidade dos índices DRIS atribuídos a essas parcelas. Eles concluíram que o método foi satisfatório para a diagnose da cultura e que a

Tabela 6.7. Normas DRIS estabelecidas para cana-de-açúcar por Elwali e Gascho (1984) para cana-de-açúcar, na África do Sul.

Relação	Média	DP	Relação	Média	DP
N:p	8,706	1,199	Fe:100 Ca	2,414	0,634
N:K	1,526	0,257	100 Mg:Fe	0,329	0,092
K:P	5,633	1,038	Zn:100 N	0,106	0,021
Ca:N	0,151	0,032	Zn:100 P	0,908	0,216
Ca:P	1,314	0,349	Zn:100 K	0,157	0,043
Ca:K	0,222	0,063	100 Ca:Zn	1,473	0,398
Ca:Mg	1,373	0,381	100 Mg:Zn	1,100	0,318
Mg:N	0,113	0,028	Fe:Mn	3,302	2,191
Mg:P	0,984	0,284	Zn:Fe	0,312	0,080
Mg:K	0,163	0,052	Zn:Mn	1,008	0,748
100 N:Mn	9,401	6,123	10 N:Cu	4,998	1,885
100 P:Mn	1,086	0,686	P:Cu	0,588	0,239
100 K:Mn	4,615	3,194	Cu:10 K	0,330	0,123
100 Ca:Mn	1,502	1,089	10 Ca:Cu	0,743	0,324
100 Mg:Mn	1,129	0,869	10 Mg:Cu	0,552	0,228
Fe:100 N	0,351	0,057	Fe:10 Cu	1,733	0,693
Fe:100 P	2,995	0,600	Mn:100 Cu	0,998	0,952
Fe:100 K	0,550	0,120	Zn:10 Cu	0,522	0,201

Valores obtidos da amostragem da folha mais alta com o colarinho visível (TVD).

DP: desvio-padrão.

Fonte: Adaptado de Elwali e Gascho (1984).

aplicação do equilíbrio adequado de nutrientes pode melhorar a produção de açúcar.

Além disso, eles também verificaram que houve aumento significativo na produção da cana-de-açúcar quando a adubação foi guiada pelos diagnósticos do método DRIS, ao contrário do ocorrido quando a fertilização foi definida com base na análise de solo ou pela diagnose dada pelo nível crítico foliar (Tabela 6.8). Esses resultados foram atribuídos ao melhor balanço nutricional, revelado pelos índices DRIS no final da temporada (Elwali; Gascho, 1984).

Em trabalho realizado no México, Ruíz-Bello e Cajuste (2002) utilizaram os índices DRIS para

recomendar a adubação de N, P e K em cana-de-açúcar, com a aplicação de quatro doses dos nutrientes (0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N, P e K). Os autores concluíram que a abordagem DRIS identifica interações nutricionais, bem como identifica adequadamente as necessidades nutricionais e os nutrientes que não restringem a produção, o que permite aumentar a dose de fertilizante conforme aumenta a exigência da cultura, corrigindo desequilíbrios nutricionais sem superestimar a dosagens das adubações.

Por sua vez, em trabalho semelhante realizado por McCray et al. (2019), não houve resposta na produtividade da cana-de-açúcar, cultivada na

Tabela 6.8. Efeitos dos métodos de fertilização guiada pelo Índice do balanço nutricional (IBN) sobre os nutrientes foliares e a produtividade para cana-de-açúcar.

Método	Índice do Balanço Nutricional			Produtividade	
	N-P-K	N-Mg	N-Cu	Bagaço	Açúcar
	Índice			(t ha ⁻¹)	
Análise do solo	8	34	46	75,4	7,9
Análise foliar – NC	3	21	36	74,3	7,7
Análise foliar – DRIS	3	13	24	85,9	9,4
DMS _{0,05}	6	11	10	5,3	0,7

DMS: diferença mínima significativa.

NC: Nível Crítico.

DRIS: Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação.

Fonte: Adaptado de Elwali e Gascho (1984).

Flórida, em razão da fertilização recomendada com base nos índices DRIS negativos, que indicam deficiência nutricional, calculados a partir da amostragem de lavouras de cana-de-açúcar. Foi observado que houve pequenos aumentos nas concentrações foliares de Mn e Zn ou nos índices DRIS, mas foram insuficientes para aumentar a produção de cana-de-açúcar. Os autores concluíram que os níveis de resposta à produção, usando essa abordagem, não foram suficientes para serem lucrativos. É possível que isso tenha ocorrido em razão de as plantas analisadas já apresentarem boas condições nutricionais, tendo em vista que a produtividade teve amplitude de 83 a 107 t ha⁻¹, sugerindo que os índices negativos observados pudessem estar associados a fatores não nutricionais.

Galíndez et al. (2009) desenvolveram normas DRIS preliminares como alternativa para a interpretações do estado nutricional da cana-de-açúcar cultivada na Venezuela (Tabela 6.9). De acordo com os autores, os resultados obtidos conferiram confiabilidade aos padrões por causa da normalidade verificada do banco de dados e por terem sido verificadas coincidências com os valores encontrados na literatura para cana-de-açúcar.

Vale considerar que, conforme evidenciado por Reis Júnior e Monnerat (2002b), podem ser encontrados diagnósticos diferentes com as normas DRIS estabelecidas para a mesma cultura, mas sob diferentes condições de crescimento. Esses autores observaram que o diagnóstico foliar realizado, a partir dos padrões DRIS brasileiros, gerados a partir de um pequeno número de amostras, não coincidiu com o diagnóstico obtido a partir de padrões gerados com um grande número de amostras, como os da África do Sul e dos EUA, mostrando que os padrões brasileiros eram mais adequados para cana-de-açúcar cultivada no Brasil. Segundo os autores, isto aponta para a necessidade de se obter padrões DRIS para cada condição produtiva, uma vez que cada uma possui condições edafoclimáticas particulares e variedades específicas. Todavia, deve-se ter em conta que o resultado pode ter sido por causa da falta de representatividade das lavouras canavieiras brasileiras estudadas na obtenção das normas DRIS norte-americanas ou sul-africanas.

No Brasil, o DRIS foi aplicado pela primeira vez na cultura da cana-de-açúcar por Zambello Júnior e Orlando Filho (1979), que estudaram sua validade para soqueiras cultivadas em solo Terra Roxa Estruturada, no estado de São Paulo.

Tabela 6.9. Média e desvio-padrão (DP) das normas pelo Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS), na população com alta produtividade de folhas de cana-de-açúcar.

Relação	Média	DP	Relação	Média	DP
K:P	3,83	0,65	Na:Mg	14,95	3,40
Ca:Cu	0,24	0,07	Na:Cu	0,78	0,22
Mg:Cu	0,05	0,012	K:Zn	0,35	0,06
Zn:Mg	2,58	0,52	N:Cu	0,88	0,29
Mn:Mg	4,08	0,87	P:Cu	0,14	0,05
B:Mg	43,78	12,59	Zn:N	0,14	0,02
Zn:Cu	0,13	0,035	K:Cu	0,53	0,21
Fe:Cu	42,27	10,7	K:Cu	3,20	0,98
Mn:Cu	0,21	0,05	B:N	2,32	0,58
B:Cu	2,29	0,80	Mn:N	0,22	0,03
Zn:Fe	0,003	0,0006	Zn:P	0,90	0,021
B:Zn	17,40	5,53	Mn:P	1,40	0,20
Mn:Fe	0,005	0,0006	B:P	15,08	4,38
B:Fe	0,05	0,01			

Valores obtidos da amostragem da folha mais alta com colarinho visível (TVD), saudável, na haste principal, entre os meses de maio e julho de 2004, pouco antes da indução floral.

Fonte: Adaptado de Galíndez et al. (2009).

Nesse estudo, o N foi identificado como elemento mais deficiente e o equilíbrio nutricional ocorreu em torno da dose de 150 kg N ha⁻¹.

Zambello Júnior et al. (1980) avaliaram o efeito de diferentes épocas da amostragem foliar de cana-soca cultivada em quatro Grandes Grupos de Solos submetidos a doses de N, P e K no estado de São Paulo. Os resultados indicaram que o diagnóstico do DRIS foi praticamente inalterado com a época de amostragem foliar e pode ser aplicado nos diversos solos estudados. Os autores também apresentaram o comportamento do balanço de N, P e K em função da aplicação de P e seu efeito na produtividade (Tabela 6.10).

Na Tabela 6.10, é possível observar que o P foi responsável por um aumento médio de 11,4 t ha⁻¹ cana, quando diagnosticado e recomendado pelo método DRIS. Mesmo com a dosagem bastante baixa de P utilizada nos ensaios, os

autores relatam que foi possível um diagnóstico eficiente pelo método, demonstrando a sensibilidade dos índices de DRIS na diagnose nutricional da cana-de-açúcar (Zambello Júnior et al., 1980).

Em estudo semelhante, Zambello Júnior et al. (1980) utilizaram a resposta produtiva da cana-de-açúcar a doses de NPK, cultivada em quatro grandes grupos de solos no estado de São Paulo para avaliar o comportamento dos diagnósticos do método DRIS entre as diferentes épocas da amostragem foliar de soqueiras cultivadas. Os resultados indicaram que o diagnóstico do DRIS foi praticamente inalterado com a época de amostragem foliar e que pode ser aplicado independentemente do grupo de solos.

Em trabalho realizado por Píperas et al. (2009), foi sugerido que o ponto de corte de 140 t ha⁻¹ é o mais indicado para separar as lavouras de

Tabela 6.10. Efeito de Fósforo com as doses mais elevadas de nitrogênio e potássio, balanço de NPK pelo DRIS, em ordem decrescente de necessidade e as respectivas produtividades.

Solo ⁽¹⁾	Tratamento ⁽²⁾	DRIS	(t ha ⁻¹) cana	↑ (t ha ⁻¹) cana
LE (I)	N3 P0 K2	P>N>K	101	+3
	N3 P1 K2	N>P>K	104	
LE	N3 P0 K2	P>N>K	92	+30
	N3 P1 K2	P>N>K	122	
LVa	N3 P0 K2	P>N>K	62	+10
	N3 P1 K2	P>N>K	72	
PV1s	N3 P0 K2	P>N>K	73	+2
	N3 P1 K2	N>P>K	75	
LR	N3 P0 K2	K>P>N	68	+12
	N3 P1 K2	P>K>N	80	

⁽¹⁾ Latossol Roxo (LR), Podzólico Vermelho-Amarelo — variação Laras (PV1s), Latossolo Vermelho-Amarelo — fase arenosa (LVa) e o Latossol Vermelho Escuro-orto (LE).

⁽²⁾ Tratamentos: N3 = 180 kg ha⁻¹ de N; P0 = 0 kg ha⁻¹ P₂O₅; P2 = 45 kg ha⁻¹ P₂O₅ e K2 = 180 kg ha⁻¹ K₂O.

Fonte: Adaptado de Zambello Júnior et al. (1980).

baixa e alta produtividade, tendo em vista que esse foi ponto de corte que apresentou melhor correlação com o Índice de Balaço Nutricional (IBN) da cana-de-açúcar, em Paraguaçu, SP. As lavouras definidas como de alta produtividade pelo ponto de corte são usadas para estabelecer as normas DRIS, salientando que, quanto mais alto o nível de corte, mais restritivo será o grupo de plantas selecionadas. Tendo como objetivo a melhora da acurácia dos diagnósticos obtidos com o DRIS, Guimarães (2014) desenvolveu normas DRIS gerais e específicas para cana-soca e cana-soca de primeiro e segundo ano, para a região Sul de Goiás. Segundo o autor, as normas específicas para cana-soca de primeiro e segundo ano se diferenciaram entre si e da norma geral. Entretanto, apesar das diferenças, houve relação positiva entre seus diagnósticos.

Silva (2018), ao realizar a diagnose nutricional de amostras provenientes de plantio comercial de cana-de-açúcar cultivada na Paraíba, interpretadas com base em normas de referências estabelecidas para Alagoas, observou que 73% dos nutrientes apresentaram situação de equilíbrio nutricional. Embora isso tenha sido atribuído à inadequação das normas DRIS utilizadas (normas DRIS não representativas das condições de sua aplicação), também representa uma fraqueza do sistema DRIS, pois essa tendência deve-se à própria distribuição normal das relações nutricionais em que, aproximadamente, 67% dos casos estão situados entre +1 e -1 desvio-padrão da média amostral.

Todavia, deve-se destacar que a maioria dos autores considera que os valores de referência devem ser obtidos para cada região de cultivo da cultura, como normas DRIS estabelecidas para a diagnose nutricional de cana-de-açúcar cultivada no norte fluminense (Reis Júnior; Monnerat, 2002b) (Tabela 6.11), ou normas DRIS estabelecidas para cana-de-açúcar cultivadas no estado de Alagoas (Calheiros et al., 2018a) (Tabela 6.12).

Em trabalho realizado a partir do mesmo conjunto de lavouras canavieiras, Calheiros et al. (2018b) estabeleceram normas DRIS para cana-de-açúcar aplicando diferentes critérios de seleção das relações duais dos nutrientes e avaliaram sua influência na diagnose dos nutrientes da cana-de-açúcar (Tabela 6.13). Os resultados indicam que os diagnósticos nutricionais foram influenciados pelos critérios utilizados para a geração de padrões DRIS. Os autores sugerem que, na seleção das relações duais, devem ser adotados critérios com elevadas razões de variância entre a população de baixa e alta produtividade, mas com menor coeficiente de assimetria.

Calheiros et al. (2018a) avaliando a distribuição da frequência com que os nutrientes são indicados com maiores probabilidades de respostas positivas à fertilização, notaram que a ordem foi

Tabela 6.11. Média e desvio-padrão (DP) das normas pelo Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS), da população com alta produtividade de folhas de cana-de-açúcar.

Relação	Média	DP	Relação	Média	DP
N:P	7,21	1,456	K:Mg	5,07	1,648
N:K	1,24	0,324	Cu:K	0,43	0,154
Ca:N	0,24	0,103	Mn:K	3,17	1,087
N:Mg	6,18	2,200	K:Zn	0,88	0,161
N:Cu	3,04	0,562	Ca:Mg	1,34	0,433
Mn:N	4,95	1,000	Ca:Cu	0,71	0,228
N:Zn	1,05	0,135	Ca:Mn	0,05	0,026
K:P	6,03	1,471	Ca:Zn	0,25	0,087
Ca:P	1,66	0,571	Cu:Mg	2,05	0,793
Mg:P	1,30	0,426	Mn:Mg	30,30	11,969
Cu:P	2,35	0,313	Zn:Mg	5,77	1,714
Mn:P	36,30	12,814	Mn:Cu	15,30	4,881
Zn:P	6,87	1,195	Cu:Zn	0,35	0,059
Ca:K	0,30	0,169	Mn:Zn	5,23	1,412

Valores obtidos da coleta da segunda folha +3, com o colarinho visível, aos 4 meses após o brotamento da cana-de-açúcar.

Fonte: Reis Júnior e Monnerat (2002b).

Ca, Mg, K, S, Mn, Cu, Zn e B. Seguindo a mesma abordagem, Silva e Chiaia (2021) verificaram que a ordem decrescente da limitação nutricional variou entre os ciclos e metodologias utilizadas.

Métodos multivariados

O método multivariado, denominado de Diagnose da Composição Nutricional, do inglês *Compositional Nutrients Diagnosis* (CND), desenvolvido por Parent e Dafir (1992), diferencia-se do método DRIS por utilizar uma relação multivariada para cada nutriente. Essa relação multivariada refere-se ao quociente entre o nutriente em análise e a média geométrica da composição nutricional, de modo que relaciona entre um teor nutricional com todos os demais nutrientes, em uma única relação, na forma de quociente (Traspadini et al., 2018; Silva et al., 2020a).

O método considera a premissa de que o tecido foliar é considerado um sistema fechado, formado por componentes quantificados (nutrientes) e por componentes não quantificados, que compõe a matéria seca do material. A relação multivariada expressa a dependência entre os teores nutricionais, pois qualquer variação, em qualquer uma das partes, deve afetar os valores relativos de outras partes do conjunto de nutrientes (Parent; Dafir, 1992).

Assim como no DRIS, o método CND apresenta índices nutricionais que podem ser negativo, zero ou positivo, além de também adotar o conceito de balanço nutricional (McCray et al., 2019) e possibilitar a ordenação dos nutrientes quanto a sua limitação, a partir do mais deficiente até o mais excessivo (Gott et al., 2017; Silva; Chiaia, 2021).

Tabela 6.12. Média e desvio-padrão (DP) das relações entre nutrientes, selecionados como as normas do Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS), para cana-de-açúcar, no Nordeste do Brasil.

Relação	Média	DP	Relação	Média	DP	Relação	Média	DP
N:P	9,467	1,722	K:Ca ⁽¹⁾	7,027	1,404	Cu:Mg ⁽¹⁾	20,059	6,221
K:N ⁽¹⁾	6,112	1,076	Mg:K ⁽²⁾	3,612	0,534	B:Mg	1,172	0,254
N:Ca	4,784	1,399	K:S	2,406	0,564	Zn:S	4,544	1,074
Mg:N ⁽²⁾	13,770	4,387	Zn:K ⁽¹⁾	15,684	4,281	Fe:S	1,141	0,257
N:S	15,073	5,126	Fe:K	4,710	1,263	Mn:S	4,322	1,387
Zn:N ⁽²⁾	9,459	2,600	K:Mn ⁽²⁾	4,035	0,698	Cu:S ⁽¹⁾	36,772	9,436
N:Fe ⁽²⁾	37,233	7,181	Cu:K ⁽²⁾	43,070	11,323	B:S	3,001	0,878
N:Mn ⁽²⁾	6,565	1,221	K:B ⁽²⁾	115,697	23,061	Fe:Zn ⁽¹⁾	31,391	9,213
Cu:N ⁽²⁾	25,432	4,859	Mg:Ca ⁽¹⁾	6,242	1,808	Zn:Mn ⁽¹⁾	2,027	0,580
N:B ⁽¹⁾	19,210	3,711	S:Ca ⁽²⁾	5,041	0,693	Zn:Cu ⁽¹⁾	2,367	0,138
P:K ⁽²⁾	18,073	2,931	Zn:Ca ⁽¹⁾	2,077	0,104	B:Zn ⁽¹⁾	6,052	1,688
P:Ca ⁽¹⁾	1,468	0,317	Fe:Ca	2,232	0,265	Fe:Mn ⁽¹⁾	4,657	1,278
P:Mg ⁽¹⁾	8,680	2,806	Ca:Mn ⁽³⁾	9,633	2,037	Cu:Fe ⁽²⁾	9,388	2,176
P:S ⁽¹⁾	16,568	6,515	Cu:Ca ⁽¹⁾	11,966	3,576	Fe:B	5,392	1,641
P:Zn ⁽³⁾	121,469	29,790	B:Ca ⁽¹⁾	4,490	0,675	Cu:Mn ⁽²⁾	4,468	1,169
Fe:P	26,485	7,400	Mg:S ⁽¹⁾	3,681	0,623	B:Mn ⁽²⁾	5,374	1,198
P:Mn ⁽³⁾	6,894	1,018	Zn:Mg	1,600	0,270	Cu:B ⁽²⁾	48,540	12,093
Cu:P ⁽¹⁾	23,988	5,921	Fe:Mg	3,569	0,520			
B:P	5,040	1,021	Mg:Mn ⁽³⁾	11,00	2,563			

⁽¹⁾ Relação multiplicada por 10. ⁽²⁾ Relação multiplicada por 100. ⁽³⁾ Relação multiplicada por 1000.

Valores obtidos da amostragem do terço médio das folhas +3 de cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado de Calheiros et al. (2018a).

O método CND tem sido utilizado em várias espécies agrícolas, mas ainda há poucos trabalhos com a cana-de-açúcar (Santos et al., 2013; Calheiros et al., 2018a; Santana et al., 2020; Silva et al., 2020b; Silva; Chiaia, 2021), embora esse método apresente maior facilidade matemática na obtenção dos índices de equilíbrio nutricional.

Em trabalho realizado por Calheiros et al. (2018a), foram estabelecidos padrões CND para cana-de-açúcar cultivada no estado de Alagoas (Tabela 6.14). Nesse estudo, além de se estabelecer os valores de referência, foi feita uma comparação entre os métodos DRIS e CND. Os

autores verificaram que o diagnóstico nutricional do método CND, interpretado pela Resposta Potencial de Adubação (PRA), foi diferente dos métodos DRIS somente para os nutrientes N e Mn. Nesse estudo, também foi verificado, com base nos índices nutricionais, que há uma adubação excessiva com N e deficiência de Ca, Mg, K, S, Mn, Cu, Zn e B, em cana-de-açúcar no nordeste do Brasil.

Em estudo semelhante ao realizado por Calheiros et al. (2018a), Silva e Chiaia (2021) compararam a interpretação do estado nutricional dos métodos DRIS e CND. No estudo, os autores

Tabela 6.13. Média e desvio-padrão (DP) das relações entre nutrientes selecionados como normas DRIS para cana-de-açúcar, obtidos pelo critério: relações nutricionais com maior razão de variância entre a população de baixa e alta produtividade e menor coeficiente de assimetria com normalização total dos dados.

Relação	Média	DP	Relação	Média	DP	Relação	Média	DP
N/P	10,695	2,250	K/Ca	7,027	1,404	Mg/Mn ⁽³⁾	3,569	2,562
K/N ⁽¹⁾	2,386	0,304	Mg/ K	3,612	0,534	Cu/Mg ⁽¹⁾	3,440	0,421
N/Ca	2,226	0,594	K/S	2,406	0,564	B/Mg	1,172	0,254
Mg/N	12,770	4,387	Zn/K ⁽¹⁾	2,093	0,155	Zn/S	4,544	1,074
N/S	5,653	1,337	Fe/K	1,303	0,195	Fe/S	1,141	0,257
Zn/N ⁽¹⁾	2,629	0,386	K/Mn	4,035	0,698	Mn/S	4,322	1,387
N/Fe ⁽¹⁾	447,407	150,037	Cu/K ⁽²⁾	88,422	28,670	Cu/S ⁽¹⁾	72,389	22,952
N/Mn ⁽²⁾	6,565	1,221	K/ B ⁽¹⁾	45,530	7,055	B/S	3,001	0,878
Cu/N ⁽¹⁾	12,281	1,847	Mg/Ca ⁽¹⁾	2,945	0,730	Fe/Zn ⁽¹⁾	9,087	1,654
N/B ⁽¹⁾	39,640	10,342	S/Ca ⁽²⁾	5,041	0,693	Zn/Mn ⁽¹⁾	2,027	0,580
P/K ⁽²⁾	3,100	0,187	Zn/Ca ⁽¹⁾	2,077	0,104	Zn/Cu ⁽¹⁾	2,367	0,138
P/Ca	1,468	0,317	Fe/Ca	2,232	0,265	B/Zn ⁽¹⁾	2,727	0,630
P/Mg	3,158	0,698	Ca/Mn ⁽³⁾	9,633	2,037	Fe/Mn ⁽¹⁾	4,657	1,278
P/S ⁽¹⁾	5,980	1,639	Cu/Ca ⁽¹⁾	3,621	0,634	Cu /Fe	18,891	6,512
P/Zn	33,058	5,591	B/Ca ⁽¹⁾	4,490	0,675	Fe/B	1,510	0,253
Fe/P	3,830	0,386	Mg/S ⁽¹⁾	3,681	0,623	Cu/Mn ⁽²⁾	4,469	1,169
P/Mn	5,894	1,018	Zn/Mg	1,600	0,270	B/Mn ⁽²⁾	5,374	1,198
Cu/P	14,555	3,153	Fe/Mg	3,569	0,520	B/Cu ⁽¹⁾	11,827	1,749
B/P	2,059	0,329						

⁽¹⁾ Relação multiplicada por 10. ⁽²⁾ Relação multiplicada por 100. ⁽³⁾ Relação multiplicada por 1000.

Valores obtidos da amostragem do terço médio das folhas +3 de cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado de Calheiros et al. (2018b).

verificaram muita discrepância entre os diagnósticos apresentados pelas metodologias, especialmente para os nutrientes N, Mg, B, Cu, Fe, Mn e Zn. Enquanto o DRIS indicava excesso ou equilíbrio nutricional, o CND apontava deficiência, sugerindo ser o método CND mais adequado para identificar situações de deficiência nutricional. Esses resultados demonstram a necessidade de se realizar um estudo mais aprofundado das técnicas para averiguar o motivo dessa distinção, já que na literatura e para a maioria das culturas, as diferenças entre os dois métodos são sutis.

Ainda nessa mesma linha de estudo, Silva et al. (2020b) avaliaram a qualidade do diagnóstico nutricional de P e testaram diferentes processos para definir a população de alta produtividade, das quais seriam estabelecidos os valores de referência. Eles observaram que as normas CND foram mais eficientes quando se utilizou a produtividade média das amostras (172 t ha⁻¹) para definir a população de referência do que quando se usou a fórmula de Beaufils (1973) para o cálculo da função DRIS.

Tabela 6.14. Média e desvio-padrão (DP) da relação multivariada entre os nutrientes (R) e da média geométrica dos constituintes da massa seca (MS), selecionados como padrões do Método da Composição Nutricional (CND) para cana-de-açúcar, no Nordeste do Brasil.

Relação multivariada ⁽¹⁾	Média	DP	Relação multivariada	Média	DP
MS	589.945	77.775	RS	0.722	0.299
RN	3.375	0.127	RZn	-3.625	0.244
RP	1.144	0.172	RFe	-2.525	0.209
RK	2.868	0.206	RMn	-3.469	0.568
Rca	1.852	0.265	RCu	-4.920	0.168
RMg	1.339	0.266	RB	-4.166	0.200

⁽¹⁾Relação multivariada (R) entre os nutrientes N (RN), P (RP), K (RK), Ca (Rca), Mg (RMg), S (RS), Zn(RZn), Fe (RFe), Cu (RCu) e B (RB).

Valores obtidos da amostragem do terço médio das folhas +3 de cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado de Calheiros et al. (2018a).

Interpretação dos índices nutricionais

A interpretação dos índices nutricionais por índices DRIS ou CND pode ser feita pela ordem de limitação nutricional, a qual indica desde o nutriente de maior limitação por insuficiência até aquele com maior limitação por excesso, e pelo sinal dos índices, onde valores negativos indicam insuficiência, valores positivos indicam excesso e valores nulos indicam equilíbrio nutricional.

Todavia, nem sempre o índice negativo (ou positivo) deverá ser classificado como em estado de deficiência (ou excesso), tendo em vista que quando os valores estão tendendo a nulo (se aproximando de zero) podem ser considerados como equilibrado. Assim, foram desenvolvidos critérios para distinguir, dentre os valores negativos e positivos, aqueles que efetivamente indicam insuficiência ou excesso e aqueles que indicam equilíbrio nutricional.

Um procedimento possível para separar os nutrientes limitantes daqueles não limitantes é o critério do Potencial de Resposta a Adubação – PRA (Wadt, 2005), que possibilita interpretar os índices DRIS e CND com sua comparação direta com o índice de balanço nutricional médio

(IBNm). O IBNm é um indicativo do estado nutricional global da lavoura com valores variando de zero (indicando maior equilíbrio nutricional) até valores positivos. Esse método tem sido largamente utilizado em várias culturas agrícolas e em laudos técnicos. O PRA, quando utilizado com o emprego de três classes, classifica cada nutriente no estado de equilibrado, deficiente e em excesso (Wadt, 2005):

- O nutriente está em equilíbrio quando o índice nutricional, em módulo, for menor ou igual ao IBNm.
- O nutriente é considerado deficiente, quando seu índice nutricional for negativo e, em módulo, maior que o IBNm.
- O nutriente está em excesso quando seu índice nutricional for positivo e, em módulo, maior que o IBNm.

Sistemas informatizados para a avaliação do estado nutricional das plantas

Os métodos de interpretação do estado nutricional são simples e diretos quando baseados nos métodos univariados, porém, mais trabalhosos

e complexos quando baseados nos sistemas DRIS e CND, requerendo a utilização de planilhas eletrônicas ou sistemas mais especializados.

Essa maior complexidade no uso dessas técnicas tem sido um dos fatores que limitam sua adoção pelos técnicos e produtores rurais. Visando tornar essas técnicas mais acessíveis, diversas iniciativas têm sido desenvolvidas, como manuais orientativos para o uso de planilhas eletrônicas (Traspadini et al., 2018), aplicativos de celulares (Sinimbu, 2019) e programas de computador (McCray et al., 2019).

Um exemplo do uso desses programas são os softwares CND desenvolvidos para diversas culturas, como para uva (Rozane et al., 2015), citros (Yamane et al., 2017), atemoia (Rozane et al., 2016); goiaba (Rozane et al., 2013), milho (Meneses et al., 2017) e tomate (Nowaki et al., 2017), disponíveis gratuitamente no site da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp)¹, ou como os sistemas DRIS e CND, disponíveis para soja (Ribeiro, 2018). Não há ainda nenhum software desenvolvido para a cana-de-açúcar.

Esses sistemas simplificam o acesso à tecnologia, são multiplataforma e de fácil acesso (Figura 6.2). Contudo, mesmo sendo de fácil utilização, é importante ressaltar que os referidos sistemas foram desenvolvidos a partir de base de dados de monitoramento nutricional dos respectivos cultivos agrícolas.

A interpretação dos resultados também é direta, sendo normalmente apresentado em gráficos de radar (Figura 6.3A) ou gráfico de barras (Figura 6.3B). No gráfico de radar, teores nutricionais dentro do perímetro circular indicam situação de insuficiência nutricional, enquanto valores fora

do perímetro indicam excesso nutricional. No gráfico de barras, valores em verde (positivos) representam excesso nutricional e valores em vermelho (negativos) indicam insuficiência nutricional.

O sistema desenvolvido para celulares pela Embrapa Meio Norte utiliza os mesmos critérios adotados pelo sistema índices CND, apresentado anteriormente, porém com a inovação de também introduzir os índices DRIS (Sinimbu, 2019) (Figura 6.4).

Alguns sistemas, além de apresentar os gráficos de barras e de radar, também realizam a interpretação dos dados dos índices DRIS ou dos índices CND, a exemplo da planilha da Embrapa Semiárido (Ribeiro, 2018) (Figura 6.5). Neste exemplo em particular, o gráfico de radar apresenta o grau de insuficiência nutricional, não destacando os valores considerados excessivos.

Contudo, um dos maiores gargalos na interpretação do estado nutricional de plantas é a incapacidade dos métodos em fornecer diagnósticos eficientes. O termo “diagnóstico eficiente” refere-se à habilidade do método em indicar diagnósticos verdadeiros do estado nutricional da planta e de modo hábil (Wadt et al., 2016).

Figura 6.2. Demonstração dos campos onde se deve inserir os valores obtidos da amostra para teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Na e Al, a ser realizado no software “CND Milho-doce”. Fonte: Meneses et al. (2017).

¹ Disponível em: <https://www.registro.unesp.br/#!/sites/cnd>

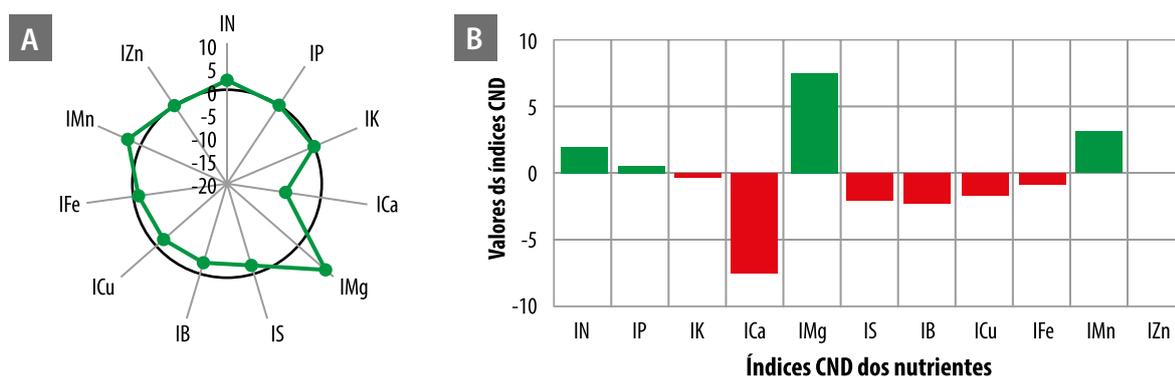


Figura 6.3. Representação gráfica dos índices nutricionais dados pelo método CND, por meio de gráfico de radar (A) e de barras (B), obtido na simulação de diagnóstico realizada no software “CND Milho-doce”.
 Fonte: Meneses et al. (2017).

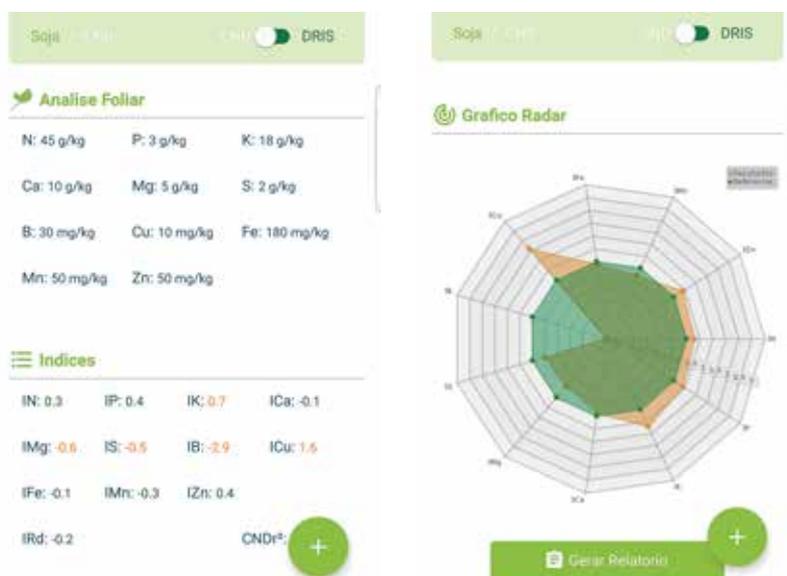


Figura 6.4. Demonstração do uso do aplicativo Soja – Meio-Norte.
 Fonte: Sinimbu (2019).

Teste de eficiência para os métodos de interpretação do estado nutricional

Atualmente, grande parte dos valores de referência publicados não são submetidos a testes de eficiência para estimar o grau de acertos dos diagnósticos nutricionais que deles são originados, apesar de haver comparações empíricas dos novos padrões nutricionais com valores de referência “clássicos” da literatura (Santos et al., 2013; Arain et al., 2017), ou com valores estabelecidos sob as mesmas condições de cultivo, por metodologias similares (Santos et al., 2013).

O desejável é que os valores de referência, bem como os métodos utilizados para defini-los, tenham sua eficiência comprovada com base no verdadeiro estado nutricional da planta (Silva et al., 2021). Para isso, é recomendável que seja utilizado, por exemplo, o método Análise da Previsão da Diagnose – APD (Beverly; Hallmark, 1992), que consiste em identificar a frequência de diagnósticos corretos (verdadeiros) e incorretos (falsos), pelo confronto entre o diagnóstico, dado pelo método de interpretação, com o verdadeiro estado nutricional da cultura (VEN). OVEN é definido com base na resposta produtiva da planta em consequência da aplicação do

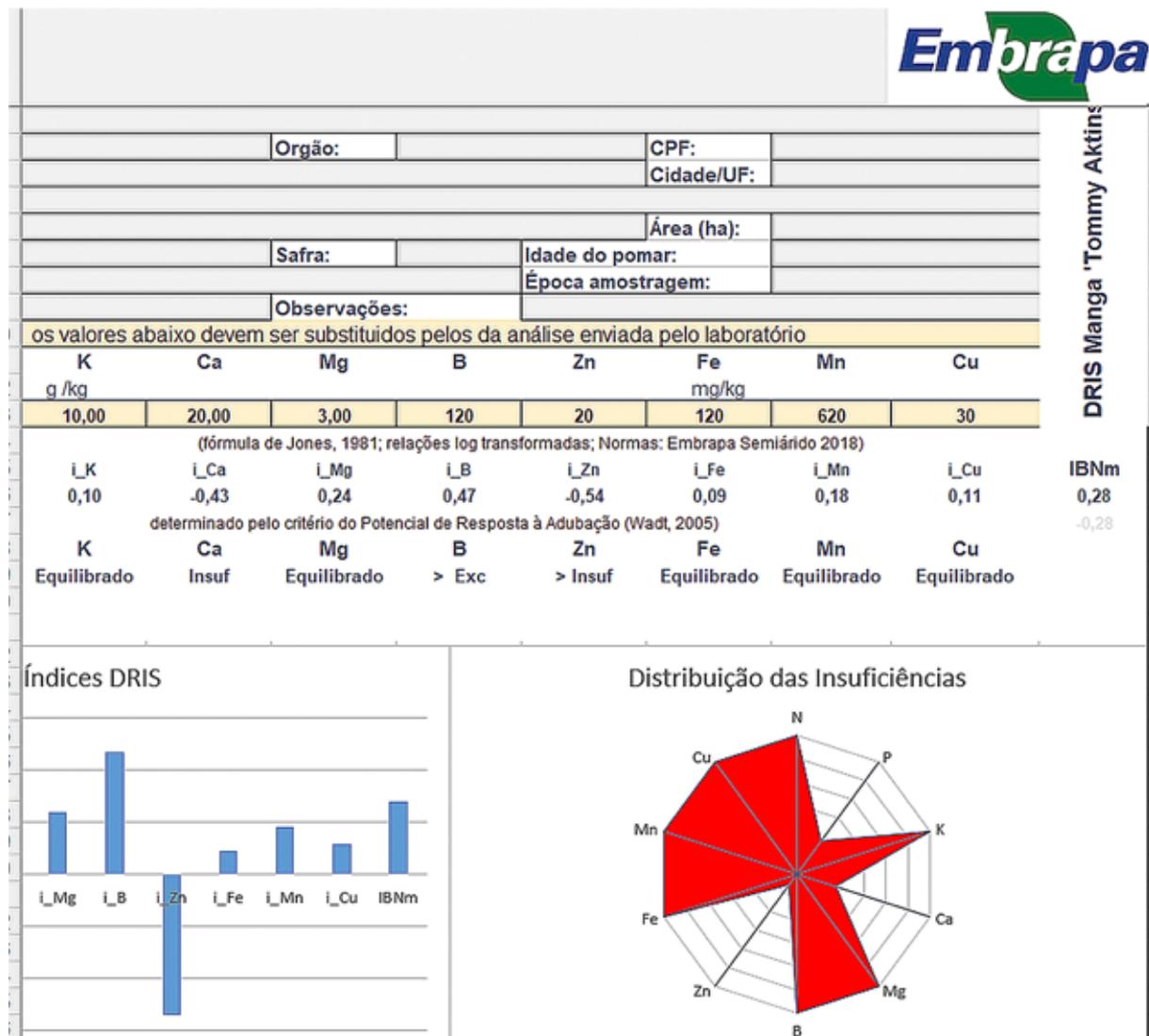


Figura 6.5. Demonstração do uso do aplicativo de planilha eletrônica para a determinação do estado nutricional.

Fonte: Ribeiro (2018).

nutriente em análise, enquanto os demais são mantidos constantes.

O uso do APD tem apresentado resultados relevantes no contexto geral da diagnose nutricional de plantas, pois demonstrou que a acurácia do método varia entre os nutrientes (Beverly, 1993b; Morais et al., 2019) e as culturas avaliadas (Beverly, 1993b); e que um mesmo método pode apresentar diferentes graus de acurácia em diferentes situações. Por exemplo, o método DRIS foi insatisfatório para a diagnose de N, P e K em soja (Beverly, 1993a), mas mostrou-se adequado para a diagnose de N e P em laranja (Beverly, 1992) e

para N e K, em bananeira (Teixeira et al., 2002). Assim, é indicado que os valores de referência estabelecidos, independentemente do método, da cultura e dos nutrientes, passem por um teste de acurácia antes da sua publicação.

Silva et al. (2020a) utilizaram o método APD para avaliar a qualidade do diagnóstico nutricional de P e testaram diferentes processos para definir o conjunto de dados usado para estabelecer os valores de referência para cana-de-açúcar, no estado de São Paulo. Os autores verificaram que a análise da acurácia dos diagnósticos nutricionais para o P identificou baixo desempenho de

todos os conjuntos de normas CND porém com melhor desempenho das normas derivadas de populações de referência de maior amplitude quanto à produtividade de colmos.

Outra metodologia desenvolvida para testar a eficiência dos métodos de interpretação com base no verdadeiro estado nutricional da planta é a proposta por Wadt e Lemos (2010). A vantagem de se utilizar este método é que ele apresenta o aumento médio de produtividade esperada e informa a eficiência em relação aos diferentes objetivos, ou seja, a identificação de cultivos deficientes, suficientes ou em níveis tóxicos para nutrientes, fornecendo informações não só para a escolha de determinado procedimento ou método, mas também para sua correção e aprimoramento (Wadt; Lemos, 2010; Silva et al., 2021).

Recentemente, Silva et al. (2020b) utilizaram as medidas de acurácia propostas por Wadt e Lemos (2010) para a modelagem de fórmulas DRIS em cana-de-açúcar, com base no estado nutricional de P. De acordo com os autores, a utilização de fatores de ajuste mais rigorosos e respostas de limite de produtividade mais rígidas pode gerar ganho, ou reduzir a perda de produtividade, ao adotar o método DRIS para avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar. Os autores verificaram que os critérios adotados não provocaram ganho na produtividade da cana-de-açúcar e que há necessidade de se realizar mais estudos a fim de ajustar o método DRIS para a avaliação do estado nutricional da cultura e, assim, aumentar os ganhos de produtividade.

Similarmente, Silva et al. (2020b) utilizaram as medidas de acurácia propostas por Wadt e Lemos (2010) para testar e definir o melhor critério de seleção da população de referência, usadas para estimar as normas DRIS, na cana-de-açúcar. Os resultados indicaram medidas de acurácia global abaixo de 50%, demonstrando que, a análise da acurácia dos diagnósticos nutricionais para P apresentou baixo desempenho em todos

os conjuntos de padrões de DRIS estudados. Contudo, o melhor desempenho ocorreu quando as normas DRIS foram obtidas da população de referência que apresentava produtividades acima do valor médio + 1.0 desvio-padrão, nas safras de 2013 e 2014, sendo este um dos meios que pode ser adotado para aumentar a eficiência na diagnose nutricional.

Considerações finais

A cultura da cana-de-açúcar tem se destacado por ter sido uma das principais culturas testadas com os métodos de diagnósticos baseados *Diagnosis and Recommendation Integrated System* (DRIS), tanto em nível mundial, no Havaí, como em nível local, no Brasil. A cana-de-açúcar é uma das poucas culturas a adotar técnicas mais avançadas de avaliação da qualidade dos diagnósticos nutricionais.

Existe uma grande variabilidade de métodos de interpretação do estado nutricional das culturas, e estes vêm sendo desenvolvidos para a cana-de-açúcar em diferentes regiões brasileiras, tanto para métodos univariados, como para os métodos mais complexos, como o DRIS e o *Compositional Nutrient Diagnosis* (CND), mas, é importante que os valores de referência passem por um teste de acurácia antes da sua publicação.

Os métodos convencionais, por sua vez, são importantes para o estudo de condições específicas de cultivo, mas têm a desvantagem de analisar os nutrientes isoladamente (univariados) e não considerarem a relação entre os nutrientes na interpretação. Essa limitação é superada pelos métodos DRIS (bivariado) e CND (multivariado), que adotam o conceito de balanço nutricional. Em conclusão, são necessários mais estudos para testar a eficiência dos métodos de interpretação e suas variáveis. Também é recomendado que seja averiguada a acurácia dos diagnósticos obtidos pelos

valores de referências previamente estabelecidos, independentemente da metodologia empregada.

Referências

- ABDEL-HADY, A. M. A. Evaluation of N, P and K status of wheat using the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) and the physiological diagnosis chart. *Egyptian Journal of Soil Science*, v. 55, n. 3, p. 231-250, Summer 2015. DOI: [10.21608/ejss.2015.614](https://doi.org/10.21608/ejss.2015.614).
- ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] CANA-DE-AÇÚCAR: safra 2021/2020: terceiro levantamento: v. 8, n. 3, p. 1-62, nov. 2021. Brasília, DF: Conab, 2022. 63 p. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/39835_2a34b37eec6ef5d4dac107978bb0103d. Acesso em: 22 fev. 2022.
- ANJOS, J. C. R. dos; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; BASTOS, E. A.; NOLETO, D. H.; MELO, F. de B.; BRITO, R. R. De. Water storage in a Plinthaqualf cultivated with sugarcane under straw levels. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 6, p. 464-473, June 2017. DOI: [10.1590/S0100-204X2017000600010](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600010).
- AQUINO, G. S. de; MEDINA, C. de C.; SHAHABA, M.; SANTIAGO, A. D.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; CARVALHO, J. B.; MOREIRA, A. Does straw mulch partial-removal from soil interfere in yield and industrial quality sugarcane? A long term study. *Industrial Crops & Products*, v. 111, p. 573-578, 2018. DOI: [10.1016/j.indcrop.2017.11.026](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.026).
- ARAIN, M. Y.; MEMON, K. S.; AKHTAR, M. S.; MEMON, M. Soil and plant nutrient status and spatial variability for sugarcane in lower Sindh (Pakistan). *Pakistan Journal of Botany*, v. 49, n. 2, p. 531-540, 2017. Disponível em: [https://pakbs.org/pjbot/PDFs/49\(2\)/20.pdf](https://pakbs.org/pjbot/PDFs/49(2)/20.pdf). Acesso em: 23 fev. 2022.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS E CORRETIVOS AGRÍCOLAS. *Anuário estatístico do setor de fertilizantes*. São Paulo: Anda, 2018.
- BAILEY, J. S.; BEATTIE, J. A. M.; KILPATRICK, D. J. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for diagnosing the nutrient status of grassland swards: I. Model establishment. *Plant and Soil*, v. 197, p. 127-135, 1997. DOI: [10.1023/A:1004236521744](https://doi.org/10.1023/A:1004236521744).
- BALDOCK, J. O.; SCHULTE, E. E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. *Agronomy Journal*, v. 88, n. 3, p. 448-456, May/June 1996. DOI: [10.2134/agronj1996.00021962008800030015x](https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800030015x).
- BATAGLIA, O. C.; SANTOS, W. R. dos. Efeito de procedimentos de cálculo e da população de referência nos índices do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 14, p. 339-344, 1990.
- BEAUFILS, E. R. *Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)*. Pietermaritzburg, [s.n.], 1973. 132 p. (Soil Science. Bulletin, 1)
- BEAUFILS, E. R.; SUMNER, M. E. Application of the DRIS approach for calibrating soil and plant their yield sugarcane. *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*, v. 50, p. 118-124, June 1976. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.381.7944&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- BEVERLY, R. B. DRIS diagnoses of soybean nitrogen, phosphorus, and potassium status are unsatisfactory. *Journal of plant nutrition*, v. 16, n. 8, p. 1431-1447, 1993a. DOI: [10.1080/01904169309364625](https://doi.org/10.1080/01904169309364625).
- BEVERLY, R. B. Prescient diagnostic analysis shows sufficiency range approach superior to DRIS for citrus. *Communications in soil science and plant analysis*, v. 23, n. 17-20, p. 2641-2649, 1992. DOI: [10.1080/00103629209368762](https://doi.org/10.1080/00103629209368762).
- BEVERLY, R. B. Re-evaluation reveals weaknesses of DRIS and sufficiency range diagnoses for wheat, corn and alfafa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 24, n. 5-6, p. 487-501, 1993b. DOI: [10.1080/00103629309368816](https://doi.org/10.1080/00103629309368816).
- BEVERLY, R. B.; HALLMALK, W. B. Prescient diagnostic analysis: a proposed new approach to evaluating plant nutrient diagnostic methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 23, n. 17-20, p. 2633-2640, 1992. DOI: [10.1080/00103629209368761](https://doi.org/10.1080/00103629209368761).
- BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B. de; OLIVEIRA, B. G. de; LA SCALA JUNIOR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, n. 2, p. 1-23, Apr. 2018a. DOI: [10.1007/s13593-018-0490-x](https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x).
- BORDONAL, R. de O.; MENANDRO, L. M. S.; BARBOSA, L. C.; LAL, R.; MILORI, D. M. B. P.; KOLLN, O. T.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Sugarcane yield and soil carbon response to straw removal in south-central Brazil. *Geoderma*, v. 328, p. 79-90, Oct. 2018b. DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.05.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.003).
- CALHEIROS, A. S.; OLIVEIRA, M. W. de; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. de S.; SANTIAGO, A. D.; ARISTIDES, E. V. dos S. Produção de biomassa, de açúcar e de proteína em função de variedades de cana e de adubação fosfatada. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 33, n. 2, p. 809-817, abr. 2012. DOI: [10.5433/1679-0359.2012v33n2p809](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n2p809).
- CALHEIROS, L. C.; FREIRE, F. J.; MOURA FILHO, G.; OLIVEIRA, E. C.; MOURA, A. B.; COSTA, J. V.; CRUZ, F. J. R.; SANTOS, Á. S.; REZENDE, J. S. Assessment of nutrient balance in sugarcane using DRIS and CND methods.

- Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 9, p. 164-179, 2018a. DOI: [10.5539/jas.v10n9p164](https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p164).
- CALHEIROS, L. C. da; FREIRE, F. J.; MOURA FILHO, G.; OLIVEIRA, E. C. A. de; MOURA, A. B.; COSTA, J. V. T. da; CRUZ, F. J. R.; SANTOS, A. S. Different criteria for determining DRIS standards influencing the nutritional diagnosis and potential fertilization response of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 6, p. 995-1007, 2018b. DOI: [10.21475/ajcs.18.12.06.PNE1147](https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.06.PNE1147).
- CARDOZO, N. P.; BORDONAL, R. de O.; LA SCALA JÚNIOR, N. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 861-871, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.09.004](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004).
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. de O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Chang. Biology Bioenergy** v. 9, n. 7, p. 1181-1195, July 2017. DOI: [10.1111/gcbb.12410](https://doi.org/10.1111/gcbb.12410).
- ELWALI, A. M. O.; GASCHO, G. J. Soil testing, foliar analysis, and DRIS as guide for sugarcane fertilization. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 3, p. 466-470, May/June 1984. DOI: [10.2134/agronj1984.00021962007600030024x](https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600030024x).
- FACHINELLI, N. P.; PEREIRA JÚNIOR, A. O. Impacts of sugarcane ethanol production in the Paranaíba basin water resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 8-16, Dec. 2015. DOI: [10.1016/j.biombioe.2015.08.015](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.015).
- FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 1, p. 88-96, jan. 2013a. DOI: [10.1590/S0100-204X2013000100012](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000100012).
- FORTES, C.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of nitrogen from sugarcane harvest residues and urea for crop nutrition. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 313-320, Oct. 2013b. DOI: [10.1590/S0103-90162013000500005](https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500005).
- GALÍNDEZ, A. A. S.; CRUZ, J. G.; ZÉREGA, L.; RODRÍGUEZ, O. A. R.; OLIVEIRA, S. A. de; PÉREZ, V. de J. R. Normas preliminares DRIS desarrolladas para caña de azúcar a partir de un bajo número de muestras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1700-1706, dez. 2009. DOI: [10.1590/S0100-204X2009001200020](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200020).
- GOPALASUNDARAM, P.; BHASKARAN, A.; RAKKIYAPPAN, P. Integrated nutrient management in sugarcane. **Sugar Tech**, v. 14, n. 1, p. 3-20, Mar. 2012. DOI: [10.1007/s12355-011-0097-x](https://doi.org/10.1007/s12355-011-0097-x).
- GOTT, R. M.; AQUINO, L. A.; CLEMENTE, J. M.; SANTOS, L. P. D. dos; CARVALHO, A. M. X.; XAVIER, F. O. Foliar diagnosis indexes for corn by the methods diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) and nutritional composition (CND). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 1, p. 11-19, 2017. DOI: [10.1080/00103624.2016.1253714](https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1253714).
- GUIMARÃES, F. C. N. **Normas DRIS e diagnóstico nutricional de cana-soca na região sul de Goiás**. 2014. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.
- HALLMARK, W. B.; WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E.; MOOY, C. J. de; PESEK, J.; SHAO, K. P. Separating limiting from non-limiting nutrients. **Journal of Plant Nutrition**, v. 10, n. 9-16, p. 1381-1390, 1987.
- JONES, C. A. Proposed modifications of the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for interpreting plant analyses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 2, n. 8, p.785-794, 1981. DOI: [10.1080/00103628109367194](https://doi.org/10.1080/00103628109367194).
- KUMAR, A.; BABAR, L.; MOHAN, N.; BANSAL, S. K. Effect of potassium application on yield, nutrient uptake and quality of sugarcane and soil health. **Indian Journal of Fertilizers**, v. 15, n. 7, p. 782-786, July 2019.
- KURIHARA, C. H.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. de; STAUT, L. A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 412-419, June 2013. DOI: [10.1590/S0034-737X2013000300015](https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000300015).
- LEAL, M. R. L. V.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E. A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 11-19, June 2013. DOI: [10.1016/j.biombioe.2013.03.007](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007).
- LIRA, R. M. de.; SILVA, Ê. F. de F. e; SILVA, G. F. da; SOUZA, D. H. de; PEDROSA, E. M.; GORDIN, L. C. Content, extraction and export of nutrients in sugarcane under salinity and leaching fraction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 6, p. 432-438, June 2019. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p432-438](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p432-438).
- LIRA, R. M. de; SILVA, Ê. F. de F. e; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; LIMA, B. L. de C.; SILVA, J. S. da. Growth and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching fractions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 170-175, mar. 2018. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v22n3p170-175](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n3p170-175).
- LISBOA, I. P.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; BARROS, P. P. S.; FIORIO, P. R.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Prediction of sugarcane yield based on NDVI and concentration of leaf-tissue nutrients in fields managed with straw removal. **Agronomia**, v. 8, n. 9, p. 196, 2018. DOI: [10.3390/agronomy8090196](https://doi.org/10.3390/agronomy8090196).

- MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M. de. Nível crítico pelo critério da distribuição normal reduzida: uma nova proposta para interpretação de análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 235-238, maio 2001. DOI: [10.1590/S1415-43662001000200010](https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000200010).
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631 p.
- MCCRAY, J. M.; NEWMAN, P. R.; RICE, R. W.; EZENWA, I. V. **Sugarcane leaf tissue sample preparation for diagnostic analysis**. University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, 2018. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/SC/SC07600.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- MCCRAY, J. M.; RICE, R. W.; EZENWA, I. V.; LANG, T. A.; BAUCUM, L. **Sugarcane plant nutrient diagnosis**. University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, 2019. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/SC/SC07500.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- MEENA, B. S.; RAM, B.; NAROLIA, R. D. S.; SINGH, P. Yield, quality, nutrient uptake and economics of spring sugarcane (*Saccharum officinarum*) as influenced by balanced fertilization in clay loam soils of Rajasthan. **Indian Journal of Agronomy**, v. 60, n. 3, p. 457-463, Sept. 2015.
- MENESES, N. B.; CECÍLIO FILHO, A. B.; ROZANE, D. E.; NATALE, W.; NOWAKI, R. H. D.; YAMANE, D. R.; PARENT, L. E. **CND Milho-doce (*Zea mays* convar. *Saccharata* var. *rugose*)**. Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho". Registro, 2017. Disponível em: https://web.registro.unesp.br/sites/cnd_milho_doce. Acesso em: 23 fev. 2022.
- MEYER, J. H. Advances in the interpretation of foliar analysis of sugarcane in the South African Sugar Industry. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**. v. 49, p. 129-136, June/July 1975. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.381.6469&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- MISHRA, A. K.; SHUKLA, S. K.; YADAV, D. V.; AWASTHI, S. K. Iron, manganese and sulphur uptake and nutrients availability in sugarcane based system in subtropical India. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 300-310, Sept. 2014. DOI: [10.1007/s12355-013-0269-y](https://doi.org/10.1007/s12355-013-0269-y).
- MODA, L. R.; PRADO, R. de M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S.; SILVA, E. C. da; FLORES, R. A. Effect of sources and rates of phosphorus associated with filter cake on sugarcane nutrition and yield. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 6, p. 477-485, 2015.
- MORAIS, T. C. B. de; PRADO, R. de M.; TRASPADINI, E. I. F.; WADT, P. G. S.; PAULA, R. C. de; ROCHA, A. M. S. Efficiency of the CL, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus* spp. rooted cuttings. **Forests**, v. 10, n. 9, p. 1-18, Sept. 2019. DOI: [10.3390/f10090786](https://doi.org/10.3390/f10090786).
- MOSTASHARI, M.; KHOSRAVINEJAD, A.; GOLMOHAMMADI, M. Comparative study of DOP and CND methods for leaf nutritional diagnosis of *Vitis Vinifera* in Iran. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 5, p. 576-584, 2018. DOI: [10.1080/00103624.2018.1432633](https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1432633).
- MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W. de; MOURA, A. B.; SANTOS, A. C. I. dos; OLIVEIRA FILHO, M. dos S.; SILVA, L. C. da. Diagnose nutricional de variedades de cana-de-açúcar em argissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 1102-1109, 2014, Nov. 2014. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1102-1109](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1102-1109).
- NOWAKI, R. H. D.; CECÍLIO FILHO, A. B.; ROZANE, D. E.; NATALE, W.; MENESES, N. B.; YAMANE, D. R.; PARENT, L. E. **CND-Tomate para indústria (*Solanum lycopersicum*)**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Registro, 2017. Disponível em: https://web.registro.unesp.br/sites/cnd_tomate. Acesso em: 22 fev. 2022.
- OLIVEIRA, E. C. A. de; GAVA, G. J. de C.; TRIVELIN, P. C. O.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 5, p. 712-723, Oct. 2013. DOI: [10.1002/jpln.201200133](https://doi.org/10.1002/jpln.201200133).
- OLIVEIRA, M. G. de.; PARTELLI, F. L.; CAVALCANTI A. C.; GONTIJO, I.; VIEIRA, H. D. Soil patterns and foliar standards for two cocoa clones in the States of Espírito Santo and Bahia, Brazil. **Ciência Rural**, v. 49, n. 10, p. 10, 2019. DOI: [10.1590/0103-8478cr20180686](https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180686).
- OLIVEIRA, R. I. de; MEDEIROS, M. R. F. A. de; FREIRE, C. S.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, E. C. A. de. Nutrient partitioning and nutritional requirement in sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 1, p. 69-75, 2016.
- ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutricao e adubacao da cana-de-acucar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1983. 368 p. (Coleção Planalsucar, 2).
- PAREDES JUNIOR, F. P.; PORTILHO, I. I. R.; MERCANTE, F. M. Atributos microbiológicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 1, p. 151-164, 2015.
- PARENT, L. E.; DAFIR, M. A Theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal American Society Horticultural Science**, v. 117, n. 2, p. 239-242, 1992. DOI: [10.21273/JASHS.117.2.239](https://doi.org/10.21273/JASHS.117.2.239).
- PÍPERAS, G. V.; CRESTE, J. E.; ECHER, F. R. Uso do DRIS na avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 56, n. 6, p. 818-825, nov./dez. 2009.
- PRADO, R. de M. CAIONE, G. Plant analysis. In: ISSAKA, R. N. (ed.). **Soil Fertility**. Rijeka: InTech, 2012. p. 115-134. DOI: [10.5772/53388](https://doi.org/10.5772/53388).
- PRADO, R. de M. **Mineral nutrition of tropical plants**. Switzerland: Springer Nature, 2021. 339 p.

- RAIJ, B. van.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- REIS JÚNIOR, R. A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 367-372, Jun. 2002a. DOI: [10.1590/S0100-06832002000200010](https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200010).
- REIS JÚNIOR, R. dos A.; MONNERAT, P. H. Sugarcane nutritional diagnosis with DRIS norms established in Brazil, South Africa, and the United States. **Journal of Plant Nutrition**, v. 25, n. 12, p. 2831-2851, 2002b. DOI: [10.1081/PLN-120015542](https://doi.org/10.1081/PLN-120015542).
- RIBEIRO, M. Planilha eletrônica determina equilíbrio nutricional em mangueiras 'Tommy Atkins'. **Notícias**, 26 dez. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/40305004/planilha-eletronica-determina-equilibrio-nutricional-em-mangueiras-tommy-atkins>. Acesso em: 22 fev. 2022.
- RODRÍGUEZ, O.; RODRÍGUEZ, V. Desarrollo, determinación e interpretación de normas DRIS para el diagnóstico nutricional en plantas. Una revisión. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 17, n. 6, p. 449-470, 2000.
- ROZANE, D. E.; BRUNETTO, G.; MELO, G. W. B.; NATALE, W.; PARENT, L. E.; PARENT, S. E.; SANTOS, E. M. H. dos. **CND-UVA (*Vitis vinifera* L.)**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Registro, 2015. Disponível em: https://web.registro.unesp.br/sites/cnd_uva. Acesso em: 22 fev. 2022.
- ROZANE, D. E.; NATALE, W.; PARENT, L. E.; PARENT, S. E.; SANTOS, E. M. H. dos. **CND-Goiaba**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Registro, 2013. Disponível em: https://web.registro.unesp.br/sites/cnd_goiaba. Acesso em: 22 fev. 2022.
- ROZANE, D. E.; SANTOS, E. M. H. dos; NATALE, W.; GOCHO, S.; LEITÃO, L. C. C.; PARENT, L. E. **CND-Atemoia (*Annona cherimola* Mill x *Annona squamosa* L.)**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Registro, 2016. Disponível em: https://web.registro.unesp.br/sites/cnd_atemoia. Acesso em: 22 fev. 2022.
- RÚZ-BELLO A.; CAJUSTE, L. J. Controlling fertilizer applications through plant analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 15-18, p. 2793-2802, 2002. DOI: [10.1081/CSS-120014481](https://doi.org/10.1081/CSS-120014481).
- SANTANA, A. C. de A.; OLIVEIRA, E. C. A. de; SILVA, V. S. G. da; SANTOS, R. L. dos; SILVA, M. A. da; FREIRE, F. J. Critical nitrogen dilution curves and productivity assessments for plant cane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 244-251, 2020, Apr. 2020. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p244-251](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p244-251).
- SANTOS, E. F. dos; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M. de; LAVRES JUNIOR, J.; CAMACHO, M. A. Normal nutrient ranges for sugarcane by the methods ChM, DRIS and CND and critical level by reduced normal distribution. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1651-1658, Dec. 2013. DOI: [10.1590/S0100-06832013000600021](https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600021).
- SANYAL, S. K.; MAJUMDAR, K.; SINGH, V. K. Nutrient management in Indian agriculture with special reference to nutrient mining - a relook. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 62, n. 4, p. 307-325, 2014.
- SATIRO, L. S.; CHERUBIN, M. R.; SAFANELLI, J. L.; LISBOA, I. P.; ROCHA JÚNIOR, P. R. da; CERRI, C. E. E.; CERRI, C. C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, v. 11, p. 86-95, Dec. 2017. DOI: [10.1016/j.geodrs.2017.10.005](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.10.005).
- SAVITA, S.; KRISHNAPPA, R.; NGANGOM, B.; DEVI, M. T.; MISHRA, G.; RAWAT, D.; SRIVASTAVA, P. C. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) approach on nutritional diagnosis in fruit crops- a review. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 8, n. 4, p. 2337-2345, 2016. DOI: [10.31018/jans.v8i4.1134](https://doi.org/10.31018/jans.v8i4.1134).
- SILVA, G. P. da; CHIAIA, H. L. J. Limitation due to nutritional deficiency and excess in sugarcane using the integral Diagnosis and Recommendation System (DRIS) and Nutritional Composition Diagnosis (CND). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 12, p. 1458-1467, 2021. DOI: [10.1080/00103624.2021.1885690](https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1885690).
- SILVA, G. P. da; PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S.; MODA, L. R.; CAIONE, G. Accuracy of nutritional diagnostics for phosphorus considering five standards by the method of diagnosing nutritional composition in sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 10, p. 1485-1497, 2020a. DOI: [10.1080/01904167.2020.1730902](https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730902).
- SILVA, G. P. da; PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S.; SILVA, F. C. da; VAZ, G. J.; MODA, L. R.; CAIONE, G. Accuracy measures for phosphorus in assessing the nutritional status of sugarcane using the comprehensive integrated Diagnosis and Recommendation System (DRIS). **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 9, p. 1287-1299, 2020b. DOI: [10.1080/01904167.2020.1849299](https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1849299).
- SILVA, G. P. da; PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S.; SILVA, F. C. da; VAZ, G. J.; MODA, L. R.; CAIONE, G. Modeling formulas of the comprehensive Diagnosis and Recommendation System (DRIS) for phosphorus in sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 9, p. 1316-1329, 2021. DOI: [10.1080/01904167.2020.1862192](https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1862192).
- SILVA, M. de A.; CAPUTO M. M. Ripening and the use of ripeners for better sugarcane management. In: MARIN, F. R. (ed.). **Crop management: cases and tools for higher yield and sustainability**. Rijeka: InTech, 2012. p. 3-24. DOI: [10.5772/28958](https://doi.org/10.5772/28958).
- SILVA, S. R. V. da. **Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) na cana-de-açúcar**. 2018. 13 f.

Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife

SILVA, V. S. G. da; OLIVEIRA, M. W. de; OLIVEIRA, D. C. de; OLIVEIRA, T. B. A.; PEREIRA, M. G.; NOGUEIRA, C. H. de C. Nutritional diagnosis of sugarcane varieties in a Yellow Oxisol during three agricultural seasons. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 1, p. 50-57, Jan. 2017. DOI: [10.5897/AJAR2016.1186](https://doi.org/10.5897/AJAR2016.1186).

SINIMBU, F. Aplicativo calcula em segundos as necessidades nutricionais da lavoura de soja. **Notícias**, 21 maio 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/43412777/aplicativo-calcula-em-segundos-as-necessidades-nutricionais-da-lavoura-de-soja>. Acesso em: 22 fev. 2022.

SIQUEIRA, G. F. de. **Aplicação de boro e maturadores na pré-colheita da cana-de-açúcar em início e final de safra**. 2004. 139 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu.

TEIXEIRA, L. A. J.; SANTOS, W. R. dos; BATAGLIA, O. C. Diagnose nutricional para nitrogênio e potássio em bananeira por meio do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) e de níveis críticos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 2, p. 530-535, Ago. 2002. DOI: [10.1590/S0100-29452002000200050](https://doi.org/10.1590/S0100-29452002000200050).

TRASPADINI, E. I. F. **Qualidade dos prognósticos do estado nutricional de boro na cultura da soja**. 2016. 49 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

TRASPADINI, E. I. F.; PRADO, R. M. de; VAZ, G.; SILVA, F. C. da; MANCINI, A. L.; SILVA, G. P. da; SANTOS, E. H. dos; WADT, P. G. S. **Guia prático para aplicação do método da diagnose da composição nutricional (CND): exemplo de uso na cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2018. 30 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Documentos, 160). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1103108>. Acesso em: 21 fev. 2022.

VALIM, W. C.; PANACHUKI, E.; PAVEI, D. S.; ALVES SOBRINHO, T.; ALMEIDA, W. S. Effect of sugarcane waste in the control of interrill erosion. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 3, p. 1155-1164, 2016. DOI: [10.5433/1679-0359.2016v37n3p11](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p11).

VASCONCELOS, R. de L.; PRADO, R. de M.; CAMPOS, C. N. S.; CAIONE, G.; ALMEIDA, H. J. de; MODA, L. R.; MELLO, F. T.; DELA MARTA, C. C. Sources of phosphorus with sugar cane filter cake on the nutritional status and productivity of sugar cane (*Saccharum officinarum* L) cultivated in red-

yellow latosol. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 11, p. 1467-1474, 2014.

WADT, P. G. S. Relationships between soil class and nutritional status of coffee plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 227-234, Apr. 2005. DOI: [10.1590/S0100-06832005000200008](https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200008).

WADT, P. G. S.; ALVAREZ V, V. H.; NOVAIS, R. F.; FONSECA, S.; BARROS, N. F. O método da chance matemática na interpretação de dados de levantamento nutricional de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 773-778, 1998. DOI: [10.1590/S0100-06831998000400023](https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400023).

WADT, P. G. S.; ANGHINONI, I.; GUINDANI, R. H. P.; LIMA, A. S. T. de; PUGA, A. P.; SILVA, G. S. da; PRADO, R. de M. Padrões nutricionais para lavouras arrozais irrigadas por inundação pelos métodos da CND e Chance Matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 145-156, jan./fev. 2013.

WADT, P. G. S.; LEMOS, C. de O. Medidas de acurácia para diagnósticos nutricionais e seu impacto no manejo das adubações. In: PRADO, R. de M.; CECÍLIO FILHO, A. B.; CORREIA, M. A. R.; PUGA, A. P. (ed.). **Nutrição de plantas: diagnose foliar em hortaliças Jaboticabal**: Unesp: Genplant, 2010. 10, p. 1-14.

WADT, P. G. S.; TRASPADINI, E. I. F.; MARTINS, R. A.; MELLO, F. de B.; OLIVEIRA, I. J. de; RODRIGUES, J. E. L. F.; BASTOS, E. A.; ARAÚJO, S. M. B. Medidas de acurácia na qualificação dos diagnósticos nutricionais: teoria e prática. In: PRADO, R. de M.; CECÍLIO FILHO, A. B. (org.). **Nutrição e adubação de hortaliças**. Jaboticabal: FCAV/ Capes, 2016. p. 373- 391.

YAMANE, D. R.; ROZANE, D. E.; NATALE, W.; CECÍLIO FILHO, A. B.; NOWAKI, R. H. D.; MENESES, N. B.; PARENT, L. E. **CND-C-ítrus (*Citrus spp.*)**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Registro, 2017. Disponível em: https://web.registro.unesp.br/sites/cnd_citros. Acesso em: 22 fev. 2022.

ZAMBELLO JÚNIOR, E.; HAAG, H. P.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação do sistema integrado de diagnose e recomendação para diferentes solos e épocas de amostragem foliar em soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, v. 37, n. 1, p. 241-289, 1980. DOI: [10.1590/S0071-12761980000100016](https://doi.org/10.1590/S0071-12761980000100016).

ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) aplicado a cana-planta com e sem irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, 1., 1979, Maceió. **Anais... Maceió: Stab**, 1979. v. 2, p. 353-356.

Uso de silício em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar

Gelza Carliane Marques Teixeira | Antônio Márcio Souza Rocha | Renato de Mello Prado

Introdução

A produção global de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) aumentou por causa de sua importância como fonte de energia renovável (Matsuoka, 2017). Nos cultivos, a cana-de-açúcar é comumente exposta às condições de restrições ambientais, como a escassez de água, que é o principal fator abiótico causador de perdas de produtividade na cultura (Basnayake et al., 2012). Os efeitos são mais intensos quando essa escassez ocorre durante os estágios iniciais de desenvolvimento (Machado et al., 2009) e quando são utilizadas mudas obtidas pelo sistema de mudas pré-brotadas (MPB) (Martins et al., 2015).

O sistema MPB consiste na individualização das gemas do colmo da cana-de-açúcar e o seu plantio em um tubete para prévia brotação ao transplântio no campo (Landell et al., 2012). A adoção dessa técnica tem permitido a redução do volume de colmos gasto por hectare; o aumento da taxa de multiplicação, da sanidade das mudas e da uniformidade do plantio; bem como o aumento na operacionalidade do plantio (Gírio et al., 2015).

As mudas são transplantadas já com área foliar e sem as reservas de nutrientes e água advindas do colmo, o que agrava a sensibilidade à seca de mudas recém-transplantadas no campo (Martins et al., 2015). Esse aspecto ganha importância pelo fato de grande parte do plantio das MPB ocorrer em épocas do ano com baixa regularidade hídrica. Assim, a busca por estratégias de manejo que visem reduzir as perdas

no transplântio, como a nutrição com silício (Si), pode ser eficiente para suprimir falhas no campo, com reflexos na menor variação da produtividade e no aumento da vida útil do canavial.

O suprimento de Si promove efeitos benéficos ao desenvolvimento das plantas, aumentando a tolerância aos danos causados pelo déficit hídrico. Isso ocorre porque o elemento mantém o conteúdo de água no tecido foliar, previne a degradação de pigmentos fotossintéticos (Bokhtiar et al., 2012), ajusta o conteúdo de osmólitos compatíveis (Gong et al., 2005) e o potencial hídrico foliar (Amin et al., 2014), bem como aumenta a eficiência de uso de nutrientes estruturais (Teixeira et al., 2020a). Esses efeitos somados propiciam maior estabilidade da produção de biomassa (Camargo et al., 2019).

O fornecimento de Si em MPB é possível via solução nutritiva (radicular) e por pulverização foliar, pois as mudas são produzidas em biofábricas e a nutrição ocorre, predominantemente, por fertirrigação (Landell et al., 2012). Em pulverizações foliares, tem-se a opção da fonte silicatada de potássio, que é a mais empregada na adubação foliar e utilizada para compor a solução nutritiva em diversas culturas. No entanto, existe a necessidade de buscar fontes alternativas mais eficientes para aplicações de Si via foliar.

Desse modo, há trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Unesp (Genplant) com o intuito de avaliar qual a fonte de Si via pulverização foliar pode promover maior acúmulo do elemento

em relação ao silicato de potássio, bem como se o Si pode mitigar déficit hídrico em MPB de cana-de-açúcar após o transplântio e qual a melhor forma de fornecimento do elemento para obtenção dos efeitos benéficos.

Uso de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo a cultura considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis, por causa do grande uso na produção de etanol e seus subprodutos (Matsuoka, 2017). A produção sucroalcooleira do Brasil é favorecida tanto pelas características potenciais à produção de energia da cultura quanto pela existência de grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis.

As áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar, sobretudo as localizadas no estado de São Paulo, têm utilizado o sistema de produção de mudas pré-brotadas (MPB) para a reforma dos canaviais. As MPB são produzidas em núcleos específicos de produção a partir da individualização de gemas plantadas em tubetes contendo substrato. Durante a fase de formação das mudas, tem-se um alto rigor nutricional, com os nutrientes fornecidos geralmente via fertirrigação ou pulverizações foliares (Teixeira et al., 2020a).

O uso de MPB tem permitido a redução do volume gasto de colmos por hectare pelo aumento da taxa de multiplicação. Estima-se que seja necessária a utilização de apenas 1 t de colmos para produzir mudas suficientes para o plantio de 1 ha de área. Isso representa um aumento de até 19 t na quantidade de colmos destinada à produção de açúcar e/ou etanol, considerando que o sistema convencional utiliza em média 20 t ha⁻¹ de colmo (Xavier et al., 2014).

A diminuição da quantidade de colmo também permite maior rigor no manejo sanitário, formando-se mudas de maior qualidade e vigor vegetativo, possibilitando a obtenção de um canavial mais sadio e uniforme (Santos et al., 2020b). Além disso, tem-se maior operacionalidade durante o plantio, reduzindo o tráfego de máquinas, a compactação do solo e os custos com a prática agrícola (Gírio et al., 2015).

Contudo, ainda existem alguns fatores que podem comprometer a eficiência na utilização dessa técnica, especialmente os relacionados à disponibilidade hídrica. A escassez de água no transplântio das mudas para o campo e durante a fase inicial de desenvolvimento pode comprometer o rendimento e vigor vegetativo da cultura. A sensibilidade das MPB na fase de transplântio é ainda mais intensa porque as plantas são levadas ao campo já com área foliar, transpiração ativa, e, diferente do sistema convencional, a reversa enérgica fornecida pelo colmo é removida (Landell et al., 2012).

Essa limitação aliada aos cenários futuros das mudanças climáticas, pode comprometer a viabilidade de utilização dessa técnica se não houver um fortalecimento nutricional das mudas produzidas. Desse modo, a utilização de estratégias que visem reduzir as perdas na fase subsequente ao transplântio das mudas ao campo pode ser eficiente para o aumento do uso de MPB, aumentando-se a produtividade e a vida útil do canavial, a partir da atenuação dos efeitos causados pela deficiência hídrica.

Silício na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico

O Si é considerado um elemento benéfico e pode ser encontrado no solo na forma de ácido monossilícico ou ácido ortossilícico [Si(OH)₄], Si adsorvido com óxidos ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês

(Mn), sílica oriunda da decomposição da matéria orgânica (formas amorfas), ou ainda como Si estrutural em minerais de silicatos (Korndörfer et al., 2002). O elemento é absorvido pela planta na forma de ácido monossilícico, sendo essa forma encontrada geralmente em baixas concentrações (1 mM a 2,0 mM) (Epstein, 2009).

O Si pode mitigar os danos causados pelo déficit hídrico nas plantas, por atuar em processos fisiológicos, como na manutenção do potencial hídrico foliar (Amin et al., 2014); no ajuste de osmólitos compatíveis e redução do estresse oxidativo (Gong et al., 2005); na preservação de pigmentos fotossintéticos (Bokhtiar et al., 2012); bem como no aumento da eficiência de uso da água (Ming et al., 2012). Além disso, associado aos efeitos no metabolismo nutricional por aumentar a eficiência de uso de nutrientes estruturais como o carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) (Teixeira et al., 2020a). Esses efeitos melhoram o crescimento das plantas sob déficit hídrico, aumentando o diâmetro do caule e o acúmulo de biomassa (Camargo et al., 2017, 2019; Teixeira et al., 2020b).

As gramíneas, como a cana-de-açúcar, são consideradas acumuladoras por possuírem transportadores específicos, que atuam na absorção e no transporte de Si das raízes para a parte aérea (Mitani et al., 2009).

Dessa forma, acredita-se que a nutrição com Si seja capaz de promover fortificação em MPB, conferindo resistência às condições de déficit hídrico, sobretudo na fase inicial de desenvolvimento da cultura.

O fornecimento de Si em MPB pode ser realizado via fertirrigação ou por pulverização foliar. Para aumentar a viabilidade do uso de Si nos viveiros de produção, busca-se avaliar a eficiência de aplicação de fontes solúveis com maior estabilidade em baixas concentrações, reduzindo as perdas por polimerização e aumentando, assim, a quantidade de Si absorvida pela planta.

Pulverização foliar de silício em mudas pré-brotadas

O Si em solução pode iniciar sua polimerização a partir da concentração de 3 mmol L⁻¹ (Birchall, 1995), formando-se dímeros, trímeros e cadeias poliméricas de Si (McKeague; Cline, 1963), que não são absorvidas pelas plantas. Portanto, concentrações baixas de Si devem manter sua forma monomérica, podendo beneficiar a planta com maior absorção do elemento pelas folhas. Para aumentar a quantidade de Si absorvida, é importante aumentar a frequência das pulverizações do elemento durante o desenvolvimento da planta e utilizar uma fonte adequada.

A fonte de Si mais utilizada para o fornecimento via pulverização foliar, em diferentes espécies, é o silicato de potássio (Zanão Júnior et al., 2009; Santos et al., 2020a), que possui forma líquida, solúvel e não contém estabilizante. No entanto, por causa do alto risco de polimerização do Si em solução e para ampliar as respostas da cana-de-açúcar à pulverização foliar, é importante avançar em estudos com fontes alternativas com maior estabilidade.

Para isso, têm surgido inovações com fontes solúveis, como o silicato de sódio e potássio estabilizado com polióis (sorbitol) e o ácido monossilícico com estabilizante PEG 400. Esses estabilizantes apresentam propriedades umectantes que aumentam a permanência da gota na superfície foliar (Babiker; Duncan, 1974; D'Souza; Shegokar, 2016) e, por isso, além de diminuir a velocidade de polimerização do Si, podem aumentar sua absorção por prolongar o tempo de contato da gota com a superfície foliar.

Uma forma de aumentar a concentração de espécies monoméricas de Si, na solução da calda, é utilizar a fonte ácido monossilícico ou as fontes solúveis (silicato de potássio ou silicato de sódio e potássio) diluídas (Santos et al., 2020a)

e diminuir o valor de pH para abaixo de 6,0 (Kudryavtsev; Figovsky, 2016). Além disso, tem-se a opção da nanossílica de dispersão coloidal em escala nanométrica, estando o elemento na forma de óxido de silício, portanto, fonte não solúvel (Felisberto et al., 2020). Existem estudos específicos indicando os benefícios de pulverização foliar da nanossílica (Wang et al., 2015; Felisberto et al., 2020) e do ácido monossilícico (Laane, 2017; Santos et al., 2020a). Essas fontes podem favorecer a absorção e o acúmulo do elemento por suas propriedades específicas, porém, os resultados apresentados neste capítulo descrevem efeitos inéditos do uso dessas fontes em MPB de cana-de-açúcar.

Diante disso, foi avaliado se as fontes alternativas de Si têm desempenho semelhante ou superior ao silicato de potássio, a fonte padrão utilizada. Ainda, se o emprego do Si na forma de ácido monossilícico estabilizado, por estar na forma prontamente disponível, tem melhor desempenho em pulverização foliar em mudas de cana-de-açúcar, em relação às demais fontes.

Além da melhor fonte, é importante conhecer a concentração adequada do Si na calda para a pulverização. Portanto, o desempenho ótimo de uma determinada fonte deve propiciar a menor taxa de polimerização em uma concentração que possa favorecer o acúmulo do elemento na planta suficiente para induzir melhorias em seu crescimento e no acúmulo de massa seca.

Respostas da utilização de silício em mudas pré-brotadas

Diante da falta de informação sobre o tema, surgiram algumas hipóteses: o Si fornecido às MPB teria um efeito residual efetivo quando elas forem transplantadas em solo com deficit hídrico; há uma melhor fonte, concentração e forma de fornecer o Si para as mudas, se por via solução

nutritiva para nutrir as raízes ou se poderia ser realizado apenas via pulverização foliar.

Para atender a esses questionamentos, o Genplant tem desenvolvido estudos com o objetivo de determinar a fonte e a concentração que poderiam aumentar o acúmulo de Si e a produção de massa seca na fase de formação de MPB; bem como avaliar se esse acúmulo prévio do elemento em relação ao fornecimento de Si via solução nutritiva poderia mitigar os danos causados pelo deficit hídrico aos 30 dias após o transplantio ao solo.

Para atingir esses objetivos, o estudo foi desenvolvido em duas etapas. Primeiramente, foram avaliados o incremento no acúmulo de Si e a massa seca da parte aérea em concentrações baixas de Si, sendo determinada qual a fonte e a concentração promotoras de maior acúmulo de biomassa. Posteriormente, foi avaliado se o fornecimento de Si na fase de produção das MPB poderia mitigar os danos causados pelo deficit hídrico após o transplantio e se haveria diferença entre o fornecimento por pulverização foliar e solução nutritiva (via radicular).

Assim, foram avaliados os efeitos das fontes de Si: nanossílica Bindizil, ácido monossilícico estabilizado com PEG-400, silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol e o silicato de potássio — padrão, na fase de formação das MPB. O fornecimento foi realizado via pulverização foliar em baixas concentrações (cinco pulverizações, aos 10, 14, 18, 22 e 26 dias após a brotação). O maior acúmulo de Si foi observado quando se utilizaram as fontes ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 e silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, sendo de 39,45 e 34,10 mg por planta, nas concentrações de 2,07 e 2,97 mmol L⁻¹, respectivamente. Com a fonte silicato de potássio, o acúmulo foi crescente em função das concentrações, com o máximo de 26,04 mg por planta, em 4,0 mmol L⁻¹ (Figura 7.1A).

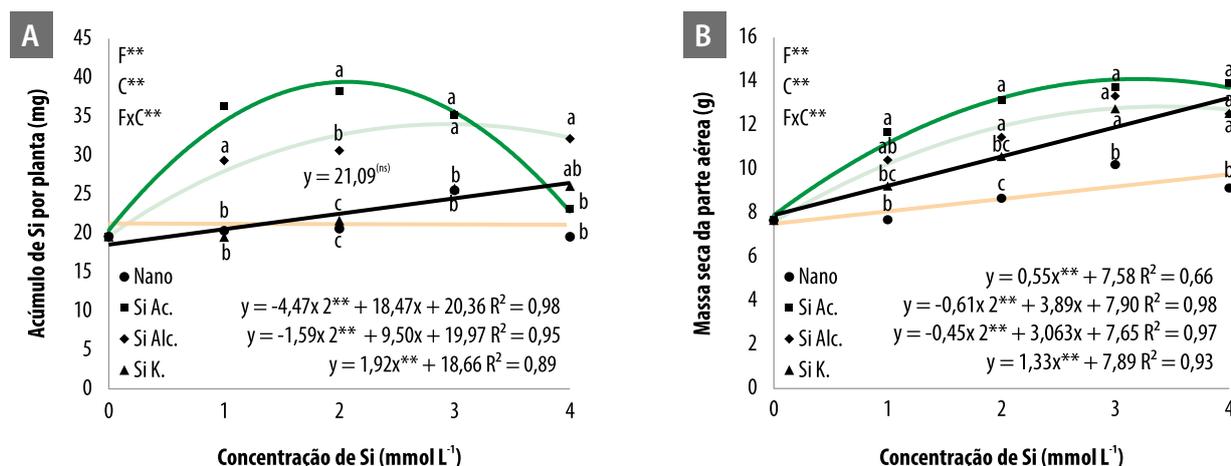


Figura 7.1. Acúmulo de Si na parte aérea (A) e massa seca da parte aérea (B) em mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar sob fontes (F): nanossilício (Nano); ácido monossilícico estabilizado PEG-400 (Si Ac.); silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Si Alc.), e silicato de potássio (Si K.) e concentrações (C): 0; 1; 2; 3 e 4 mmol L⁻¹ de Si aplicado via pulverização foliar. FxC: interação entre fontes (F) e concentrações (C). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre fontes, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. (*), (**), e (ns): representam o nível de significância do Teste F e dos parâmetros da regressão, sendo a 5 e 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

A pulverização foliar foi suficiente para incrementar a absorção do elemento pelas plantas de cana-de-açúcar na fase de formação das mudas, especialmente com emprego das fontes ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 e silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (Figura 7.1A). Isso ocorre por causa da ação dos estabilizantes com propriedades umectantes que aumentam a permanência da gota na superfície foliar (Babiker; Duncan, 1974; D’Souza; Shegokar, 2016), diminuindo a velocidade de polimerização do Si e favorecendo a sua absorção por prolongar o tempo de contato da gota com a superfície foliar.

As baixas concentrações aliadas à alta frequência de aplicação (a cada 4 dias) também beneficiaram a absorção de Si, pois a polimerização somente se inicia em solução com concentração de Si acima de 3 mmol L⁻¹ (Birchall, 1995). Desse modo, é possível afirmar que grande parte do elemento que teve contato direto com a folha na aplicação foliar tenha sido absorvida pela parte aérea, pela baixa polimerização do produto.

O aumento no acúmulo de Si promoveu aumento na massa seca da parte aérea, com ajuste quadrático para as fontes ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 e silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, com pontos de máximo em 14,11 e 12,87 g em 3,19 e 3,40 mmol L⁻¹, respectivamente. As plantas que receberam aplicação das fontes silicato de potássio e nanossilício responderam de forma linear com maior acúmulo de 12,54 e 9,14 g, respectivamente (Figura 7.1B).

As fontes de ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 e silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol apresentaram maiores valores de massa seca nas menores concentrações (1 e 2 mmol L⁻¹), sendo semelhantes entre si. Em maiores concentrações (3 e 4 mmol L⁻¹), essas fontes proporcionaram incrementos de massa iguais aos observados em plantas que receberam pulverizações com o silicato de potássio (Figura 7.1B).

No entanto, como a fonte silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol é mais estável, dada a presença do estabilizante sorbitol,

conclui-se que é a fonte mais recomendada para uso nas pulverizações foliares, utilizando-se a concentração de $3,4 \text{ mmol L}^{-1}$. Assim, pode-se afirmar que a pulverização foliar de Si, na fase de formação de MPB de cana-de-açúcar, promove aumento no crescimento, permitindo obter mudas de melhor qualidade, o que poderá levar às plantas mais tolerância a estresses na ocasião do transplântio para campo.

A partir desses dados, realizou-se um experimento para avaliar se o Si fornecido às MPB tem efeito residual no alívio dos danos causados pelo déficit hídrico após o transplântio; bem como, para definir a melhor forma de aplicação, se por solução nutritiva ou por pulverização foliar. Utilizou-se a fonte silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol na concentração de 2 e $3,4 \text{ mmol L}^{-1}$, via solução nutritiva e pulverização foliar, respectivamente. A concentração de 2 mmol L^{-1} foi utilizada para o fornecimento via solução nutritiva porque é a dose comumente utilizada sob essas condições (Teixeira et al., 2020b).

As mudas que receberam Si durante a fase de formação e após o transplântio foram submetidas a níveis de déficit hídrico (ausência, déficit moderado e déficit severo, com 70, 50 e 30% da capacidade de retenção de água, respectivamente), durante 30 dias, que corresponde à fase de maior sensibilidade hídrica após o transplântio (Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5).

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação de Si, nas duas formas de fornecimento, foi eficiente para aumentar o acúmulo do elemento na parte aérea em todos os níveis de água do solo (Figura 7.2). O maior acúmulo de Si nas plantas que receberam o elemento via solução nutritiva em relação à pulverização foliar, independentemente dos níveis de água no solo, pode ser justificado pelo fornecimento de Si ter sido contínuo durante toda a fase de produção das mudas. Soma-se a isso, o fato de que

gramíneas apresentam alto acúmulo de Si, pois possuem transportadores específicos na absorção ativa de Si pelas raízes, contribuindo para a absorção de grandes quantidades do elemento por essas plantas (Mitani et al., 2009).

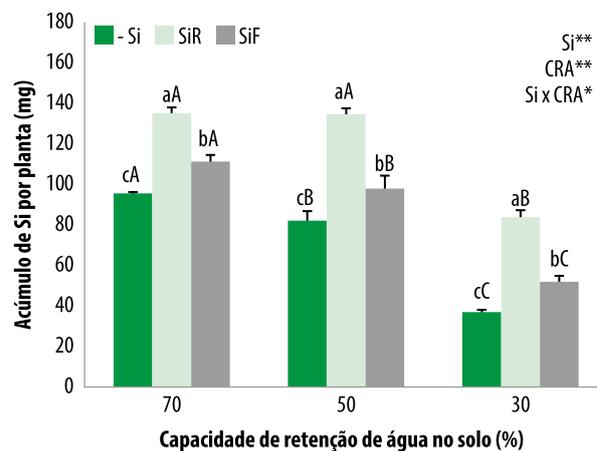


Figura 7.2. Acúmulo de silício (Si) na parte aérea de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70, 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (-Si: sem Si; SiR: Si radicular; SiF: Si foliar). Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação à CRA. Si x CRA: interação entre Si e CRA. (*) e (**): representam o nível de significância do Teste F, sendo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2020b).

No entanto, também houve acréscimo na absorção de Si pelas plantas com a pulverização foliar do elemento em relação a plantas sem Si (Figura 7.2). Isso ocorreu provavelmente por causa da qualidade da calda pulverizada nas folhas, tendo possível baixa taxa de polimerização dada à concentração de Si utilizada ($3,4 \text{ mmol L}^{-1}$) e à presença de estabilizante (sorbitol), contribuindo para garantir incremento da absorção do elemento pelas folhas das MPB.

A menor disponibilidade de água no solo, na ausência de Si, reduziu a altura das plantas. No entanto, a presença de Si aumentou a altura das plantas em déficit hídrico moderado e severo com o Si fornecido via solução nutritiva, e apenas

em deficit hídrico severo com a pulverização foliar (Figura 7.3A).

Em plantas que não receberam Si na fase de produção de mudas, o diâmetro do colmo foi reduzido com o aumento da restrição de água no solo, sendo esse efeito mais acentuado na condição de deficit hídrico severo (30% CRA). Em deficit hídrico severo, o fornecimento de Si, em ambas as formas de aplicação, aumentou o diâmetro do colmo em relação ao controle (-Si) (Figura 7.3B).

Houve diminuição do perfilhamento da planta com o aumento da restrição hídrica. A presença do Si incrementou o número de perfilhos

apenas em plantas sob deficit hídrico severo, com ganhos de 60 e 51% com o fornecimento via solução nutritiva e por pulverização foliar, respectivamente, em relação às plantas que não receberam Si previamente ao transplanto (Figura 7.2C).

O conteúdo relativo de água em plantas não fertilizadas com Si em deficit hídrico severo diminuiu em relação à condição de água adequada. Com o fornecimento de Si, por via solução nutritiva ou por pulverização foliar em deficit hídrico severo, a quantidade de água foi maior em relação ao controle (-Si), sendo inclusive igual ao tratamento sem deficit hídrico (Figura 7.3D).

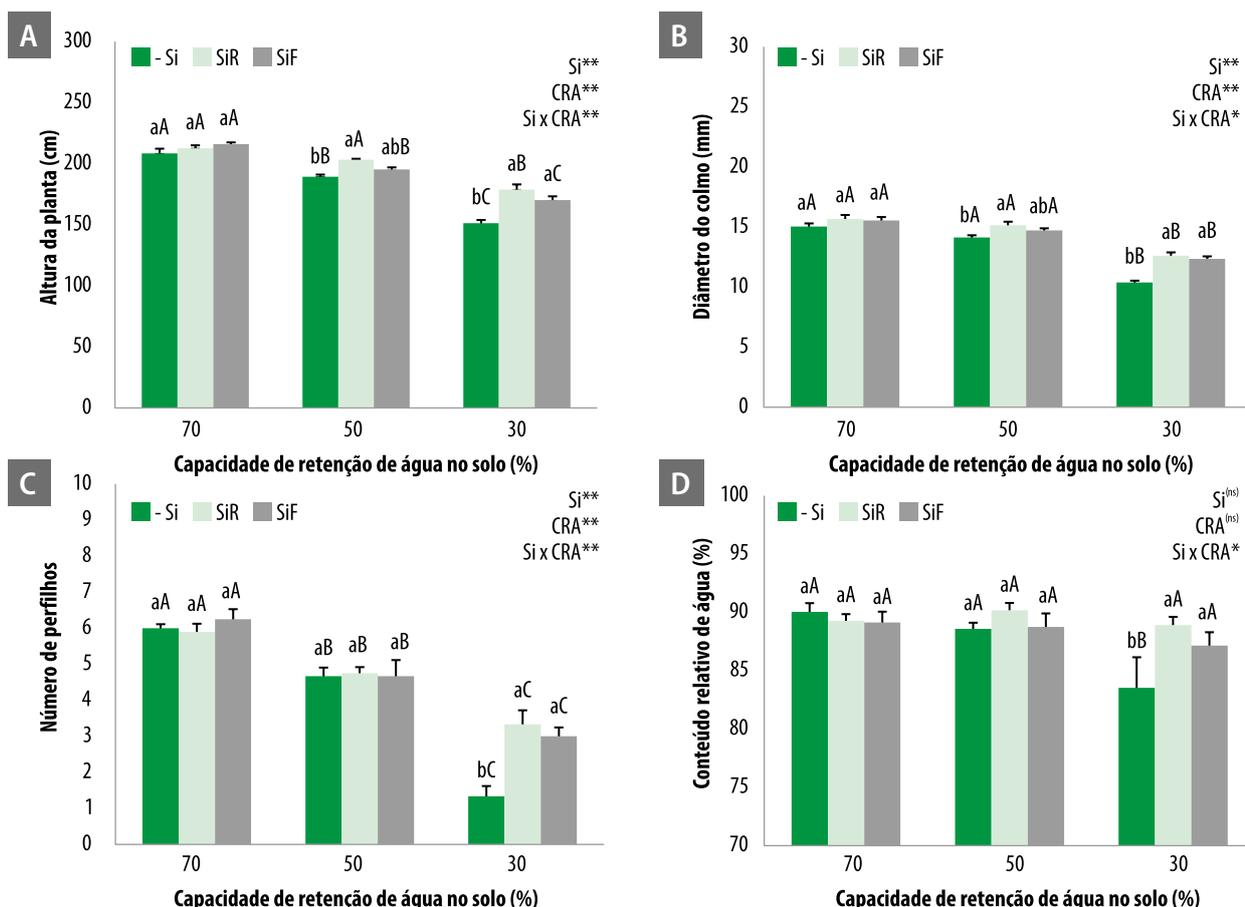


Figura 7.3. Altura da planta (A), diâmetro do colmo (B), número de perfilhos (C) e conteúdo relativo de água (D) de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70, 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (-Si: sem Si; SiR: Si radicular; SiF: Si foliar). Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação à CRA. Si x CRA: interação entre Si e CRA. (*), (**) e (ns): representam o nível de significância do Teste F, sendo a 5 e 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2020b).

O efeito mitigador do Si nos danos provocados pelo déficit hídrico da planta ao aumentar o conteúdo de água foliar em déficit hídrico severo pode ter ocorrido pela maior proteção na atividade de proteínas que contribuem na absorção de água, como as aquaporinas (Vandeleur et al., 2009), aumentando a quantidade de água, tanto pela facilidade de absorção quanto pela diminuição das perdas (Liu et al., 2014, 2015).

Na condição de déficit hídrico moderado (50% CRA), houve o maior desempenho do Si, especialmente fornecido via solução nutritiva, conseguindo manter o diâmetro do colmo (Figura 7.3B), a altura da planta (Figura 7.3A), a massa seca da parte aérea (Figura 7.4A) e da planta inteira (Figura 7.4C) semelhante às plantas sem estresse (70% CRA), fato que não ocorreu em estresse hídrico severo. Isso indica a importância

do Si na melhoria das variáveis de crescimento da planta fornecido via solução nutritiva para MPB em condição de estresse moderado em relação ao estresse severo.

Plantas que não receberam Si na fase de produção de mudas apresentaram diminuição da massa seca da parte aérea e da planta inteira, em função do aumento do déficit hídrico, sobretudo em déficit hídrico severo (30% CRA) (Figuras 7.4A e 7.4C), sendo possível de ser observada essa massa seca visualmente no crescimento das plantas que não receberam Si (-Si) (Figura 7.5).

O déficit hídrico severo e moderado, nas mudas sem Si, diminuiu em 47 e 21% a massa da planta inteira respectivamente, em relação às plantas sem déficit hídrico (Figura 7.5C). Tanto em déficit hídrico moderado quanto em severo, a presença do Si contribuiu para manutenção da massa

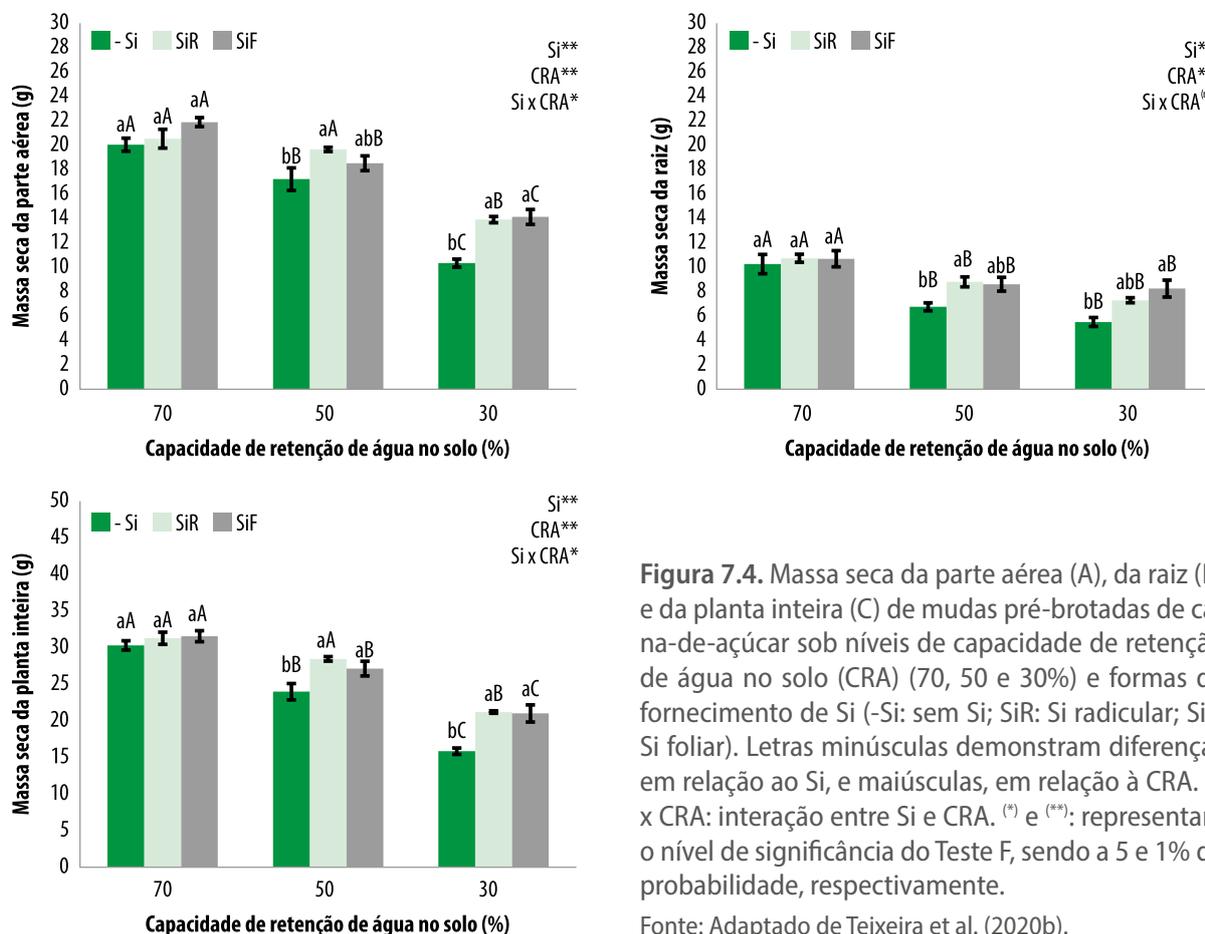
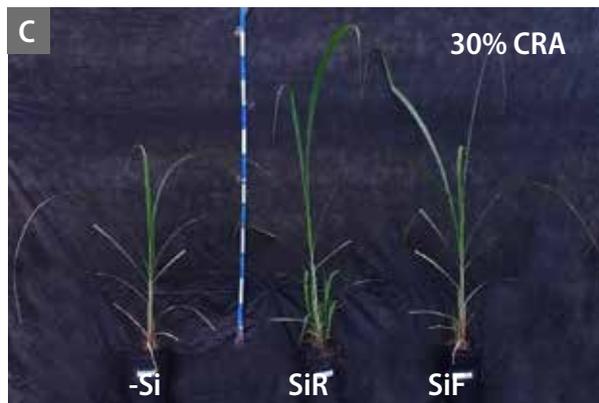
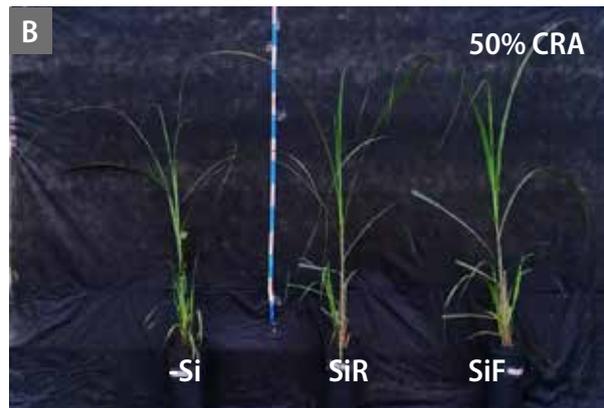
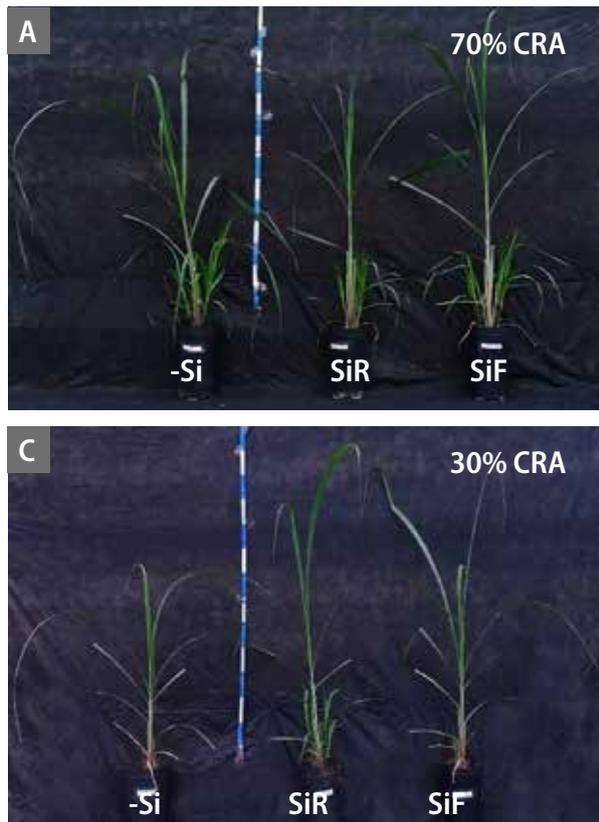


Figura 7.4. Massa seca da parte aérea (A), da raiz (B) e da planta inteira (C) de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) (70, 50 e 30%) e formas de fornecimento de Si (-Si: sem Si; SiR: Si radicular; SiF: Si foliar). Letras minúsculas demonstram diferenças em relação ao Si, e maiúsculas, em relação à CRA. Si x CRA: interação entre Si e CRA. (*) e (**): representam o nível de significância do Teste F, sendo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2020b).



Fotos: Gelza Carlilane Marques Teixeira

Figura 7.5. Fotos das plantas ilustrando o crescimento após transplântio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar sob diferentes formas de fornecimento de Si (-Si: sem Si; SiR: Si radicular; SiF: Si foliar) e 70% de capacidade de retenção de água (CRA) (A); 50% de CRA (B); 30% de CRA (C).

Imagens originalmente cedidas por Teixeira et al. (2020b).

seca da parte aérea, das raízes e planta inteira. E mesmo havendo redução no acúmulo de massa seca na condição de 30% de CRA, a presença do Si fornecido por via solução nutritiva ou por pulverizações foliares foi suficiente para mitigar os danos causados pelo déficit hídrico e reduzir as perdas no acúmulo de biomassa (Figura 7.5).

Apesar de o acúmulo de Si obtido pela pulverização foliar ter sido menor que o obtido por via solução nutritiva, o efeito do elemento em condição de déficit hídrico severo foi semelhante em ambas as formas de aplicação verificado nas variáveis de crescimento (Figura 7.3) e de massa seca (Figura 7.4). Esse efeito pode ser justificado pelo fato de que a pulverização foliar de Si foi eficiente para garantir aumento do seu acúmulo na parte aérea da planta e conseqüentemente o seu efeito mitigador (Ma et al., 2011), dada a alta frequência das aplicações foliares e com concentração adequada do elemento.

Considerações finais

As fontes de ácido monossilícico estabilizado com PEG-400 e silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol são fontes alternativas de silício promissoras para pulverização foliar na produção de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar.

O emprego do silício na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol na solução nutritiva para absorção radicular ou em pulverização foliar durante a formação das MPB é importante para atenuar problemas hídricos nos cultivos durante o seu estabelecimento inicial da cultura. Diante da expansão mundial do uso de MPB ou sistemas similares nos cultivos de cana-de-açúcar, esses resultados devem contribuir para fortalecimento dessa tecnologia nos campos de produção da cana-de-açúcar.

Referências

AMIN, M.; AHMAD, R.; BASRA, S. M. A.; MURTAZA, G. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.) under water deficit. *Pakistan Journal of Agricultural Science*, v. 51, n. 1, p. 187-196, Mar. 2014.

- BABIKER, A. G. T.; DUNCAN, H. J. Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, v. 14, n. 6, p. 375-378, Dec. 1974. DOI: [10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x).
- BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A.; INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments: genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 16, p. 6023-6033, Oct. 2012. DOI: [10.1093/jxb/ers251](https://doi.org/10.1093/jxb/ers251).
- BIRCHALL, J. D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, v. 24, n. 5, p. 351-357, 1995. DOI: [10.1039/CS9952400351](https://doi.org/10.1039/CS9952400351).
- BOKHTIAR, S. M.; HUANG, H. R.; LI, Y. R.; DALVI, V. A. Effects of silicon on yield contributing parameters and its accumulation in abaxial epidermis of sugarcane leaf blades using energy dispersive x-ray analysis. **Journal of Plant Nutrition**, v. 35, n. 8, p. 1255-1275, 2012. DOI: [10.1080/01904167.2012.676379](https://doi.org/10.1080/01904167.2012.676379).
- CAMARGO, M. S. de; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 1, p. 81-91, Mar. 2019. DOI: [10.1007/s42729-019-0012-1](https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1).
- CAMARGO, M. S. de; BEZERRA, B. K. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. L. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 1, p. 99-111, Mar. 2017. DOI: [10.4067/S0718-95162017005000008](https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008).
- D'SOUZA, A. A.; SHEGOKAR, R. Polyethylene glycol (PEG): a versatile polymer for pharmaceutical applications. **Expert Opinion on Drug Delivery**, v. 13, n. 9, p. 1257-1275, 2016. DOI: [10.1080/17425247.2016.1182485](https://doi.org/10.1080/17425247.2016.1182485).
- EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, v. 155, n. 2, p. 155-160, 2009. DOI: [10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x).
- FELISBERTO, G.; PRADO, R. de M.; OLIVEIRA, R. L. L. de; FELISBERTO, P. A. de C. Are nanosilica, potassium silicate and new soluble sources of silicon effective for silicon foliar application to soybean and rice plants? **Silicon**, v. 13, n. 9, p. 3217-3228, Sept. 2020. DOI: [10.1007/s12633-020-00668-y](https://doi.org/10.1007/s12633-020-00668-y).
- GÍRIO, L. A. da S.; DIAS, F. L. F.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S.; SCHULTZ, N.; BOLONHEZI, D.; MUTTON, M. A. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 33-43, Jan. 2015. DOI: [10.1590/S0100-204X2015000100004](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100004).
- GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, n. 2, p. 313-321, Aug. 2005. DOI: [10.1016/j.plantsci.2005.02.023](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023).
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **STAB**, v. 21, n. 2, p. 34-37, nov./dez. 2002.
- KUDRYAVTSEV, P. G.; FIGOVSKY, O. L. Nanocomposite organomineral hybrid materials: part I. **Nanotechnologies in Construction: a scientific internet journal**, v. 8, n. 1, p. 16-56, 2016. DOI: [10.15828/2075-8545-2016-8-1-16-56](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-1-16-56).
- LAANE, H. M. The effects of the application of foliar sprays with stabilized silicic acid: an overview of the results from 2003-2014. **Silicon**, v. 9, n. 6, p. 803-807, Nov. 2017. DOI: [10.1007/s12633-016-9466-0](https://doi.org/10.1007/s12633-016-9466-0).
- LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A. dos; DINARDO-MIRANDA, L. L.; SCARPARI, M. S.; GARCIA, J. C.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, D. N. da; MENDONÇA, J. R. de; KANTHACK, R. A. D.; CAMPOS, M. F. de; BRANCALIÃO, S. R.; PETRI, R. H.; MIGUEL, P. E. M. **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2012. 16 p. (Documentos IAC, 109).
- LIU, P.; YIN, L.; DENG, X.; WANG, S.; TANAKA, K.; ZHANG, S. Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in Sorghum bicolor L. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 17, p. 4747-4756, Sept. 2014. DOI: [10.1093/jxb/eru220](https://doi.org/10.1093/jxb/eru220).
- LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in Sorghum bicolor. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 42-51, Mar. 2015. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.10.006).
- MA, J. F.; YAMAJI, N.; MITANI-UENO, N. Transport of silicone from roots to panicles in plants. **Proceedings of the Japan Academy: series B: physical and biological sciences**, v. 87, n. 7, p. 377-385, July 2011. DOI: [10.2183/pjab.87.377](https://doi.org/10.2183/pjab.87.377).
- MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. de A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, Dec. 2009. DOI: [10.1590/S0100-204X2009001200003](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003).
- MARTINS, A. P. C.; ALBRECHT, L. P.; CASTALDO, J.; CARNEIRO, A. R.; ZUCARELI, V. Novas tecnologias no

- plântio de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, p. 301-317, 2015. Número especial.
- MATSUOKA, S. Free fiber level drives resilience and hybrid vigor in energy cane. **Journal of Scientific Achievements**, v. 2, n. 1, p. 1-35, 2017.
- MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in the soil. **Advances in Agronomy**, v. 15, p. 339-396, 1963. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60403-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60403-4).
- MING, D. F.; PEI, Z. F.; NAEEM, M. S.; GONG, H. J.; ZHOU, W. J. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crops Science**, v. 198, n. 1, p. 14-26, Feb. 2012. DOI: [10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x).
- MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, n. 1, p. 5-12, Jan. 2009. DOI: [10.1093/pcp/pcn110](https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110).
- SANTOS, L. C. N. dos; TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. de M. P.; ROCHA, A. M. R.; PINTO, R. C. dos S. Response of pre-sprouted sugarcane seedlings to foliar spraying of potassium silicate, sodium and potassium silicate, nanosilica and monosilicic acid. **Sugar Tech**, v. 22, n. 5, p. 773-781, Oct. 2020a. DOI: [10.1007/s12355-020-00833-y](https://doi.org/10.1007/s12355-020-00833-y).
- SANTOS, L. S.; BRAGA, N. C. C.; RODRIGUES, T. M.; RUBIO NETO, A.; BRITO, M. F.; SEVERIANO, E. da C. Pre-sprouted seedlings of sugarcane using sugarcane industry by-products as substrate. **Sugar Tech**, v. 22, n. 4, p. 675-685, Aug. 2020b. DOI: [10.1007/s12355-020-00798-y](https://doi.org/10.1007/s12355-020-00798-y).
- TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. de M.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. de C. Root- and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **Plos One**, v. 15, n. 20, p. 1-24, Oct. 2020a. DOI: [10.1371/journal.pone.0240847](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847).
- TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. de M.; ROCHA, A. M. S.; SANTOS, L. C. N. dos; SARAH, M. N. dos S.; GRATÃO, P. L.; FERNANDES, C. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 849-859, Sept. 2020b. DOI: [10.1007/s42729-019-00170-4](https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4).
- VANDELEUR, R. K.; MAYO, G.; SHELDEN, M. C.; GILLIHAM, M.; KAISER, B. N.; TYERMAN, S. D. The role of plasma membrane intrinsic protein aquaporins in water transport through roots: diurnal and drought stress responses reveal different strategies between isohydric and anisohydric cultivars of grapevine. **Plant Physiology**, v. 149, n. 1, p. 445-460, Jan. 2009. DOI: [10.1104/pp.108.128645](https://doi.org/10.1104/pp.108.128645).
- WANG, S.; WANG, F.; GAO, S. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 4, p. 2837-2845, Feb. 2015. DOI: [10.1007/s11356-014-3525-0](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3525-0).
- XAVIER, M. A.; LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; MENDONÇA, J. R. de; DINAROD-MIRANDA, L. L.; SCARPARI, M. S.; GARCIA, J. C.; ANJOS, I. A. dos; AZANIA, C. A. M.; BRANCALIAO, S. R.; KANTHACK, R. A. D.; AFERRI, G.; SILVA, D. N. da; BIPÓIA, M. A. P.; CAMPOS, M. F. de; PERRUCCO, D.; MATSUO, R. S.; NEVES, J. C. T.; CASSANELI JUNIOR, J. R.; PERRUCCO, L.; PETRI, R. H.; SILVA, T. N. da; SILVA, V. H. P. da; THOMAZINHO JUNIOR, J. R.; MIGUEL, P. E. M.; LORENZATO, C. M. **Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotação IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar - Mudas Pré-Brotadas (MPB)**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2014. 22 p. (Documentos IAC, 113).
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; FONTES, R. L. F.; ÁVILA, V. T. de. Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 22, p. 203-206, 2009. DOI: [10.1590/S0100-204X2009000200013](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000200013).

Fertilidade do solo e adubação em cana-de-açúcar

Fernando José Freire | Jefrejan Souza Rezende | Fábio Cesar da Silva |

Cristiano Alberto de Andrade | Thomaz Adolpho Rein | Luis Fernando Sanglade Marchiori

Introdução

O solo é resultante de transformações complexas que envolvem o intemperismo de rochas e minerais, a ciclagem de nutrientes e a produção e decomposição de biomassa. Esse recurso natural é o principal responsável pelo suporte da atividade agropecuária global, de forma a suprir a demanda da sociedade por alimentos, fibras, bioenergia e uma série de outras matérias-primas.

A presença de nutrientes é um dos aspectos fundamentais que garantem a boa qualidade dos solos e o seu bom uso e manejo, principalmente no caso de agroecossistemas (Glaze-Corcoran et al., 2020). A fertilidade do solo é o ramo da ciência que trata da disponibilidade dos nutrientes, ou seja, a quantidade de nutrientes disponíveis para a absorção pelas plantas (Kalidas-Singh et al., 2021). Embora a fertilidade do solo seja, naturalmente, associada ao crescimento e desenvolvimento das plantas, esses aspectos são insuficientes para conceituá-la, uma vez que a produtividade é consequência da interação complexa de vários fatores (Patsios et al., 2021).

Nesse contexto, torna-se fundamental avaliar a fertilidade do solo, no intuito de determinar a capacidade de suprir a demanda das culturas por nutrientes, sustentando produtividades competitivas e sem depauperar o recurso edáfico. A avaliação da fertilidade envolve processos de amostragem, métodos de análise, técnicas de diagnóstico dos resultados e modelos de in-

terpretação e de recomendação de corretivos e fertilizantes (Silva et al., 2021).

Nos últimos anos houve importantes avanços no sistema de produção da cana-de-açúcar, com desenvolvimento de variedades potencialmente mais produtivas e adaptadas aos diversos ambientes agrícolas, bem como resistentes a pragas e doenças. No entanto, as recomendações de manejo da fertilidade e nutrição da cultura não acompanharam os avanços no melhoramento genético, ficando limitadas a algumas questões mais pontuais, como o uso de micronutrientes. Nesse cenário atual, as variedades potencialmente mais produtivas não têm demonstrado o êxito esperado, em parte, pela dispersão dos resultados recentes das pesquisas no tema, além da consequente lacuna de atualização das recomendações de manejo da fertilidade dos solos com cana-de-açúcar.

Para se ter uma ideia da contribuição do manejo varietal para a cultura e a defasagem no manejo da fertilidade do solo com cana-de-açúcar, é importante um breve histórico. De 1970 a 2020, o rendimento médio da cana-de-açúcar aumentou 53%, passando de 46,2 t ha⁻¹ para 70,5 t ha⁻¹. Dados de 2020/2021 mostraram que o Centro-Sul atingiu produtividade média de 78 t ha⁻¹ (Cruz, 2022). Para safras futuras espera-se uma maior média de produtividade porque há melhor remuneração pela cana-de-açúcar, tem havido mais investimentos em produtos biológicos como micronutrientes, o perfil varietal é mais

moderno e os canaviais estão mais sistematizados. Assim, será possível chegar brevemente ao potencial de produtividade de 85 t ha⁻¹.

Para esses resultados, contribuíram, substancialmente, as pesquisas realizadas pelo Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (Planalsucar), pela Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (Ridesa), pela Cooperativa dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar), pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC).

No caso do manejo da fertilidade, uma das principais referências técnicas para correção da acidez e adubação da cana-de-açúcar é o *Boletim Técnico 100*, do IAC (Raij et al., 1997), com a última atualização da versão impressa realizada na década de 1990. Embora o IAC e outras instituições de pesquisa, como a Embrapa e universidades, tenham realizado pesquisas para o manejo da fertilidade do solo e nutrição da cana-de-açúcar, os resultados não foram compilados e trabalhados para a atualização das recomendações.

É importante mencionar também que, na planilha de custos para a cana-de-açúcar, corretivos e fertilizantes respondem por 20 a 25% do custo de produção, num consumo estimado de 16,3% dos fertilizantes aplicados na agricultura brasileira (Conab, 2021), o que demonstra a necessidade de uso eficiente dos nutrientes pela cultura, em alinhamento com recomendações atualizadas de manejo da fertilidade do solo.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os aspectos básicos da fertilidade do solo (amostragem e métodos de análise), as recomendações atualizadas de manejo da fertilidade do solo para cana-de-açúcar, o uso de fertilizantes (atributos de fertilidade do solo e resposta da cultura) e a utilização de gesso. Aspectos relacionados à calagem foram tratados em capítulo específico.

Amostragem de solo

Qualquer programa de manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas tem na análise do solo uma importante ferramenta para o diagnóstico do status de disponibilidade dos nutrientes e dimensionamento da necessidade de aplicação de fertilizantes (Resende et al., 2016). O primeiro passo, entretanto, é a obtenção de amostra de solo representativa do talhão de produção. É importante entender que a amostra é proveniente de uma população naturalmente heterogênea em suas características, cuja variabilidade decorre de processos pedogenéticos, de uso e manejo do solo, com componentes nas direções horizontal e vertical.

A tarefa de realizar uma adequada amostragem do solo é fundamental para que os resultados analíticos expressem a real condição do sistema edáfico, para balizar adequadamente as recomendações de manejo. Nesse sentido, o que se denomina de talhão ou gleba de amostragem é a maior área na propriedade que possa ser considerada homogênea em termos de relevo, tipo de solo, uso anterior e práticas de manejo. A amostra retirada e enviada para o laboratório deve representar o talhão amostrado, considerando-se também a profundidade, uma vez que diferentes culturas podem explorar o perfil do solo de modo diverso, além da questão da dinâmica dos nutrientes e elementos potencialmente tóxicos em camadas superficiais e subsuperficiais.

Um resultado analítico emitido pelo laboratório de análise de solo representa o valor médio do atributo X no talhão e a profundidade de amostragem, de forma que há certo erro associado à medida:

$$X = \mu + \mathcal{E}$$

em que X = atributo de fertilidade do solo [pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio

(Mg), etc.]; μ = valor médio estimado do atributo, determinado no laboratório; e ϵ = erro associado ao valor médio estimado (Cardoso et al., 2014).

Em geral, o erro de amostragem (ϵ_{am}) é maior que o erro analítico (ϵ_{an}), sendo 80% do erro devido ao procedimento de amostragem, enquanto 20%, ou menos, é atribuído ao procedimento analítico no laboratório (Cardoso et al., 2014). Assim, a exatidão na caracterização do talhão é muito dependente dos cuidados para minimizar o erro amostral no campo. Conforme mencionado anteriormente, a variabilidade do talhão é determinante no procedimento de amostragem que será adotado. No caso de um talhão totalmente homogêneo (situação fictícia), uma única amostra de solo seria suficiente para representar a condição dele. No entanto, num talhão aparentemente homogêneo, que apresenta variações horizontais e verticais naturais do sistema, são necessárias algumas amostras simples (subamostras) para uma boa estimativa do valor médio do atributo de interesse. Nesse sentido, o número de amostras simples necessárias na composição da amostra composta, para uma boa estimativa da média, cresce com o aumento da variabilidade do talhão, bem como do atributo considerado (Machado et al., 2015).

No solo, a heterogeneidade horizontal é detectável pela variabilidade entre indivíduos, sendo classificada (James; Wells, 1990), de acordo com a distância em que ocorrem as variações, em: a) macrovariações, que ocorrem em distâncias maiores que 2 m e decorrem de processos pedogenéticos (topografia, cobertura vegetal original, textura e condição de drenagem), porém, podem ser exacerbadas pelo uso e manejo do solo (uso agrícola e histórico de manejo); b) mesovariações, em que as variações nas características do solo ocorrem em distâncias entre 2 e 0,5 m; e c) microvariações, em que as variações nas características do solo ocorrem em distâncias menores do que 0,5 m. As meso e microvariações

— embora sejam decorrentes, também, da ação de fatores de formação dos solos — se relacionam mais com práticas agrícolas de manejo (preparo do solo, aplicação localizada de fertilizantes, uso de resíduos orgânicos, etc.).

Em cana-de-açúcar, as micro e mesovariações têm mais importância em cana-soca, enquanto as macrovariações são determinantes na amostragem de implantação e renovação de canaviais (cana-planta).

Verticalmente, a organização do solo em horizontes, onde pode haver transição difusa ou abrupta, e as práticas agrícolas, como fertilização localizada, contribuem para a heterogeneidade em profundidade. A ação do sistema radicular, também, exerce importante papel nessa variabilidade vertical do solo.

Ao considerar que a variação dos atributos químicos do solo tem uma relação com a distância, em que pontos mais próximos tendem a ser mais semelhantes, uma discussão importante que se faz é sobre o número de amostras simples e a extensão ou área do talhão (Schossler et al., 2019). Em cana-de-açúcar, isso é importante porque os talhões têm variações importantes na área.

Num primeiro momento, pode-se pensar que a variação de número de pontos com a área do talhão seja mais lógica, mas não se deve esquecer do conceito de talhão ou gleba mencionado anteriormente. O conceito traz a variação de uma área máxima com homogeneidade de relevo, tipo de solo, uso anterior, histórico de manejo, etc. Dessa forma, se poderia retirar um mesmo número de amostras simples independentemente da área considerada.

Outro aspecto importante diz respeito ao uso de uma única amostra para a determinação de diferentes atributos de interesse e cuja variabilidade não é semelhante no campo. Por exemplo, o manejo que altera substancialmente o pH e

os teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} é a calagem, em que o corretivo é geralmente aplicado em área total. A adubação fosfatada e potássica, por sua vez, geralmente é feita no sulco de plantio e/ou em faixas ao lado da linha de cana-de-açúcar. Espera-se, dessa forma, que a variação do P e do K no solo seja superior a variação do Ca^{+2} , do Mg^{+2} e do pH (Oliveira et al., 2007); porém, uma mesma amostra deverá ser coletada no campo para representar os teores desses nutrientes e o valor do pH. De forma geral, se busca compatibilizar o número de amostras para atender satisfatoriamente a todos os atributos de interesse.

A amostra que representa o talhão, em cada profundidade de interesse, é uma amostra composta de um número n de amostras simples. A variabilidade de 5 amostras compostas provenientes de 10 a 20 amostras simples é similar à variabilidade esperada para um conjunto analítico de 30 amostras simples (Santos; Vasconcellos, 1987). Dessa forma, a amostragem composta traz economia no número de análises e pode refletir a mesma variabilidade de um maior número de amostras simples analisadas.

Para se estabelecer o número de amostras simples necessárias para obtenção do valor representativo do talhão, com vistas aos vários atributos de interesse, a seguinte equação pode ser utilizada:

$$IC = X \pm t (s^2/n)^{0,5}$$

em que IC = intervalo de confiança; X = estimativa do valor médio do atributo; t = valor t tabelado de Student para um nível α de probabilidade; s^2 = variância associada à média; e n = número de amostras (Santos et al., 2018).

Isolando-se o número de amostras n e rearranjando os demais termos, chega-se à estimativa do número de amostras simples:

$$n = (t \times CV/f)^2$$

em que n = número de amostras; t = valor t tabelado de Student para um nível α de probabilidade (1,96 para $\alpha = 5\%$; e 2,58 para $\alpha = 1\%$; CV = coeficiente de variação (%); e f = erro admitido em torno da média (%) (Santos et al., 2018).

Nas equações anteriores evidencia-se que quanto maior for o intervalo de confiança, ou a variância ou o coeficiente de variação, maior será o número de amostras simples necessárias para se estimar satisfatoriamente o valor médio do atributo. A relação entre número de amostras simples e a variação esperada em torno da média é mostrada na Figura 8.1.

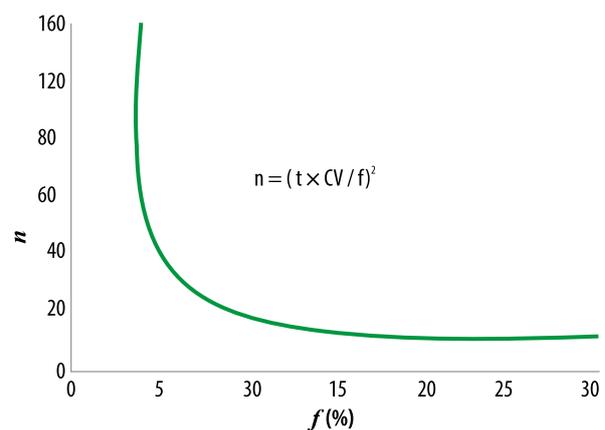


Figura 8.1. Número de amostras (n) necessárias para estimar a média do atributo do solo, considerando-se uma variação de 5 a 30% em torno da média (f).

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2018).

É importante perceber que, a partir de determinada variação em torno da média (f), não existe ganho significativo de se amostrar um maior número de pontos (Figura 8.1). Na Tabela 8.1 apresentam-se as estimativas do número de amostras simples a serem retiradas em torno do resultado analítico médio verdadeiro estimado a 95% de probabilidade e valores de f em torno da média entre 5 e 100%.

Obviamente se podem ajustar valores de erro aceitável dos atributos (f) de interesse por meio de amostragem prévia do solo, em alguns ta-

Tabela 8.1. Número de amostras coletadas em solos de terraço e encosta para diagnóstico da fertilidade.

<i>f</i> %	Terraço					Encosta				
	pH	P	K	Ca+Mg	Al	pH	P	K	Ca+Mg	Al
3	4	3181	1076	47	218	3	601	2226	298	204
10	1	796	269	12	55	1	149	557	75	51
15	1	354	120	6	25	1	67	248	34	23
20	1	199	68	3	14	1	38	139	19	13
25	1	128	44	2	9	1	24	90	12	9
30	1	89	30	2	7	1	17	62	9	6
35	1	65	22	1	5	1	13	46	7	5
40	1	50	17	1	4	1	10	35	5	4
45	1	40	14	1	3	1	8	28	1	3
50	1	32	11	1	3	1	6	23	3	3
60	1	23	8	1	2	1	5	16	3	2
70	1	17	6	1	2	1	4	12	2	2
80	1	13	5	1	1	1	3	9	2	1
90	1	10	4	1	1	1	2	7	1	1
100	1	8	3	1	1	1	2	6	1	1

Fonte: Barreto et al. (1974).

Ihões da propriedade. Nesses talhões é possível retirar aleatoriamente de 10 a 15 amostras simples e enviá-las individualmente para as análises previstas. De posse dos resultados analíticos, são obtidos o valor médio do atributo, a variância e o desvio-padrão, conforme procedimentos comumente utilizados em estatística descritiva. Tanto o coeficiente de variação (CV) como o erro percentual aceitável (*f*) devem ser utilizados como guia para ajustar o número de amostras simples que devem ser retiradas para representar o atributo químico.

A obtenção de amostra composta para análise e subsídio ao manejo da fertilidade do solo nos talhões deve observar alguns critérios. Um deles é a coleta de volume semelhante de solo em cada ponto de amostragem simples e a homogeneização das amostras simples antes da obtenção da composta.

A retirada das amostras simples pode ser realizada de forma sistemática ou aleatória. O método sistemático é muitas vezes utilizado em pesquisas de geoestatística que procuram representar a interdependência dos valores medidos em função de sua localização (Molin et al., 2015). Os resultados desse tipo de pesquisa são muito importantes para o entendimento do efeito do manejo do solo e das culturas na variação dos atributos, além de servir de base para a agricultura de precisão com aplicações de corretivos e fertilizantes em taxa variável, ou para o dimensionamento do número de pontos para amostragem do solo. O método aleatório é normalmente o mais usado, e, nesse caso, as amostras devem estar distribuídas ao acaso, em toda a área da unidade de amostragem. O caminhamento em zigue-zague deve ser preferencialmente escolhido, de modo que cada ponto tenha a mesma chance de ser amostrado (Figura 8.2).

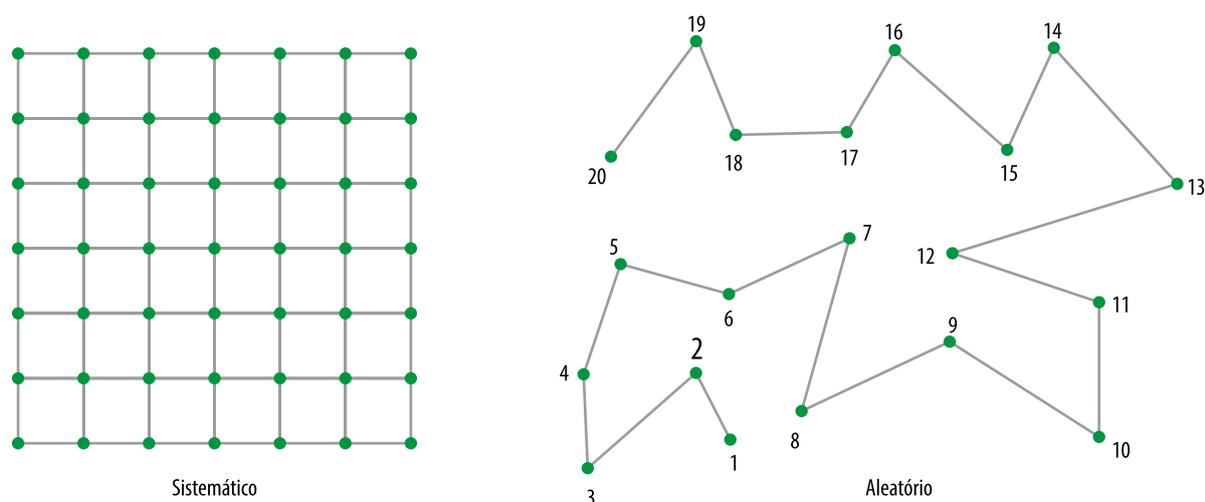


Figura 8.2. Malha de amostragem do solo com pontos para coleta de amostras simples, alocados de forma sistemática ou aleatória no talhão/gleba de produção.

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, com bom potencial para explorar o perfil do solo, sendo que a profundidade de amostragem do solo deve considerar a efetividade do sistema radicular. Na implantação ou reforma do canavial, ocasião em que o manejo da fertilidade em profundidade é possível, devem-se retirar amostras de solo das camadas 0–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm. Na soqueira, a avaliação da fertilidade pode ser feita com o monitoramento da camada superficial (0–20 cm), ou, no máximo, até 40 cm (0–20 cm e 20–40 cm), quando há possibilidade de ocorrência de altos teores de alumínio trocável.

A localização dos pontos para a amostragem do solo é outra questão importante, uma vez que há geralmente a localização dos fertilizantes no sulco de plantio (implantação) e em faixas ao lado da linha (soqueira). Dessa forma, uma coleta posicionando-se dois quintos das amostras simples próximas à linha (15–20 cm da linha) de cana-de-açúcar e três quintos no meio da entrelinha para a obtenção da amostra composta é bastante razoável. A amostragem exclusivamente na linha de cana-de-açúcar, onde os fertilizantes são normalmente aplicados, pode subestimar a necessidade de reposição dos nu-

trientes via adubação, enquanto a amostragem somente nas entrelinhas pode superestimar a adubação.

Normalmente são utilizados trados na amostragem do solo (Figura 8.3), em que o mais importante é o adequado controle da profundidade de amostragem e a coleta de volumes semelhantes de solo entre os pontos de amostragem. Outras ferramentas, como pá de corte e enxada, podem ser utilizadas, porém, atentando para os dois aspectos mencionados.

Na agricultura de precisão, em que a aplicação dos corretivos e fertilizantes é feita em taxas variáveis, também são tomadas amostras compostas representando o ponto central da quadrícula. A definição da malha amostral, no caso da agricultura de precisão, pode considerar a distância mínima entre amostras compostas tomadas ao redor do ponto central para que elas sejam consideradas independentes, para determinada(s) variável(eis) de interesse, o que pode ser feito com o uso da geoestatística, particularmente do semivariograma (Schossler et al., 2019).

Para obtenção das amostras compostas, as amostras simples coletadas devem ser reunidas em um recipiente, de preferência de plástico, misturadas e homogeneizadas, retirando-se

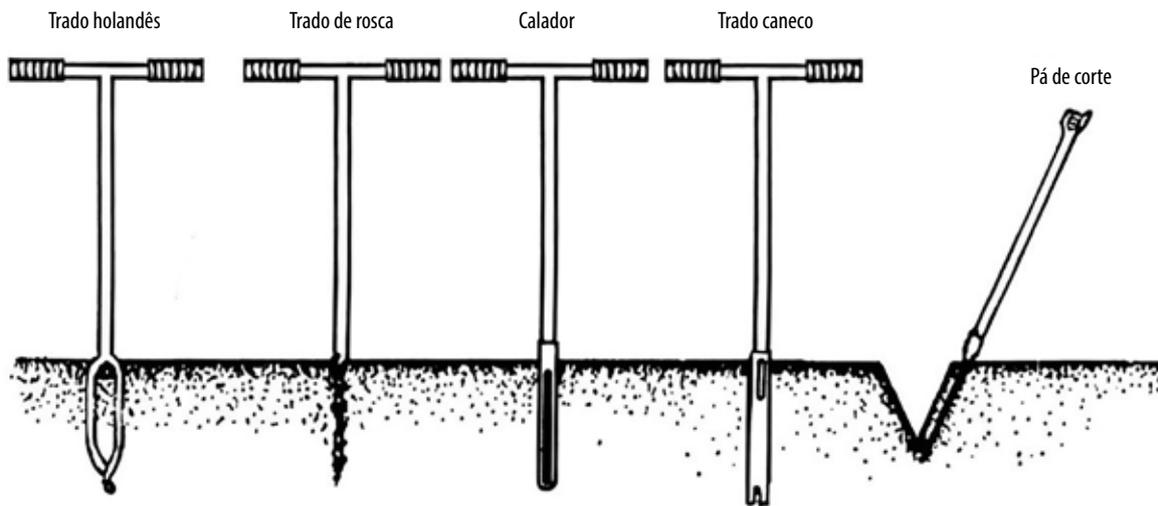


Figura 8.3. Ferramentas mais comuns utilizadas na coleta de amostras de solo.

Fonte: Freire et al. (2001).

uma subamostra com um volume de aproximadamente 500 cm^3 , a qual deverá ser enviada a um laboratório de fertilidade do solo para a realização das análises.

Para Cantarutti et al. (2007), o resultado das análises químicas aproxima-se da característica real do solo quando:

- A amostra composta é representativa do solo da unidade amostral (talhão ou gleba).
- Nenhuma alteração (modificação ou contaminação) tenha ocorrido na amostra antes da análise.
- As análises das subamostras tomadas no laboratório sejam representativas da amostra original.
- A análise seja exata e represente a informação requerida.

Métodos de análise química do solo para fins de fertilidade

A análise de solo, na agricultura moderna, é a base para a correção da acidez do solo e adubação. Para que esse processo seja eficaz, os méto-

dos de análise devem ser referendados pelo conhecimento científico, gerando resultados para recomendação da(s) quantidade(s) de corretivo e/ou fertilizantes conforme a demanda da cultura, com economia da produção e prezando pela qualidade ambiental (Raij et al., 2017).

A análise de solo é praticada em grande parte das regiões no mundo, estando seu sucesso na dependência da quantidade e qualidade da pesquisa sobre métodos utilizados, de sua correlação com a planta, de sua calibração e interpretação, da organização das informações e dos laboratórios de análise (Cardoso et al., 2014).

O emprego da análise de solo no Brasil foi muito limitado até o início da década de 1960. No entanto, nessa mesma década, um programa integrado de análise química de solo do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) e da North Carolina State University (EUA) foi muito relevante para o País, impulsionando a análise do solo em todo o Brasil, expandindo o número de laboratórios e amostras analisadas. De acordo com Raij et al. (2017), esse programa contribuiu para isso pelo desenvolvimento de sistemas de automação, uniformização de métodos de aná-

lise química, definição de critérios de interpretação e um eficiente sistema de comunicação.

Particularmente no caso da cultura da cana-de-açúcar, o Planalsucar tinha em suas bases operacionais laboratórios vinculados ao Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), que eram administrativamente ligados ao Mapa, cuja estrutura se atrelou ao programa brasileiro desenvolvido com a North Carolina State University (Rodella, 1983).

No presente capítulo, são apresentados os principais métodos usados na análise de solo para a cultura da cana-de-açúcar, com as referências bibliográficas pertinentes para que detalhes

possam ser acessados pelos interessados (Tabela 8.2).

O Brasil possui alguns programas de proficiência de laboratório de solos que prezam pela qualidade dos resultados analíticos. É recomendável que os laboratórios se credenciem em um ou mais desses programas de proficiência, a depender do pacote analítico oferecido. A participação do laboratório permite o acompanhamento da evolução dos métodos, a adoção de novas tecnologias de análise e o aprimoramento dos serviços oferecidos aos clientes, além da questão de imagem e marketing associados ao bom desempenho do laboratório no

Tabela 8.2. Métodos de extração e determinação realizados em análises químicas para avaliação da fertilidade de solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil.

Característica	Método de extração		Método de determinação	
	PTCE-1 ⁽¹⁾	PTCE-2 ⁽²⁾	PTCD-1 ⁽³⁾	PTCD-2 ⁽⁴⁾
pH	CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹ (1:2,5)	H ₂ O (1:2,5)	–	–
Al ³⁺	KCl 1 mol L ⁻¹	–	Titulometria	–
Ca ²⁺ e Mg ²⁺	Resina ⁽⁵⁾	KCl 1 mol L ⁻¹	Complexometria	Espectrofotometria de absorção atômica
Na ⁺	Resina ⁽⁵⁾	Mehlich-1	Fotometria	–
H + Al	Ca(OAc) 0,5 Mol L ⁻¹ pH 7,0	-	Titulometria	SMP ⁽⁶⁾
P disponível	Resina ⁽⁵⁾	Mehlich-1	Colorimetria	–
K disponível	Resina ⁽⁵⁾	Mehlich-1	Fotometria	–
S disponível	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em H ₂ O	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em HOAc	Turbidimetria	–
Fe, Mn, Cu e Zn disponíveis	DPTA ⁽⁷⁾	Mehlich-1	Espectrofotometria de absorção atômica	–
B disponível	Água quente	–	Espectrofotometria de absorção atômica	Colorimetria
Si solúvel	CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹	HOAc 0,5 mol L ⁻¹	Colorimetria	–
N total	Micro-Kjeldahl	–	Titulometria	–
Matéria orgânica	C oxidável por Cr ₂ O ₇ ²⁻	Incineração	Titulometria	Colorimetria

⁽¹⁾ Protocolo de extração 1. ⁽²⁾ Protocolo de extração 2. ⁽³⁾ Protocolo de dosagem 1. ⁽⁴⁾ Protocolo de dosagem 2. ⁽⁵⁾ Utiliza-se resina mista (catiônica + aniônica). ⁽⁶⁾ Solução mista de cloreto de cálcio, cromato de potássio, acetato de cálcio e trietanolamina, com pH tamponado em 7,5. ⁽⁷⁾ Ácido dietilenotriaminopentacético.

Fonte: Rajj e Camargo (1973), Korndörfer et al. (1999), Rajj et al. (2001) e Cantarutti et al. (2007).

programa. A busca pela exatidão analítica minimiza o erro analítico, aumentando-se a confiabilidade na avaliação da fertilidade, conforme discutido anteriormente.

Interpretação e recomendação da análise química do solo

Tabelas de interpretação

Os critérios de diagnóstico da fertilidade com base na análise química do solo são organizados em manuais estaduais, normalmente elaborados por uma comissão nomeada pelo órgão competente do governo do estado. Embora os manuais sejam regionais, algumas vezes têm caráter inter-regional em função da ocorrência de solos com características químicas e físicas semelhantes, bem como clima. Como a recomendação da adubação é vinculada aos métodos de análise de solos adotados, esse pacote analítico também direciona o uso de determinado manual de adubação. Esse último aspecto é especialmente importante na medida em que a cana-de-açúcar tem expandido para estados menos tradicionais na produção da cultura, em que se usam manuais de adubação dos estados com histórico mais consolidado na produção de cana-de-açúcar.

O modelo de diagnóstico para elaboração dos manuais de adubação se baseia nas classes de disponibilidade dos nutrientes no solo, balizadas pelo conceito de produção relativa (Tabela 8.3). O processo envolve o que se denomina “calibração” do método de análise do solo, realizada a partir de resultados de experimentos de campo em diferentes classes de solo, relacionando-se o teor do nutriente e a produtividade da cultura. As recomendações de adubação são estabelecidas em função da classe de disponibilidade do nutriente no solo, a partir da experimentação de campo, estudando-se doses do nutriente

aplicadas a solos originalmente com diferentes teores (classes) deste.

Para fósforo (P), por exemplo, se o método for Mehlich-1, se considera o teor de argila (Alvarez V. et al., 1999; Simões Neto et al., 2015; Manual..., 2016) ou o valor do P remanescente (P_{rem}) (Alvarez V. et al., 1999; Simões Neto et al., 2015) (Tabela 8.3). Quando o método é a resina, não são considerados outros fatores relacionados à capacidade de fixação de P no solo, somente o resultado analítico e as respectivas classes de disponibilidade (Raij et al., 1997). Para potássio (K), a eficiência de extração é influenciada pela capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0, interferindo na interpretação dos resultados do K disponível da análise de solo (Manual..., 2016) (Tabela 8.4).

Um sistema dinâmico com formas orgânicas e inorgânicas de nitrogênio (N), mediado pela atividade biológica de plantas e microrganismos, bem como influenciado pelas condições climáticas e práticas de manejo, regula a disponibilidade do N no solo. Essa intensa dinâmica, característica do N no solo, é o que torna a previsão de sua disponibilidade às plantas bastante difícil e desafiadora. Neste capítulo são apresentados e discutidos alguns fundamentos e índices para previsão da disponibilidade de N a partir de análises de solo.

O nitrogênio não é usualmente analisado no solo para interpretação de sua disponibilidade. Isso porque as formas orgânicas e inorgânicas no solo são muito dinâmicas e influenciadas por processos biológicos, pelas condições climáticas e por práticas de manejo (Castoldi et al., 2019). Uma alternativa adotada em alguns estados é a interpretação da disponibilidade de N a partir do teor de matéria orgânica do solo, conforme mostrado na Tabela 8.5, de modo a balizar, minimamente, o potencial de fornecimento de N no sistema.

Tabela 8.3. Classes de interpretação da disponibilidade de fósforo extraído pelo método Mehlich-1, conforme o teor de argila e fósforo remanescente (P_{rem}).

Característica tampão	Classe de interpretação ⁽¹⁾				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	(mg dm ⁻³)				
Rio Grande do Sul e Santa Catarina					
Argila (g kg⁻¹)					
>600	≤1,5	1,6–3,0	3,1–4,5	4,6–9,0	>9,0
410–600	≤2,0	2,1–4,0	4,1–6,0	6,1–12,0	>12,0
210–400	≤3,0	3,1–6,0	6,1–9,0	9,1–18,0	>18,0
≤200	≤5,0	5,1–10,0	10,1–15,0	15,1–30,0	>30,0
Pernambuco					
Argila (g kg⁻¹)					
>600	<3,5	3,5–5,5	5,6–9,5	9,6–12,0	>12,0
>350–600	<6,5	6,5–9,5	9,6–12,5	12,6–16,0	>16,0
150–350	<8,5	8,5–12,5	12,6–15,0	15,1–18,0	>18,0
<150	<10,5	10,5–13,5	13,6–17,0	17,1–20,0	>20,0
Prem (mg L⁻¹)					
0–12	<3,5	3,5–5,5	5,6–9,5	9,6–12,0	>12,0
12–17	<6,5	6,5–9,5	9,6–12,5	12,6–16,0	>16,0
>17–35	<8,5	8,5–12,5	12,6–15,0	15,1–18,0	>18,0
>35–60	<10,5	10,5–13,5	13,6–17,0	17,1–20,0	>20,0
Minas Gerais					
Argila (g kg⁻¹)					
>600	≤2,7	2,8–5,4	5,5–8,0	8,1–12,0	>12,0
350–600	≤4,0	4,1–8,0	8,1–12,0	12,1–18,0	>18,0
150–350	≤6,6	6,7–12,0	12,1–20,0	20,1–30,0	>30,0
≤150	≤10,0	10,1–20,0	20,1–30,0	30,1–45,0	>45,0
Prem (mg L⁻¹)					
0–4	≤3,0	3,1–4,3	4,4–6,0	6,1–9,0	>9,0
4–10	≤4,0	4,1–6,0	6,1–8,3	8,4–12,5	>12,5
10–19	≤6,0	6,1–8,3	8,4–11,4	11,5–17,5	>17,5
19–30	≤8,0	8,1–11,4	11,5–15,8	15,9–24,0	>24,0
30–44	≤11,0	11,1–15,8	15,9–21,8	21,9–33,0	>33,0
44–60	≤15,0	15,1–21,8	21,9–30,0	30,1–45,0	>45,0

⁽¹⁾ Para Minas Gerais as classes de teor alto e muito alto correspondem a bom e muito bom, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Alvarez V. et al. (1999), Simões Neto et al. (2015) e Manual... (2016).

Tabela 8.4. Classes de interpretação da disponibilidade de potássio extraído pelo método Mehlich-1, conforme a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0.

CTC a pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	Classe de interpretação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	(mg dm^{-3})				
>30	≤ 35	36–70	71–105	106–210	>210
15,1–30,0	≤ 30	31–60	61–90	91–180	>180
7,6–15,0	≤ 20	21–40	41–60	61–120	>120
$\leq 7,5$	≤ 15	16–30	31–45	46–90	<90

Fonte: Manual... (2016).

Tabela 8.5. Classes de interpretação da disponibilidade de nitrogênio, conforme os teores de matéria orgânica do solo.

Classe de interpretação		
Baixa	Média	Alta
Matéria orgânica		
(%)		
$\leq 2,5$	2,6–5,0	>5,0

Fonte: Manual... (2016).

Tabelas de recomendação

A recomendação da adubação da cana-de-açúcar no País é fundamentada em curvas de resposta, em que nutrientes são aplicados em doses crescentes e seus efeitos observados no incremento da produção. Conforme mencionado anteriormente para as classes de disponibilidade, a calibração e as recomendações são regionalizadas. Essa estratégia de avaliação da fertilidade do solo permite gerar tabelas de recomendação da adubação que trazem o componente científico, mas também algum empirismo e subjetividade. Assim, uma simples comparação entre tabelas de diferentes estados brasileiros gera diferentes recomendações para condições semelhantes de solo e de cultivo, e a mesma recomendação para diferentes solos (Tabela 8.6).

Métodos de recomendação da adubação mais objetivos e fundamentados em balanço de nutrientes (demanda da cultura para uma determinada produtividade esperada, capacidade do solo em fornecer o nutriente e quantidade de nutriente que deve ser aplicada via fertilizante, incluindo-se, nesse último aspecto, as perdas e a eficiência de recuperação pela cultura) são promissores e acompanhariam as alterações temporais de produtividade da cultura em razão de fatores climáticos, práticas de manejo e, principalmente, do lançamento de variedades mais produtivas. O ajuste de modelos mecanísticos de abrangência mais generalizada pode ser uma ferramenta eficaz para recomendações de fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil.

Fundamento dos estudos para calibração da adubação

Estabelecido o método de análise por meio de estudos de correlação entre o que o método extrai e o conteúdo do nutriente na planta que determina os teores disponíveis, seguido dos estudos de calibração, torna-se necessário estabelecer valores de referência para essa disponibilidade e a definição de doses que devem ser aplicadas, fundamentadas em uma expectativa de resposta, de acordo com o diagnóstico da fertilidade.

Tabela 8.6. Doses de nitrogênio, fósforo e potássio recomendadas para cana-de-açúcar, de acordo com as classes de disponibilidade e/ou produtividade esperada, além do ciclo de cultivo (cana-planta ou soca).

Classes de teores	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	SP ⁽¹⁾	MG ⁽²⁾	PE ⁽³⁾	SP ⁽⁴⁾	MG	PE	SP ⁽⁵⁾	MG ⁽⁶⁾	PE ⁽⁷⁾
	(kg ha ⁻¹)								
Cana-planta									
Não se aplica	60–90	0–60	40	–	–	–	–	–	–
Muito baixo	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Baixo	–	–	–	180–200	150	180	140–220	160	100
Médio	–	–	–	140–200	100	90	120–200	120	70
Alto	–	–	–	80–140	50	40	100–180	80	70
Muito alto	–	–	–	40–100	–	–	60–120	–	–
Cana-soca									
Não se aplica	80	100	100	–	–	–	–	–	–
Muito baixo	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Baixo	–	–	–	40–60	40	40	100–200	–	–
Médio	–	–	–	20–40	–	30	80–160	140	120
Alto	–	–	–	0–30	–	–	60–140	100	100
Muito alto	–	–	–	–	–	–	40–100	60	100

⁽¹⁾ Aplicar em cana-planta 30 kg ha⁻¹ em fundação e de 30 a 60 kg ha⁻¹ em cobertura, dependendo da produtividade esperada (>100; 100-130; 130-150; 150-170; e >170 t ha⁻¹); Em cana-soca para produtividades entre 80-100 t ha⁻¹, aplicar 100 kg ha⁻¹; Para produtividades entre 100-120 t ha⁻¹, aplicar 120 kg ha⁻¹; Para produtividades entre 120-140 t ha⁻¹, aplicar 140 kg ha⁻¹; e para produtividades acima de 140 t ha⁻¹, aplicar 160 kg ha⁻¹. ⁽²⁾ Não aplicar N em fundação. Dependendo da produtividade esperada, aplicar em cobertura até 60 kg ha⁻¹. Em Minas Gerais, a produtividade esperada para cana-planta é de 120 t ha⁻¹ e para cana-soca é de 80 t ha⁻¹. ⁽³⁾ Aplicar 20 kg ha⁻¹ em fundação e 20 kg ha⁻¹ em cobertura. A dose de N em cobertura deverá ser aumentada para 40 kg ha⁻¹ em solos arenosos e com baixos teores de matéria orgânica (<1,5%); Em Pernambuco, a produtividade esperada para cana-planta é de 75 t ha⁻¹ e para cana-soca é de 50 t ha⁻¹. ⁽⁴⁾ Tanto em cana-planta, como em cana-soca, deve-se elevar a dose recomendada de P₂O₅, dependendo da produtividade esperada. ⁽⁵⁾ em cana-planta, como em cana-soca, deve-se elevar a dose recomendada de K₂O, dependendo da produtividade esperada. ⁽⁶⁾ Não aplicar K em solos que apresentem teores superiores a 150 mg dm⁻³. Em solos arenosos ou de textura média, aplicar no máximo 90 kg ha⁻¹ de K₂O no sulco de plantio, acrescentando o restante em cobertura. ⁽⁷⁾ Aplicar metade da dose em fundação e a outra metade em cobertura. Em áreas fertirrigadas com vinhaça com doses acima de 150 m³ ha⁻¹, não aplicar K.

Fonte: Ribeiro et al. (1999), Cavalcanti (2008) e Cantarela et al. (2022).

As tabelas estaduais de adubação (dados apresentados na Tabela 8.6) são construídas a partir de uma série de ensaios de adubação. Especificamente para cana-de-açúcar, que é cultivada em extensas áreas, é possível realizar ajustes finos na adubação sob condições de cultivo mais específicas da propriedade ou do talhão, em sintonia com o ambiente de produção edafoclimático.

Para simular uma calibração de K, os dados tratados nesse estudo de caso são fictícios e servem apenas como referência técnica para orientar ajustes regionais ou na dimensão de propriedade rural. Considerando-se que o método de análise definido para avaliar o K disponível é o Mehlich-1 (Tabela 8.2) e após a realização de vários ensaios de campo com dois tratamentos

(sem e com alta adubação potássica para máxima produtividade), distribuídos de forma que, em cada ambiente de produção, haja pelo menos um ensaio, principalmente para diferentes solos, épocas de corte e variedades, os resultados de produção relativa em função dos teores de K são os apresentados na Tabela 8.7. Os resultados devem ser repetidos em diferentes anos e para as condições de cana-planta e/ou cana-soca. É importante que o único fator em estudo seja a adição de K (ou outro nutriente de interesse), mantendo-se os demais fatores de produção constantes, incluindo o fornecimento dos demais nutrientes.

As classes de disponibilidade do nutriente no solo podem ser obtidas a partir da Tabela 8.7, por meio de ajustes ao modelo matemático para observação da relação entre os teores de K no solo e a produção relativa na ausência do

seu fornecimento via adubação (Resende et al., 2016) (Figura 8.4).

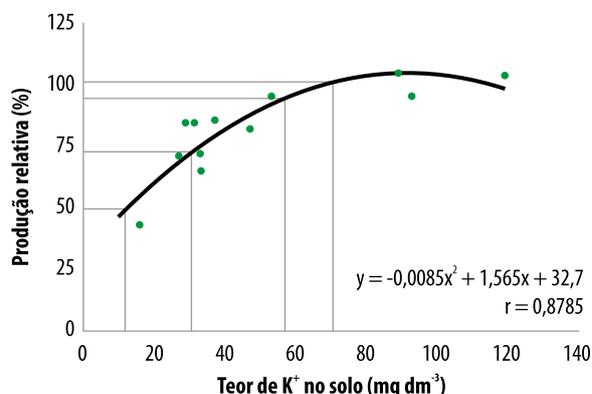


Figura 8.4. Definição dos limites críticos de k^+ no solo e classes de disponibilidade do nutriente no solo.

Nota: teor muito baixo (<50% produção relativa \approx resposta muito alta à adubação); teor baixo (de 50 a 70% da produção relativa \approx resposta alta à adubação); teor médio (de 70 a 90% da produção relativa \approx resposta média à adubação); teor alto (de 90 a 100% da produção relativa \approx resposta baixa à adubação); e teor muito alto (>100% da produção relativa \approx sem resposta ou resposta negativa à adubação).

Fonte: Resende et al. (2016).

Tabela 8.7. Produção absoluta e relativa de colmos na soqueira de cana-de-açúcar com ou sem aplicação de potássio (+K e -K, respectivamente) e teor inicial de potássio no solo extraído por Mehlich-1.

Produção de colmos		Produção relativa ⁽¹⁾	Teor de K no solo
- K	+ K		
(t ha ⁻¹)		(%)	(mg dm ⁻³)
16,3	38,0	43	16
75,0	105,1	71	27
86,3	102,2	84	29
59,3	70,8	84	31
61,0	84,7	72	33
80,7	123,5	65	33
82,7	97,1	85	37
71,7	87,3	82	47
100,7	105,5	95	53
14,9	143,0	104	89
159,7	168,4	95	93
196,0	190,9	103	119

⁽¹⁾Produção relativa = Produção - K x 100/Produção + K.

Para cada classe de disponibilidade do nutriente no solo, experimentos de curvas de resposta ao nutriente mostram que a dose para máximo retorno econômico proporciona em geral entre 80 e 90% da produção máxima (Resende et al., 2016). Essa dose de máxima eficiência econômica (MEE) leva em consideração a relação entre o custo do fertilizante e o preço do produto. Historicamente os gastos com adubação respondem por 25 a 30% do custo total de produção.

Outros aspectos influenciam a relação entre teores do nutriente no solo e a produtividade, como o método de análise (Tabela 8.2), a variedade de cana-de-açúcar, a idade da cultura (Simões Neto et al., 2011) e, principalmente, a sensibilidade do extrator ao fator capacidade tampão do solo (Novais et al., 2015).

Assim, Simões Neto et al. (2015) — utilizando regressões que descrevem a resposta de cana-de-açúcar a doses de P aplicadas ao solo (curvas de resposta) (Figura 8.5) e a recuperação do P pelo método Mehlich-1, de acordo com as mesmas doses aplicadas (Figura 8.6) — estabeleceram níveis críticos variáveis com o fator capacidade de P. O nível crítico de P no solo é aqui definido como aquele que propiciaria, na ausência de adubação, produtividade equivalente à obtida com a dose de MEE. Para o Latossolo de maior fator capaci-

dade, o nível crítico foi de 5 mg dm^{-3} de P, e para o Gleissolo de menor fator capacidade, o nível crítico foi de 10 mg dm^{-3} de P (Figura 8.5). As doses de MEE foram de 43 e 100 kg ha^{-1} , respectivamente para o Gleissolo e Latossolo (Figura 8.6).

Ao considerar que o conceito de nível crítico se relaciona com a dose de MEE, pode-se estabelecer que essa é a condição ideal de disponibilidade do nutriente no solo, sem falta, nem excesso e num alinhamento com a máxima produtividade.

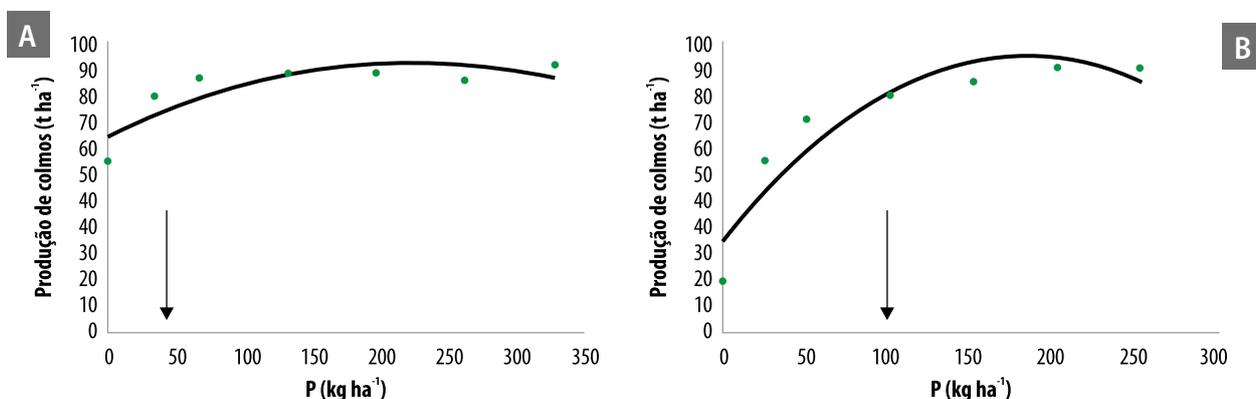


Figura 8.5. Produção de colmos de cana-de-açúcar em função de doses de fósforo aplicadas no sulco de plantio em Gleissolo Háplico Eutrófico (A) e Latossolo Amarelo Distrófico (B) de diferentes texturas e valor de fósforo remanescente (P_{rem}) e definição da dose de máxima eficiência econômica (MEE).

$$P_2O_5 (\text{kg ha}^{-1}) = P (\text{kg ha}^{-1}) \times 2,29.$$

Fonte: Adaptado de Simões Neto et al. (2015).

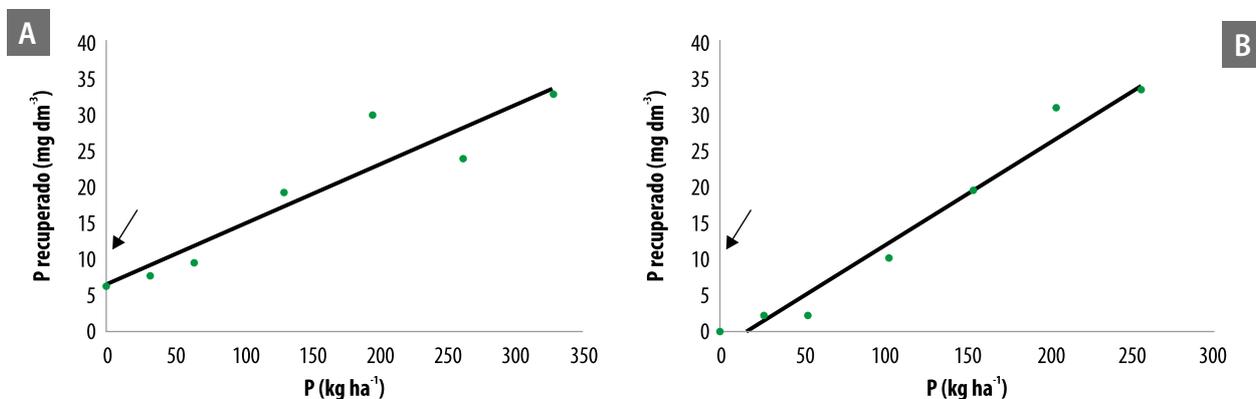


Figura 8.6. Teores de fósforo recuperados pelo método Mehlich-1 em função de doses de fósforo aplicadas no sulco de plantio em Gleissolo Háplico Eutrófico (A) e em Latossolo Amarelo Distrófico (B).

Nota: níveis críticos (NC) determinados de acordo com as doses de máxima eficiência econômica. $P_2O_5 (\text{kg ha}^{-1}) = P (\text{kg ha}^{-1}) \times 2,29$.

Fonte: Adaptado de Simões Neto et al. (2015).

O cálculo da dose para recomendação da adubação pode ser realizado usando-se a equação a seguir, que considera a condição de disponibilidade atual do nutriente, o nível crítico para MEE e o incremento relativo de P no solo em função da dose de P aplicada:

$$Dose\ recomendada = (NC - NA) / (Nrec / apl)$$

em que *Dose recomendada* = dose do nutriente recomendada para aplicação (kg ha^{-1} P); *NC* = nível crítico do nutriente no solo (mg dm^{-3}); *NA* = nível atual do nutriente no solo (mg dm^{-3}); e *Nrec/apl* = coeficiente angular da equação de regressão linear do nutriente recuperado em função do nutriente aplicado ($\text{mg dm}^{-3}/\text{kg ha}^{-1}$ P) (Alvarez V., 1996).

A partir da equação supracitada, é possível calcular a dose recomendada para qualquer nível crítico que corresponda à dose de MEE, conhecendo-se o coeficiente *Nrec/Napl* do solo em questão, adequando-se ainda ao momento econômico. Pode ser que, num determinado momento, a relação custo do fertilizante/preço do produto indique que o nível crítico de P no solo seja inferior em relação ao teor, proporcionando aproximadamente 90% da produtividade máxima, no exemplo das Figuras 8.5 e 8.6. Nesse caso, o novo valor de nível crítico seria usado (para a MEE, em vez de 90% da produção máxima), gerando a dose recomendada de P naquele momento.

Ao tomar como exemplo os valores apresentados nas Figuras 8.5 e 8.6, em que a dose para a MEE corresponde a 90% da produção máxima de colmos de cana-de-açúcar e os teores iniciais de P no solo são iguais a 2,0 e 6 mg dm^{-3} para o Latossolo e o Gleissolo, respectivamente, há as doses recomendadas para a adubação:

Latossolo

$$Dose\ recomendada = (5 - 2) / 0,0638937 = 47\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P ou } 108\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P}_2\text{O}_5$$

Gleissolo

$$Dose\ recomendada = (10 - 6) / 0,083851 = 48\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P ou } 110\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P}_2\text{O}_5$$

Essa fertilização, para atingir a dose de suficiência (nível crítico), é, frequentemente, a mais utilizada e se aplica ao modelo de diagnóstico da fertilidade e recomendação por meio da análise química do solo. Essa fertilização tem por base a reposição das quantidades dos nutrientes removidos pelas colheitas, constituindo o que se denomina lei da restituição (Resende et al., 2016).

Adubação em canaviais

Fertilização nitrogenada

Penatti (2013) avaliou 74 experimentos de campo conduzidos pela Copersucar e pelo IAC. Os resultados dos experimentos, individualmente, não evidenciaram respostas da cana-planta à adubação nitrogenada, porém, em conjunto, foi possível observar uma clara resposta e indicar $75\ \text{kg ha}^{-1}$ de N como dose econômica (Figura 8.7). Constatação semelhante foi feita por Oliveira et al. (2010) a partir de estudos de extração de N em 11 variedades de cana-de-açúcar no ciclo de cana planta.

Na prática, utilizaram-se doses de N na cana-planta entre 30 e $60\ \text{kg ha}^{-1}$, justamente pelos

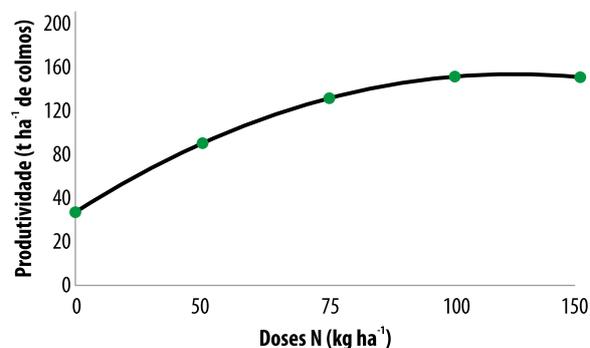


Figura 8.7. Resposta média (74 experimentos) da cana-planta à adubação.

Fonte: Adaptado de Penatti (2013).

resultados inconsistentes dos experimentos e variações sazonais de produtividade em função de outros fatores determinantes da produção. Doses mais elevadas de N são recomendadas para ambientes mais favoráveis à produção, em que o nível de resposta tende a ser maior em função do N aplicado. Esse é o caso da cana-de-açúcar irrigada, em que a máxima resposta de produtividade, igual a 190 t ha^{-1} de colmos, foi proporcionada pelo uso de 196 kg ha^{-1} de N (Figura 8.8). Somente a irrigação é responsável por um incremento médio de 54 t ha^{-1} de colmos, na ausência de N; enquanto essa diferença aumenta para 93 t ha^{-1} de colmos quando são consideradas as produtividades máximas (Dellabiglia et al., 2018).

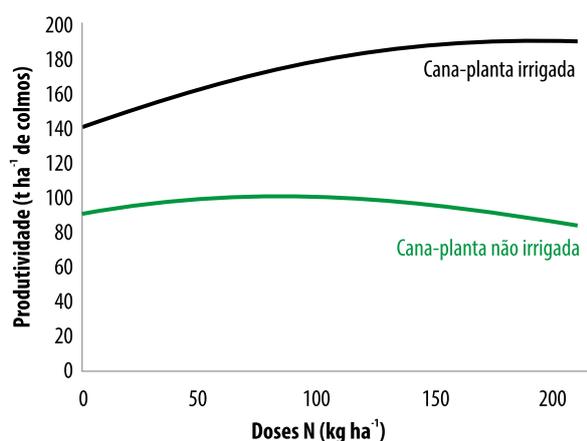


Figura 8.8. Respostas médias de produtividade de colmos da cana-planta var. RB 92579 irrigada e não irrigada (sequeiro), fertilizada com doses de nitrogênio até 210 kg ha^{-1} , em Jaú, SP.

Fonte: Adaptado de Dellabiglia et al. (2018).

Normalmente na adubação da cana-planta, a eficiência agrônômica das fontes nitrogenadas é semelhante, uma vez que são aplicadas no sulco de plantio. Desse modo, emprega-se a fonte que apresentar menor custo por unidade de N. Geralmente a ureia (sólida) e a aquamônia (líquida) são as fontes de menor custo-benefício.

No caso de aplicação de parte da dose do fertilizante nitrogenado em cobertura, deve-se

optar por fontes que apresentam menores ou não apresentam perdas de N por volatilização de amônia, como o sulfato de amônio, nitrato de amônio ou nitrato de cálcio. De acordo com Degaspari et al. (2020), havendo adaptação dos implementos para a incorporação do adubo ao lado da linha, qualquer fonte nitrogenada poderá ser utilizada.

No caso da adubação de soqueiras de cana-de-açúcar, um aspecto fundamental é a presença de palha na superfície, que dificulta a incorporação mecânica do fertilizante nitrogenado. Por essa razão, a aplicação incorporada de fertilizantes à base de ureia, prática usual de cultivo de soqueiras, tem dado lugar à aplicação superficial de fontes nitrogenadas mais estáveis com baixa perda de N por volatilização.

Em termos de N na soqueira, as doses aplicadas são geralmente superiores na comparação com as doses na cana-planta, apesar de o nível de incerteza de resposta ainda permanecer relativamente alto. Percentualmente, de 45 experimentos com adubação nitrogenada em cana-soca colhida mecanicamente, sem queima, 75% dos casos exibiram moderada ou nenhuma resposta à aplicação de N (Figura 8.9) (Otto et al., 2016). O mesmo caso foi verificado em estudo mais recente com dez experimentos avaliados em dois cortes (Otto et al., 2021).

A dose de fertilizante nitrogenado para aplicação na soqueira de cana-de-açúcar geralmente é da ordem de 60 a 150 kg ha^{-1} de N e dependerá, principalmente, da expectativa de produtividade de colmos. Como a produtividade da cana-de-açúcar decresce com os sucessivos ciclos de corte, essa adubação também acompanha a menor expectativa de colheita na medida em que os ciclos se sucedem até o momento da reforma do canavial.

Há décadas se conhece a fixação biológica de nitrogênio (FBN) na cana-de-açúcar, porém, sua

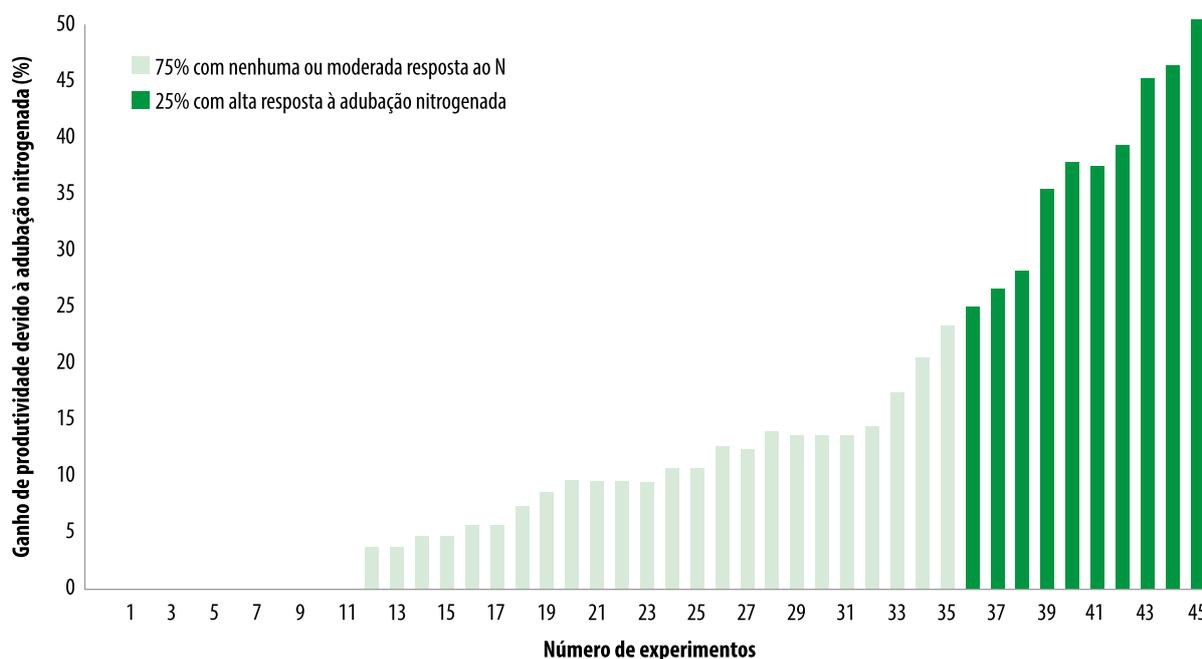


Figura 8.9. Nível de resposta à adubação nitrogenada da cana-soca colhida mecanicamente (sem queima prévia) em 45 experimentos.

Nota: resposta ausente ou moderada quando o ganho de produtividade foi <25%; e alta resposta quando o ganho de produtividade foi ≥25%.

Fonte: Otto et al. (2016).

contribuição para a nutrição mineral da cultura e a possibilidade de um bioinsumo para substituir parcial ou totalmente o uso de fontes orgânicas ou minerais de adubação não estão bem estabelecidas. Na verdade, a FBN na cana-de-açúcar sempre foi parte da explicação sobre a variabilidade de respostas à adubação nitrogenada mineral, bem como usada para justificar uma relação entre exportação de N superior à entrada de N via adubação.

Em 2008, a Embrapa lançou um produto à base de bactérias endofíticas com a finalidade de uso na cana-de-açúcar para a nutrição mineral da cultura (Pereira, 2011). Resultados promissores em laboratório (Oliveira et al., 2006) e uma relação de dependência quanto à variedade de cana-de-açúcar usada (Schultz, 2012) tornaram-se evidentes. No campo, entretanto, um número menor de resultados atestando a eficiência dos inoculantes e/ou bactérias num efeito similar à fertilização nitrogenada mineral foi obser-

vado. O efeito dessas bactérias na promoção de crescimento apareceu como mais consistente do que o efeito na FBN. As pesquisas têm avançado no intuito de compreender melhor a relação entre a planta e as bactérias, o que leva a crer que, num futuro próximo, a inoculação da cana-de-açúcar visando à nutrição em N será exitosa.

Com a manutenção da palha de cana-de-açúcar com a colheita mecanizada, também houve uma expectativa quanto à redução da quantidade de N necessário para aplicação via fertilizante, tendo em vista que parte do nutriente seria reciclado na decomposição do palhço e não mais perdido por volatilização na queima do canavial por ocasião da colheita. Isso, na verdade, não se comprovou, porque a dinâmica do N da palha é lenta. A palha de cana, com relação carbono:nitrogênio (C:N) entre 80:1 e 100:1, leva cerca de um ciclo (1 ano) para alcançar um valor de relação C:N de 30:1 a 40:1, quando, a

partir de então, se esperaria uma mineralização líquida de N (Pimentel et al., 2019). O que ocorre, no entanto, é que, no momento em que o N da palha seria liberado para o solo, uma nova quantidade de palha com relação C:N entre 80:1 a 100:1 é deixada sobre o solo em razão de nova colheita, tendendo a imobilizar parte do N que seria disponibilizado a partir da palha do ciclo anterior. Dessa forma, na prática, nenhuma redução de adubação nitrogenada é atualmente observada.

A adubação nitrogenada tem também um papel importante no desempenho ambiental dos produtos derivados da cana-de-açúcar, sobretudo do etanol, cuja adição na gasolina e/ou substituição se destaca no cenário nacional na redução de emissões de gases de efeito estufa e na mitigação às mudanças climáticas globais. Contudo, o que se viu na cana-de-açúcar é que o fator de emissão de óxido nitroso (N_2O) a partir do fertilizante nitrogenado mineral é, em geral, inferior ao valor default do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), de 1% (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), 0,7% em média (Carvalho et al., 2021). No entanto, a aplicação do fertilizante nitrogenado mineral em conjunto com a vinhaça conduz a emissões de N_2O até três vezes. Estudos realizados por Silva et al. (2017b) mostraram que o efeito combinado da aplicação de vinhaça e fertilizante nitrogenado potencializou as emissões de N_2O , seja em cultivo irrigado, seja em condições de sequeiro (Figura 8.10).

A maior emissão de N_2O a partir do fertilizante aplicado junto ou em período muito próximo da aplicação de vinhaça se deve provavelmente à presença de C solúvel e água, ambos os fatores fundamentais para a emissão de N_2O nos processos de nitrificação e desnitrificação. A estratégia para evitar emissões elevadas de N_2O é o

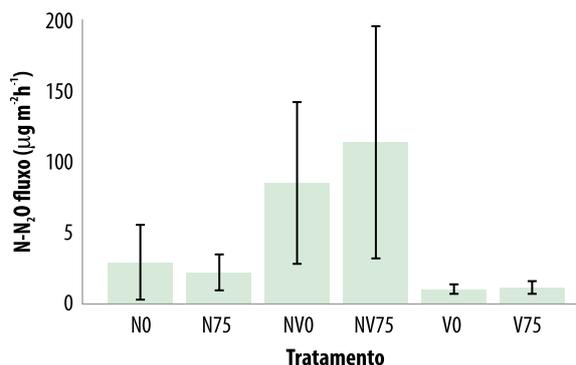


Figura 8.10. Efeito sinérgico da aplicação de vinhaça e fertilizante nitrogenado no fluxo médio de $N-N_2O$ (\pm um erro-padrão) para tratamentos na cana-de-açúcar.

Nota: N0, nitrogênio sem irrigação; V0, vinhaça sem irrigação; NV0, nitrogênio mais vinhaça sem irrigação; N75, nitrogênio sob irrigação; V75, vinhaça sob irrigação; NV75, nitrogênio mais vinhaça sob irrigação.

Fonte: Silva et al. (2017b).

planejamento temporal da aplicação do fertilizante e da aplicação da vinhaça, evitando-se fazê-los em períodos muito próximos.

Há que se ressaltar a prática atual de aplicação localizada de vinhaça enriquecida com N (principalmente ureia), o que possivelmente resulta em alta emissão de N_2O e, conseqüentemente, comprometimento do desempenho ambiental da produção de cana-de-açúcar e produtos derivados.

A presença de palha sobre o solo também tende mais comumente a aumentar a emissão de N_2O (Gonzaga et al., 2018; Vasconcelos et al., 2018), porém, talvez o impacto mais significativo seja na perda de N na forma de NH_3 (Pinheiro et al., 2018). A atividade da urease na palha da cana-de-açúcar é relativamente maior do que no solo, o que potencialmente agrava as perdas de N por volatilização (Mira et al., 2017).

A volatilização de N na forma de NH_3 é um problema ambiental, mas também agrônômico, uma vez que o percentual perdido reduz a eficiência de fertilização. A reação da ureia no solo envolve ação da urease e posterior carbonatação em contato com umidade (água), resultando numa

elevação excessiva do pH ao redor do grânulo de fertilizante. No caso de o fertilizante estar localizado na superfície do solo, as perdas podem chegar a 30% do aplicado, enquanto a volatilização tende a zero quando há cobertura com solo (adubo no sulco de plantio, por exemplo) ou a ocorrência de chuva logo após a aplicação (10 mm são suficientes para zerar perdas de amônia – NH_3).

Ao considerar que a ureia é a fonte de menor custo por ponto de N, há uma motivação no uso dessa fonte para aplicações em superfície, mesmo que com riscos maiores de insucesso. O uso de inibidor da urease em fertilizantes especiais reduz e atrasa a perda de NH_3 (Figura 8.11). É importante perceber que o atraso na perda de N por volatilização de NH_3 também representa maior chance de ocorrência de uma chuva de 10 mm, que reduz a zero a perda.

Fertilização fosfatada

A adubação fosfatada em cana-de-açúcar é fundamental para a maximização da produção da cultura, principalmente, em solos do Cerrado,

que são, em sua maioria, de baixa fertilidade natural em P.

Solos de outras regiões produtoras de cana-de-açúcar do País, como os do bioma Mata Atlântica, também apresentam baixa fertilidade natural em fósforo (P), porém, não são tão fixadores de P, como os do bioma Cerrado. Esse é o caso dos solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. Nesses solos, a fosfatagem corretiva pode ser ainda mais promissora e dissociada da adubação no sulco de plantio.

Em três experimentos foi estudado o efeito da fosfatagem corretiva associada à adubação de plantio no fundo do sulco. Na fosfatagem foi utilizado superfosfato triplo na dose de 100 a 150 kg ha^{-1} de pentóxido de fósforo (P_2O_5), aplicado a lanço e incorporado (Rein et al., 2015). Houve ganhos de 17 e 18 t ha^{-1} em um solo argiloso em Anicuns, GO; de 7 e 15 t ha^{-1} em um solo de textura média em João Pinheiro, MG; e de 9 e 6 t ha^{-1} em um solo de textura média em João Pinheiro, MG, para cana-planta e soca, respectivamente.

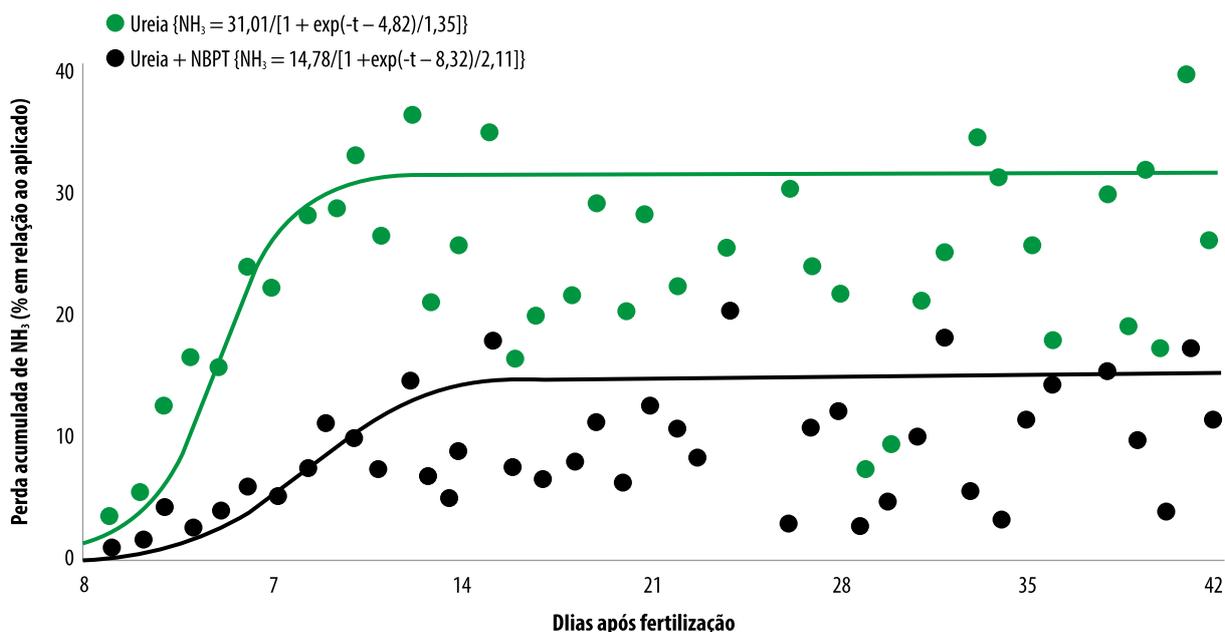


Figura 8.11. Perda acumulada de nitrogênio na forma de amônia (NH_3) em 42 dias após aplicação de ureia e ureia + inibidor da urease (ureia + NBPT) a partir de metanálise de 35 estudos.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017a).

Curvas de respostas de cana-de-açúcar a doses de P foram estudadas em um Latossolo Vermelho muito argiloso em Brasília, com baixo teor de P, em cana-planta e duas socas (Rein; Sousa, 2013) (Figura 8.12). Esse trabalho evidenciou respostas significativas do rendimento de colmos com o uso de superfosfato triplo aplicado a lanço e incorporado no plantio, com ganhos expressivos até a dose de 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Na cana-planta, o rendimento mínimo (sem aplicação de P₂O₅) foi de 74,8 t ha⁻¹ e o rendimento máximo obtido foi de 129,9 t ha⁻¹, o que representou um aumento de 73,6%. Nas duas safras de cana-soca (2011 e 2012) os aumentos foram de 58,7 e 134,7%, respectivamente. Os aumentos significativos de produtividade de colmos, nas duas safras de cana-soca, mostraram o efeito residual do fertilizante, proporcionando mais longevidade ao canavial.

Experimentos realizados em diferentes regiões comparando doses e formas de aplicação de P em diferentes tipos de solos na produtividade da cana-de-açúcar (Rein et al., 2015) mostraram que a aplicação de P a lanço e incorporado

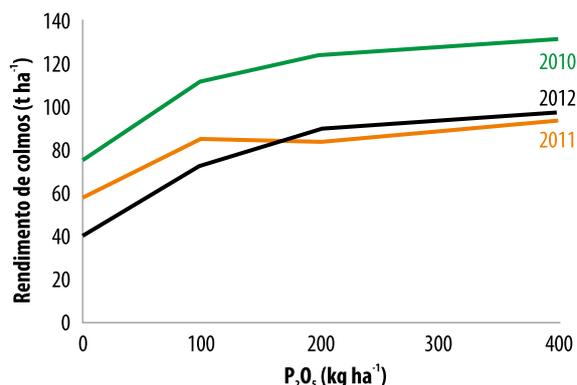


Figura 8.12. Rendimento de colmos de cana-de-açúcar a doses de fósforo aplicadas a lanço em Latossolo Vermelho muito argiloso.

Fonte: Adaptado de Rein e Sousa (2013).

proporcionou maiores rendimentos em comparação à aplicação no sulco de plantio (Tabela 8.8). Isso indica alta resposta da cana-de-açúcar à aplicação de P em maior volume de solo, que surge como possível alternativa à aplicação em sulco de plantio, tradicionalmente realizada na cana-de-açúcar. Esse fato pode estar associado ao acesso de uma maior fração do sistema radicular ao P quando aplicado a lanço com incorporação, embora em menor concentração no

Tabela 8.8. Produtividade da cana-planta em resposta ao modo de aplicação do fertilizante fosfatado no plantio, sem aplicação de fósforo (testemunha), e com o fertilizante fosfatado aplicado exclusivamente no sulco de plantio ou a lanço com incorporação.

Local	Solo/textura	P solo ⁽¹⁾ (mg dm ⁻³)	Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	TCH cana-planta		
				Testemunha	Sulco	Lanço
				(t ha ⁻¹ por corte)		
Belmonte, BA	Argissolo/arenosa	2 (M)	100–200	28	96	115
Lençóis Paulista, SP	Argiloso/arenosa	9 (H)	100	62	85	97
Lençóis Paulista, SP	Neossolo/arenosa	3 (R)	200	69	104	148
Rio das Pedras, SP	Neossolo/arenosa	80 (R)	120	61	74	83
Junqueirópolis, SP	Latossolo/arenosa	13 (R)	100–200	126	144	145
Santa Rita, PB	Argissolo/arenosa	7 (M)	200	63	81	88
Carpina, PE	Argissolo/média	14 (M)	200	87	96	108

⁽¹⁾ Extratores de fósforo do solo: H=H₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹ ("0,5 N"); M = Mehlich 1 (H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹); R = resina trocadora de íons.

Fonte: Reis e Caballa-Rosand (1986), Morelli et al. (1987, 1991), Tomaz (2009) e Costa (2012).

solo. É baixa a mobilidade do P no solo, e sua ciclagem ao longo dos cortes, pois os teores de P na palhada são baixos.

Dois experimentos realizados na Usina Goiasa, em Goiatuba, GO, testaram o efeito da fosfatagem corretiva com superfosfato triplo associada à aplicação de P no sulco de plantio em dois Latossolos Vermelhos de textura média e argilosa (Rein et al., 2021) (Tabela 8.9). Os resultados mostraram um ganho médio na cana-planta de 14,6 t e 11,6 t ha⁻¹ ao ano nos solos de textura média e argilosa, respectivamente com dis-

ponibilidade baixa e adequada de P. Nas cinco safras de cana-soca, o ganho médio foi de 15,7 e 2,3 t ha⁻¹ ao ano nos solos de textura média e argilosa, respectivamente. Em relação ao solo com baixo teor de P, o ganho médio considerando-se as seis safras foi em torno de 15 t ha⁻¹ de colmos ao ano, o que mostrou alta resposta à adubação corretiva do solo.

No Nordeste foram conduzidos três ensaios em Argissolos de texturas arenosa, média e argilosa (Costa, 2012). O trabalho avaliou a produtividade da cana-de-açúcar nos dois primeiros

Tabela 8.9. Experimentos realizados na Usina Goiasa, em Goiatuba, GO. Efeito da fosfatagem corretiva com superfosfato triplo associada à aplicação de fósforo no sulco de plantio em dois Latossolos Vermelhos de textura média e argilosa.

Experimento 1				
Tratamento	P corretivo		Sulco de plantio	Soqueira ⁽²⁾
	Fonte ⁽¹⁾	Taxa		
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)				
A	–	0	0	0
B	–	0	170	0
C	–	0	170	40
D	ST	150	170	0
E	ST	150	170	40
F	Arad, PR	150	170	0
G	Arraias, PR	125	170	0
H	–	0	100 + 70 ⁽³⁾	0
Experimento 2				
Tratamento	Fertilização corretiva		Sulco de plantio	Soqueira
	Fonte	Taxa		
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)				
A	–	0	0	0
B	–	0	170	0
C	–	0	100 + 70 ⁽³⁾	0
D	–	0	170	40
E	ST	150	170	0

⁽¹⁾ ST, superfosfato triplo; e Arad PR e Arraias PR, rochas fosfáticas de Arad e Arraias, respectivamente. ⁽²⁾ Taxa de fósforo anual de manutenção como superfosfato triplo. ⁽³⁾ 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no sulco de plantio e 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em cobertura. Fonte: Rein et al. (2021).

ciclos de cultivo: cana-planta e a primeira soca. Para avaliar as formas de aplicação do P no solo, fracionou-se a dose de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em aplicações a lanço e aplicada no fundo do sulco de plantio, totalizando-se seis tratamentos: testemunha (sem aplicação de P); 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no fundo do sulco; 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço; 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço e 140 kg ha⁻¹ P₂O₅ no fundo do sulco; 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no fundo do sulco; e 140 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no fundo do sulco. O P não foi aplicado em cana-soca. A forma de aplicação do adubo influenciou a produtividade agrícola da cana-de-açúcar nos solos de textura arenosa e média, bem como não teve efeito no solo de textura argilosa. Nos solos de textura arenosa e média, a aplicação a lanço do adubo incrementou a produtividade em 10,31 e 16,67% nos ciclos de cana-planta e cana-soca, respectivamente.

Em relação à calibração de P em solos do Cerrado, foram desenvolvidos estudos em cinco ciclos de cana-de-açúcar (cana-planta e quatro safras de cana-soca). Os resultados mostraram que o teor de P no solo, obtido pelo método da resina, em torno de 12 mg dm⁻³, proporcionou um rendimento relativo próximo a 100% (Figura 8.13). Esse valor é um pouco inferior ao nível crítico de P adotado nas tabelas de recomendação de adubação de P do Cerrado, que é de 15 mg dm⁻³. Ausência de resposta da cana-de-açúcar à adubação fosfatada em solos com teores de P pelo método da resina abaixo de 12 a 15 mg dm⁻³ tem sido verificada em outras regiões (Soltangheisi et al., 2019).

Simões Neto et al. (2015) mostraram que o nível crítico de P nos solos do Nordeste usando-se a resina como extrator foi bem superior que o preconizado para os solos do Cerrado, sugerindo que a mineralogia dos solos do Nordeste é menos fixadora de P, e, portanto, é

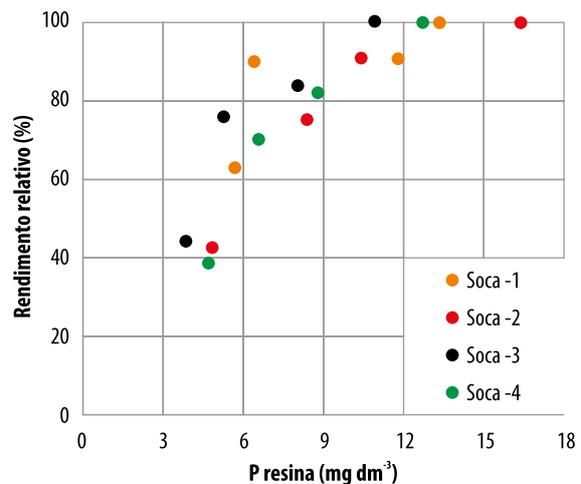


Figura 8.13. Calibração de fósforo em solos do Cerrado.

necessário manejar a adubação fosfatada de maneira diferente, considerando a especificidade regional.

Bases para a recomendação da adubação fosfatada

Citam-se as principais recomendações para manejo de P da Embrapa (Rein et al., 2015):

- Combinar as diferentes formas de aplicação (corretiva, sulco, soca).
- Elevar/manter os teores de P no solo no nível adequado.
- Considerar o potencial produtivo (determinado pelo ambiente e práticas agrícolas).
- Exportação de P nos colmos de 100 a 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ao longo de cinco safras (cortes), perfazendo de 400 a 500 t ha⁻¹.

Adicionalmente, é necessário considerar a mineralogia dos solos da região de cultivo da cana-de-açúcar, que atualmente é cultivada em condições muito diversas de clima e solo.

Fertilização potássica

O potássio (K) é muito extraído pela cana-de-açúcar, como se mostra na Tabela 8.10. Isso indica a necessidade de uma adubação expressiva

Tabela 8.10. Extração de nutrientes pela cana-de-açúcar e alocação em diferentes em partes da planta, com ênfase na maior extração de potássio.

Compartimento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S
	(kg por 100 t)					
Colmos	84,0	35,0	148,0	36,0	41,0	23,0
Restos vegetais	62,0	18,0	88,0	38,0	13,0	13,0
Compartimento	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	(g por 100 t)					
Colmos	200,0	43,0	3.178,0	1.424,0	346,0	–
Restos vegetais	233,0	44,0	119,0	1.073,0	236,0	–

Média de 24 estudos publicados entre 2002 e 2017.
 Fonte: Otto et al. (2019).

desse nutriente, a fim de suprir a demanda da cultura. A resposta para o nutriente é mais significativa quanto maior for a sua deficiência no solo, ou seja, as doses devem ser reduzidas com a elevação do teor de K no solo.

As respostas de aumento de produtividade para K são muito variáveis, principalmente pelo elevado consumo de luxo desse nutriente, quando comparado a N e P (Figura 8.14).

Essa variabilidade na relação entre produtividade e K na parte aérea (Figura 8.14) está relacionada à grande amplitude de teores de K, muito acima da necessidade da cultura, no caso de áreas com histórico de fertirrigação com vinhaça. Isso também é mostrado na Figura 8.15.

O K no palhço da cana-de-açúcar é rapidamente reciclado e disponibilizado para cultura em relação ao demais. Carvalho et al. (2013)

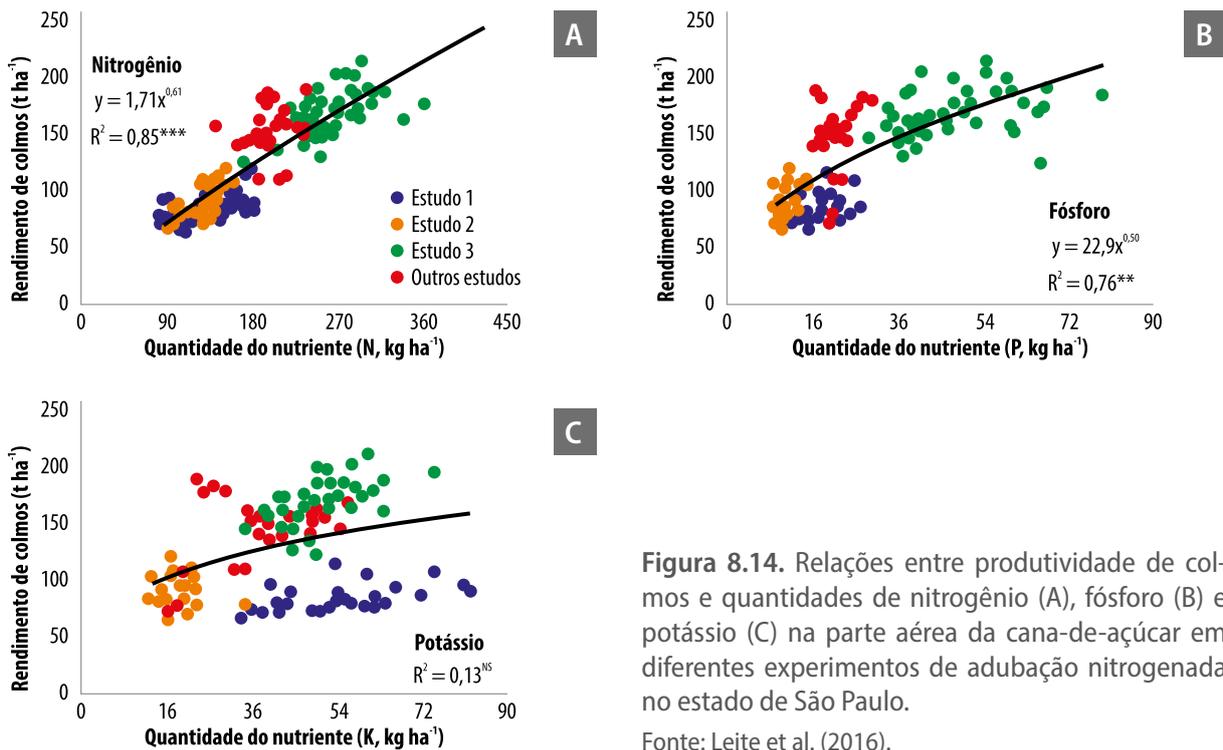


Figura 8.14. Relações entre produtividade de colmos e quantidades de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C) na parte aérea da cana-de-açúcar em diferentes experimentos de adubação nitrogenada no estado de São Paulo.

Fonte: Leite et al. (2016).

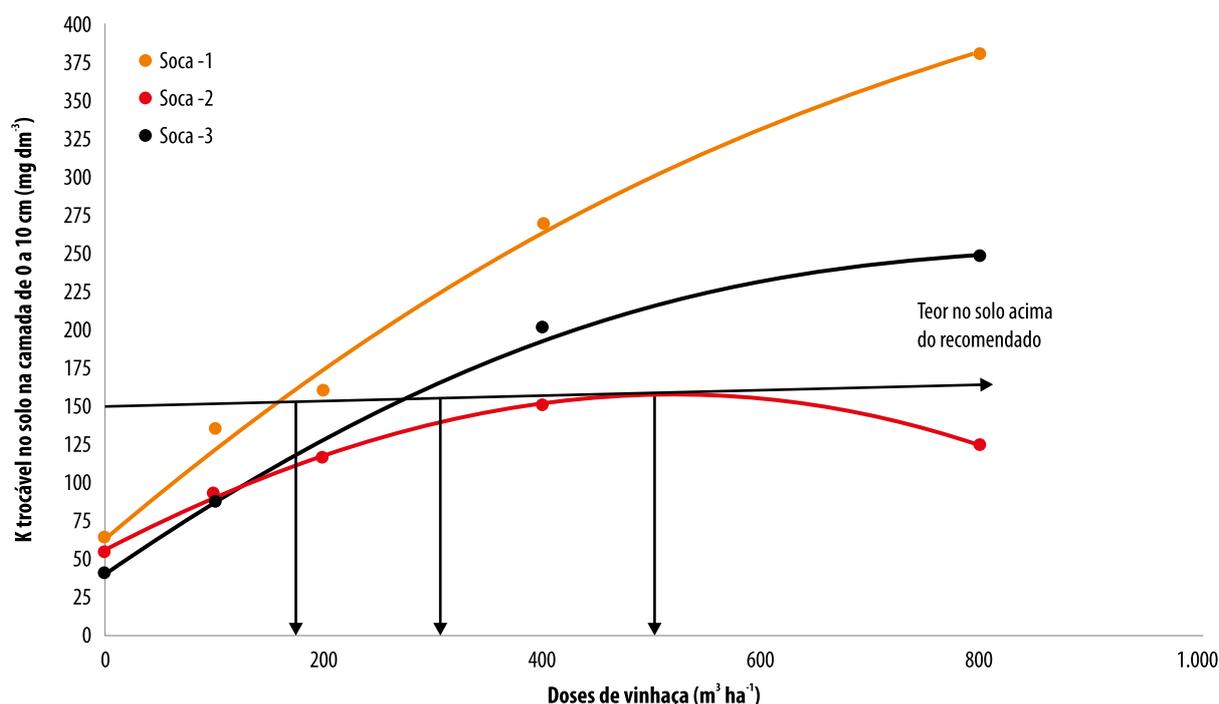


Figura 8.15. Efeitos da vinhaça nos teores de potássio trocável no solo, na camada de 0 a 10 cm.

Y = Teores de K (mg dm⁻³)
 Fonte: Silva et al. (2014).

verificaram que a decomposição ocorreu de forma significativa nos primeiros 180 dias e após 330 dias (Figura 8.16). A entrada de K chega a 144 kg ha⁻¹ durante as fases iniciais de decomposição do palhicho (Tabela 8.11).

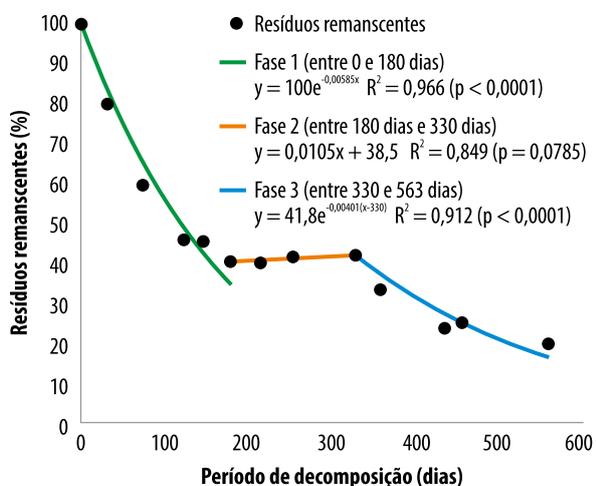


Figura 8.16. Decomposição do palhicho de cana-de-açúcar ao longo do tempo, compreendendo duas estações chuvosas e uma estação seca.
 Fonte: Carvalho et al. (2013).

Tabela 8.11. Quantidades iniciais e remanescentes de macronutrientes no palhicho de cana-de-açúcar, destacando-se o aporte de potássio.

Tempo	Palhicho (t ha ⁻¹)	Macronutrientes (kg ha ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Tempo zero	25	76	12	144	48	61	26
Após 270 dias	9	78	9	5	30	21	11

Fonte: Adaptado de Coelho (2015).

Adubação com enxofre e gessagem

O fornecimento de enxofre (S) é fundamental para o sucesso da cultura da cana-de-açúcar por causa das funções que ele desempenha na planta, pois está presente nos aminoácidos (metionina, cistina e cisteína), bem como na composição da ferredoxina, enzima-chave no processo da fixação simbiótica do N₂ atmosférico. Esses fatores, aliados à deficiência generalizada desse nutriente em solos com baixo conteúdo de

matéria orgânica, requerem especial atenção quanto ao seu manejo.

As áreas com maiores possibilidades de resposta ao S são:

- Áreas sem aplicação de resíduos orgânicos, ou de gesso agrícola.
- Áreas localizadas em solos mais arenosos com baixo teor do nutriente.

O S pode ser fornecido para a cultura da cana-de-açúcar das seguintes formas:

- Na utilização de fontes de P contendo S, como: superfosfato simples (12% S), termofosfato com S (6% S), fosfato parcialmente acidulado, fosfato natural reativo misturado com superfosfato simples (4% S) ou fosfato monoamônico (MAP) revestido com S, no programa regular de adubação.
- Na utilização de gesso agrícola, que, por questões de operacionalidade, se recomenda o uso na dose de 750 a 1.000 kg ha⁻¹ (100 a 150 kg ha⁻¹ de S), aplicados em área total.

A dose de S recomendada por corte ou safra, considerando-se os fatores nutricionais e de perdas, é de aproximadamente 50 a 60 kg ha⁻¹, considerando-se também os teores médios desse nutriente no solo.

Rocha et al. (2017) aplicaram diferentes doses de gesso e avaliaram a distribuição de cálcio (Ca) após um período de 90 dias em um perfil de Latossolo Vermelho Amarelo em campo, como se mostra na Figura 8.17.

Esses resultados mostraram a importância do gesso no aprofundamento de Ca em subsuperfície, favorecendo o aprofundamento do sistema radicular, o que possibilita uma maior capacidade de absorção de água e nutrientes, superando períodos de deficit hídrico.

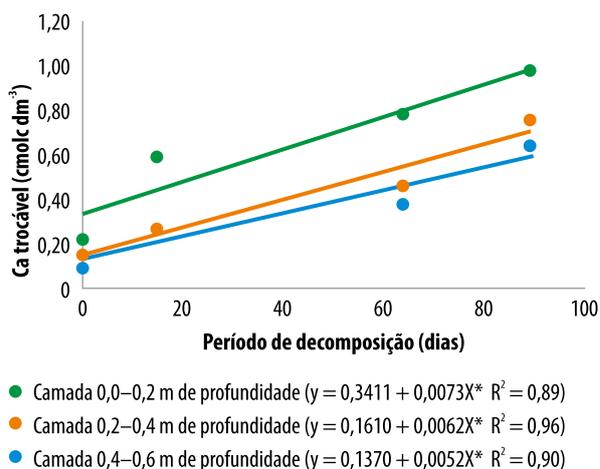


Figura 8.17. Movimentação de cálcio no perfil do solo em função do tempo de aplicação de gesso.

Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2017).

Outra importância da gessagem é a movimentação de sulfato (SO_4) para as camadas inferiores do perfil do solo acompanhado por cátions (Ca, Mg e K), que posteriormente se dissociam, promovendo o processo de troca de cátions nos colóides em subsuperfície, liberando alumínio (Al) para a solução do solo. O Al, por sua vez, se associa ao SO_4 formando o íon $AlSO_4^+$. Esse processo torna o Al não tóxico para as plantas, além de adicionar Ca, Mg e S em profundidade, auxiliando no desenvolvimento das raízes das plantas e, conseqüentemente, maximizando a capacidade de absorver água e nutrientes.

Rocha et al. (2017) também estudaram o efeito da aplicação de diferentes doses de gesso na mobilização do SO_4 em profundidade e observaram que o aumento da dose aplicada resultou numa maior movimentação do SO_4 em subsuperfície, ou seja, quanto maior foi a dose, maior foi a profundidade de mobilização do SO_4 (Figura 8.18). Isso reflete na capacidade do gesso em neutralizar o Al em subsuperfície, atuando em associação com o calcário, que tem efeito mais significativo na camada arável.

Uma característica muito importante do gesso é o seu efeito residual, muito importante para culturas de vários ciclos de produção, a exemplo da cana-de-açúcar.

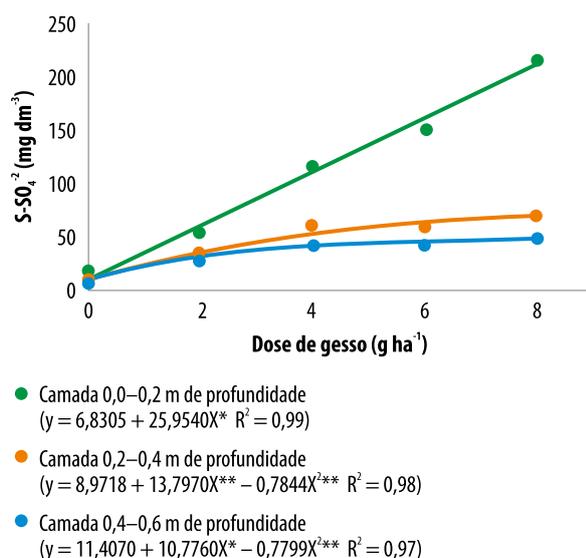


Figura 8.18. Distribuição do íon sulfato em profundidade em um Latossolo Vermelho Amarelo, com adição de diferentes doses de gesso.

Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2017).

Araújo et al. (2016), ao estudarem a produção de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho distrófico em resposta ao uso de gesso no plantio (Figura 8.19), observaram que a aplicação de 5 t ha⁻¹ de gesso incrementou a produção de colmos, com aumento de 10% (13 t ha⁻¹) na cana-planta e um incremento médio de 20% (16 t ha⁻¹ por corte) de colmo, nas três safras de cana-soca subsequentes. Esse aumento foi atribuído ao fornecimento de S como nutriente e à melhoria do ambiente radicular em profundi-

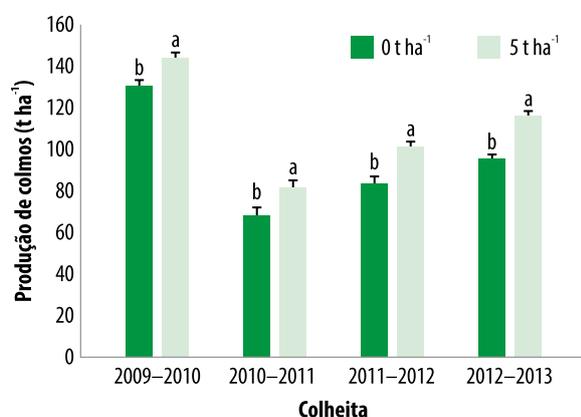


Figura 8.19. Produção de colmos de cana-de-açúcar com a aplicação de gesso.

Fonte: Araújo et al. (2016).

de, com grande aumento nos teores de Ca e redução na saturação por Al (Figuras 8.17 e 8.18). O ganho de produtividade nas soqueiras evidencia o efeito residual do gesso.

Esses resultados mostraram a importância da aplicação de gesso na produção de cana-de-açúcar em solos distróficos do Cerrado, que apresentam alta saturação de Al abaixo da camada arável. Além disso, observou-se nesse mesmo experimento que dose superior à recomendada (5 t ha⁻¹) não proporcionou ganhos de produtividade, causando ainda maior lixiviação de magnésio (Mg) da camada superficial (Araújo, 2018), ainda assim ao alcance do sistema radicular da cultura.

Na comparação do efeito do gesso na movimentação de SO₄ e Ca no perfil do solo, Araújo (2018) comparou a reação do gesso após 13 meses e 87 meses de aplicação nas doses de 0, 0,5, 5 e 10 t ha⁻¹. Observou-se aos 13 meses após a aplicação grande movimentação de SO₄ e Ca no perfil até pelo menos 60 cm com as maiores doses aplicadas (Figura 8.20). Aos 87 meses após a aplicação, o enriquecimento atingiu camadas mais profundas, principalmente com a dose de 10 t ha⁻¹, mas não resultando em ganhos de produtividade. Isso explica o efeito residual do gesso ao longo do tempo no cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado brasileiro.

O efeito do gesso na redução da saturação de Al e também do Al trocável nas camadas subsuperficiais foi mostrado nesse mesmo experimento (Figura 8.21), aos 50 meses após a aplicação de 5 t ha⁻¹ de gesso (Araújo et al., 2016).

O efeito residual do gesso também foi observado no desenvolvimento de raízes da cana-de-açúcar, em que a aplicação de 5 t ha⁻¹ proporcionou aumento significativo da densidade de massa seca de raízes a partir da camada de 40 cm, representando um aumento médio de 56% no perfil aos 87 meses após a aplicação do gesso (Figura 8.22).

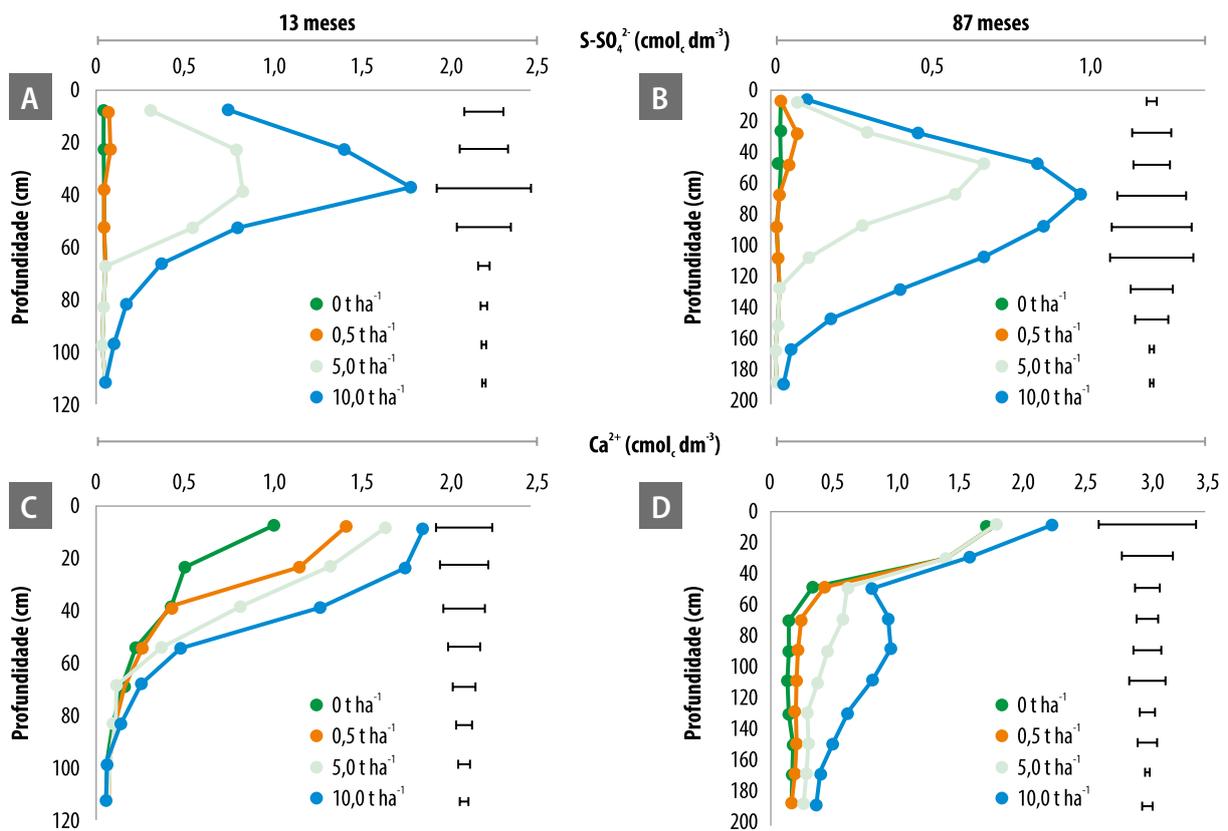


Figura 8.20. Efeito residual da aplicação de gesso na movimentação de $S-SO_4^{2-}$ (A) e Ca^{2+} (B) no perfil do solo. Fonte: Araújo (2018).

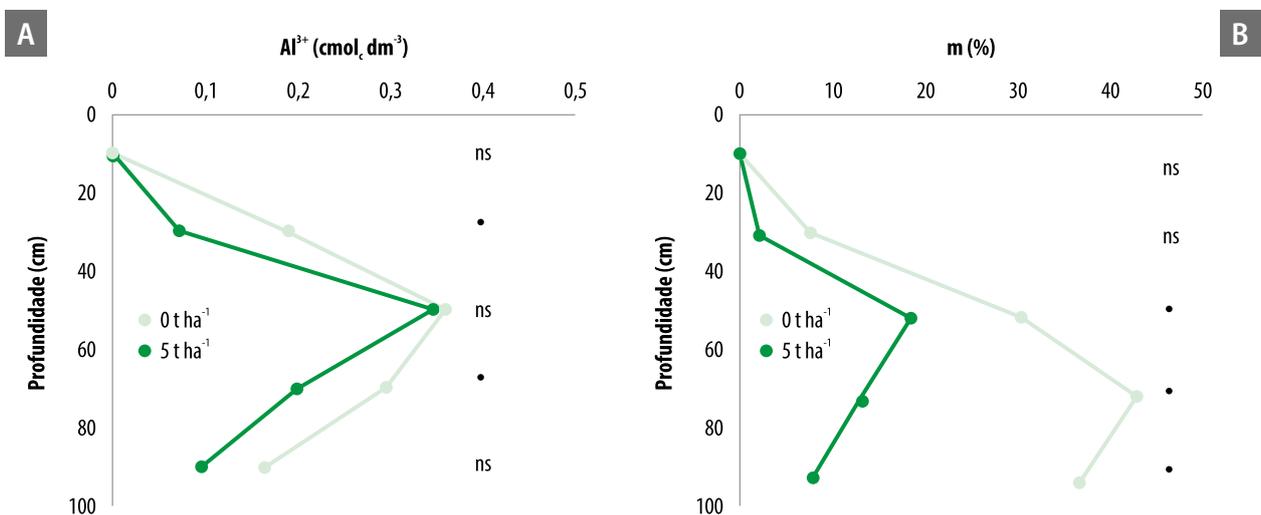


Figura 8.21. Redução dos teores de alumínio (A) e saturação por alumínio (B) no perfil do solo 50 meses após a aplicação de gesso.

Fonte: Araújo et al. (2016).

Além dos fatores citados anteriormente, o gesso pode proporcionar aumento no estoque de carbono do solo. Araújo et al. (2019), ao avaliarem o efeito do gesso no estoque de carbono, após 87 meses de aplicação do gesso, observaram um

aumento de 12,3 t ha⁻¹ em um perfil de 2,0 m de profundidade, em que 84% (10,3 t ha⁻¹) desse valor concentrou-se abaixo de 40 cm de profundidade (Figura 8.23). Isso está associado ao maior desenvolvimento do sistema radicular da

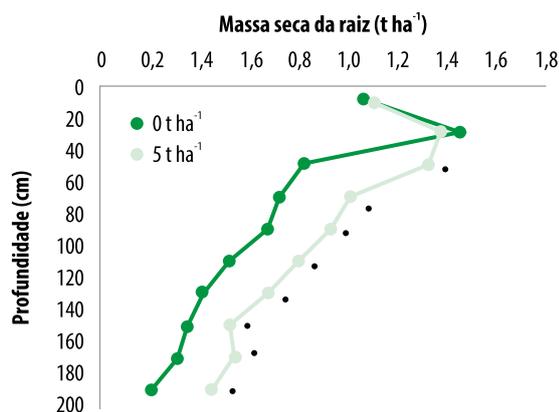


Figura 8.22. Efeito residual da aplicação de gesso na densidade de raízes de cana-de-açúcar.

Fonte: Araújo et al. (2019).

cana-de-açúcar proporcionado pela ação do gesso e pelo efeito da colheita que adiciona material orgânico ao solo. Esse acúmulo de carbono no perfil do solo com a aplicação do gesso pode ser visto como uma prática mitigadora do aumento do efeito estufa e do aquecimento global. Além disso, pode ter impacto direto na melhoria da fertilidade e dos atributos físicos do solo (aumento da porosidade, distribuição de água e redução da densidade e compactação do solo).

Os solos do Cerrado, em geral, são ácidos, com baixos teores de Ca e Mg na camada arável e com excesso de Al em subsuperfície, sendo necessárias as práticas de calagem e gessagem para sua correção, proporcionando, com isso,

o melhor desenvolvimento da cana-de-açúcar, porque a cultura demanda elevados teores de bases e não tolera elevada saturação por Al. Portanto, recomenda-se a aplicação de gesso quando a saturação por Al do solo for maior que 20% ou o teor de Ca²⁺ for menor que 0,5 cmol_c dm⁻³.

Adubação com micronutrientes

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil apresenta produtividades abaixo do seu potencial genético, fato associado principalmente à deficiência hídrica (Dias; Sentelhas, 2018), mas também à baixa fertilidade natural dos solos, em que a cultura vem se expandido. Um dos fatores responsáveis por essa baixa resposta da cultura em termos de produtividade são os baixos teores de micronutrientes nesses solos. Nesse sentido, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas que visem avaliar a eficiência desses micronutrientes na produção de cana-de-açúcar.

Mellis et al. (2016) realizaram 11 experimentos em 11 locais pertencentes às principais regiões produtoras do estado de São Paulo, com o objetivo de verificar o efeito da adubação com micronutrientes na produção de colmos de cana-de-açúcar (Tabela 8.12). Para isso, foram aplicados de forma isolada boro (B), cobre (Cu), manganês

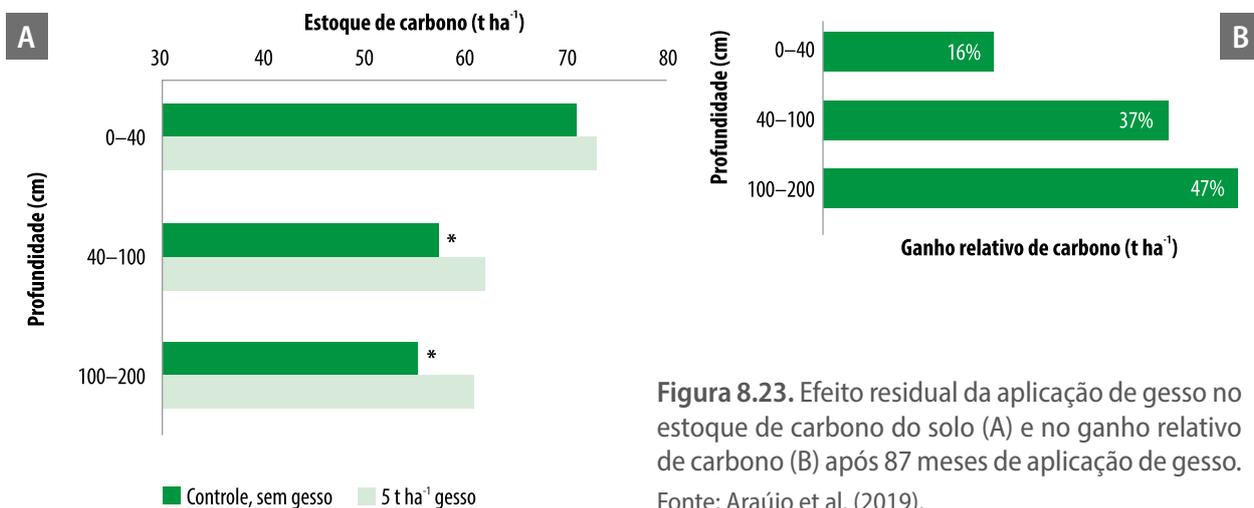


Figura 8.23. Efeito residual da aplicação de gesso no estoque de carbono do solo (A) e no ganho relativo de carbono (B) após 87 meses de aplicação de gesso. Fonte: Araújo et al. (2019).

(Mn), zinco (Zn) e molibdênio (Mo) em sulco de plantio nas doses de 3, 10, 10, 10 e 2 kg ha⁻¹, respectivamente, além da associação desses micronutrientes. Os resultados mostraram que a aplicação individualizada dos micronutrientes promoveu aumento de produtividade. A adubação com B proporcionou ganhos significativos de produtividade em Orindiúva e José Bonifácio, com aumentos de 20 e 32 t ha⁻¹, respectivamente, em comparação à não aplicação de nutrientes (testemunha). A aplicação de Cu proporcionou ganhos significativos em Adamantina e José Bonifácio, com aumentos de 22 e 38 t ha⁻¹, respectivamente. A aplicação de Zn proporcionou ganhos em seis áreas avaliadas com aumentos, variando de 11 a 46 t ha⁻¹. A aplicação de Mn e Mo proporcionou ganhos em três locais, com aumentos variando de 8 a 30 t ha⁻¹, para a aplicação de Mn, e de 12 a 55 t ha⁻¹, para a aplicação de Mo. A aplicação dos micronutrientes de forma associada mostrou respostas significativas apenas em José Bonifácio, com aumento de 34 t ha⁻¹.

Esses resultados evidenciaram que a cana-de-açúcar tem elevada resposta à adubação com

micronutrientes, e que a intensidade da resposta vai depender do tipo de solo, cultivar e de condições climáticas, que são diferentes entre os locais avaliados. Nesse caso, as áreas de produção de cana-de-açúcar são antigas com até 80 anos de cultivo, com grande exportação desses nutrientes e sem reposição, esgotando, assim, o solo em micronutrientes. Além disso, houve uma grande expansão de cana-de-açúcar para solos mais pobres em fertilidade. Com isso, estudos com adubação de micronutrientes em áreas de cana-de-açúcar são cada vez mais necessários.

Silva et al. (2019), ao estudarem a disponibilidade e as reservas de ferro (Fe), Cu, Zn e Mn em solos cultivados com cana-de-açúcar no Nordeste e em diferentes contextos geológicos, concluíram que os teores no solo e os níveis foliares desses nutrientes estavam abaixo do referencial, sugerindo que está ocorrendo uma exportação contínua desses micronutrientes. Isso, certamente, causará deficiências significativas e interferência na produtividade. Portanto, sugere-se que, no manejo das adubações, já se inclua esses micronutrientes.

Tabela 8.12. Efeito dos micronutrientes na produtividade de cana-de-açúcar.

Tratamento	Local ⁽¹⁾											Frequência
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	(t ha ⁻¹)											
Controle	86	114	64	144	103	86	123	112	152	105	177	–
Zn	111 ^(*)	125	91 ^(*)	158 ^(*)	110	99	157 ^(*)	158 ^(*)	163 ^(*)	114	174	6/11
Mn	116 ^(*)	121	88 ^(*)	149	111 ^(*)	98	136	141	153	112	175	3/11
Cu	108 ^(*)	123	77	151	104	94	130	150 ^(*)	146	115	173	2/11
B	92	115	69	151	108	98	143 ^(*)	144 ^(*)	146	121	172	2/11
Mo	98	123	65	156 ^(*)	116 ^(*)	93	136	167 ^(*)	149	119	170	3/11
Completo	90	117	75	151	107	100	127	146 ^(*)	159	116	178	1/11
Média	100	120	77	151	108	96	135	149	152	115	174	–
CV (%)	11,3	8,3	9,7	5,1	5,2	12,0	9,6	15,1	4,2	13,8	3,9	–
F ⁽³⁾	5,17 ^(†)	0,90	5,11 ^(†)	1,24	2,63 ^(†)	0,89	2,71 ^(†)	2,72 ^(†)	2,81 ^(†)	1,11	1,24	–

⁽¹⁾ Local: 1-Adamantina 1; 2-Adamantina 2; 3-Paraguacú Paulista; 4-Serra Azul; 5-Assis; 6-Itapira; 7-Orindiúva; 8-José Bonifácio; 9-Olímpia; 10-Itapetininga; 11-Guaíra; ^(*) Valores no mesmo local diferem significativamente do tratamento controle (teste de Dunnett, P < 0,10); ⁽³⁾ F: F calculado; ^(†) Efeito significativo do tratamento (teste F, P < 0,10).

Fonte: Mellis et al. (2016).

Cavali (2020), ao avaliar o efeito da interação entre a calagem e a adubação com Zn em cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho argiloso (18 meses após o plantio), observou que a aplicação apenas de calcário dolomítico, em um solo com teor médio de Zn, proporcionou a máxima produtividade na dose de 1,5 t ha⁻¹ de calcário, ocorrendo, a partir desse valor, significativa redução da produtividade (Figura 8.24). No entanto, quando foram aplicados 10 kg ha⁻¹ de Zn, a perda de produtividade com o aumento da dose de calcário foi pouco pronunciada. Na dose de calcário de 3 t ha⁻¹, a produtividade foi 20 t ha⁻¹ superior com a aplicação de Zn. Com o aumento do pH, ocorre redução da disponibilidade de Zn no solo, e maior necessidade de sua aplicação para ganhos de produtividades.

Experimento realizado por Santos Junior e Ruiz (2019) mostrou a importância da aplicação foliar de micronutrientes. Os resultados apontaram um ganho significativo de produtividade

com aumento de 8,2 t ha⁻¹ de colmos, com a aplicação foliar aérea de 20 L ha⁻¹ de uma solução contendo micronutrientes (Figura 8.25).

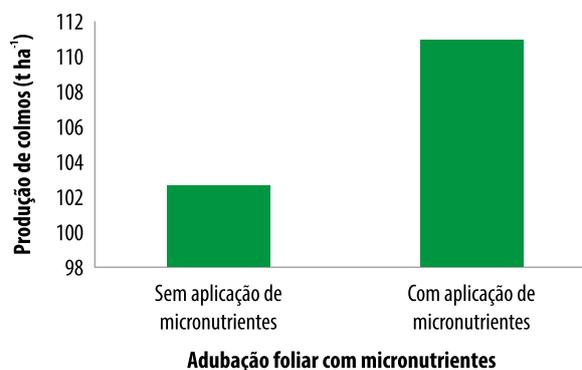


Figura 8.25. Rendimentos de cana-de-açúcar com e sem a aplicação de micronutrientes.

Fonte: Santos Junior e Ruiz (2019).

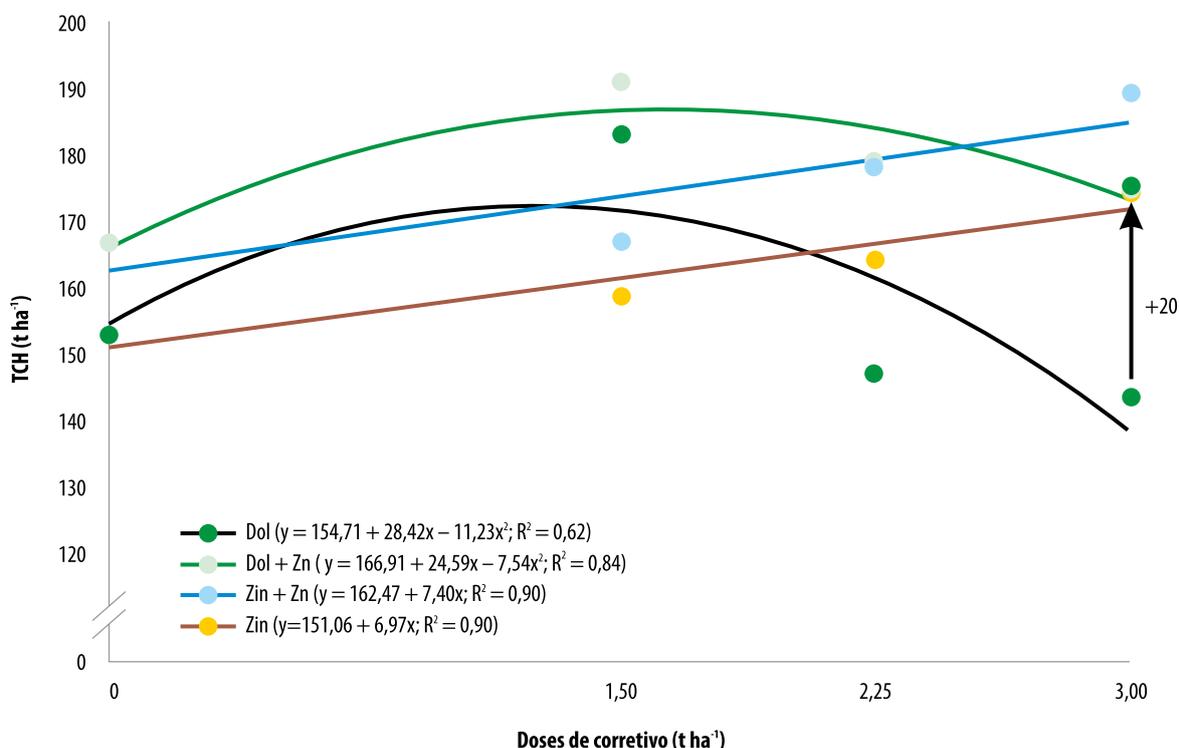


Figura 8.24. Efeito da calagem associada à aplicação de zinco em cana-de-açúcar.

Fonte: Cavali (2020).

Considerações finais

A estruturação das informações para modelar a demanda de nutrientes para determinada produtividade permite calcular o balanço nutricional e a recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar. O balanço entre o que será preciso (demanda nutricional) e o que pode ser disponibilizado (suprimento) pelo solo representa a base para o desenvolvimento dos cálculos necessários para recomendar ou não fertilizantes. Portanto, o cálculo do balanço nutricional indicará a necessidade, ou não, da aplicação de fertilizantes.

Assim, essas recomendações de fertilizantes avançam substancialmente em relação às tabelas de recomendação por integrarem uma série de informações relacionadas ao sistema solo/planta, as quais vão além de uma calibração de caráter regional, normalmente desenvolvida para prestar informações médias sobre as classes de fertilidade e doses recomendadas. Isso faz com que, em muitos casos, o produtor esteja sub ou sobre-estimando a quantidade de fertilizante que está efetivamente aplicando em seu canavial.

No entanto, não se pode menosprezar a importância dessas tabelas de recomendação, pelo que elas têm proporcionado ao cultivo de cana-de-açúcar, principalmente por terem sido criadas, além dos estudos de correlação e calibração, com a experiência do conhecimento prático dos técnicos quanto às possibilidades de respostas da cana à aplicação de fertilizantes. O que se pretende é oferecer mais uma ferramenta baseada nas amplas informações oriundas da pesquisa científica com cana-de-açúcar para permitir aos técnicos e produtores um maior acervo de conhecimento sobre fertilidade do solo e nutrição de plantas, principalmente com os avanços dos últimos anos oriundos da introdução de novas variedades potencialmente bem mais produtivas.

Referências

- ALVAREZ V., V. H. Correlação e calibração de métodos de análises de solo. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBCS/UFV, 1996. p. 615-646.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CATARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G. ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- ARAÚJO, L. G. **Gesso agrícola na cana-de-açúcar: produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo**. 2018. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- ARAÚJO, L. G.; FIGUEIREDO, C. C. de; SOUSA, D. M. G. de; NUNES, R. de S.; REIN, T. A. Influence of gypsum application on sugarcane yield and soil chemical properties in the Brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 11, p. 1557-1563, 2016. DOI: [10.21475/ajcs.2016.10.11.PNE156](https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.11.PNE156).
- ARAÚJO, L. G.; SOUSA, D. M. G. de; FIGUEIREDO, C. C. de; REIN, T. A.; NUNES, R. de S.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; MALAQUIAS, J. V. How does gypsum increase the organic carbon stock of an Oxisol profile under sugarcane? **Geoderma**, v. 343, p. 196-204, June 2019. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.029](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.029).
- BARRETO, A. C.; NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M. Determinação estatística do número de amostras simples de solo por área para avaliação de sua fertilidade. **Revista Ceres**, v. 21, n. 114, p. 142-147, 1974.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 3. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. 489 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. de; PRIETO, H. E.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 769-850.
- CARDOSO, J. A.; LACERDA, M. P. C.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, D. G. dos; FIGUEIREDO, C. C. de. Variabilidade de atributos de fertilidade do solo em áreas cultivadas com

- cana-de-açúcar no Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 506-515, abr. 2014. DOI: [10.1590/S0100-06832014000200015](https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200015).
- CARVALHO, A. M. de; COELHO, M. C.; SÁ, M. A. C. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Decomposição de resíduos vegetais de cana-de-açúcar no Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Ciência do solo: para quê e para quem: anais**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 1-4.
- CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G.; CANTARELLA, H.; CHAGAS, M. F.; GONZAGA, L. C.; LOURENÇO, K. S.; BORDONAL, R. O.; BONOMI, A. Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 1-10, Oct. 2021. DOI: [10.1016/j.rser.2021.111423](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111423).
- CASTOLDI, G.; ROSOLEM, C. A.; CANTARELLA, H.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. O.; PIVETTA, L. A.; SILVA, M. A. S.; DAMIN, V. Eficiência de uso de nitrogênio em agroecossistemas. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, p. 139-238, 2019.
- CAVALCANTI, F. J. de A. (coord.). **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 3. ed. rev. Recife: IPA, 2008. 212 p.
- CAVALI, E. **Interação entre calagem e adubação com zinco em cana-de-açúcar**. 2020. 105 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas.
- COELHO, M. C. **Efeitos da remoção do palhizo residual na ciclagem de nutrientes e no desempenho agrônomo da cana-de-açúcar**. 2015. 45 f. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- CONAB. **Cana-de-açúcar: série histórica - custos - cana de açúcar - 2008 a 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/800-cana-de-acucar>. Acesso em: 2 mar. 2022.
- COSTA, D. B. da. **Adubação fosfatada de cana-de-açúcar: disponibilidade de fósforo e formas de aplicação**. 2012. 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal rural de Pernambuco, Recife.
- CRUZ, D. M. **Depois da quebra em 2021, nova safra de cana deve retomar ganho em produtividade**. 28 jan. 2022. Disponível em: <https://www.energiaquefalacomvoce.com.br/2022/01/28/depois-da-quebra-em-2021-nova-safra-de-cana-deve-retomar-ganho-em-productividade>. Acesso em: 31 jan. 2022.
- DEGASPARI, I. A. M.; SOARES, J. R.; MONTEZANO, Z. F.; DEL GROSSO, S. J.; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N₂O and NH₃ in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, n. 3, p. 329-344, Apr. 2020. DOI: [10.1007/s10705-019-10045-w](https://doi.org/10.1007/s10705-019-10045-w).
- DELLABIGLIA, W. J.; GAVA, G. J. de C.; ARLANCH, A. B.; VILLAS BOAS, R. L.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, E. R. Produtividade de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N e inoculadas com bactérias diazotróficas. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2018. DOI: [10.15809/irriga.2018v1n1p28-41](https://doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p28-41).
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – a multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of the Total Environment**, v. 637-638, p. 1127-1136, Oct. 2018. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.05.017](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017).
- FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; SOUZA, E. A.; ESPIG, S. A.; BROGGI, F. **Amostragem de solo para recomendação de corretivos e fertilizantes**. Recife: UFRPE, 2001. 3 p. (Boletim técnico).
- GLAZE-CORCORAN, S.; HASHEMI, M.; SADEGHPOUR, A.; JAHANZAD, E.; AFSHAR, R. K.; LIU, X.; HERBERT, S. J. Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. **Advances in Agronomy**, v. 162, p. 199-256, 2020. DOI: [10.1016/bs.agron.2020.02.004](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.004).
- GONZAGA, L. C.; CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G. de; SOARES, J. R.; CANTARELLA, H. Crop residue removal and nitrification inhibitor application as strategies to mitigate N₂O emissions in sugarcane fields. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 206-216, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.biombioe.2018.09.015](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.015).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 1: general guidance and reporting**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- JAMES, D. W.; WELLS, K. L. Soil sample collection and handling: technique based on source and degree of field variability. In: WESTERMAN, R. L. (ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. v. 3, p. 25-44. (Soil science society of America book series, n. 3). DOI: [10.2136/sssabookser3.3ed.c3](https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c3).
- KALIDAS-SINGH, S.; BORA, I. P.; THAKURIA, D.; CHANGKIJA, S.; PUYAM A.; KHWAIRAKPAM, L. The comparative soil fertility in traditional and alder-based shifting cultivation of varied fallow lengths in Eastern Indian Himalayas. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, n. 6, 2021. DOI: [10.1080/00380768.2021.2009741](https://doi.org/10.1080/00380768.2021.2009741).

- KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 101-106, mar. 1999. DOI: [10.1590/S0100-06831999000100013](https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000100013).
- LEITE, J. M.; CIAMPITTI, I. A.; MARIANO, E.; VIEIRA-MEGDA, M. X.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient partitioning and stoichiometry in unburnt sugarcane ratoon at varying yield levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1-14, Apr. 2016. DOI: [10.3389/fpls.2016.00466](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00466).
- MACHADO, F. C.; MONTANARI, R.; SHIRATSUCHI, L. S.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. de S. LIMA. Spatial dependence of electrical conductivity and chemical properties of the soil by electromagnetic induction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1112-1120, July/Aug. 2015.
- MANUAL de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. 376 p.
- MELLIS, E. V.; QUAGGIO, J. A.; BECARI, G. R. G.; TEIXEIRA, L. A. J.; CANTARELLA, H.; DIAS, F. L. F. Effect of micronutrients soil supplementation on sugarcane in different production environments: cane plant cycle. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 5, p. 2060-2070, Sept./Oct. 2016. DOI: [10.2134/agronj2015.0563](https://doi.org/10.2134/agronj2015.0563).
- MIRA, A. B.; CANTARELLA, H.; SOUZA-NETTO, G. J. M.; MOREIRA, L. A.; KAMOGAWA, M. Y.; OTTO, R. Optimizing urease inhibitor usage to reduce ammonia emission following urea application over crop residues. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 248, n. 19, p. 105-112, Oct. 2017. DOI: [10.1016/j.agee.2017.07.032](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.032).
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 224 p.
- MORELLI, J. L.; DEMATTÊ, J. L. I.; SILVA, J. A. V.; BAPTISTELLA, J. R.; GIOVANETTI, L. Z. Efeitos da aplicação do superfosfato simples em área total e dentro do sulco. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 4.; CONVENÇÃO DA ACTALAC, 13., 1987, Olinda. **Anais...** Piracicaba: Stab, 1987. p. 76-83.
- MORELLI, J. L.; NELLI, E. J.; BAPTISTELA, J. R.; DEMATTÊ, J. L. I. Termofosfato na produtividade da cana-de-açúcar e nas propriedades químicas de um solo arenoso de baixa fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 1, p. 57-61, 1991.
- NOVAIS, S. V.; MATTIELLO, E. M.; VERGUTZ, L.; MELO, L. C. A.; FREITAS, I. F. de; NOVAIS, R. F. Loss of extraction capacity of Mehlich-1 and monocalcium phosphate as a variable of remaining P and its relationship to critical levels of soil phosphorus and sulfur. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1079-1087, July/Aug. 2015. DOI: [10.1590/01000683rbc20140551](https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140551).
- OLIVEIRA, A. L. M. de; CANUTO, E. de L.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M.; BALDANI, J. I. Yield of micropropagated sugarcane varieties in different soil types following inoculation with endophytic diazotrophic bacteria. **Plant and Soil**, v. 284, n. 1/2, p. 23-32, 2006. DOI: [10.1007/s11104-006-0025-0](https://doi.org/10.1007/s11104-006-0025-0).
- OLIVEIRA, E. C. A. de; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. da. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, ago. 2010. DOI: [10.1590/S0100-06832010000400031](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031).
- OLIVEIRA, F. H. T. de; ARRUDA, J. A. de; SILVA, I. de F.; ALVES, J. do C. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 973-983, out. 2007. DOI: [10.1590/S0100-06832007000500014](https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500014).
- OTTO, R.; ALTARUGIO, L. M.; SANCHES, G. M. Atualizações sobre exigências nutricionais da cana-de-açúcar para fins de manejo da adubação. **Informações Agronômicas**, n. 3, p. 1-10, set. 2019.
- OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? **BioEnergy Research**, v. 9, n. 4, p. 1272-1289, 2016. DOI: [10.1007/s12155-016-9763-x](https://doi.org/10.1007/s12155-016-9763-x).
- OTTO, R.; SOUZA NETTO, G. J. M. de; ALMEIDA, R. F.; ALTARUGIO, L. M.; FAVARIN, J. L. Multisite response of sugarcane to nitrogen rates and split application under Brazilian field conditions. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 1, p. 419-435, Jan./Feb. 2021. DOI: [10.1002/agj2.20461](https://doi.org/10.1002/agj2.20461).
- PATSIOS, S. I.; KONTOGIANNOPOULOS, K. N.; BANIAS, G. F. Environmental impact assessment in agri-production: a comparative study of olive oil production in two European countries. In: BOCHTIS, D.; ACHILLAS, C.; BANIAS, G.; LAMPRIDI, M. (ed.). **Bio-economy and agri-production: concepts and evidence**. London: Academic Press, 2021. pt. 2, chap. 5, p. 83-116. DOI: [10.1016/B978-0-12-819774-5.00005-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819774-5.00005-9).
- PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência**. Itui: Editora Ottoni, 2013.
- PEREIRA, W. **Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas**. 2011. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

- PIMENTEL, L. G.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Decomposition of sugarcane straw: basis for management decisions for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 133-144, Mar. 2019. DOI: [10.1016/j.biombioe.2019.01.027](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.027).
- PINHEIRO, P. L.; RECOUS, S.; DIETRICH, G.; WEILER, D. A.; GIOVELLI, R. L.; MEZZALIRA, A. P.; GIACOMINI, S. J. Straw removal reduces the mulch physical barrier and ammonia volatilization after urea application in sugarcane. **Atmospheric Environment**, v. 194, p. 179-187, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2018.09.031](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.031).
- RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. de. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 223-231, 1973. DOI: [10.1590/S0006-87051973000100011](https://doi.org/10.1590/S0006-87051973000100011).
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Desenvolvimento de métodos de análises de solo: Impactos na agricultura brasileira. **O Agrônomo: Boletim Técnico-Informativo do Instituto Agrônomo**, 24 jun. 2017. Disponível em: <http://oagronomico.iac.sp.gov.br/?p=999>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundag, 1997. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. In: RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. de (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 5-39.
- REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; SOUSA, D. M. G. de; CARVALHO, W. P. de; LEMES, G. de C. Corrective and maintenance phosphorus fertilization on sugarcane yield in Oxisols. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, p. 1-10, 2021. DOI: [10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02160](https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02160).
- REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. de. Sugarcane response to phosphorus sources and placement in a very clayey oxisol of the Brazilian Cerrado. **Proceedings of the International Society of Sugarcane Technologists**, v. 28, p. 477-485, 2013.
- REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; NUNES, R. de S.; KORNDÖRFER, G. H. **Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015. 12 p. (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 29).
- REIS, E. L.; CABALA-ROSAND, P. Respostas da cana-de-açúcar ao nitrogênio, fósforo e potássio em solo de tabuleiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, n. 2, p. 129-134, 1986.
- RESENDE, A. V. de; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C. dos; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agrônomicas**, v. 156, p. 1-19, dez. 2016.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 360 p.
- ROCHA, I. T. M.; BEZERRA, N. S.; FREIRE, F. J.; SOUZA, E. R. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; OLIVEIRA, E. C. A. de; SIMÕES NETO, D. E. Aluminum buffering in acid soil under mineral gypsum application. **African Journal Agricultural Research**, v. 12, n. 8, p. 597-605, Feb. 2017. DOI: [10.5897/AJAR2016.12079](https://doi.org/10.5897/AJAR2016.12079).
- RODELLA, A. A. Métodos de análise de solo, tecido vegetal, vinhaça e torta de filtro. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Penalsucar, 1983. p. 351-368.
- SANTOS, H. L. dos; VASCONCELLOS, C. A. Determinação do número de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 97-100, 1987.
- SANTOS, R. L. dos; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A. de; BARBOSA, J. de A.; MOURA, M. J. A. de; LOPES, N. R. da C.; COSTA, L. G. de A. F.; GUEDES, V. H. de F.; OLIVEIRA, D. M. de A.; SANTOS, M. B. da C. Sampling of sugarcane leaves in field experiments to determine the activity of nitrate reductase. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, p. 76-87, 2018. DOI: [10.1080/00103624.2017.1421648](https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421648).
- SANTOS JUNIOR, P. R. de A.; RUIZ, J. G. C. L. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em função de adubação foliar com micronutrientes aditivados. **Science and Technology Innovation in Agronomy**, v. 3, n. 1, p. 163-170, dez. 2019.
- SCHOSSLER, T. R.; MANTOVANELLI, B. C.; ALMEIDA, B. G. de; FREIRE, F. J.; SILVA, M. M. da; ALMEIDA, C. D. G. C. de; FREIRE, M. B. G. dos S. Geospatial variation of physical attributes and sugarcane productivity in cohesive soils. **Precision Agriculture**, v. 20, p. 1274-1291, 2019. DOI: [10.1007/s11119-019-09652-y](https://doi.org/10.1007/s11119-019-09652-y).
- SCHULTZ, N. **Fixação biológica de nitrogênio associada à cultura de cana-de-açúcar: eficiência e contribuição da inoculação com bactérias diazotróficas**. 2012. 119 f. Tese. (Doutorado em Ciências) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

- SILVA, A. G. B.; SEQUEIRA, C. H.; SERMARINI, R. A.; OTTO, R. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 1, p. 1-13, Jan./Feb. 2017a. DOI: [10.2134/ agronj2016.04.0200](https://doi.org/10.2134/ agronj2016.04.0200).
- SILVA, A. P. M. da; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. de A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 38-43, jan. 2014. DOI: [10.1590/ S1415-43662014000100006](https://doi.org/10.1590/ S1415-43662014000100006).
- SILVA, J. F. da; CARVALHO, A. M. de; REIN, T. A.; COSER, T. R.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; VIEIRA, D. L.; COOMES, D. A. Nitrous oxide emissions from sugarcane fields in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 246, p. 55-65, Aug. 2017b. DOI: [10.1016/j.agee.2017.05.019](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.019).
- SILVA, L. C. da; FREIRE, F. J.; MOURA FILHO, G.; OLIVEIRA, E. C. A. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; MOURA A. B.; COSTA, J. V. T. da; REZENDE, J. S. Nutrient balance in sugarcane in Brazil: diagnosis, use and application in modern agriculture. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 14, p. 2167-2189, 2021. DOI: [10.1080/01904167.2021.1889591](https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1889591).
- SILVA, R. de C. F. da; SILVA, F. B. V. da; BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A. do; OLIVEIRA, E. C. A. de. Assessing the content of micronutrients in soils and sugarcane in different pedogeological contexts of northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-15, 2019. DOI: [10.1590/18069657rbcS20180228](https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20180228).
- SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. dos S.; OLIVEIRA, E. C. A. de; ROCHA, A. T. da. Adubação fosfatada para cana planta em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 73-81, jan. 2015. DOI: [10.1590/ S0100-204X2015000100008](https://doi.org/10.1590/ S0100-204X2015000100008).
- SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de; ROCHA, A. T. da; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S. dos; NASCIMENTO, C. W. A. do. Níveis críticos de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco. **Revista Ceres**, v. 58, n. 6, p. 802-810, dez. 2011. DOI: [10.1590/ S0034-737X2011000600018](https://doi.org/10.1590/ S0034-737X2011000600018).
- SOLTANGHEISI, A.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; ROSSETTO, R.; CARMO, J. B. do; ROCHA, G. C. da; MARTINELLI, L. A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 11, p. 1444-1455, Dec. 2019. DOI: [10.1111/gcbb.12650](https://doi.org/10.1111/gcbb.12650).
- TOMAZ, H. V. de Q. **Fontes, doses e formas de aplicação de fósforo na cana-de-açúcar**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- VASCONCELOS, A. L. S.; CHERUBIN, M. R.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; GMACH, M. R.; SIQUEIRA NETO, M. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. **Biomass and Bioenergy**, v. 113, p. 15-21, June 2018. DOI: [10.1016/j.biombioe.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.03.002).

Correção da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar

Cristiano Alberto de Andrade | Fernando José Freire | Fábio Cesar da Silva | Thomaz Adolpho Rein

Introdução

Solos de regiões tropicais, naturalmente ácidos, sustentam historicamente algo entre 30 e 40% da produção mundial de cana-de-açúcar. A acidez nesses solos é função do ambiente de formação, com elevado intemperismo químico e lixiviação de cátions básicos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}). A denominação cátions básicos ou bases do solo, entretanto, é somente em razão de estarem associados a óxidos e/ou hidróxidos, que, sob o ponto de vista químico, são bases verdadeiras.

As principais características mineralógicas e suas consequências em termos de cargas elétri-

cas no solo, acidez e disponibilidade de bases e alumínio em solos brasileiros são ilustradas na Figura 9.1.

Na América sob clima tropical, há elevada proporção de solos com características químicas originais desfavoráveis ao estabelecimento da cultura da cana-de-açúcar (Sanches; Salinas, 1981). Essas condições relacionadas à baixa fertilidade de solos ácidos (Figura 9.2) proporcionam baixos rendimentos agrícolas, comprometem a longevidade dos canaviais e representam desafio à expansão da cultura sobre áreas de pastagens extensivas, uma tendência atual.



Figura 9.1. Localização do Brasil entre a Linha do Equador e o Trópico de Capricórnio; características mineralógicas e químicas predominantes em solos de ambiente tropical cultivados com cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado de Sá (1999).

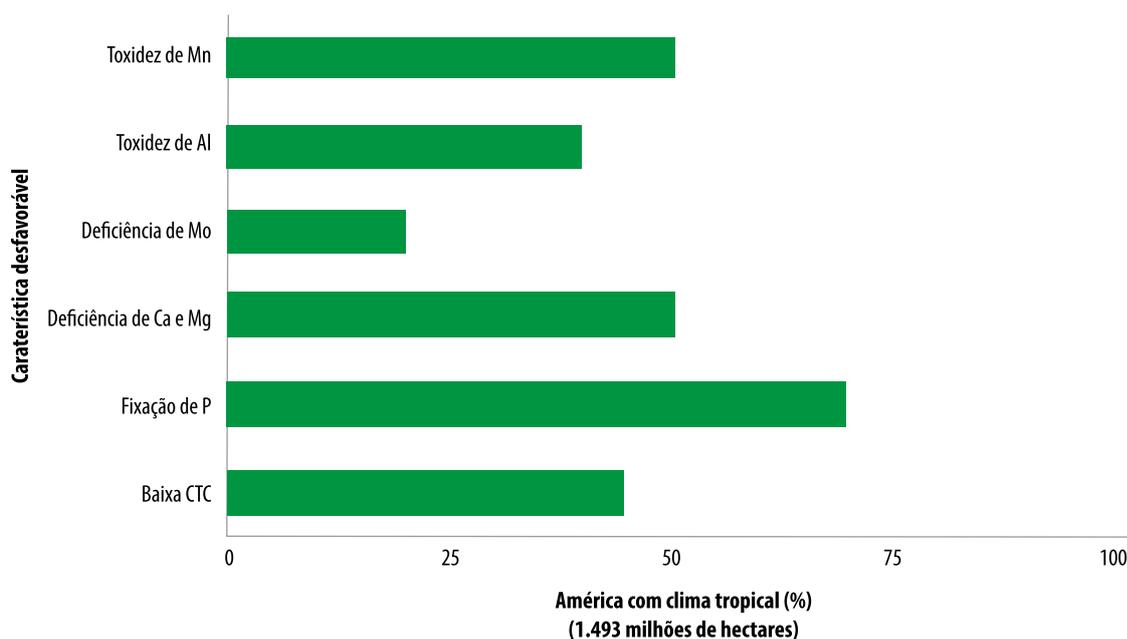


Figura 9.2. Características químicas desfavoráveis ao cultivo de cana-de-açúcar em solos da América de clima tropical.

Fonte: Adaptado de Sanches e Salinas (1981).

Embora a cana-de-açúcar se desenvolva em solos com valores de pH entre 4,0 e 8,3, o que indica sua relativa tolerância a condições de elevada acidez e baixa alcalinidade, respectivamente (Schmehl; Humbert, 1964), seu rendimento é comprometido sob condição de acidez extrema do solo, determinando a necessidade de correção química.

Ao iniciar um programa de adubação para a cultura da cana-de-açúcar, um ponto fundamental é a criteriosa avaliação das condições de acidez do solo e a estruturação de estratégia de manejo para correção da acidez e manutenção de condições favoráveis à cultura. Ressalta-se que o manejo da acidez representa baixo impacto na planilha de custos de produção da cana-de-açúcar, porém, seu impacto positivo na produtividade da cultura é dos mais elevados, principalmente pelo uso adequado de nutrientes e de água.

O presente capítulo apresenta conceitos básicos sobre acidez e corretivos de acidez de solos, visando à capacitação de estudantes e técnicos;

além de trazer informações organizadas a partir da literatura especializada para a atualização dos critérios de recomendação de calcário e gesso para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil, com vistas à adoção pelo setor sucroenergético, contribuindo, dessa forma, para uma produção eficiente e sustentável.

Acidez do solo

Origem da acidez do solo

Solos são formados a partir do material de origem (rochas e minerais) sujeito à ação do clima e de organismos, num determinado horizonte temporal (tempo) e numa determinada posição na paisagem (relevo). Esses são os cinco fatores do intemperismo. Sob condição tropical, a ação do clima e dos organismos é mais intensa e o intemperismo químico é forte, resultando em rotas naturais de acidificação. O manejo do solo e da cultura também contribui para a acidificação do sistema.

Acidificação natural e antrópica do solo

O intemperismo dos minerais primários promove a formação de silicatos ácidos, óxidos e hidróxidos de Ferro (Fe) e óxidos de alumínio (Al) (Figura 9.3). Nessa pedogênese há liberação de cátions básicos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , dependendo da composição química dos minerais primários intemperizados, além da formação de argilominerais de caráter ácido.

Solos muito intemperizados de ambiente tropical possuem cargas variáveis com as condições do meio, principalmente o pH. Os constituintes inorgânicos predominantes na fase sólida (caulinita e/ou óxidos e hidróxidos de Fe e Al) desses solos e a matéria orgânica possuem cargas variáveis.

A caulinita e os óxidos e hidróxidos de Fe e Al formam cargas positivas a baixos valores de pH do solo, o que reforça a necessidade de manejo da acidez do solo, de forma a reduzir a formação de cargas positivas desses constituintes e favorecer o balanço de cargas negativas, que se reflete na capacidade de troca de cátions (CTC) do solo.

Os constituintes da matéria orgânica do solo (grupos carboxílico, fenólico, alcoólico, etc.) apresentam cargas negativas até os limites inferiores de pH (2,5 a 3,5) geralmente encontrados em solos agrícolas.

Em solos ácidos há hidrólise do alumínio, e a forma tóxica Al^{3+} aparece em solução (Figura 9.4) e ocupa parte da CTC dos solos, caracterizando-se uma reserva ácida do sistema.

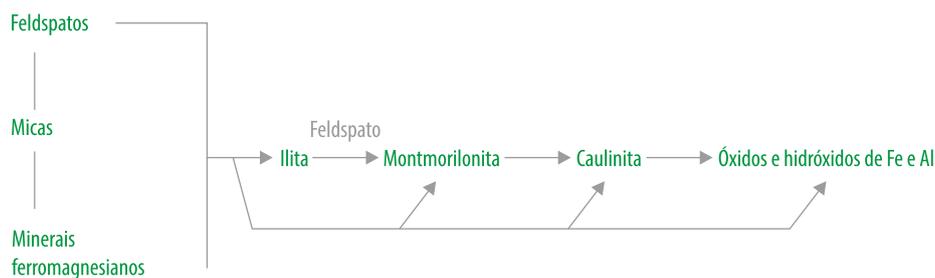


Figura 9.3. Representação esquemática do processo de intemperismo dos minerais primários, passando pela formação de minerais 2:1, 1:1 e culminado com a formação de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

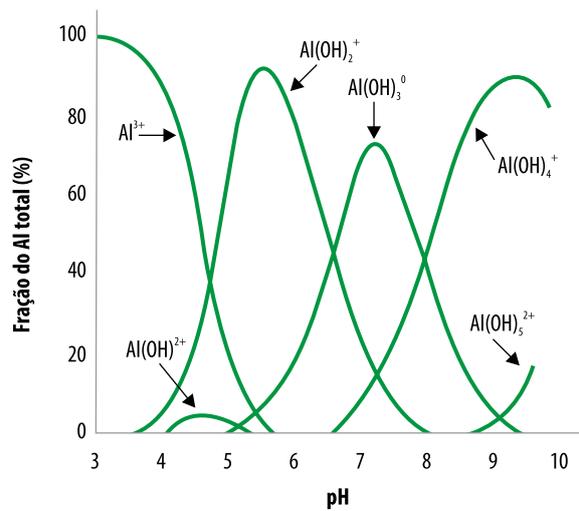


Figura 9.4. Distribuição relativa das espécies químicas de alumínio de acordo com o pH da solução.

Fonte: Marion et al. (1976).

Elevadas precipitações pluviais promovem a lixiviação desses cátions básicos do complexo de troca do solo, os quais são substituídos por outros de caráter ácido, como H_3O^+ e Al^{3+} . Tanto o íon hidrônio ou hidroxônio (H_3O^+ , que simpli-ficadamente é representado como H^+) quanto o alumínio em sua forma tóxica trivalente (Al^{3+}) são ácidos verdadeiros.

O H^+ origina-se, naturalmente, pela difusão do gás carbônico da atmosfera para a água (solução do solo), passando à formação de ácido carbônico (H_2CO_3), que, após dissociação parcial aos valores de pH geralmente encontrados no solo, libera H^+ no sistema (Figura 9.5), que ocupará os sítios de troca da CTC liberados pela lixiviação ou absorção dos cátions básicos Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

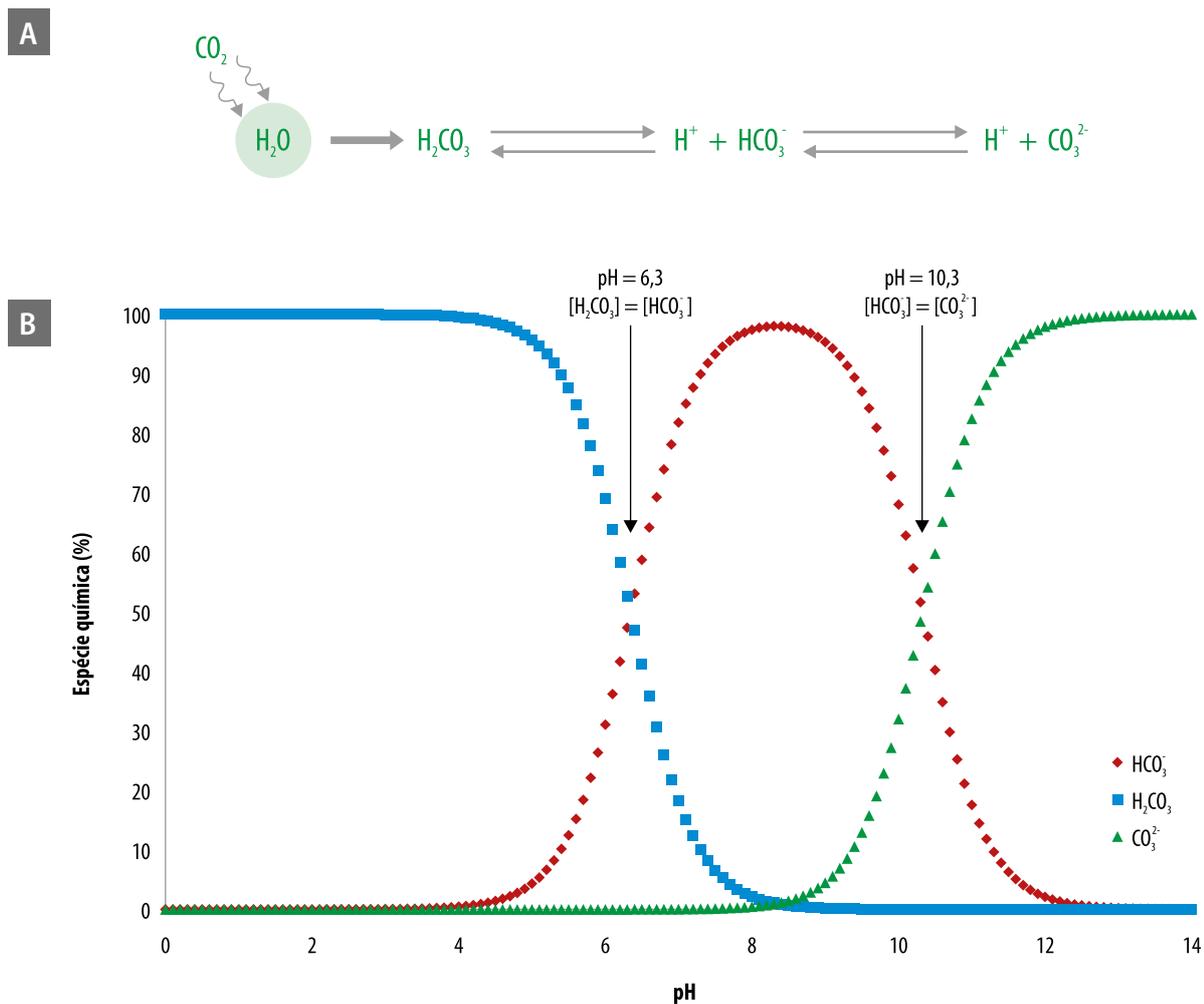


Figura 9.5. Representação da difusão do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico para a solução do solo, com formação de ácido carbônico (H_2CO_3) e posterior dissociação parcial em bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}), liberando H^+ no meio (A); e diagrama de distribuição relativa das espécies químicas H_2CO_3 - HCO_3^- - CO_3^{2-} em função do pH (B).

A absorção de cátions nutrientes pelas plantas também acidifica o solo. Geralmente, a quantidade de cátions absorvidos supera a de ânions absorvidos, fazendo com que a planta libere prótons (H^+) no sistema para manutenção de sua neutralidade elétrica (Figura 9.6).

Cátions básicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ são absorvidos e exportados em quantidades elevadas pela cultura da cana-de-açúcar (Tabela 9.1). Uma fração dos cátions é exportada nos colmos e outra parte retorna ao solo via cinzas, quando a cana é colhida com uso de despalha a fogo, ou via palhada no sistema de colheita de cana sem queima (cana crua). A despalha da cana a fogo, antecedendo à colheita, proporciona perda parcial

de cátions por meio de erosão eólica das cinzas. Além disso, o fogo mineraliza elevada quantidade de cátions que não serão de imediato demandados pela cultura, ficando sujeitos a perdas por lixiviação. Dessa forma, espera-se uma acidificação mais acentuada dos solos em cultivos submetidos à colheita com queima da palhada.

A fertilização nitrogenada com formas orgânicas de nitrogênio (N), ou N amídico (NH_2 da ureia) ou N na forma amoniacal (NH_4^+), é uma das principais fontes de acidificação em solos manejados, uma vez que, em condições de boa drenagem, há tendência de nitrificação do N, que resulta num balanço com liberação líquida de H^+ no sistema (Figura 9.7).

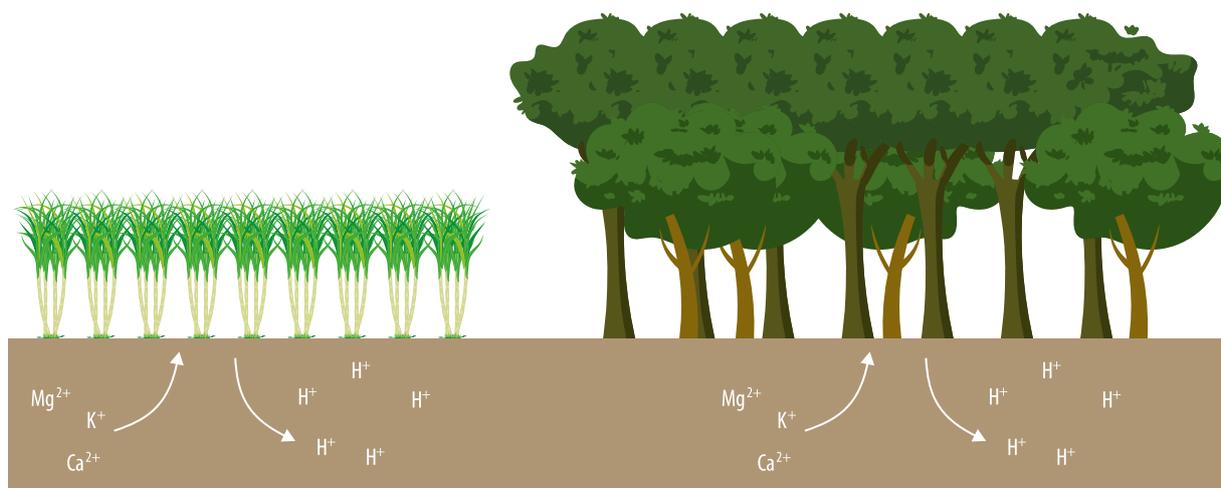


Figura 9.6. Representação esquemática da absorção de cátions suplantando a absorção de ânions, que resulta na acidificação do solo pela liberação de prótons (H⁺) pelas plantas.

Tabela 9.1. Extração e exportação de cálcio, magnésio e potássio para algumas variedades de cana-de-açúcar.

Variedade	Extração Exportação		Variedade	Extração Exportação		Variedade	Extração Exportação	
	(kg ha ⁻¹)			(kg ha ⁻¹)			(kg ha ⁻¹)	
	Ca			Mg			K	
RB72454	201,6	185,2	RB72454	80,2	60,8	RB72454	295,0	171,7
RB763710	320,3	265,0	RB763710	103,8	99,0	RB763710	368,0	225,2
RB813804	199,6	148,8	RB813804	66,9	36,1	RB813804	249,5	96,8
RB863129	192,6	172,7	RB863129	73,3	54,0	RB863129	229,1	136,8
RB867515	271,7	202,3	RB867515	121,4	67,9	RB867515	361,8	222,3
RB872552	230,9	192,6	RB872552	88,9	64,1	RB872552	344,2	285,7
RB92579	259,6	196,2	RB92579	83,4	66,8	RB92579	344,8	197,7
RB943365	228,9	193,9	RB943365	82,1	64,5	RB943365	299,5	165,4
SP78-4764	241,9	192,6	SP78-4764	94,7	63,0	SP78-4764	359,1	219,2
SP79-1011	170,7	184,1	SP79-1011	61,2	51,9	SP79-1011	276,6	109,4
SP81-3250	209,2	191,3	SP81-3250	79,7	62,1	SP81-3250	297,4	190,3
Média	229,7	193,1	Média	85,0	62,7	Média	311,4	183,7

Fonte: Oliveira (2008).

A cana-de-açúcar é a terceira cultura que mais consome fertilizantes no Brasil (11% do total consumido em 2019) (Globalfert, 2020), e o manejo da adubação nitrogenada com fontes amídicadas e amoniacais acelera a acidificação do solo, função do caráter acidificante desses adubos (Tabela 9.2).

O manejo inadequado do solo favorece a erosão e expõe camadas subsuperficiais mais ácidas, principalmente em cultivos conduzidos em condição de maior declive e sem manutenção de palhada (Bezerra; Cantalice, 2006) (Figura 9.8). Em sistema de colheita de cana queimada, a quantidade de resíduo de palhada

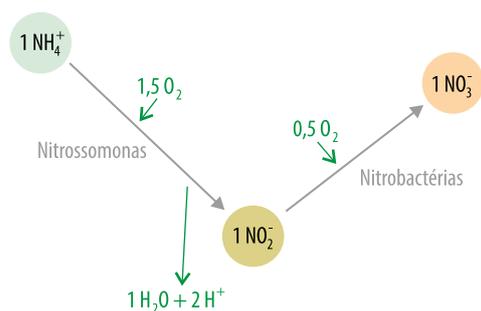


Figura 9.7. Processo de nitrificação a partir do nitrogênio amoniacal no solo (NH_4^+), mostrando a formação de nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), pela ação de bactérias dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, respectivamente, e liberação de 2 mols de H^+ para cada mol de nitrogênio nitrificado.

Tabela 9.2. Quantidade de carbonato de cálcio (CaCO_3) para neutralizar 1.000 kg de fertilizante.

Fertilizante (1.000 kg)	CaCO_3 (kg)
Amônia anidra	1.480
Sulfato de amônio	1.100
Fosfato diamônico	880
Ureia	840
Sulfonitrato de amônia	840
Fosfato monoamônico	600
Nitrato de amônio	600
Nitrocálcio	280
Superfosfatos simples ou triplo	0
Cloreto de potássio	0
Sulfato de potássio	0
Sulfato de potássio e magnésio	0

Fonte: Adaptado de Malavolta (1980) e Tisdale et al. (1985).

é significativamente diminuída, favorecendo a erosão e remoção de cátions básicos do solo.

O uso de vinhaça e da torta de filtro recicla importantes quantidades de cálcio (Ca) e de potássio (K), que contribuirão para a saturação de cátions no complexo de troca do solo. No entanto, materiais orgânicos, de forma geral, tendem a acidificar o sistema em função de alguma con-

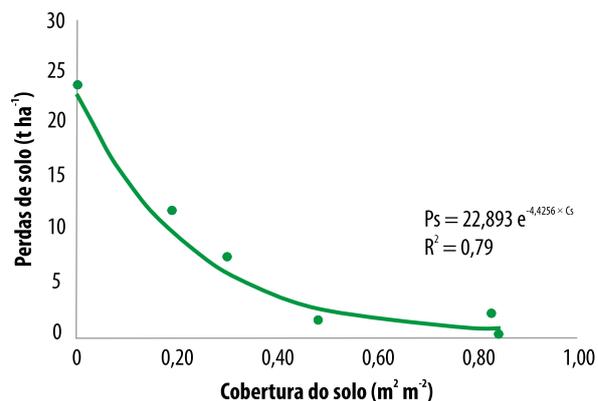


Figura 9.8. Perdas de solo (P_s) em função da cobertura do solo (C_s) entre sulcos em cultivo de cana-de-açúcar.

Fonte: Bezerra e Cantalice (2006).

tribuição de N para mineralização e posterior nitrificação no solo, além da liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

Determinação da acidez do solo

Acidez ativa

A acidez ativa do solo corresponde à atividade do íon H^+ em solução, medida por meio de leitura do pH. Define-se pH como:

$$pH = \log 1/(H^+) \text{ ou } pH = -\log (H^+)$$

em que (H^+) = atividade de H^+ , em mol L^{-1} .

Para determinação da acidez ativa, podem ser utilizados métodos mais simples como o dos indicadores, que, por meio de uma escala de cores e faixas de pH, indicam, aproximadamente, o pH da solução. Em determinações analíticas, utilizam-se métodos potenciométricos, com eletrodo específico (calomelano). Essas determinações são realizadas a partir de suspensões de solo + água ou solo + eletrólito. Os métodos potenciométricos mais utilizados encontram-se apresentados na sequência, de acordo com o descrito no *Manual de Métodos de Análise de Solo* da Embrapa (Teixeira et al., 2017):

- a) Suspensão solo: 1:2,5 (10 cm³ de solo:25 mL de água). Em solos de várzea, em que haja indício de tiomorfismo, utilizar relação 1:1 (solo:água).
- b) Suspensão solo: KCl 1 mol L⁻¹ na relação 1:1 (10 cm³ de solo:10 mL de solução) ou 1:2,5 (10 cm³ de solo:25 mL de solução). A determinação do pH em KCl 1 mol L⁻¹ é importante quando se deseja determinar a carga elétrica líquida do solo, ou seja, se o solo é eletronegativo ou eletropositivo. Com essas determinações estima-se o valor de ΔpH :

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{\text{água}}$$

O valor de ΔpH é negativo, em solos com balanço negativo de cargas, e positivo, em solos com balanço positivo de cargas. Certa proporção de H⁺ e OH⁻, ligados eletrostaticamente, encontra-se no complexo de troca. Com a adição de K⁺ e Cl⁻, via solução de KCl, há deslocamento proporcionalmente maior de H⁺, que OH⁻, do complexo de troca para a solução, que resulta em pH_{KCl} inferior ao $pH_{\text{água}}$. No caso de solos com balanço positivo de cargas, o deslocamento de OH⁻ é proporcionalmente superior ao de H⁺, resultando em pH_{KCl} maior que ao $pH_{\text{água}}$.

O pH em KCl é muito utilizado em levantamentos de solo para fins de classificação, mas seu uso pode ser estratégico no manejo de áreas com solos no extremo do intemperismo, em que a manutenção da concentração de cátions disponíveis às plantas no perfil do solo dependerá de outras estratégias que vão além da correção da acidez, como no caso de solos ácidos. Esses solos possuem baixa capacidade de troca de cátions e, conseqüentemente, baixos teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, num ambiente com pH relativamente elevado, em que a barreira química está pouco relacionada com o excesso de alumínio e mais relacionada com a limitação de bases.

- c) Suspensão solo: CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ na relação 1:1 (10 cm³ de solo:10 mL de solução) ou 1:2,5 (10 cm³ de solo:25 mL de solução). Esse é o método mais utilizado para avaliação da fertilidade dos solos. A solução de eletrólito possui concentração suficientemente elevada para eliminar variações do pH em função da força iônica do meio, além de ter o mesmo cátion geralmente encontrado em maior concentração no complexo de troca do solo.

Acidez trocável

A acidez trocável é representada principalmente pelo Al³⁺ no complexo de troca do solo e, em menor proporção, por H⁺, também ligado eletrostaticamente aos colóides do solo. A rigor, além do Al³⁺ e do H⁺, a acidez trocável conceitualmente inclui outros cátions metálicos com a camada de hidratação e ligados eletrostaticamente às superfícies de troca, como Mn²⁺, Fe²⁺ e Fe³⁺.

Do ponto de vista prático, a avaliação da acidez trocável é realizada por meio da avaliação do teor trocável de Al³⁺ e de sua participação na CTC_{efetiva} . A CTC_{efetiva} corresponde às cargas do solo ao pH natural e pode ser estimada pela soma dos teores trocáveis de K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺.

Em algumas situações, como em áreas com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, principalmente nos estados de Pernambuco e Alagoas, os teores de H⁺ trocáveis são elevados — superando, inclusive, os teores de Al³⁺ trocáveis — e, entre 87 e 92% da CTC, depende da matéria orgânica (Santos, 1993).

O teor de Al³⁺ trocável pode não ser suficiente para a correta interpretação sobre a possibilidade de toxidez à cultura, uma vez que sua atividade em solução é dependente dos níveis de cátions básicos presentes no complexo de troca. Dessa forma, torna-se fundamental conhecer sua participação na CTC_{efetiva} , ou seja, seu

percentual em relação aos demais cátions presentes no complexo de troca. Para isso, calcula-se a saturação por Al^{3+} (m):

$$m = 100 Al^{3+} / CTC_{efetiva}$$

em que m é a saturação por Al^{3+} (%); Al^{3+} é o teor de alumínio trocável do solo ($cmol_c dm^{-3}$); $CTC_{efetiva}$ é a capacidade de troca de cátions efetiva do solo ($cmol_c dm^{-3}$), estimada pela soma dos cátions trocáveis K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} .

Ao comparar os teores de Al^{3+} trocável e os valores de m em solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, constata-se a importância dessa característica nas relações do Al^{3+} com os demais cátions do solo, principalmente, Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Tabela 9.3). Teores de Al^{3+} de $1,20 cmol_c dm^{-3}$ no Gleissolo Háplico Eutrófico (GXVe) são responsáveis por apenas 12,50% de saturação, enquanto teores de $1,00 cmol_c dm^{-3}$ de Al^{3+} no Argissolo Amarelo Distrófico (PAd) proporcionam uma saturação de 39,46%, pelos menores teores de cátions básicos no solo.

Na determinação da acidez trocável, consideram-se duas etapas: 1) a extração, em que se utiliza como extrator uma solução de sal neutro, no caso KCl $1 mol L^{-1}$ na relação solo:solução de 1:10; e 2) a quantificação, por meio de volumetria de neutralização, utilizando-se solução de NaOH $0,05 mol L^{-1}$.

A acidez trocável (Al^{3+}) apresenta relação inversa com o pH do solo (Figura 9.9A) (Sousa et al., 1985). Portanto, o aumento do pH do solo é uma das alternativas para reduzir, ou mesmo eliminar, o efeito tóxico do alumínio. Quando o pH do solo, determinado em água, está com valor igual ou superior a 5,5, todo o alumínio estará precipitado como $Al(OH)_3$ (Figura 9.9B).

Acidez potencial

A acidez potencial (H+Al) é a acidez trocável, representada principalmente pelo Al^{3+} no complexo de troca, e o H^+ ligado covalentemente à superfície dos coloides (acidez não trocável). Esse H^+ é somente deslocado para a solução do

Tabela 9.3. Componentes da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco.

Componente	Solo ⁽¹⁾				
	PAdx	LAd	PAd	GXVe	ESKo
pH (H ₂ O 1:2,5)	5,20	4,10	4,80	4,90	5,55
pH (KCl 1:2,5)	4,00	3,60	3,80	3,60	4,40
H+Al ($cmol_c dm^{-3}$)	5,20	9,24	7,00	6,77	3,22
Al^{3+} ($cmol_c dm^{-3}$)	0,35	2,00	1,00	1,20	0,00
Ca^{2+} ($cmol_c dm^{-3}$)	1,90	0,20	0,90	5,80	2,20
Mg^{2+} ($cmol_c dm^{-3}$)	0,50	0,20	0,50	2,20	0,50
Na^+ ($cmol_c dm^{-3}$)	0,01	0,02	0,03	0,19	0,04
K^+ ($cmol_c dm^{-3}$)	0,07	0,11	0,10	0,21	0,07
$CTC_{efetiva}$ ($cmol_c dm^{-3}$)	2,83	2,52	2,53	9,60	2,81
m (%)	12,36	79,03	39,46	12,50	0,00
V (%)	32,29	5,43	17,98	55,40	46,69

⁽¹⁾ PAdx – Argissolo Amarelo Distrocoeso; LAd – Latossolo Amarelo Distrófico; PAd – Argissolo Amarelo Distrófico; GXVe – Gleissolo Háplico Eutrófico; ESKo – Espodosolo Cárbico Duripânico. Fonte: Simões Neto (2008).

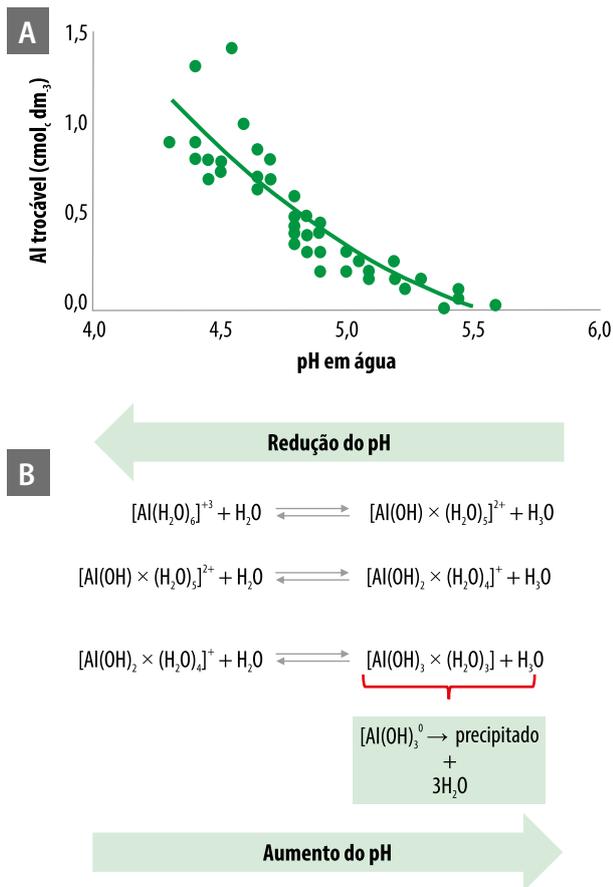


Figura 9.9. Relação entre a acidez trocável e o pH do solo (A) (Sousa et al., 1985); representação da hidrólise do alumínio, responsável por parte da acidez do solo, e precipitação como Al(OH)₃ em função da elevação do pH (B).

solo com o aumento do pH do meio. Dessa forma, a protonação e a desprotonação do H⁺ dependem da natureza química dos constituintes do solo, inorgânicos (caulinita; óxidos e hidróxidos de Fe e Al) e orgânicos (grupamentos funcionais) (Figura 9.10).

Na determinação da acidez potencial, consideram-se duas etapas:

- A extração, em que se utiliza como extrator uma solução de Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 na relação solo:extrator (1:15). Esse ajuste garante, até esse valor de pH, a extração da acidez dependente de pH.
- A determinação, por meio de método volumétrico, com titulação alcalimétrica usando NaOH 0,05 mol L⁻¹.



Grupo	pK ₁	pK ₂ ⁽¹⁾
Si-OH	< 2,0	6 a 7
Al-OH	5 a 7,5	8 a 10
Fe-OH	–	10
Fenólico	–	6
Carboxílico	–	2 a 3
Húmus ⁽²⁾	–	< 2

⁽¹⁾ Quando o valor de pH supera o pK₂ há predomínio de carga líquida negativa. ⁽²⁾ Valor médio de pK₂ para os grupamentos da matéria orgânica humificada.

Figura 9.10. Acidez potencial em função do H⁺ ligado covalentemente e relação com formação de cargas elétricas negativas e positivas no solo; lista com grupamentos inorgânicos e orgânicos, com valores de pK₁ e/ou pK₂, que correspondem aos valores de pH, no qual: (pK₁) - 50% dos sítios de troca estão com carga negativa + 50% dos sítios de troca estão bloqueados (carga zero); e (pK₂) 50% dos sítios de troca estão bloqueados (carga zero) + 50% dos sítios de troca estão com carga positiva.

Outra forma de determinar o teor de (H+Al) é por meio do valor do pH SMP (Shoemaker et al., 1961). Esse método foi desenvolvido por Shoemaker, MacLean e Pratt, daí a origem do nome (SMP), e apresenta alta correlação com a acidez potencial. O método de pH SMP depende de adequada calibração para a variedade de solos e condições regionais. Essa calibração é feita pelo ajuste matemático entre a acidez potencial dos solos determinada com solução de Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 (método considerado referência) e o valor do pH SMP (Kaminski et al., 2007). Assim, em diferentes estados e regiões do Brasil apresentam-se as equações de conversão do valor do pH SMP em (H+Al) (Tabela 9.4).

A determinação do pH SMP é realizada seguindo-se o seguinte procedimento:

Tabela 9.4. Estimativa do teor de (H+Al) em função dos valores de pH SMP para diferentes estados e regiões do Brasil.

Região ou estado	Referência	Equação de regressão ⁽¹⁾
São Paulo ⁽²⁾	Quaggio et al. (1985)	$\hat{Y} = e^{7,76 - 1,053x}$
Minas Gerais ⁽²⁾	Corrêa et al. (1985)	$\hat{Y} = e^{8,06 - 1,111x}$
Cerrados ⁽²⁾	Sousa et al. (1989)	$\hat{Y} = e^{7,719 - 1,068x}$
Paraná ⁽⁴⁾	Pavan et al. (1996)	$\hat{Y} = e^{6,068 - 0,744x}$
Mato Grosso do Sul ⁽²⁾	Maeda et al. (1997)	$\hat{Y} = e^{8,086 - 1,062x}$
Nordeste/Pa ⁽²⁾	Gama et al. (1998)	$\hat{Y} = 1,3294x^2 - 21,073x + 78,63$
Rio de Janeiro ⁽²⁾	Pereira et al. (1998)	$\hat{Y} = e^{7,75 - 1,02x}$
Pernambuco ⁽³⁾	Nascimento (2000)	$\hat{Y} = 0,4837x^2 - 8,4855x + 38,488$
Nordeste ⁽³⁾	Silva et al. (2000)	$\hat{Y} = 3,1521x^2 - 45,161x + 162,53$
Norte/MG ⁽³⁾	Silva et al. (2002)	$\hat{Y} = 0,00359 + 1,556,5806e^{-x}$
Sul ⁽⁴⁾	Kaminski et al. (2002)	$\hat{Y} = e^{10,665 - 1,1483x} / 10$
Noroeste/PR ⁽²⁾	Sambatti et al. (2003)	$\hat{Y} = 20,1925 - 2,6484x$
Amazonas ⁽²⁾	Moreira et al. (2004)	$\hat{Y} = 30,155 - 3,834x$
Vale do Jequitinhonha/MG ⁽⁴⁾	Silva et al. (2006)	$\hat{Y} = e^{8,26 - 1,124312x}$

⁽¹⁾ \hat{Y} é o teor de (H+Al) (cmol_c dm⁻³); e é a base do logaritmo neperiano; x é o pH SMP. ⁽²⁾ Medição em CaCl₂ sem agitação da solução SMP de equilíbrio. ⁽³⁾ Medição em água sem agitação da solução SMP de equilíbrio. ⁽⁴⁾ Medição em água com agitação da solução SMP de equilíbrio.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2000, 2006).

- Na suspensão em que foi determinado o pH em CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, adiciona-se solução-tampão SMP e determina-se o pH. Lembrar de padronizar adequadamente as condições de análise.
- Pode-se, também, determinar o pH SMP associado à determinação do pH em água. Para isso, após a leitura do pH em água, adiciona-se solução-tampão SMP e determina-se o pH.

Interpretação dos valores de pH do solo

Conforme apresentado em item anterior, solos tendem à acidificação em função de processos naturais e sob influência do manejo nas áreas agrícolas destinadas à produção. Assim, medidas da atividade hidrogeniônica são utilizadas para interpretar e alertar sobre o momento da

necessidade de correção dos solos. O pH também tem importante relação com a disponibilidade dos nutrientes no solo, o que reforça a necessidade de interpretação adequada dos valores de pH medidos (Tabela 9.5).

Por meio da análise da Tabela 9.5, fica evidente que a interpretação da acidez do solo difere da interpretação da acidez de soluções aquosas. No caso do solo, valores de pH em água entre 5,5 e 6,0 são desejáveis, que correspondem a valores de pH em CaCl₂ de aproximadamente 5,0 e 5,5, considerando-se a camada superficial 0 cm–20 cm de solos com balanço negativo de cargas.

Efeitos da acidez do solo

Em ambiente tropical, o termo acidez do solo abrange um conjunto de características químicas distintas, a qual compreende o valor de pH

Tabela 9.5. Classes de interpretação para valores de pH do solo, baseadas em critérios agrônômicos.

Classificação agrônômica do pH ⁽¹⁾				
Muito baixo	Baixo	Bom ⁽²⁾	Alto	Muito alto
<4,5	4,5–5,4	5,5–6,0	6,1–7,0	>7,0

⁽¹⁾ pH em água, relação 1:2,5. ⁽²⁾ pH adequado.

Fonte: Alvarez V. e Ribeiro (1999).

do solo, a toxidez iônica de alumínio (Al) e manganês (Mn) e limitações nutricionais por causa dos baixos níveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg), molibdênio (Mo) e fósforo (P). De forma prática, a interpretação da acidez do solo em ambiente tropical é realizada por meio do valor de pH em água inferior a 5,5 (e/ou pH CaCl₂ <5,0), que geralmente está associada a teores excessivos de Al³⁺ (>0,5 cmol_c dm⁻³; e/ou m >30%) na camada superficial 0 cm–20 cm ou em subsuperfície (abaixo de 20 cm) e disponibilidade insatisfatória de Ca²⁺ (<0,4 cmol_c dm⁻³).

Efeitos diretos

Os efeitos da acidez do solo no crescimento e desenvolvimento das plantas, em particular, na cana-de-açúcar, podem ser divididos em efeitos diretos e indiretos. Os efeitos diretos estão relacionados ao excesso de H⁺ e ao Al³⁺ trocável, enquanto os efeitos indiretos estão relacionados à disponibilidade dos nutrientes.

Os íons H⁺ trocáveis competem com alguns nutrientes no mecanismo de absorção pelas plantas, e, em condições de extrema acidez, pode existir dano direto do H⁺ no funcionamento morfofisiológico celular, embora as células vegetais exerçam rigoroso controle de pH do meio interno, utilizando, para isso, mecanismos de exclusão de H⁺, entrada de H⁺, compartimentalização do H⁺ no vacúolo, etc. Esses efeitos são raros e praticamente não reportados para cana-de-açúcar em condições de campo.

Por sua vez, a elevada atividade do Al³⁺ na solução do solo, que se manifesta em valores de pH

dentro da faixa cultivável, é danosa e compromete o desenvolvimento vegetal. O Al³⁺ se liga a diversos compostos da parede celular, membrana plasmática e/ou citoplasma, por causa da sua alta afinidade por compostos doadores de O₂, o que inclui uma longa lista de ligantes, desde moléculas estruturalmente simples, como os fosfatos inorgânicos, até algumas bastante complexas, como antocianinas e outros flavonoides (Tolrà et al., 2005). Em função dessas ligações, o Al³⁺ interfere nos mecanismos celulares (Rossiello; Jacob Neto, 2006).

Muitos dos mecanismos celulares dependem de uma concentração mínima de Ca²⁺, que pode ser comprometida na presença e competição do Al³⁺. O Ca²⁺ atua na manutenção da conformação espacial das redes de pectina, estabelecendo pontes iônicas entre os grupos carboxila (COO⁻) das cadeias poligalacturônicas adjacentes (Fernandes; Souza, 2006), fundamentais para o alongamento radicular (Koyama et al., 2001). No caso do Al³⁺ se ligar às pectinas, em competição ao Ca²⁺ (Taylor et al., 2000), haverá alteração das propriedades físicas da parede, incluindo sua extensibilidade, rigidez e permeabilidade (Rengel; Zhang, 2003), que resulta em inibição do alongamento celular pelo bloqueio dos processos responsáveis pelo afrouxamento da parede celular (Rengel, 1992; Ryan et al., 1997).

É conhecido que os sintomas de toxidez severa por alumínio são similares aos induzidos pela deficiência de Ca²⁺ e que podem ser revertidos ou mitigados pela elevação da atividade do Ca²⁺ no meio radicular (Foy, 1988; Rengel, 1992). Al-

guns trabalhos, porém, têm mostrado uma ação mais eficiente do Mg^{2+} na atenuação da fitotoxicidade do Al^{3+} , suplantando a ação do Ca^{2+} (Tan et al., 1992; Silva et al., 2001). Nesse caso atribui-se ao Mg^{2+} um papel adicional à competição com o Al^{3+} pelos sítios de ligação nas pectinas, que é o estímulo à exsudação de ácidos orgânicos pelo sistema radicular, reduzindo a toxidez por Al^{3+} .

Há outras ações do Al^{3+} na fitotoxicidade, como sua interferência nos elementos do citoesqueleto e outras vias que não os mecanismos eletrostáticos.

Os sintomas de toxidez por Al^{3+} manifestam-se primeiramente na raiz (Figura 9.11), e sua ação tóxica, aliada aos teores insuficientes de Ca^{2+} , torna o desenvolvimento radicular mais lento, provocando engrossamento e não ramificação das raízes, além de desintegração das extremidades radiculares (Furlani; Clark, 1981; Raj, 1988).

Há também alterações na arquitetura do sistema radicular, reprimindo o crescimento das raízes laterais (Foy et al., 1978; Pavan; Bingham, 1982; Macedo et al., 1997), conduzindo, portanto, a sistemas radiculares com menor área e volume radicular (Foy et al., 1978) (Figura 9.12), efeito extensivo aos pelos radiculares (Care, 1995).

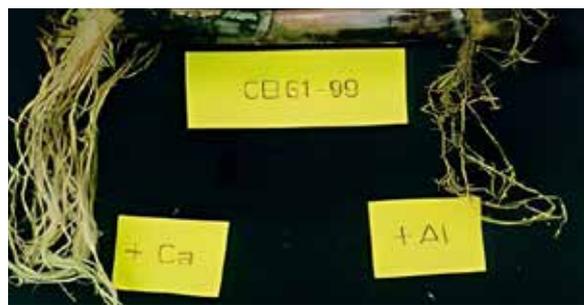


Foto: Orlando Filho

Figura 9.11. Sintoma de toxidez por alumínio em raízes de cana-de-açúcar.

Imagem cedida originalmente por Orlando Filho e Zambello Júnior (1980).

Com a evolução dos danos radiculares, aparecem os sintomas na parte aérea das plantas, os quais se assemelham ao provocado por estresse hídrico. Isso ocorre geralmente a valores de m superiores a 30–40% (Figura 9.13) (Planalsucar, 1980; Marinho; Araújo Filho, 1981; Rodella et al., 1984; Alvarez V.; Ribeiro, 1999; Freire, 2001). Concomitantemente ao sintoma de deficiência hídrica, pode ocorrer também alguma deficiência nutricional, principalmente de nutrientes cuja absorção é dependente do volume de solo explorado, como no caso do fósforo. Por isso, quando os sintomas se tornam visíveis na parte aérea, a produtividade já foi fortemente com-

Fotos: Murilo Luis Marinho



Figura 9.12. Redução de área e volume radicular de cana-de-açúcar em solo com elevados teores de alumínio (A), comparativamente a solo sem a presença de alumínio em altos teores (B).

Imagens cedidas por Marinho e Albuquerque (1983).

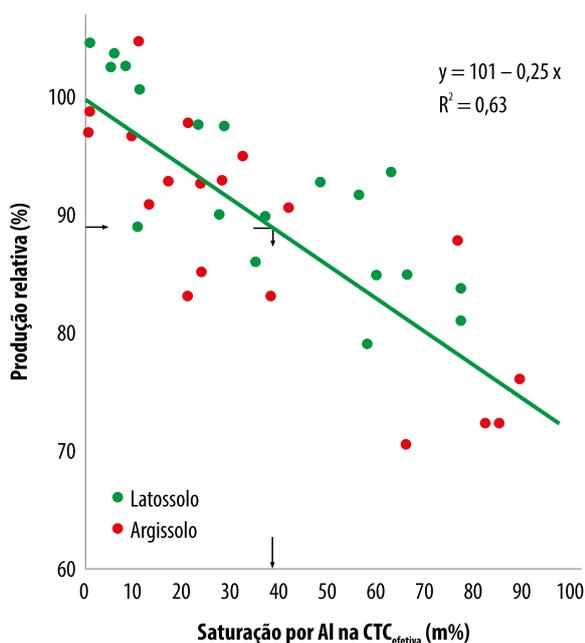


Figura 9.13. Relação entre a produção relativa de cana-de-açúcar e a saturação por alumínio do solo (m).
 Fonte: Adaptado de Marinho e Araújo Filho (1981) e Rodella et al. (1984).

prometida, o que reforça a necessidade de monitoramento das condições de acidez do solo e do manejo adequado dessa acidez.

Efeitos indiretos

Os efeitos indiretos estão relacionados à variação da disponibilidade de nutrientes, para faixas de deficiência ou toxidez, em função do valor de

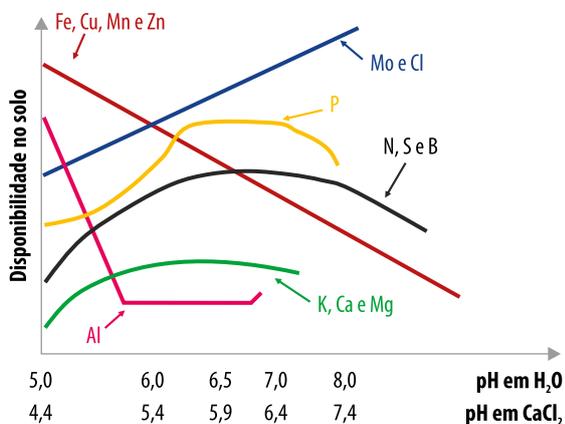


Figura 9.14. Disponibilidade de nutrientes e de alumínio de acordo com o pH do solo.
 Fonte: Adaptado de Instituto da Potassa & Fosfato (1998).

pH do solo (Figura 9.14). Valores de pH do solo em água entre 6,0 e 6,5 são adequados para a maioria das culturas (Sousa et al., 2007). Para cana-de-açúcar, pode-se admitir limites inferiores de pH em água da ordem de 5,5, sem comprometimento ao desenvolvimento da cultura, desde que a saturação por Al^{3+} não ultrapasse 20%.

Em solos arenosos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste e dos Cerrados, o monitoramento do pH é de fundamental importância para a disponibilidade dos micronutrientes metálicos ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) e para o molibdênio (Mo). Para os micronutrientes metálicos, a disponibilidade diminui com a elevação do pH, enquanto para o Mo a disponibilidade cresce com a elevação do pH.

Por sua vez, solos ricos em matéria orgânica e com pH menor ou igual a 5,5, sob condições redutoras, como os solos de várzeas cultivados com cana-de-açúcar, podem disponibilizar Mn^{2+} em níveis tóxicos (Dechen; Nachtigall, 2006).

Correção da acidez do solo e fornecimento de cálcio e magnésio

No início deste capítulo, discutiu-se a tendência natural de acidificação dos solos, acentuada pela interferência antropogênica, resultante da intensificação de práticas agrícolas acidificadoras. Posteriormente, constataram-se os efeitos deletérios dos solos ácidos nas plantas, principalmente porque se correlacionam com perdas significativas de produtividade em cana-de-açúcar, por interferirem, direta ou indiretamente, na adequada nutrição da cultura. O problema torna-se preocupante quando estudos realizados em diversos solos, de diferentes regiões brasileiras, constataram que 75% dos valores de pH na camada superficial variaram entre 3,8 e 5,5 e que o Al^{3+} foi o cátion trocável predominante no complexo de troca em

mais de um terço dos solos com pH inferior a 5,5 (Abreu Júnior et al., 2003).

Assim, a correção da acidez do solo deve ser realizada antes de qualquer programa nutricional e de manejo da fertilidade do solo em cana-de-açúcar. Nessa correção, o insumo mais utilizado para a camada superficial do solo é o calcário, enquanto para a camada subsuperficial é o gesso agrícola (Sousa; Lobato, 2004).

A efetividade de correção da acidez pelo uso do calcário depende do tempo decorrido da aplicação, do sistema de preparo do solo e do volume de solo corrigido (Miranda et al., 2005), entre outros aspectos.

A velocidade de correção da acidez do solo depende da reatividade do calcário traduzido pela distribuição das partículas do corretivo em diferentes classes granulométricas, conforme disposto pela Instrução Normativa nº 35 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Mapa (Brasil, 2006). No entanto, a origem da rocha também tem influência na reação do calcário no solo, o que deve ser incorporado aos procedimentos norteadores do uso desse tipo de corretivo, no intuito de aprimoramento da referida prática agrícola.

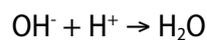
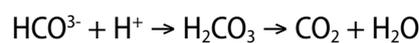
Resultados pioneiros de Gallo e Catani (1954) e Gallo (1954), avaliando a solubilidade de diversos calcários, e mais recentemente de Soratto et al. (2019), evidenciaram maior eficiência de correção da acidez do solo por calcários de origem sedimentar, comparativamente aos calcários de origem metamórfica. Essa diferença se deve à solubilidade do calcário, maior no de origem sedimentar (Gallo; Catani, 1954), que altera a relação entre diâmetro médio da partícula de calcário e a disponibilidade de Ca e Mg no solo.

Objetivos com a calagem

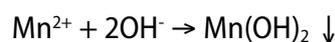
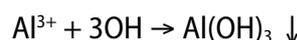
Os calcários agrícolas, que são rochas contendo mistura de carbonatos de cálcio e magné-

sio ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), em proporções variadas, têm ação neutralizante da acidez do solo por meio do aumento do pH do solo (entenda-se como aumento da concentração de OH^- e consequente redução da concentração de H_3O^+) e neutralização do alumínio tóxico (Al^{3+}), que, após reação com ânions OH^- , precipita na forma de hidróxido, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Dessa forma, a aplicação de calcário ao solo é prática agrícola denominada calagem, em que se têm os seguintes objetivos:

- a) Corrigir a acidez do solo pela redução da atividade de H^+ (aumento do pH):



- b) Neutralizar o alumínio e o manganês tóxicos no solo por meio de reações com OH^- e formação de hidróxidos [$\text{Al}(\text{OH})_3$ e $\text{Mn}(\text{OH})_2$] insolúveis, que precipitam (\downarrow):



É oportuno lembrar que essa precipitação poderá ocorrer também com os outros micronutrientes metálicos Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} , diminuindo a disponibilidade desses nutrientes, principalmente se doses excessivas de calcário forem utilizadas.

- c) Fornecer cálcio e magnésio à cana-de-açúcar:



- d) Aumentar a $CTC_{efetiva}$ pela geração de cargas negativas no solo, incrementando, con-

sequentemente, a retenção de cátions nutrientes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e NH_4^+ .

- e) Em solos de Cerrado, altamente intemperizados, neutralizar os sítios de cargas positivas dos oxi-hidróxidos de Fe e Al, reduzindo a adsorção específica de P.
- f) Aumentar a atividade biológica do solo, principalmente a fixação biológica de N e a contribuição do Mo nesse processo, além de promover a mineralização de fração mais lábil da matéria orgânica.
- g) Melhorar a eficiência de utilização de nutrientes e água, pelas melhores condições de desenvolvimento do sistema radicular.

A calagem como fornecedora de cálcio e magnésio

O Ca e o Mg podem ser fornecidos às plantas de várias formas (Figura 9.15), mas, como em ambiente tropical o desenvolvimento do solo implica acidificação e perda dos cátions básicos, a calagem se torna uma prática eficiente para o fornecimento desses nutrientes.

A disponibilidade de Ca é adequada, de modo geral, quando os solos não são ácidos ou quando a acidez é corrigida pela aplicação de corretivo em dose adequada. Para Mg, a deficiência



Figura 9.15. Processos de adição e perda de cálcio e magnésio nos solos.

Fonte: Adaptado de Malavolta (1981).

pode surgir sob as seguintes condições (Vitti et al., 2006):

- a) Solo ácido ($\text{pH} < 5,3$).
- b) Proporção de Mg na $\text{CTC}_{\text{efetiva}} < 6\%$.
- c) Alto teor de K ($> 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), principalmente em áreas com aplicação de vinhaça.
- d) Relação K:Mg > 4 , independentemente dos teores absolutos desses nutrientes.
- e) Teor de Mg trocável no solo inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Os materiais empregados como corretivos da acidez são, basicamente, os óxidos, hidróxidos, os silicatos e os carbonatos (Alcarde, 1992).

Assim, é por meio desses materiais que se aumenta a disponibilidade de Ca e Mg dos solos, estando esse suprimento relacionado com os teores desses nutrientes nos corretivos (Tabela 9.6).

A calagem em solos para cultivo de cana-de-açúcar é prática antiga e largamente utilizada.

Tabela 9.6. Corretivos da acidez e respectivos teores de cálcio e magnésio.

Corretivo	Ca	Mg
	(%)	
Calcário		
Calcítico	32	<3
Dolomítico	22–27	>7
Magnesiano	<1	3–7
Cal hidratada agrícola	33	<1
Cal virgem agrícola	43	<1
Silicatos		
Silicato de Ca	30	<1
Silicato de Ca e Mg	26	7
Silicato de Mg	1,5	11,5
Magnesitas	<1	55
Termofosfato	20	7

Fonte: Lopes (1998), Pereira et al. (2003) e Ramos et al. (2006).

Os sistemas de recomendação da necessidade de calagem, porém, podem variar quanto ao foco na deficiência de Ca e de Mg e/ou critério de neutralização da acidez. Quando baseados nas deficiências de Ca e Mg, percebe-se que no Brasil os níveis críticos desses nutrientes são muito variáveis nas diversas regiões e, de forma geral, relativamente baixos. Deve-se ressaltar que possíveis respostas das culturas ao fornecimento de cálcio e magnésio podem ser mascaradas pelo efeito do corretivo no pH do solo (e efeitos indiretos como redução da toxidez de Al, disponibilidade dos demais nutrientes, aumento de cargas no solo, estímulo à atividade microbiana, etc.), uma vez que, em solos tropicais altamente intemperizados e de reação ácida, o insumo que corrige a acidez é também a fonte de Ca e Mg.

Níveis críticos de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo para cana-de-açúcar, determinados por Cordeiro (1978), foram de 0,28 e 0,25 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. Zambello Júnior e Orlando Filho (1981) encontraram 0,75 e 0,67 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, e Benedini (1988) encontrou 1,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca e 1,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg trocáveis. No estado do Rio de Janeiro, Azeredo et al. (1981) sugeriram níveis críticos de 1,6 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg trocáveis.

No estado de Alagoas, o Planalsucar (1980) estabeleceu o nível crítico de 1,25 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg. Na região de Cerrados, Rodella et al. (1984) encontraram como nível crítico de Ca trocável o valor de 0,65 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e para Mg trocável, 0,17 a 0,34 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Dados mais recentes apontam para níveis críticos de Ca + Mg maiores, como os recomendados por Alvarez V. e Ribeiro (1999), que sugerem 3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para solos de Minas Gerais, e os de recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (Cavalcanti et al., 1998), que apontam para 2,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em solos de Pernambuco.

De forma geral, solos de áreas usadas na produção de cana-de-açúcar, em que se tem um efetivo programa de manejo da acidez, apresentam valores de Ca + Mg acima de 3,0–4,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, não devendo ser, portanto, a deficiência nesses cátions o principal aspecto para recomendação da dose de calcário, pelo menos se considerados os níveis críticos disponíveis na literatura e aqui apresentados (Tabela 9.7).

Tabela 9.7. Nível crítico de cálcio + magnésio no solo para cana-de-açúcar em diferentes regiões.

Região	Nível crítico de Ca + Mg ⁽¹⁾ ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)
Norte	2,5
Nordeste	2,5
Centro-Oeste	3,0
Sudeste	3,0
Cerrados	3,5

⁽¹⁾Valor de X utilizado nos métodos para cálculo da necessidade de calagem baseados na neutralização do alumínio e (ou) elevação dos teores de cálcio e magnésio. Fonte: Azeredo et al. (1981, 1996) e Orlando Filho et al. (1996).

Determinação da necessidade de calagem

No Brasil há grande diversidade de regiões com características específicas de solo, clima e desenvolvimento socioeconômico. Assim, tecnologias geradas em determinada região nem sempre poderão ser utilizadas diretamente em outras, sem modificações e adaptações para adequação local.

Vários métodos para estimar a necessidade de calagem (NC) são utilizados no País. No Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, foi adaptado o SMP (Mielniczuk et al., 1969), enquanto em São Paulo e parte do Paraná foi adaptado o da saturação por bases (Raij, 1981). Nas demais regiões, inclusive no bioma Cerrado, o método

mais empregado é baseado no teor de Al trocável e de Ca e Mg trocáveis, difundido originalmente por Mohr (1960) e Cate (1965). Em Minas Gerais considera-se a tolerância da cultura ao Al^{3+} trocável (Alvarez V.; Ribeiro, 1999). No Nordeste, os critérios para neutralização do Al trocável e elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis do solo são utilizados em forma excludente, sendo o maior valor obtido utilizado na recomendação da quantidade de calcário a aplicar, uma vez que, ao se neutralizar o Al^{3+} trocável, fornece-se Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e vice-versa (Marinho; Albuquerque, 1983).

Na cultura da cana-de-açúcar, o método para neutralização do Al^{3+} trocável e elevação dos teores trocáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} do solo tem sido largamente estudado, sendo importante o conhecimento dos níveis críticos de Ca^{2+} e de Mg^{2+} , bem como o limite de tolerância da cultura à saturação por Al^{3+} do solo.

Assim, como constata Sousa et al. (2007), a calagem é fundamental para a agricultura em solos ácidos. No entanto, não existe uma definição clara sobre o melhor método para determinar a NC, ou seja, a quantidade de corretivo a ser aplicada ao solo.

Método da curva de incubação

Esse método consiste na incubação de amostras de solo com quantidades crescentes de $CaCO_3$ p.a. até estabilização do pH, que pode variar entre 30 a 90 dias, dependendo do poder tampão da acidez do solo. Por ser pouco operacional, demandar tempo e mão de obra excessivos e apresentar custo elevado, não é um método de rotina para determinação da necessidade de calagem em cana-de-açúcar.

No entanto, em atividades de pesquisa, principalmente em ambientes controlados, é largamente utilizado, além de ser o padrão para a calibração de outros métodos.

Em cana-de-açúcar, os métodos mais utilizados para estimar a NC são: saturação por bases; neutralização do Al^{3+} e (ou) elevação de Ca^{2+} e Mg^{2+} ; e solução tampão SMP.

Método da saturação por bases

Nesse método, o cálculo da NC é dado pela expressão:

$$NC = CTC_{pH7,0} (Ve - Va)/100$$

em que NC é a necessidade de calagem ($t\ ha^{-1}$); $CTC_{pH7,0}$ é a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 ($cmol_c\ dm^{-3}$); Va é a saturação por bases atual, dada na análise do solo (%); e Ve é a saturação por bases desejada ou esperada, que, no caso da cana-de-açúcar, é de 60% (Spironello et al., 1996).

Esse é o principal método utilizado no Sudeste, no Centro-Oeste e em parte do Nordeste, principalmente em solos com valores de $CTC_{pH7,0}$ entre 4 e 12 $cmol_c\ dm^{-3}$. Recomendações de NC em solos que apresentam $CTC_{pH7,0}$ abaixo de 4 $cmol_c\ dm^{-3}$ ou acima de 12 $cmol_c\ dm^{-3}$ podem ser sub ou superestimadas, respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, solos sob cana-de-açúcar com manejo da acidez do solo geralmente apresentam valores de Ca + Mg de 30 a 40 $cmol_c\ dm^{-3}$, ou seja, encontram-se acima do valor mínimo de CTC para aplicação adequada desse método.

É importante perceber que o método da saturação por bases considera a natureza variável das cargas de solos muito intemperizados, típicos de ambiente tropical, que representam a maior parte dos solos agricultáveis no Brasil. Além disso, o método considera também a demanda da cultura (valores V atual e esperado) e as características do corretivo em termos de reatividade e poder de neutralização. Esse último aspecto, relacionado ao corretivo, será tratado mais adiante neste capítulo.

Método da neutralização do alumínio trocável e elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis

A NC é assim calculada:

$$NC = Y[Al^{3+} - (m_t \times CTC_{efetiva}/100)] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

em que NC é a necessidade de calagem ($t\ ha^{-1}$); Y é um índice da capacidade tampão da acidez do solo que pode ser estimado pelo teor de argila ou pelo valor do P-rem (fósforo remanescente); Al^{3+} é a acidez trocável fornecida na análise do solo ($cmol_c\ dm^{-3}$); m_t representa a máxima saturação por alumínio tolerada pela cultura, que, no caso da cana-de-açúcar, é de 30% (Alvarez V.; Ribeiro, 1999); $CTC_{efetiva}$ é a capacidade de troca de cátions efetiva ($cmol_c\ dm^{-3}$); X é a correção da deficiência de Ca e de Mg, assegurando um valor mínimo para Ca + Mg, que, para a cana-de-açúcar, varia com a região de cultivo, conforme a Tabela 9.7; e Ca^{2+} e Mg^{2+} são os teores trocáveis desses nutrientes fornecidos na análise de solo ($cmol_c\ dm^{-3}$).

O valor do índice da capacidade tampão da acidez (Y), quando em função do teor de argila do

solo, pode ser estimado pelo modelo de Alvarez V. e Ribeiro (1999):

$$Y = 0,0302 + 0,06532X - 0,000257X^2; (R^2 = 0,999)$$

em que Y é o índice da capacidade tampão da acidez do solo; e X é o teor de argila (%).

Ainda, segundo os mesmos autores, o valor de (Y) pode ser estimado também em função do fósforo remanescente (P-rem):

$$Y = 4,002 - 0,125901X + 0,001205X^2 - 0,00000362X^3; (R^2 = 0,999)$$

em que Y é o índice da capacidade tampão da acidez do solo; e X é o valor do P-rem ($mg\ L^{-1}$).

Ao considerar que o teor de argila não é um bom estimador da capacidade tampão da acidez, uma vez que a capacidade tampão depende não somente da quantidade de argila, mas, também, de sua qualidade (Alvarez V., 1982), orienta-se a usar a estimativa em função do P-rem ou, ainda, utilizar um modelo que relaciona o P-rem e o teor de argila (Freire, 2001) (Figura 9.16).

Originalmente o método apresentava restrições ao uso por não considerar o poder tampão da acidez dos solos e as exigências em Ca e Mg das culturas (Coleman et al., 1959; Mohr, 1960; Cate,

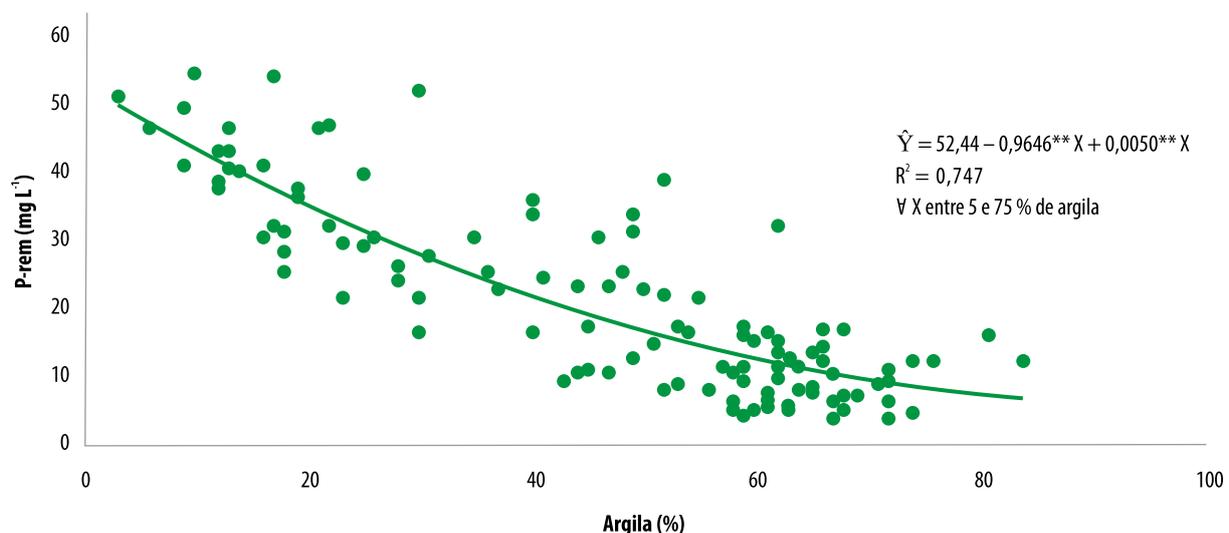


Figura 9.16. Valor de fósforo remanescente (P-rem) em função do teor de argila no solo.

Fonte: Freire (2001).

1965; Kamprath, 1967). No entanto, muitas contribuições foram feitas para o aprimoramento do método (Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1978, 1989; Freire et al., 1984; Alvarez V.; Ribeiro, 1999; Sousa; Lobato, 2004), tornando-o bom estimador da NC dos solos, principalmente pelo modelo contínuo para estimar a capacidade tampão da acidez e a tolerância das culturas ao Al^{3+} .

Como a cana-de-açúcar tolera algum nível de saturação com Al^{3+} sem prejuízos à produtividade, pode-se por meio desse método de NC preservar parte dos sítios de troca com alumínio. Isso é particularmente interessante em casos onde a manutenção de boa agregação do solo e de adequada permeabilidade hídrica são estratégias, considerando-se, além dos aspectos edafoclimáticos envolvidos, a capacidade operacional do empreendimento rural, que normalmente gerencia extensas áreas no caso da cana-de-açúcar.

Por outro lado, o método de neutralização do alumínio trocável e elevação dos teores de cálcio e magnésio não relaciona diretamente a correção da acidez com o máximo de desbloqueio e geração de cargas negativas na CTC, diferentemente do método da saturação por bases.

Essas diferenças entre os métodos são importantes ferramentas para o técnico estruturar o manejo mais específico em cada área de produção de cana-de-açúcar.

Método da neutralização do alumínio trocável ou da elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis

Esse é o método mais difundido nas regiões produtoras de cana-de-açúcar do Nordeste, cujo princípio básico é a separação da NC para neutralizar os teores de alumínio trocável, da NC para elevar os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis. O maior valor encontrado repre-

senta a recomendação de calagem (Cavalcanti et al., 1998).

O cálculo da necessidade de calagem é dado pelas expressões:

$$NC = f \times Al^{3+}$$

ou

$$NC = f \times [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

em que NC é a necessidade de calagem ($t\ ha^{-1}$); f é o fator de calagem que corresponde a 1,5 para solos com teor de argila inferior a 15%, 2,0 quando o solo apresenta argila entre 15 e 35% e 2,5 quando o solo tem teor de argila superior a 35%; Al^{3+} é a acidez trocável dada pela análise do solo ($cmol_c\ dm^{-3}$); X é a correção da deficiência de Ca e de Mg, assegurando um teor mínimo de $Ca + Mg$ ($cmol_c\ dm^{-3}$), que é variável com a região de cultivo (Tabela 9.7); e Ca^{2+} e Mg^{2+} são os teores trocáveis desses nutrientes fornecidos na análise de solo ($cmol_c\ dm^{-3}$).

Como esse método NC é estratificado em função do teor de argila, há possibilidade de sub ou superestimativas de doses para solos com teores de argila próximos aos limites das faixas. Além disso, o procedimento é excludente, ou seja, deve-se escolher a NC de maior valor entre a neutralização do Al^{3+} e aquela para elevação dos teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. Isso significa que, nesse caso, o fator mais limitante define a filosofia de manejo da acidez do solo.

Não se deve considerar, em hipótese alguma, a soma das NCs , pois isso significaria supercalagem, com potenciais efeitos negativos na disponibilidade de nutrientes e consequentemente na produtividade da cana-de-açúcar.

Método da solução-tampão SMP

Esse método baseia-se na medida do decréscimo do pH de uma solução-tampão SMP em

contato com uma amostra de solo, usando-se relação solo:água:tampão de 10:10:5. A calibração é feita correlacionando o pH_{SMP} de uma série de solos com a NC para elevar o pH a 5,5, 6,0 ou 6,5, sendo essa NC determinada por incubação com CaCO_3 (Sousa et al., 2007). De posse do valor do pH_{SMP} do solo e definido o pH que se deseja alcançar, utilizando uma tabela, determina-se a NC .

Esse método é oficialmente utilizado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004), porém, salienta-se que, para ser empregado em determinada região, é necessário calibrar o método para as condições regionais, evitando-se sub ou superestimativas da NC .

Na Tabela 9.8 são apresentados valores de NC para os estados de São Paulo, do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, com base no pH_{SMP} .

Especificamente para cana-de-açúcar, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina recomenda NC para atingir pH 6,0 (Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004). No entanto, pela tolerância da cultura ao Al^{3+} , é possível que NC para pH 5,5 seja mais adequada, desde que satisfaça as exigências nutricionais em Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Necessidade de calagem versus quantidade de corretivo

Até o momento, a necessidade de calagem (NC) indicada pelos diferentes métodos utilizados no Brasil refere-se à dose de CaCO_3 a ser aplicada em um hectare. As premissas assumidas nesse caso referem-se à aplicação a lanço, em área total, do corretivo, a incorporação na camada superficial de 0–20 cm e um calcário totalmente puro em CaCO_3 e com 100% de reação no solo após aplicação.

Entende-se, portanto, que a NC , até o momento calculada por meio de diferentes métodos, corresponde a uma dose teórica do corretivo.

Os corretivos comerciais não são quimicamente puros em CaCO_3 , nem tampouco apresentam reação total em termos de solubilização após aplicação no solo. O atributo associado ao corretivo de acidez que expressa a pureza química, aliada à reação após aplicação no solo, é o poder relativo de neutralização total ($PRNT$). Dessa forma, corretivos de acidez apresentam $PRNT$ inferiores a 100%, inclusive a legislação brasileira estabelece como valor mínimo 45% (Brasil, 2006). A quantidade de corretivo (QC) para aplicação é, então, baseada na NC , porém, corrigindo-se a dose em função do $PRNT$ do corretivo:

$$QC = NC(sc/100) \times (pr/20) \times (100/PRNT)$$

em que QC é a quantidade de corretivo (t ha^{-1}); NC é a necessidade de calagem (t ha^{-1}); sc é a superfície de cobertura em que o corretivo será aplicado (%); pr é a profundidade de incorporação do corretivo (cm); $PRNT$ é poder relativo de neutralização total do corretivo (%).

É importante perceber que, à medida que se reduz o percentual de área que receberá o corretivo, há redução proporcional da quantidade a ser aplicada, enquanto, com o aumento da profundidade de incorporação do corretivo, há incremento na quantidade a ser aplicada. Particularmente em cana-de-açúcar, na implantação ou renovação de canaviais, é recomendável a incorporação de corretivo até 30–40 cm; ou seja, as doses devem ser aumentadas utilizando-se o fator 1,5 – 2,0 (= 30/20 ou 40/20; ver equação de QC). O interesse pela aplicação de parte do calcário em subsuperfície ou do calcário incorporado em grandes profundidades (40 cm ou mais) cresceu nos últimos anos. A principal motivação para pesquisas nesse sentido é o estímulo ao desenvolvimento radicular em profundidade no solo, o qual garante a obtenção de produtivida-

Tabela 9.8. Necessidade de calagem para solos de São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina de acordo com pH_{SMP} (relação 10:10:5; respectivamente solo, água e solução-tampão) para atingir pH 5,5, 6,0 e 6,5.

pH_{SMP}	Necessidade de calagem para atingir pH					
	São Paulo			Rio Grande do Sul e Santa Catarina		
	5,5	6,0	6,5	5,5	6,0	6,5
	(t ha ⁻¹)					
6,9	–	–	0,4	–	–	–
6,8	–	–	0,8	–	–	–
6,7	–	0,3	1,2	–	–	–
6,6	–	0,5	1,5	–	–	–
6,5	0,1	0,7	2,0	–	0,2	0,7
6,4	0,2	0,9	2,3	–	0,6	1,5
6,3	0,3	1,1	2,8	0,2	1,2	2,1
6,2	0,5	1,4	3,3	0,6	1,7	2,7
6,1	0,7	1,8	3,8	1,0	2,2	3,4
6,0	0,9	2,2	4,5	1,4	2,8	4,1
5,9	1,1	2,7	5,2	1,9	3,3	4,8
5,8	1,4	3,2	6,1	2,3	3,9	5,5
5,7	1,7	3,8	6,9	2,8	4,5	6,2
5,6	2,0	4,4	7,9	3,3	5,1	7,0
5,5	2,4	5,1	8,9	3,8	5,8	7,9
5,4	2,8	5,8	10,1	4,4	6,5	8,7
5,3	3,2	6,7	11,2	4,9	7,2	9,6
5,2	3,7	7,6	12,5	5,5	8,0	10,6
5,1	4,4	8,5	13,8	6,2	8,8	11,7
5,0	5,0	9,5	15,3	6,9	9,7	12,9
4,9	5,5	10,5	16,7	7,7	10,7	14,2
4,8	6,1	11,6	18,3	8,5	11,9	15,7

Fonte: Adaptado de Raji (1991) e Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004).

des competitivas da cana, mesmo em anos com períodos de escassez hídrica, condição esta que vem sendo cada vez mais frequente, além de garantir aportes de carbono em camadas mais profundas do solo, que contribui para o balanço negativo de cargas elétricas no complexo de troca e para a mitigação do aquecimento global em função do sequestro de carbono.

Aplicações de corretivo durante os ciclos de soca, por exemplo, na segunda ou terceira soca, para o manejo da acidez e promoção da longevidade do canavial, são realizadas de forma mais localizada (na entrelinha) e superficialmente, sem incorporação mecânica do corretivo. Nesse caso, algumas recomendações devem ser seguidas, de forma que se evitem doses muito

baixas, aquém da necessária e que não trazem os benefícios esperados, ou doses muito altas que podem significar supercalagem. No caso da calagem nesses canaviais já implantados, na região da entrelinha, recomenda-se usar uma superfície de cobertura (*sc*) de 70% e um valor de profundidade (*pr*) igual a 10 cm, o que deve gerar doses de corretivo da ordem de 1 a 2 t ha⁻¹, dependendo do *PRNT*. Se a calagem na soqueira for realizada em área total, não há necessidade de reduzir a dose com o fator 70%.

Essa é uma recomendação conservativa, especialmente em função de possíveis interações não desejáveis com micronutrientes. Isso não exclui a possibilidade de respostas positivas com doses relativamente elevadas de corretivo, como no trabalho de Rossato et al. (2017), em que as melhores respostas na fertilidade do solo e na produtividade de colmos, açúcar, bagaço e palha na cana-de-açúcar foram proporcionadas pela aplicação de 3,6 t ha⁻¹ de calcário (dose calculada para elevação da V a 60% na camada 0–40 cm) na cana-soca de terceiro ciclo.

Corretivos da acidez do solo

A correção da acidez pode ser realizada utilizando-se uma série de materiais que, após reação no solo, liberam OH⁻ e/ou HCO₃⁻ (ou HSiO₃⁻), com destaque para os óxidos, os hidróxidos, os silicatos e os carbonatos. Na prática, os calcários são os principais corretivos de acidez de solos usados no Brasil, com a ação neutralizante relacionada com a liberação de OH⁻ e HCO₃⁻ após reação com a umidade do solo.

Os calcários são rochas moídas contendo mistura de CaCO₃ e MgCO₃ em proporções variáveis, apresentando uma classificação quanto ao teor de magnésio (Mg):

a) Calcários calcíticos: <5% de MgO.

b) Calcários magnesianos: entre 5 e 12% de MgO.

c) Calcários dolomíticos: >12% de MgO.

Os calcários dolomíticos têm sido largamente utilizados na cana-de-açúcar por apresentarem teores mais elevados de Mg, constituindo boa fonte desse nutriente para a cultura e com custo de aquisição relativamente baixo. Além disso, o Mg na composição do calcário dilui os custos da operação de correção da acidez, pois se está também fornecendo o nutriente de forma eficiente, considerando-se, nesse sentido, que a calagem incrementa cargas negativas (de natureza variável) no solo, que favorecem a manutenção de cátions básicos no complexo de troca.

A opção pelo uso do calcário com mais ou menos Mg em sua composição deve ser realizada observando-se o teor de Mg²⁺ no solo e o valor de nível crítico para a cultura, de forma que calcários magnesianos ou dolomíticos devem ser preferidos quando se deseja incrementar esse teor. A partir do momento em que o solo apresentar teor de Mg²⁺ acima do nível crítico, é recomendável manter uma relação Ca:Mg entre 3:1 e 4:1. O uso prolongado de calcário dolomítico pode conduzir a estreitamento excessivo da relação Ca:Mg, com potencial impacto negativo na produtividade da cana-de-açúcar por prejuízo à absorção de Mg e consequente desbalanço iônico.

Valor e poder de neutralização dos corretivos

Ao carbonato de cálcio puro (CaCO₃) é atribuído o valor neutralizante (VN) igual a 100%, sendo os valores dos demais corretivos atribuídos de forma relativa a este e considerando-se os teores de CaO e MgO (Tabela 9.9).

Para calcular o VN de um corretivo, utiliza-se a seguinte expressão:

$$VN = (1,79 \times T_{CaO}) + (2,48 \times T_{MgO})$$

Tabela 9.9. Corretivos da acidez e seus correspondentes valores neutralizantes (VN).

Corretivo	Fórmula	VN (%) (Equivalente em CaCO ₃)
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	100
Carbonato de magnésio	MgCO ₃	119
Carbonato de cálcio e magnésio	CaCO ₃ .MgCO ₃	109
Hidróxido de cálcio	Ca(OH) ₂	135
Hidróxido de magnésio	Mg(OH) ₂	172
Óxido de cálcio	CaO	179
Óxido de magnésio	MgO	248
Silicato de cálcio	CaSiO ₃	86
Silicato de magnésio	MgSiO ₃	100

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2007).

em que VN é o valor neutralizante (%); 1,79 é a relação entre o VN do CaO e do CaCO₃; T_{CaO} é o teor de CaO do corretivo (%); 2,48 é a relação entre o VN do MgO e o CaCO₃; T_{MgO} é o teor de MgO do corretivo (%).

Na realidade, os teores de CaO e MgO são estimados por meio de análises de Ca e Mg no corretivo, expressando-se esse valor na forma de óxidos (Brasil, 2017). Por isso o VN pressupõe que todos os compostos de Ca e de Mg do corretivo participam da neutralização da acidez do solo, o que não é verdade. Para contornar essa limitação, determina-se o poder neutralizante (PN) do corretivo, por meio de método de reação com uso de ácido clorídrico e titulação com NaOH (Brasil, 2017). O PN é obrigatoriamente informado na embalagem do produto ou na nota fiscal (ou documento auxiliar) juntamente com a informação dos teores presentes de CaO e MgO. Como o PN considera efetivamente o componente de neutralização da acidez, ele geralmente é inferior ao VN . O CaCO₃ puro continua como referência de PN , com valor igual a 100%, e a legislação brasileira estabelece 67% como valor mínimo de PN

do calcário. As garantias mínimas de PN , soma de CaO e MgO e $PRTN$ variam conforme o corretivo (Tabela 9.10) (Brasil, 2006).

Tabela 9.10. Valores mínimos de poder de neutralização (PN), teores de CaO e MgO e poder relativo de neutralização total ($PRNT$).

Corretivo da acidez	PN	CaO + MgO	PRNT
	(%)		
Calcário	67	38	45
Calcário calcinado	80	43	54
Cal hidratada	94	50	90
Cal virgem	125	68	120
Outros	67	38	45

Fonte: Brasil (2006).

A qualidade do corretivo, além de estar relacionada diretamente com o PN , relaciona-se, também, com a granulometria do material, que permite obter a eficiência relativa ou reatividade (RE) do corretivo (Tabela 9.11).

Tabela 9.11. Eficiência relativa ou reatividade (RE) de classes granulométricas de corretivos de acidez.

Fração granulométrica (mm)	Tamisação (Peneira ABNT)	RE (%)
>2,00	Retida nº 10	0
0,84–2,00	Passa nº 10, retida nº 20	20
0,30–0,84	Passa nº 20, retida nº 50	60
≤0,30	Passa nº 50	100

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2007).

A RE do corretivo é, então, obtida a partir da distribuição granulométrica e respectivos valores de eficiência relativa apresentados na Tabela 9.11. Os valores de eficiência relativa correspondem ao percentual de reação das partículas num período de 3 meses, ou seja, partículas ≤0,30 mm reagem totalmente nesse período, enquanto

partículas pertencentes às classes 0,30–0,84 mm e 0,84–2,00 mm reagem, respectivamente, 60 e 20% no período considerado; e partículas $\geq 2,00$ mm não reagirão nesse período ($RE = \text{zero}$).

$$RE = F_{0,84-2,00} \times 0,2 + F_{0,30-0,84} \times 0,6 + F_{\leq 0,30} \times 1,0$$

em que RE é a reatividade ou eficiência relativa do corretivo (%); $F_{0,84-2,00}$ é o percentual (%) de partículas do corretivo entre 0,84 e 2,00 mm (passa na peneira de nº 10 da ABNT e é retida na peneira de nº 20); $F_{0,30-0,84}$ é o percentual (%) de partículas do corretivo entre 0,30 e 0,84 mm (passa na peneira de nº 12 e é retida na peneira de nº 50); e $F_{\leq 0,30}$ é o percentual (%) de partículas do corretivo com granulometria inferior a 0,30 mm (passa na peneira de nº 50 da ABNT).

Embora se tenha níveis de eficiência relativa em função da granulometria das partículas, isso não quer dizer que a fração superior a 2 mm não reagirá no solo em prazo superior a 3 meses, ou que, num horizonte temporal mais extenso, o valor da eficiência relativa das frações $F_{0,84-2,00}$ e $F_{0,30-0,84}$ permaneça inalterado. Dessa forma, a menor RE do calcário tem relação com o efeito residual mais longo, observando-se, é claro, o limite estabelecido pelo Mapa (Brasil, 2006).

Em algumas situações de manejo, o uso de calcários com menor RE pode ser uma vantagem, como por ocasião da adequação de áreas para implantação do sistema plantio direto em culturas anuais. Essa adequação envolve uma série de atividades para eliminar eventuais problemas físicos e químicos do solo, entre eles a acidez do solo. Como será a última oportunidade de incorporação mecânica do corretivo, recomenda-se, no período anterior à adoção do plantio direto, utilizar corretivo de menor RE , para um efeito residual mais longo (Lopes et al., 2004).

De forma correlata, a reforma do canavial também visa à eliminação de limitações físicas e químicas do solo ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, uma cultura semiperene cuja possibilidade de mobilização mecânica mais intensa

do solo se restringe ao período de reforma, que ocorre em intervalos médios de 4 a 6 anos. Nesse sentido, também se pode pensar no uso de corretivo com menor RE no momento da reforma do canavial, principalmente quando há necessidade de preparo profundo do solo, colocando parte da dose do corretivo em profundidade no perfil. Novos arranjos de plantio para controlar o tráfego podem viabilizar preparos em faixas, de forma a localizar parte (1/4) da dose de calcário a cerca de 50 cm de profundidade, ou mesmo em área total com preparo profundo, com resultados de produtividade de colmos e açúcar superiores ao sistema convencional (Figura 9.17), inclusive com respostas máximas entre 5 e 10 t ha⁻¹ de calcário (Garcia, 2018).

Obviamente, existe a questão econômica e logística relacionada ao uso de um corretivo com menor RE em extensas áreas com cana-de-açúcar, com incorporação mecânica em maior profundidade, pois a menor RE implica aumento da dose para aplicação, uma vez que deve ser garantida a ação desejada em período relativamente curto.

É oportuno também destacar que, em termos de legislação, é a distribuição granulométrica das partículas do corretivo que determina sua reatividade (Brasil, 2006), mas, em termos técnicos, se sabe que outros fatores inerentes à natureza dos materiais também interferem na reatividade. Bases fortes, como os óxidos e hidróxidos de Ca e Mg, são mais reativas que bases fracas, como carbonatos e silicatos. Para calcários, os de origem sedimentar apresentam maior reatividade em comparação com os de origem metamórfica (Gallo, 1954; Gallo; Catani, 1954; Soratto et al., 2019), o que direciona à menor necessidade de moagem dos calcários sedimentares, reduzindo custos, e à conveniência de aprimoramento do critério de reatividade adotado na legislação nacional.

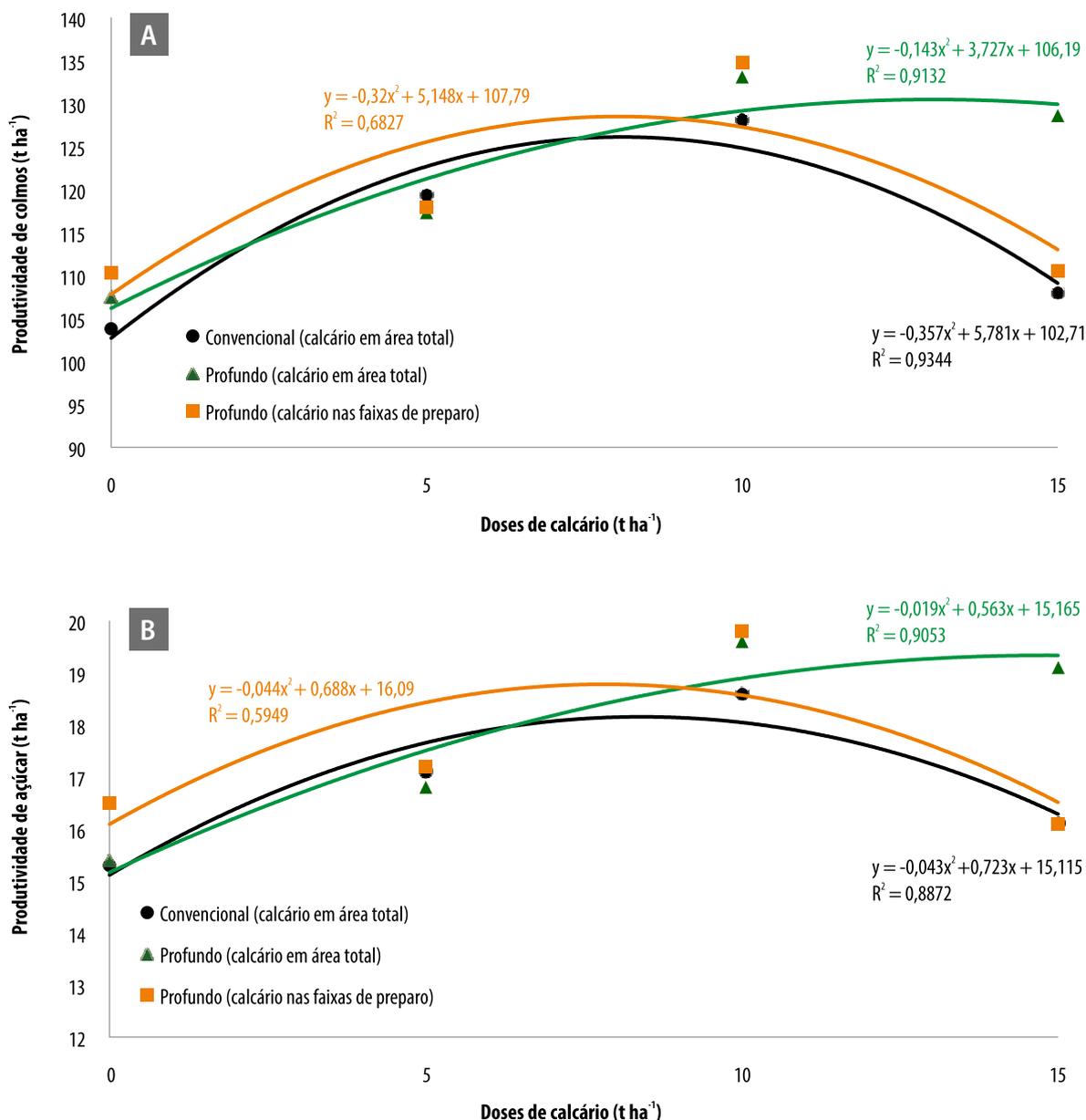


Figura 9.17. Produtividade de colmos (A) e açúcar (B) após reforma do canavial com aplicação de calcário em doses até 15 t ha⁻¹ em área total com preparo convencional para incorporação do corretivo, ou com preparo profundo em área total, ou preparo profundo em faixas.

Fonte: Adaptado de Garcia (2018).

Poder relativo de neutralização total

O poder de neutralização (PN) e a reatividade (RE) são utilizados para o cálculo do poder relativo de neutralização total (PRNT), que representa o percentual do PN reativo num período de 3 meses:

$$PRNT = (PN \times RE) / 100$$

em que PRNT é o poder relativo de neutralização total (%); PN poder neutralizante (%); e RE é a reatividade ou eficiência relativa (%).

O PRNT é um índice de valor prático, que caracteriza o poder neutralizante efetivo dos corretivos da acidez. Assim, esses corretivos podem ser classificados em quatro grupos:

- a) Grupo A, com PRNT entre 45 e 60%.

- b) Grupo B, com *PRNT* entre 60,1 e 75%.
- c) Grupo C, com *PRNT* entre 75,1 e 90%.
- d) Grupo D, com *PRNT* acima de 90%.

Os corretivos da acidez, principalmente os calcários, são de custo relativamente baixo, e os itens econômicos mais impactantes na composição do custo são o transporte para entrega do calcário (frete) e a distribuição do material no campo (mão de obra). De forma geral, o cálculo econômico para aquisição do corretivo deve ser feito por unidade de *PRNT* colocado no local de aplicação (ou redistribuição), devendo-se escolher aquele de menor custo. Deve-se, no entanto, ter especial atenção para os aspectos de manejo mencionados anteriormente, como a necessidade de calcário com maior teor de Mg, quando o teor desse nutriente no solo encontra-se abaixo do nível crítico, e o uso de calcário com menor reatividade na reforma do canal, para obtenção de efeito residual mais longo. Outros aspectos a observar — hoje objeto de estudos em algumas pesquisas — são a subavaliação do *PRNT* dos calcários sedimentares e o efeito da deriva que prejudica a qualidade da aplicação dos calcários mais finos. O fato é que decisões tecnicamente fundamentadas conduzem a maior lucratividade, que compensa o gasto com a escolha de um corretivo diferenciado quanto a algum fator importante para a cultura ou para o sistema produtivo.

Análise química e granulométrica de corretivos

Na determinação dos teores de CaO e MgO, consideram-se duas etapas:

- a) A extração ou solubilização, em que se utiliza como extrator ou solubilizador uma solução de HCl 1+1 e HNO₃ 1+1 a quente para o CaO e apenas o HCl 1+1 para o MgO.

- b) Na determinação do Ca e do Mg contidos no CaO e MgO, respectivamente, utiliza-se método complexiométrico de titulação com EDTA 10 mmol L⁻¹ padronizado com solução-padrão de Ca 10 mmol L⁻¹, preparada com CaCO₃ p.a.

Os teores de CaO e MgO permitem calcular o *IN* do corretivo, que, na indisponibilidade da informação do *PN*, pode ser utilizado para calcular o *PRNT* do corretivo.

Na determinação do *PN*, consideram-se duas etapas:

- a) Neutralização parcial, em que se utiliza como solução a ser neutralizada HCl 0,5 mol L⁻¹ padronizada a quente.
- b) Neutralização total, utilizando-se o método da titulação volumétrica com NaOH 0,25 mol L⁻¹ padronizado.

O princípio dessa análise é uma reação de neutralização ácido-base. O ácido clorídrico é adicionado em excesso, tendo uma fração de sua acidez neutralizada pelas bases do corretivo. A acidez restante é neutralizada pelo NaOH na titulação. Sabendo-se o volume de ácido adicionado e quanto foi neutralizado pelo NaOH, calcula-se, por diferença, quanto do ácido foi neutralizado pela ação do corretivo.

Na determinação da *RE*, a principal operação é o tamisamento da amostra usando-se jogo de peneiras ABNT nº 10, nº 20 e nº 50.

A *RE* é calculada pela seguinte expressão:

$$RE = [(0 \times r_{ABNT\ 10}) + (20 \times r_{ABNT\ 20}) + (60 \times r_{ABNT\ 50}) + (100 \times p_{ABNT\ 50})]/100$$

em que *RE* é a reatividade do calcário (%); 0, 20, 60 e 100 são as eficiências relativas ou reatividades das classes de partículas retidas em cada peneira (Tabela 9.11) (%); *r*_{ABNT 10} é o percentual da amostra retida na peneira ABNT nº 10; *r*_{ABNT 20} é o percentual da amostra retida

na peneira ABNT nº 20; $r_{ABNT 50}$ é o percentual da amostra retida na peneira ABNT nº 50; $p_{ABNT 50}$ é o percentual da amostra que passa na peneira ABNT nº 50.

Procedimentos técnicos para a aplicação de calcário

Distribuição do calcário

O momento de correção da acidez do solo na cultura da cana-de-açúcar ocorre por ocasião do início de cultivo em novas áreas de produção ou no período de reforma do canavial, por causa da possibilidade de aplicação do calcário em área total e posterior incorporação mecânica.

Alguns técnicos têm sugerido a aplicação de calcário de alto PRNT em menores doses no fundo do sulco de plantio, mesmo em áreas mecanizáveis. Esse calcário é comercialmente denominado de “filler”. Tal procedimento é eficiente para incrementar os teores de Ca e Mg no solo, porém, pouco efetivo na correção da acidez, uma vez que há limitada ação em termos de área, confinando o sistema radicular ao local de aplicação do corretivo. Na cana-de-açúcar, onde o sistema radicular senesce e renova-se em vários ciclos, a restrição ao desenvolvimento do sistema radicular é um equívoco.

Outro efeito indesejável dessa prática refere-se à interação com fósforo (P) aplicado na adubação de plantio. Em condição de pH mais elevado, o P do fertilizante reage com Ca do corretivo, formando fosfato de cálcio, que reduzirá a disponibilidade de P para a cultura.

Em áreas declivosas, no entanto, a aplicação localizada do corretivo no fundo do sulco se justifica por ser a única maneira de incorporar o calcário a uma profundidade maior, ou seja, acompanhando a abertura do sulco, mesmo consciente da diminuição da eficiência da adu-

bação fosfatada. Alternativamente, nesse caso, recomenda-se minimizar o uso de fonte mineral solúvel de P, substituindo por fonte orgânica, como a torta de filtro.

A aplicação do calcário no sulco de plantio da cana-de-açúcar para correção da acidez é comum na região dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, onde os solos são arenosos, com pH $\geq 5,5$, livre de Al^{3+} e com baixos teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. Nessa condição, conforme mencionado anteriormente, a aplicação do calcário no fundo do sulco é recomendada, proporcionando consideráveis incrementos nos teores de cálcio e magnésio.

Incorporação do calcário

Os calcários são os corretivos de acidez de uso mais generalizado, por razões que vão desde questões técnicas e agrônômicas até aspectos econômicos. No entanto, sua baixa solubilidade dificulta a ação em profundidade no perfil do solo, fazendo com que sua aplicação seja acompanhada de incorporação até a profundidade que se deseja corrigir. Em sistema de plantio direto para produção de grãos, por exemplo, a aplicação de calcário na superfície do solo tem geralmente ação limitada aos primeiros 10 cm de profundidade, suficiente, muitas vezes, para garantir bons rendimentos dessas culturas (Caires et al., 1998).

Em cana-de-açúcar, a aplicação de calcário com incorporação é realizada na abertura de novas áreas e na renovação do canavial. Em ambas as situações, é recomendável que a incorporação do calcário seja, em média, realizada até 30 cm de profundidade, pela característica semipere-ne da cultura, pelo fato de 45 a 55% do sistema radicular estar concentrado nessa camada e pela dinâmica de senescência e renovação de parte das raízes durante os seguidos ciclos de soca (Dal Bó et al., 1986).

Em áreas mecanizáveis e de início de cultivo com cana-de-açúcar, quando a quantidade de calcário (QCalc) a aplicar for elevada ($\geq 5,0 \text{ t ha}^{-1}$), recomenda-se a incorporação de metade da dose com grade pesada e a outra metade com arado de disco. No caso de renovação do canavial e recomendação de QCalc elevada, a incorporação apenas com arado de disco é suficiente. Sob condição de declive, em área de encosta, onde a mecanização se restringe apenas a operação de sulcação, sugere-se que uma fração do calcário seja aplicada manualmente no fundo do sulco e a outra fração superficialmente, com posterior incorporação manual quando do fechamento do sulco.

Quando houver necessidade de uma segunda calagem no mesmo ciclo de cultivo, é importante que seja realizada na terceira ou quarta soca, ou seja, de 42 a 48 meses após a primeira aplicação. Nesse caso, o calcário é aplicado na superfície do solo na região de entrelinha da cultura, podendo ser incorporado levemente com cultivador de disco. Conforme mencionado anteriormente, pode-se optar por estratégia de aplicação de calcário com maior efeito residual na implantação ou na reforma do canavial, na tentativa de evitar calagens na cana-soca. Mesmo para situações com uso de cultivo mínimo na implantação do canavial, essa estratégia pode ser interessante. Isso pode ser importante em algumas situações, como na dessecação de áreas com pastagem, seguida de aplicação de calcário e sulcação para plantio da cana, que resulta em melhoria dos atributos de fertilidade do solo semelhante ao que se observa para preparos mais intensivos (Moraes et al., 2019). Essa situação de mudança de uso da terra é comum na expansão atual da cultura da cana no Brasil, e o uso do cultivo mínimo alia o menor custo de implantação do canavial à preservação da estrutura do solo e dos estoques de carbono.

Essa estratégia pode ser acompanhada pela escolha mais criteriosa dos fertilizantes que serão utilizados, principalmente os amoniacais, por causa do efeito de acidificação do solo (Tabela 9.2).

É importante salientar que, para qualquer dos procedimentos técnicos sugeridos, é fundamental o monitoramento dos parâmetros de fertilidade do solo, com especial atenção para o pH, teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , acidez potencial e saturação por bases. Recomenda-se frequência anual para o monitoramento desses parâmetros.

Tempo de reação no solo

O ideal é que a aplicação de calcário seja realizada com pelo menos 90 a 120 dias de antecedência ao plantio da cana-de-açúcar, independentemente se é nova área de cultivo ou área de reforma. Esse tempo é o suficiente para que ocorra a reação do calcário, com consequente correção da acidez do solo e atendimento às necessidades nutricionais da cana-de-açúcar. No entanto, a reação do calcário no solo após a aplicação depende de umidade. Caso o corretivo seja aplicado com a antecedência recomendada, porém em período seco, é possível que não ocorra a reação total do corretivo.

Na prática, entretanto, a colheita da cana-de-açúcar ocorre predominantemente no período seco. No Nordeste estende-se de setembro a março e no Centro-Sul, de março a setembro. Portanto, a renovação do canavial ocorre geralmente no período sem umidade no solo, evidentemente, quando o cultivo não utiliza irrigação. Aliada a essa dificuldade, quando a aplicação de calcário se distancia do plantio, eleva os custos, porque determina dois momentos diferentes no manejo da renovação. Para agravar ainda mais a situação, a adubação de fundação insere-se nesse contexto como outra prática a ser realizada, principalmente no que diz respeito à adubação fosfatada, que, normalmente, é aplicada de uma só vez por ocasião do plantio.

Assim, é comum em áreas de renovação a concentração das práticas de incorporação de calcário, sulcação, adubação de fundação e plantio num mesmo período, geralmente com baixos teores de umidade do solo. Muitos inconvenientes podem ser enumerados nesse caso:

- a) O calcário não reage satisfatoriamente, porque a umidade do solo é reduzida. Consequentemente a planta inicia seu crescimento de arranque em condições de baixo pH e presença de Al^{3+} , o que prejudica a formação inicial do sistema radicular.
- b) O cálcio liberado na restrita reação do calcário pode tornar-se indisponível pela reação com o fósforo que está sendo fornecido na adubação de plantio. Esta, por sua vez, terá sua eficiência reduzida, podendo resultar em plantas deficientes em fósforo, pelo menos no ciclo da cana-planta. Esse problema pode ser minimizado quando o fosfato é adequadamente localizado.
- c) O nitrogênio, que na cana-planta é proveniente principalmente da mineralização da matéria orgânica e da fixação biológica, deixa de ser disponibilizado pelo ambiente ainda ácido do início de crescimento da cultura.
- d) Nos momentos que antecedem a situação em que a cana-de-açúcar deve apresentar o maior equilíbrio nutricional, que deve ocorrer em torno dos 120 dias, todo um ambiente desfavorável foi proporcionado, impedindo que a planta expresse sua capacidade produtiva por restrições nutricionais advindas de uma calagem realizada em momento inapropriado.

A alternativa e recomendação para fugir aos inconvenientes mencionados é a realização da calagem no segundo terço do período seco, quando as primeiras chuvas já permitem o início de reação do corretivo, que evolui com o aumento da precipitação e permite alcançar o período de

máxima expressão nutricional da cultura (± 120 dias), com adequadas condições de correção da acidez e de disponibilidade de nutrientes no solo. Além disso, com essa recomendação, há certo distanciamento entre a calagem e a adubação de fundação, evitando-se a reação indesejada entre o fósforo e o cálcio.

É oportuno lembrar ainda que direcionamentos mais específicos para algumas situações possam envolver o uso de calcários com maior reatividade (Tabela 9.10) e/ou de origem sedimentar, o que talvez implique aplicação de calcário na cana-soca (terceira ou quarta).

Gessagem

O teor elevado de alumínio reduz o crescimento radicular (Adams; Pearson, 1970; Pavan et al., 1982), especialmente o ápice das raízes (Kochian, 1995), que, inicialmente, tornam-se alongadas e, posteriormente, engrossam e não se ramificam normalmente, dificultando o acesso a reservas de água e nutrientes em camadas mais profundas do solo (Clarkson, 1967; McCormick; Borden, 1972; Tang et al., 2003; Rossiello; Jacob Neto, 2006). Em solos de baixa fertilidade, constata-se que a cana-de-açúcar explora camada de cerca de 60 cm de profundidade de solo, embora resultados experimentais observados por Koffler et al. (1986) mostrem que a cana-de-açúcar é capaz de explorar de 120 a 200 cm de solo, desde que não haja barreiras químicas e/ou físicas ao crescimento de raízes.

O cálcio, por sua vez, é um nutriente decisivo no desenvolvimento radicular das plantas (Ritchey et al., 1982). Segundo Quaggio (2000), quando a saturação por Ca^{2+} no complexo de troca é inferior a 20%, há forte restrição ao crescimento de raízes no solo, para a maioria das espécies cultivadas. Como a absorção de Ca^{2+} ocorre nas partes mais novas da raiz (Fernandes; Souza, 2006), é preciso que haja uma distribuição adequada

do nutriente no solo para que a absorção seja contínua.

A calagem é a prática mais eficiente para elevar o pH, os teores de Ca^{2+} e a saturação por bases, além de reduzir o Al^{3+} e sua saturação nos solos. No entanto, a reação do calcário restringe-se ao local de aplicação, não atendendo à correção da acidez no subsolo, que, por sua vez, depende da percolação de sais (Caires et al., 2004). Na verdade, a ação do calcário em profundidade deve ocorrer por meio de uma frente de neutralização da acidez a partir das bases (OH^- e HCO_3^-) resultantes da dissolução das partículas de calcário (Amaral; Anghinoni, 2001). A condição química para existência do HCO_3^- para migração no solo é o pH superior a 6,3, que explica a frente de alcalinização suficiente para manutenção do pH em faixa adequada na camada superficial de solos sob plantio direto, com reaplicação mais frequente de calcário na superfície do solo. No entanto, o efeito do calcário é insatisfatório na correção da acidez em subsuperfície ou ainda abaixo da profundidade de incorporação do corretivo, no caso da cana-de-açúcar.

O manejo da acidez em subsuperfície, e principalmente a redução da toxidez por Al^{3+} , deve, então, ser feito com o uso de gesso, em função de sua alta solubilidade e mobilidade de suas espécies químicas (Ca^{2+} e SO_4^{2-}) no perfil do solo (Shainberg et al., 1989; Ritchey et al., 1995; Quaggio, 2000; Sousa et al., 2007).

Pesquisas têm demonstrado o efeito benéfico do gesso em diversas culturas, com a redução

da acidez em profundidade (Oliveira; Pavan, 1996; Farina et al., 2000; Quaggio, 2000; Rocha, 2007), com o fornecimento de cálcio e enxofre (Caires et al., 2003, 2004; Fernandes et al., 2007), com a melhoria de desenvolvimento do sistema radicular em subsolos originalmente ácidos (Ritchey et al., 1980; Ernani et al., 2001; Caires et al., 2004) e com o aumento na absorção de água pelas plantas (Ritchey et al., 1980; Alcorido; Rechcigl, 1993; Sumner, 1993). Tais efeitos são geralmente atribuídos ao aumento dos teores de Ca^{2+} trocáveis e a diminuição da atividade do Al^{3+} na solução.

Objetivos com a gessagem

O uso do gesso, denominado gessagem, como prática agrícola objetiva principalmente reduzir a acidez em subsuperfície no solo e fornecer cálcio e enxofre para a cana-de-açúcar. A solubilidade do gesso é aproximadamente 180 vezes maior do que a dos calcários, o que pode ser comprovado fazendo-se um paralelo entre a solubilidade do carbonato de cálcio, com valor igual a $0,014 \text{ g L}^{-1}$ (Alcarde, 1992), e a solubilidade do sulfato de cálcio, que é de $2,5 \text{ g L}^{-1}$ (Raij, 1988).

Após solubilização do gesso no solo, seguem-se as reações de troca iônica e formação de complexos e pares iônicos (Figura 9.18).

O ânion sulfato (SO_4^{2-}) presente no gesso é capaz de formar par iônico com o Al^{3+} , o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , facilitando a movimentação descendente no perfil do solo (Pavan et al., 1987; Caires et al., 1998). Os complexos AlSO_4^+ e $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3^0$ formados redu-

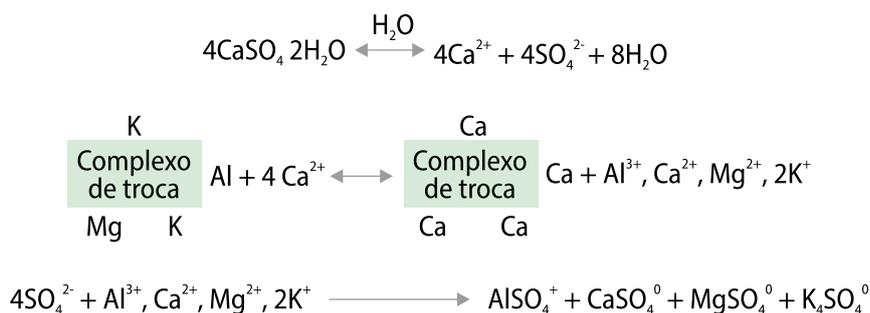


Figura 9.18. Reações de troca iônica e formação de complexos e pares iônicos.

zem a atividade do Al^{3+} em solução, diminuindo seu efeito fitotóxico (Alva; Sumner, 1989; Mclay; Ritchie, 1993; Rossiello; Jacob Neto, 2006).

Além dos efeitos na movimentação dos cátions e na complexação do Al^{3+} com o sulfato, o gesso pode ainda:

- a) Precipitar parte do alumínio na forma de sulfatos básicos (Pavan, 1993), como jurbanita ($\text{AlOHSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), alunita [$\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$] e basaluminita [$\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$].
- b) Precipitar parte do alumínio como $\text{Al}(\text{OH})_3$, em função da adsorção específica de SO_4^{2-} e consequente liberação de OH^- . Esse processo é muitas vezes denominado “autocalagem” e envolve a polimerização ou precipitação do alumínio como resultado da liberação de OH^- , por causa da troca de ligantes entre SO_4^{2-} e OH^- (Alva et al., 1991). De maneira geral, a magnitude da mudança no pH do solo com a aplicação do gesso, quando ocorre, é da ordem de 0,2 a 0,3 unidade (Silva; Raij, 1992).
- c) Formar complexos com o fluoreto (F^-) (Shainberg et al., 1989; Carvalho; Raij, 1997), de fórmula geral AlF_x ($x = 1-6$). O fluoreto está presente no gesso agrícola ou fosfogesso (ver adiante).
- d) Aumentar a força iônica da solução do solo, causando redução da atividade tóxica de Al^{3+} (Furlani; Berton, 1992).

Paralelamente ao deslocamento do Al^{3+} do complexo de troca do solo pelo Ca^{2+} aplicado via gesso, outros cátions são também deslocados, como K^+ e Mg^{2+} , que, conforme mencionado, também formam pares iônicos com o SO_4^{2-} , originando as respectivas formas neutras (K_2SO_4^0 e MgSO_4^0), além do CaSO_4^0 . Em função da neutralidade elétrica, os pares iônicos apresentam grande mobilidade ao longo do perfil do solo, deslocando-se para camadas mais profundas (Soprano; Alvarez V., 1989).

Tem sido observado que, entre os cátions básicos, o Ca^{2+} trocável tem aumentado de modo uniforme no perfil do solo em função do uso do gesso. A lixiviação de K^+ e Mg^{2+} tem sido resposta frequente nos estudos com aplicação de gesso em solos (Quaggio et al., 1982; Mays; Mortvedt, 1986; Farina; Channon, 1988; Syed-Omar; Sumner, 1991), principalmente a lixiviação de Mg^{2+} (Carvalho et al., 1986; Syed-Omar; Sumner, 1991; Oliveira; Pavan, 1996; Caires et al., 2004). Contudo, essa movimentação não significa que esteja ocorrendo perda, pois se deve considerar que a aplicação do gesso cria condição favorável para que as raízes se desenvolvam em profundidade no solo, podendo absorver esses nutrientes das camadas mais profundas.

De maneira geral, pode-se dizer que diferentes fatores condicionam maior ou menor movimentação dos cátions básicos no perfil do solo (Alvarez V.; Dias, 1994):

- a) Dose de gesso aplicada.
- b) Capacidade de troca catiônica do solo (CTC).
- c) Condutividade elétrica da solução do solo.
- d) Capacidade de adsorção de SO_4^{2-} .
- e) Textura do solo.
- f) Volume de água que drena no solo.

Wadt e Wadt (1999) recomendam que, quando a aplicação de gesso for realizada em doses elevadas no solo, devem ser desenvolvidas estratégias para minimizar as perdas de Mg^{2+} . Em solos arenosos de baixa CTC, por exemplo, é recomendável, quando possível, dividir a aplicação de gesso entre a cana-planta e as socas.

Ainda nesse sentido, recomenda-se não realizar a aplicação do gesso antes do calcário, pois a calagem aumenta a CTC em solos de carga variável, o que promove maior capacidade de adsorção do K^+ e do Mg^{2+} , prevenindo contra perdas excessivas. Retardar um pouco mais a aplicação de gesso em relação à calagem, deixando para

após o plantio ou a rebrota da cana, também é alternativa para minimizar a lixiviação excessiva dos cátions nutrientes.

Efeitos positivos da aplicação de gesso como fonte de enxofre (S) foram obtidos em várias culturas, entre elas a cana-de-açúcar (Viator et al., 2002; Fernandes et al., 2007).

A adição de Ca e S pelo gesso provoca uma série de efeitos paralelos que afetam a disponibilidade de nutrientes no solo. Aumentos do pH no subsolo, por meio da aplicação de gesso, têm sido verificados em alguns trabalhos (Ririe et al., 1952; Quaggio et al., 1982; Belkacem; Nys, 1997; Carvalho; Raij, 1997; Caires et al., 1999), por causa da reação de troca de ligantes na superfície das partículas das argilas, envolvendo óxidos hidratados de Fe e Al e o SO_4^{2-} , deslocando OH^- para a solução e promovendo neutralização parcial da acidez (Reeve; Sumner, 1972).

Na subsuperfície, onde as propriedades eletroquímicas dos minerais de argila predominam sobre as propriedades dos coloides orgânicos, a adsorção específica do ânion SO_4^{2-} , ao transferir sua carga à superfície adsorvente, gera novos sítios para adsorção de cátions, promovendo, assim, aumento na CTC e redução do valor de pH no qual passa a predominar balanço negativo de cargas no solo (Shamshuddin; Ismail, 1995; Wadt, 2000).

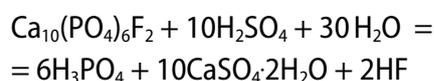
Fontes de gesso

O gesso é utilizado como fertilizante para plantas desde a época antiga dos gregos e romanos (Tisdale; Nelson, 1975).

O gesso natural ou mineral é obtido a partir das rochas gipsíferas (*Mined gypsum*), que ocorrem associadas a quantidades menores de anidrita, calcita, dolomita, halita, enxofre, quartzo e minerais de argila. Tais rochas são designadas de minérios de gipsita sempre que os teores de sulfato ou de gipsita atendam às exigências do mercado consumidor (Accioly; Schulze, 2003).

Usualmente, ocorre na forma di-hidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), embora os sulfatos naturais possam ser encontrados e utilizados em formas menos hidratadas, como a bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) ou gesso argamassa (Vilela et al., 1995) e, ainda, na forma anidra (CaSO_4), a anidrita (Porta, 1998).

O gesso agrícola ou fosfogesso é subproduto originado em grande quantidade a partir da produção de fertilizantes fosfatados, mais especificamente para fabricação de ácido fosfórico, composto base na indústria de fertilizantes fosfatados (Raij, 1988; Malavolta, 1992):



O fosfogesso possui como principal constituinte o sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e, em menores concentrações, outros elementos (P, F, Si, Fe, Al) originalmente presentes na rocha fosfatada (Malavolta, 1992).

A maior parte das pesquisas realizadas com o uso do gesso na agricultura brasileira trata de resultados obtidos com o fosfogesso (Saldanha et al., 2007). A produção nacional de fosfogesso supera 5 milhões de toneladas por ano (Vitti, 2000). Em outros países, o gesso gerado com subproduto em diferentes processos também é reaproveitado: *coal-gypsum*, proveniente da dessulfurização de gases combustíveis; *red-gypsum*, da fabricação de dióxido de titânio; *fluor-gypsum*, do ácido hidrófluídrico; *lacto-gypsum*, do ácido láctico e lactatos; *boron-gypsum*, do ácido ortobórico; e o *organo-gypsum*, oriundo da obtenção de sais orgânicos (Amezketta et al., 2005).

Tanto o gesso mineral quanto o gesso agrícola têm, predominantemente, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em sua composição e são comumente chamados apenas de gesso. Morfologicamente, o gesso mineral é mais amorfo na comparação com o gesso agrícola (Figura 9.19), característica que lhe proporciona uma maior superfície específica e,

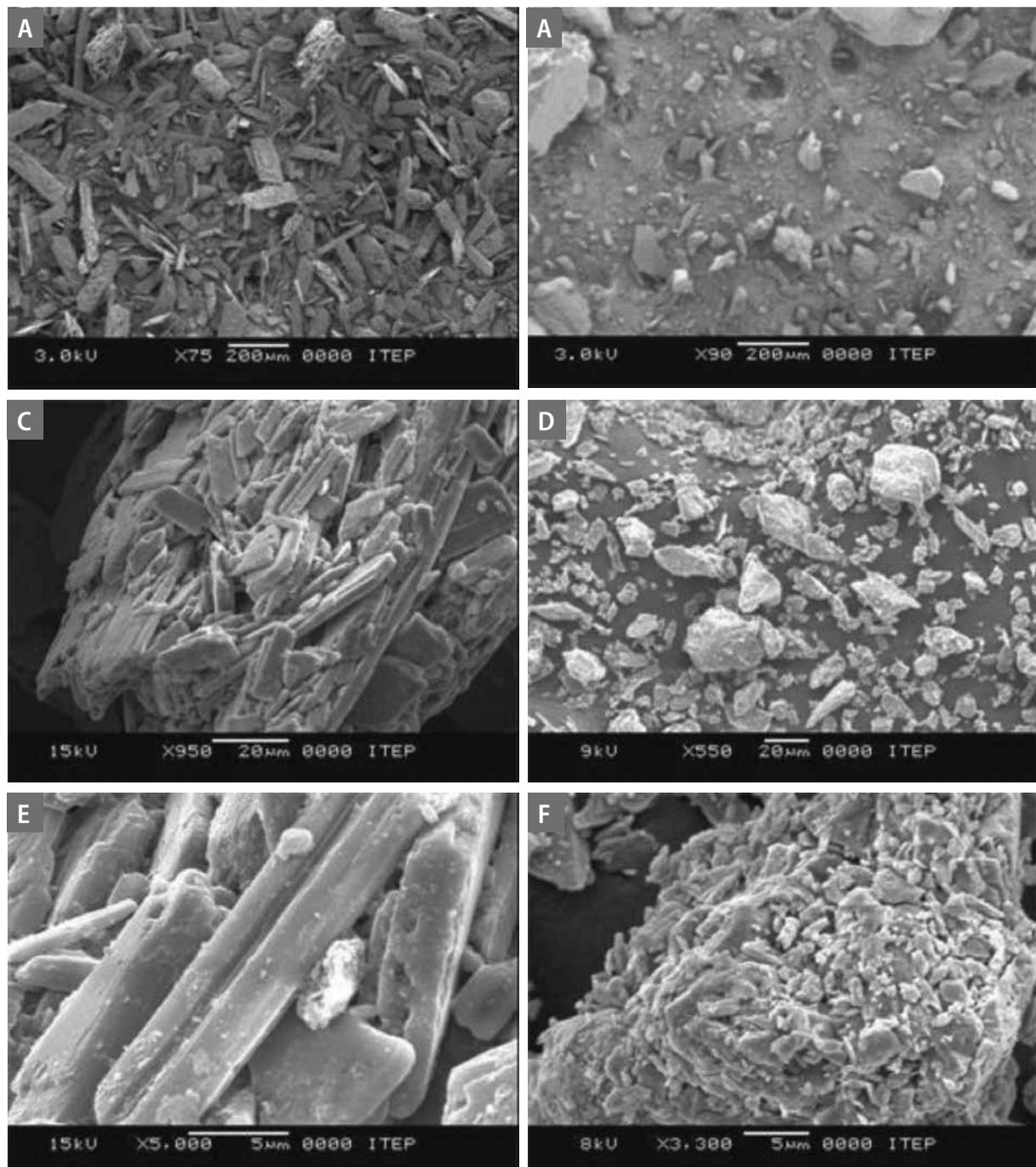


Figura 9.19. Imagens de microscopia eletrônica do gesso agrícola (A, C e E) e do gesso mineral (B, D e F) em estruturas de 5 até 200 μm .

Fonte: Rocha (2007).

consequentemente, maior contato com o solo, intensificando sua reatividade. No que se refere ao uso agrícola, entretanto, não há diferenças quanto aos efeitos de ambos os produtos quando aplicados ao solo (Garrido et al., 2003; Illera et al., 2004; Amezketa et al., 2005).

Sob o ponto de vista ambiental, o uso agrícola do gesso subproduto é bastante interessante no intuito de melhor aproveitamento dos recursos, do modo adequado de disposição final no ambiente, da agregação de valor e geração de riqueza na cadeia produtiva.

Métodos para recomendação da necessidade de gesso

A recomendação da necessidade de gesso (NG) é basicamente realizada para correção de acidez trocável em camadas subsuperficiais e/ou elevação dos teores de cálcio em profundidade. Em cana-de-açúcar, a amostragem do solo, visando à recomendação de gesso, deve ser feita até 60 cm de profundidade. Se, a partir de 20 cm, a saturação por Al for >30% e/ou o teor de Ca for $\leq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou o teor de Al for $>0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, há grande probabilidade de resposta à aplicação de gesso (Alvarez V. et al., 1999a).

No estado de São Paulo, a gessagem é recomendada quando o valor m na camada 20–40 cm é superior a 40% e/ou o teor de Ca^{2+} é inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Quaggio; Raij, 1996). Outras recomendações indicam a necessidade da gessagem quando o m é superior a 30% e/ou Ca^{2+} inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou Al^{3+} é maior do que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada 20–40 cm (Lopes et al., 2004).

Para fins práticos, o melhor índice para avaliação da toxidez de alumínio é a saturação na CTC efetiva (m) do solo em subsuperfície, cujos valores superiores a 20–30% provocam redução substancial do crescimento das raízes (Quaggio, 2000). Portanto, para a cana-de-açúcar, recomenda-se a aplicação de gesso agrícola quando o valor de m for $\geq 20\%$ e/ou Ca for $<0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Embora os mecanismos de ação do gesso no solo sejam relativamente bem conhecidos, a principal questão quanto ao seu uso agrícola diz respeito aos critérios para recomendação da dose. Na literatura podem ser encontrados diferentes critérios, alguns mais empíricos que outros, mas, no geral, são bons sistemas para recomendação.

Na sequência, são destacados quatro métodos para recomendação do gesso.

Recomendação em função da participação do Ca^{2+} e do Al^{3+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$

Nesse caso, a NG é estimada por meio das seguintes equações, que consideram o status de Ca^{2+} ou Al^{3+} no solo, camada 20–40 cm, e o máximo desejável ou permitido, respectivamente, dessas espécies químicas na CTC do solo:

$$NG = (40/100 \times \text{CTC}_{\text{efetiva}} - \text{Ca}^{2+}) \times 2,5$$

ou

$$NG = (\text{Al}^{3+} - 20/100 \times \text{CTC}_{\text{efetiva}}) \times 2,5$$

em que NG é a necessidade de gesso (t ha^{-1}); $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$ é a capacidade de troca de cátions efetiva, ou seja, ao pH do solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Ca^{2+} é o teor de cálcio trocável dado pela análise de solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Al^{3+} é o teor de alumínio trocável dado pela análise do solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); 40/100 é a percentagem desejável de Ca^{2+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$; 20/100 é a percentagem máxima permitida de Al^{3+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$; 2,5 é a quantidade de gesso necessária para elevar o teor de Ca^{2+} ou diminuir o teor de Al^{3+} em $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Esse método foi proposto por Malavolta (1992) e relaciona-se com a presença de teores desejáveis de Ca^{2+} ou limites máximos permitidos de Al^{3+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$, estabelecendo-se uma elevação mínima de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} ou redução de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , respectivamente, na camada de 20 cm–40 cm de profundidade. O cálculo é realizado por meio das duas fórmulas, recomendando-se para aplicação a maior dose calculada. Posteriormente, Alvarez V. e Dias (1994) sugerem para a cultura do café uma participação de Ca^{2+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$ de 60%, e a fórmula passa a ser descrita da seguinte forma:

$$NG = (60/100 \times \text{CTC}_{\text{efetiva}} - \text{Ca}^{2+}) \times 2,5$$

em que 60/100 é a percentagem desejável de Ca^{2+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$.

Recomendação baseada na saturação por bases

A dose de gesso recomendada por esse método objetiva a elevação da saturação por bases (V) na camada 20–40 cm de profundidade a 50% (Demattê, 1986; Vitti et al., 2008). A recomendação é feita quando a V é igual ou inferior a 35%:

$$NG = [(50 - V_1) \times CTC]/50$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); V_1 é a saturação por bases na camada 20–40 cm (%); e CTC é a capacidade de troca de cátions na camada 20–40 cm ($cmol_c\ dm^{-3}$).

Recomendação baseada na textura do solo

Esse método foi proposto por Alvarez V. et al. (1999b) e se baseia na correlação entre o teor de argila em subsuperfície (20–40 cm) e a necessidade de gesso:

$$NG = 0,00034 - 0,002445X^{0,5} + 0,0338886X - 0,00176366X^{1,5}; (R^2 = 0,999)$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); e X é o teor de argila (%).

O P remanescente (P-rem) é uma medida para estimar a capacidade do solo em adsorver fósforo, e, pela similaridade química com a dinâmica do sulfato (Alves; Lavorenti, 2004), a NG pode ser também estimada usando-se o P-rem. Resalta-se que a capacidade do solo em adsorver fosfato e/ou sulfato é muito relacionada com o teor de argila.

Essa recomendação, conforme Sousa et al. (2007), fica:

$$NG = 1,681 - 0,1361X^{0,5} - 0,03045X + 0,002588 X^{1,5}; (R^2 = 0,999)$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); e X é o valor do P-rem ($mg\ L^{-1}$).

Para solos da região de Cerrado, Sousa et al. (1995) indicam doses de gesso com base na classe textural do solo e na característica do cultivo:

$$NG = f \times argila$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); $argila$ é o teor de argila (%); e f é um fator igual a 0,050 para culturas anuais e 0,075 para culturas perenes.

No caso da cana-de-açúcar, uma cultura semi-perene, sugere-se valor de f igual a 0,0625.

No estado de São Paulo, a recomendação da dose de gesso também é em função da textura do solo, conforme mostrado em Quaggio e Raij (1996):

$$NG = argila \times 6,0$$

em que NG é a necessidade de gesso ($kg\ ha^{-1}$); e $argila$ é o teor de argila do solo na camada subsuperficial 20–40 cm ($g\ kg^{-1}$).

As recomendações de doses de gesso de acordo com o teor argila, para solos cujos teores de cálcio e saturações de alumínio nas camadas subsuperficiais os classificam como responsivos ao gesso, tem como base a sua relação com a capacidade de adsorção de sulfato nas camadas subsuperficiais, que determina a extensão da frente de lixiviação e conseqüentemente a profundidade corrigida enriquecida com quantidades estequiometricamente equivalentes de cálcio e outros cátions trocáveis (adsorção salina).

Recomendação baseada na necessidade de calcário

É uma recomendação de gesso que corresponde a 25% da necessidade de calcário (Alvarez V. et al., 1999b):

$$NG = 25/100\ NC$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); 25/100 é o percentual da necessidade de calcário da camada subsuperficial 0–20 cm; e NC é a

necessidade de calagem da camada subsuperficial que se deseja corrigir ($t\ ha^{-1}$).

É importante esclarecer aqui, para que não haja equívocos, que a *NC*, ou seja, o calcário é direcionado para a correção da acidez e promoção de outras melhorias na camada superficial do solo, enquanto a *NG*, ou seja, o gesso é recomendado para condicionamento da camada subsuperficial, onde a ação do calcário é insatisfatória.

Recomendação da quantidade de gesso

Independentemente do método para a *NG*, a dose é suficiente para correção de uma camada com 20 cm de espessura (camada superficial 20–40 cm), considerando-se a aplicação a lanço, em área total.

Dessa forma, entende-se que a *NG* corresponde a uma dose teórica. Particularmente, em cana-de-açúcar, em áreas de implantação ou renovação de canavial, é recomendável a correção até 60 cm de profundidade. Como a recomendação para incorporação de calcário é até 30 cm, a espessura da camada em subsuperfície para condicionamento pelo uso do gesso corresponderá a 30 cm. Nessas áreas de implantação ou renovação do canavial, o gesso é aplicado a lanço em área total. No caso de aplicação em soqueira, a superfície de cobertura não será de 100%, bem como quando o manejo determina aplicação no sulco de plantio, como em áreas muito declivosas de encosta.

Assim, a quantidade de gesso (*QG*) pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$QG = NG(sc/100) \times (ec/20)$$

em que *QG* é a quantidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); *NG* é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); *sc* é a superfície de cobertura em que o gesso será aplicado (%); e *ec* é a espessura da camada a ser corrigida (cm).

De maneira geral, deve-se dar preferência aos critérios de *NG* que levam em consideração as características texturais e/ou químicas do solo, que se encontram associadas à movimentação de bases e/ou ao equilíbrio no complexo de troca e adsorção de sulfato. Por sua vez, geralmente as quantidades de gesso não são muito elevadas e, por isso, é plausível considerar um programa de correção e manejo da acidez com aplicações anuais ou bianuais de gesso.

Há cerca de 10 anos alguns agricultores utilizaram com “aparente sucesso” doses de gesso até $40\ t\ ha^{-1}$, prática denominada “irrigação branca”, por causa do aspecto esbranquiçado da superfície do solo e do aparente melhor uso da água pela planta (provavelmente pelo melhor desenvolvimento do sistema radicular).

Embora os dados sobre os efeitos positivos do gesso como melhorador do ambiente radicular sejam abundantes no Brasil, não se pode negligenciar a ocorrência de perdas excessivas de potássio e magnésio, tal qual reportado para a região do Cerrado, quando doses elevadas de gesso são usadas (Lopes et al., 2004). O Mg^{2+} e o K^+ podem ser lixiviados para além de 60 cm de profundidade em função de doses elevadas de gesso (Rossato et al., 2017), principalmente se após a aplicação de doses de calcário também elevadas em solos de textura média a arenosa.

Nesse sentido, a pesquisa agrícola ainda não conseguiu estabelecer as bases técnicas para recomendação de doses mais específicas de gesso, considerando-se as características físico-químicas e mineralógicas do solo, bem como a profundidade de ação, o que poderia viabilizar doses mais altas de gesso, porém, sem efeitos adversos.

Efeitos do gesso no sistema radicular

As respostas ao gesso como melhorador ou condicionador químico do ambiente radicu-

lar em profundidade têm sido observadas em muitas culturas agrícolas. Essas respostas são atribuídas à melhor distribuição das raízes das culturas em profundidade, que propicia às plantas o aproveitamento de maior volume de água, fundamental em ciclos curtos de estresse hídrico, como nos Cerrados do Centro-Oeste e nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, com extensas áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar pode ser severamente afetada por causa do desenvolvimento radicular insatisfatório, uma vez que a planta apresenta elevado consumo de água, necessitando de 250 kg de água para cada 1 kg de matéria seca (Shigaki et al., 2004). Assim, em regiões onde ocorre estresse hídrico com frequência ou mesmo veranicos curtos, uma prática de grande importância para o aumento do acesso à água pelas raízes é o manejo químico do solo, visando à eliminação de barreiras químicas provocadas pelo alumínio (Al), as quais impossibilitam a exploração de um maior volume de solo pelas plantas.

Além disso, a eficiência nutricional é incrementada pela exploração de maior volume de solo, particularmente importante para o fósforo (P), e com enraizamento mais profundo, absorvendo nutrientes que porventura tenham sido carreados para camadas subsuperficiais, como é o caso do nitrogênio (N) (NO_3^- e NH_4^+) e o potássio (K).

Particularmente, em cana-de-açúcar, o aumento dos teores de cálcio (Ca) e a redução da saturação por Al em subsuperfície proporcionam maior volume de raízes em camadas mais profundas do solo (Figura 9.20), favorecendo a distribuição mais uniforme do sistema radicular, como constatou Rocha (2007). A associação entre calcário e gesso ou o uso exclusivo do gesso proporcionaram respostas semelhantes de distribuição das raízes abaixo dos 40 cm de profundidade (Figura 9.21), evidenciando-se a ação mais restrita do calcário à camada superficial do solo, em contraposição ao efeito do gesso no aprofundamento do sistema radicular.

Calagem e gessagem na produção de cana-de-açúcar

De modo geral, respostas à calagem estão muito relacionadas com o ano agrícola, com a ocorrência de chuvas suficientes ou não e com a distribuição dessas chuvas, que tornam o desenvolvimento das plantas e a produtividade da cultura mais ou menos dependentes do pleno desenvolvimento do sistema radicular (Tabelas 9.12 e 9.13).

Marinho et al. (1980), pesquisando o efeito da calagem em solos fortemente ácidos em Alagoas, obtiveram respostas favoráveis de produtividade da cana-planta e das duas soqueiras avaliadas (Figura 9.23). O padrão de resposta é tipicamente quadrático para o aumento das doses, com maiores incrementos de produtividade nas doses menores, tendendo a um ponto de inflexão onde as doses aplicadas tornam-se excessivas, com efeito negativo na produtividade. No caso do trabalho de Marinho et al. (1980), doses acima de $7,0 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário já não evidenciaram incrementos na produtividade ou resultaram em queda na comparação com as doses menores testadas (Figura 9.22).

Os programas de melhoramento genético em atividade no Brasil foram responsáveis pelo desenvolvimento de variedades adaptadas às mais variadas condições de solo, incluindo-se solos ácidos.

Em seis usinas do estado de São Paulo, Rossetto et al. (2004) buscaram respostas à calagem em cana-de-açúcar e somente encontraram acréscimos de produção significativos em duas delas, confirmando certa adaptação das cultivares a solos ácidos de menor fertilidade (Tabela 9.14).

Quando se associa o uso do calcário com o gesso, as respostas são mais consistentes. Medina e Brinholi (1998), estudando os efeitos da apli-

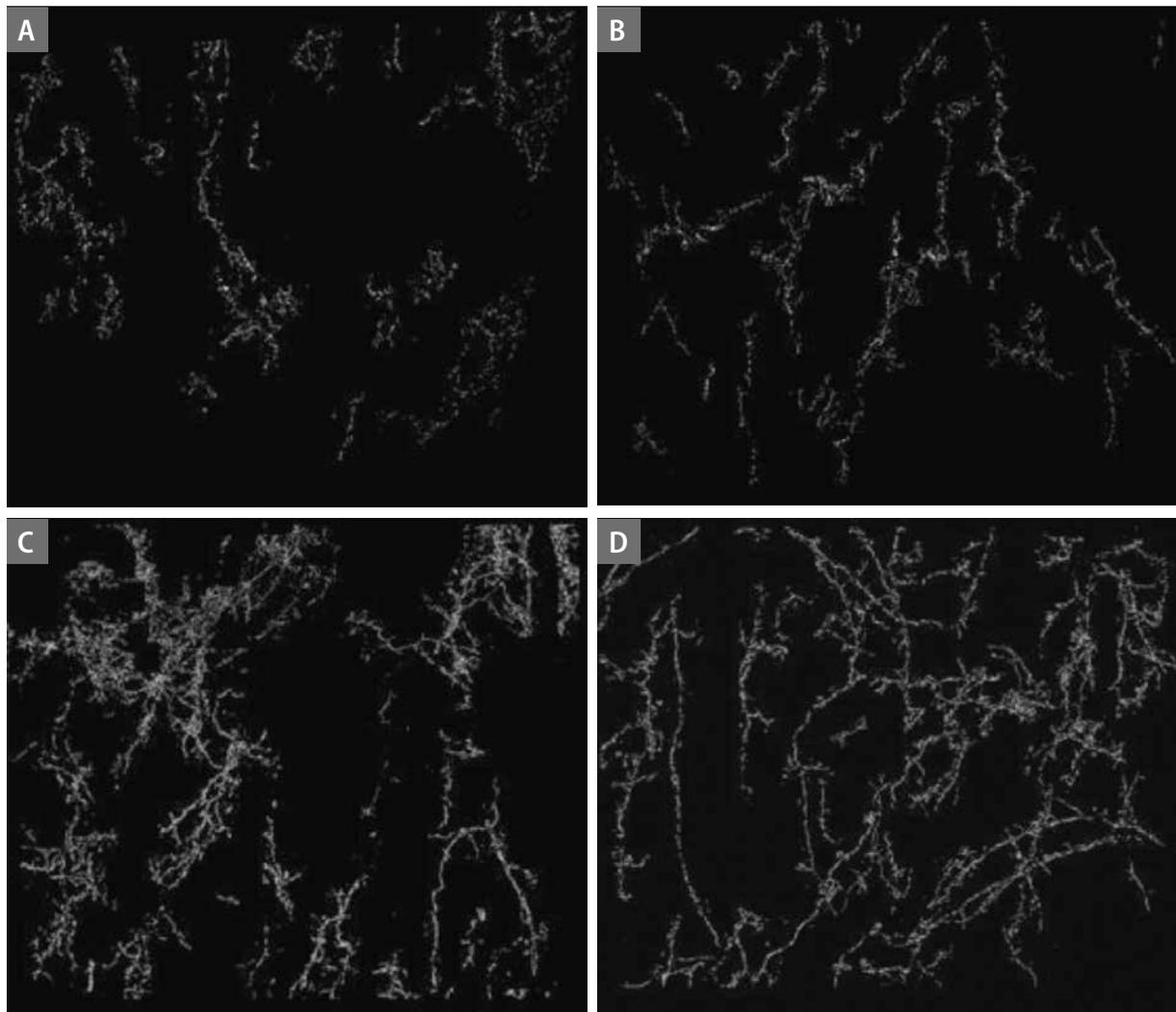


Figura 9.20. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar na profundidade 40–80 cm em solo sem aplicação de calcário e gesso (A) e com aplicação de calcário (B), calcário + gesso (C) e somente gesso (D).

Fonte: Rocha (2007).

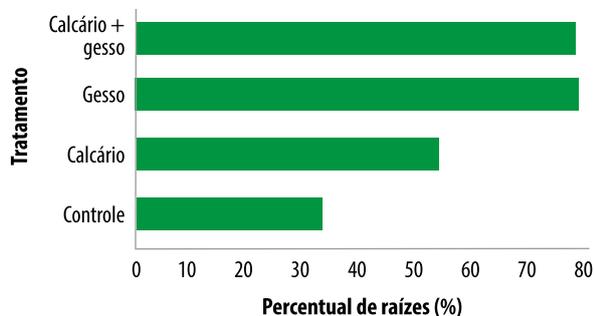


Figura 9.21. Proporção de raízes de cana-de-açúcar na camada 40–80 cm de profundidade, em relação à camada mais superficial de 0–40 cm, em solos sem aplicação de calcário e gesso (controle), com aplicação exclusiva de calcário ou gesso; e com a aplicação de calcário + gesso.

Fonte: Rocha (2007).

cação de calcário e gesso na produção de cana-de-açúcar, constataram que os maiores incrementos são obtidos com a associação calcário/gesso. Os resultados evidenciaram também que menores produtividades foram obtidas quando do uso exclusivo do gesso. O efeito negativo da aplicação isolada de gesso na produtividade das culturas, conforme já mencionado neste capítulo, se dá pela movimentação descendente de SO_4^{2-} , que tem como consequência lixiviação de Mg^{2+} e K^+ para região de menor exploração radicular (Singh et al., 1980; Raij et al., 1988).

Rocha (2007) encontrou resposta significativa à aplicação da associação calcário/gesso em

Tabela 9.12. Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário no sulco de plantio em usinas dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

Tratamento	Usina				
	Santa Teresinha	São Francisco	Catente	Santana	Baía Formosa
TCH ⁽¹⁾					
NPK sem calcário	76,0a	76,0b	104,0a	137,0a	77,0a
NPK com calcário	76,0a	87,7a	95,5b	147,2a	74,8a

⁽¹⁾ Produção em toneladas de colmos por hectare, na cana-planta.

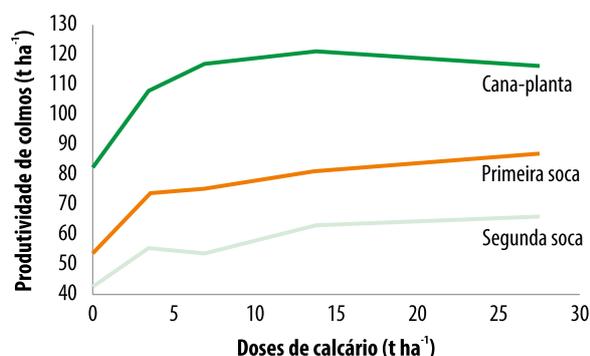
Fonte: Adaptado de Planalsucar (1980).

Tabela 9.13. Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário a lanço em área total em usinas dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

Tratamento	Usina							
	Cucaú	Laisa	Barreiros	Baía Formosa	União Indústria	São Francisco	Catente	Trapiche
TCH ⁽¹⁾								
NPK sem calcário	114,3a	71,7a	75,0a	40,7b	59,0a	96,0a	83,3b	51,3b
NPK com calcário	116,5a	75,4a	77,4a	45,7a	57,5a	95,0a	91,0a	64,0a

⁽¹⁾ Produção em toneladas de colmos por hectare, na cana-planta.

Fonte: Adaptado de Planalsucar (1980).

**Figura 9.22.** Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário no solo em Porto Calvo no estado de Alagoas.

Fonte: Adaptado de Marinho et al. (1980).

cana-planta na variedade SP78-4764 (Figura 9.22). A máxima produtividade (88,2 t ha⁻¹) foi obtida com a aplicação de 5,6 t ha⁻¹ de gesso, associada com dose de 4,6 t ha⁻¹ de calcário, calculada utilizando-se o critério de elevação do cálcio e do magnésio. A dose de gesso para a máxima produtividade, em associação com o calcário, pro-

porcionou incremento de 12,5 t ha⁻¹ de colmos, comparativamente ao uso exclusivo do calcário.

O autor observou, entretanto, que 3,42 t ha⁻¹ de gesso foram suficientes para reduzir a saturação por Al³⁺ em subsuperfície e proporcionar elevada produtividade, de 86,2 t ha⁻¹, o que foi atribuído à suficiente disponibilidade de cálcio no solo, com consequente melhoria do desenvolvimento radicular e nutrição das plantas.

Resultados consistentes da aplicação associada de calcário/gesso foram obtidos por Morelli et al. (1992), principalmente porque avalia-se o efeito residual dessa associação na produção de cana-de-açúcar em quatro cortes e calcula-se o custo da aplicação transformado em toneladas por hectare, permitindo estimativa de balanço financeiro, bem como considerando-se o ganho adicional de produção e o custo associados aos insumos (Tabela 9.15).

Tabela 9.14. Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário a lanço em área total em usinas do estado de São Paulo.

Tratamento	Usina					
	Santa Bárbara ⁽¹⁾	Ester ⁽¹⁾	São Francisco ⁽¹⁾	Barra Grande ⁽¹⁾	Arnália ⁽¹⁾	Arnália ⁽²⁾
NC ⁽³⁾	TCH (t ha ⁻¹)					
0,0	125,4	134,3	125,6	152,6	147,4	115,0
0,5	126,5	131,8	128,1	156,4	151,1	118,0
1,0	131,0	132,1	131,6	157,1	154,5	116,0
2,0	133,1	132,7	132,0	153,1	155,2	116,0

⁽¹⁾ Produção em cana planta. ⁽²⁾ Produção em cana-soca. ⁽³⁾ Necessidade de calagem.

Fonte: Adaptado de Rossetto et al. (2004).

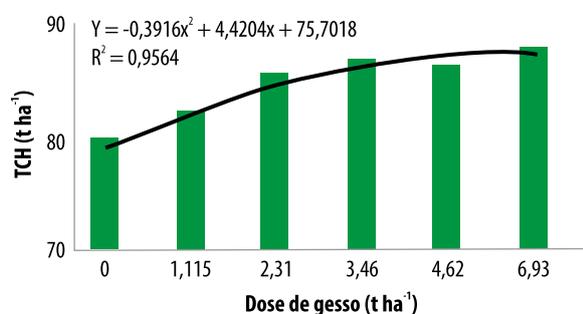


Figura 9.23. Produção de cana-de-açúcar, em toneladas de colmos por hectare (TCH), da variedade SP78-4762 em função de doses de gesso aplicadas em associação com 4,6 t ha⁻¹ de calcário.

Fonte: Rocha (2007).

Percebe-se pelos resultados da Tabela 9.15 que o custo de aplicação do calcário e gesso foi pago totalmente pelo ganho adicional em produtividade em 50% das combinações testadas já na primeira colheita da cana. A partir da segunda colheita da cana, praticamente todo o custo com calcário e gesso foi amortizado, gerando receita líquida média adicional de 13,3 t ha⁻¹ de colmos.

É importante registrar aqui que outros materiais, como escórias de siderurgia e termofosfatos, também têm sido utilizados na correção da acidez em solos com cana-de-açúcar.

A escória de siderurgia apresenta liberação mais lenta de nutrientes quando comparada com o calcário, o que pode ser bastante positivo para

culturas perenes ou semiperenes. Esse material tem sido bastante utilizado na região da Flórida nos Estados Unidos, proporcionando respostas satisfatórias (Elawad et al., 1982; Anderson et al., 1987, 1991). No Brasil, a escória de siderurgia em pré-plantio promoveu efeito residual positivo na produção da soqueira de cana-de-açúcar, comparativamente ao calcário calcítico aplicado (Figura 9.24) (Prado et al., 2003).

Além dos benefícios diretos às culturas, a utilização agrícola de escórias de siderurgia representa rota para reciclagem desse material e utilização racional dos recursos naturais.

Outras pesquisas têm mostrado o potencial dos termofosfatos (Ramos et al., 2006), que, além de serem muito utilizados na adubação com fósforo, também contribuem no manejo da correção da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar.

Rossetto et al. (2004) observaram as respostas significativas à calagem em apenas dois, de seis experimentos, com acréscimos de produtividade de cana de 8 e 13 t ha⁻¹, o que confirma a adaptação das cultivares plantadas em solos ácidos e de baixa fertilidade. Por sua vez, a resposta da cana ao potássio foi de natureza linear e significativa em sete das dez avaliações, tanto na cana-planta como em soqueiras. A interação calcário-potássio não foi significativa em

Tabela 9.15. Acréscimos de produção de colmos de cana-de-açúcar em quatro cortes em função da aplicação de calcário e gesso, custo associado aos insumos e ganho líquido (balanço: acréscimo total – custo).

Tratamento		Acréscimo de produção					Custo ⁽¹⁾	Ganho líquido
Calcário	Gesso	1º Corte	2º Corte	3º Corte	4º Corte	Total		
(t ha ⁻¹)								
0	0	–	–	–	–	–	–	–
0	2	7	5	5	12	29	3,3	25,7
0	4	8	12	8	22	50	5,1	44,9
0	6	9	11	9	23	52	6,9	45,1
2	0	7	10	6	22	45	5,7	39,3
2	2	9	12	10	28	59	8,9	50,1
2	4	18	18	12	25	73	10,8	62,2
2	6	11	14	7	30	62	12,6	49,4
4	0	8	13	9	25	55	9,9	45,1
4	2	18	21	13	38	90	13,2	76,8
4	4	11	21	14	28	74	15,0	59,0
4	6	13	31	7	26	77	16,8	60,2
6	0	4	8	8	25	45	14,2	30,8
6	2	7	13	17	37	74	17,4	56,6
6	4	9	12	8	30	59	19,2	39,8
6	6	5	19	15	38	77	21,1	55,9

⁽¹⁾ Custo do calcário + custo gesso + custo aplicação.

Fonte: Adaptado de Morelli et al. (1992).

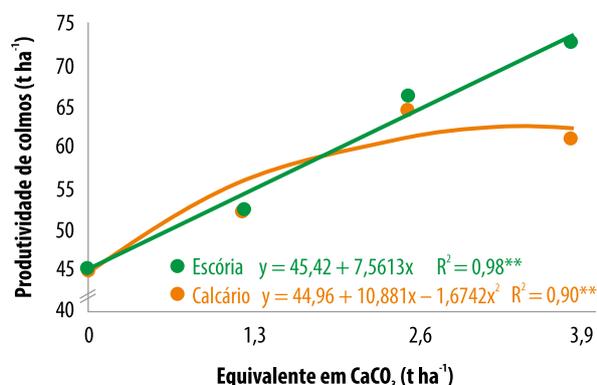


Figura 9.24. Produção de soqueira de cana-de-açúcar de quarto corte em função da aplicação em pré-plantio de doses equivalentes de CaCO₃ via escória de siderurgia e calcário.

Fonte: Adaptado de Prado et al. (2003).

nenhuma avaliação, mostrando a pouca interdependência entre essas práticas no manejo da fertilidade do solo para a cana-de-açúcar.

Considerações finais

O emprego de corretivos da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar é uma prática eficiente e sem contestação técnica ou ambiental, o qual permite obter produtividades mais elevadas, pela correção da acidez do solo, pela elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis, pela redução dos teores tóxicos de alumínio e manganês, bem como pelos efeitos indiretos na nutrição mineral das plantas.

O gesso agrícola é um importante insumo para o manejo químico do perfil do solo, complementarmente aos benefícios do calcário, e deve ser utilizado para melhoria das condições de desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar em profundidade.

Na implantação ou renovação do canavial, recomenda-se a aplicação de calcário a lanço em área total e incorporação até 30 cm de profundidade com arado de disco, antecedendo-se a aplicação de gesso, que deve ser recomendado para correção da acidez de 30 até 60 cm de profundidade, aplicado a lanço na superfície.

Em áreas de encostas, como comumente encontradas no cultivo de cana-de-açúcar no Nordeste, pela dificuldade da incorporação, o calcário deve ser aplicado localizadamente no sulco de plantio na reforma ou implantação do canavial. Dessa forma, é recomendado evitar a aplicação de calcário concomitantemente à adubação fosfatada e, se possível, substituir parcial ou totalmente a adubação mineral pelo uso da torta de filtro no sulco.

Em solos arenosos, o gesso pode ser aplicado parceladamente, evitando-se perdas significativas de magnésio e potássio, principalmente, quando recomendado em doses elevadas ($>4 \text{ t ha}^{-1}$).

Recomenda-se, também, após cada corte, monitorar a acidez do solo até 60 cm de profundidade, de modo a subsidiar uma segunda calagem e/ou gessagem, sempre que o teor de cálcio estiver inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

O manejo da acidez do solo, em favor de produtividades mais competitivas e do uso racional dos recursos minerais, requer o acompanhamento periódico dos atributos do solo, o estabelecimento de estratégias de adubação e correção alinhadas com as características do insumo ou do condicionador do solo, bem como o manejo das relações cálcio e magnésio, com vistas à sustentabilidade do sistema produtivo.

Referências

- ABREU JÚNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. *Scientia Agricola*, v. 60, n. 2, p. 337-343, abr./jun. 2003. DOI: [10.1590/S0103-90162003000200019](https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000200019).
- ACCIOLY, A. C. A.; SCHULZE, S. M. B. B. **Noções de geologia e evolução da Bacia do Araripe**. Recife: UFRPE, 2003. 9 p.
- ADAMS, F.; PEARSON, R. W. Differential response of cotton and peanuts to subsoil acidity. *Agronomy Journal*, v. 62, n. 1, p. 9-12, Jan./Feb. 1970. DOI: [10.2134/agronj1970.00021962006200010003x](https://doi.org/10.2134/agronj1970.00021962006200010003x).
- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: Anda, 1992. 26 p. (Boletim técnico, 6).
- ALCORDO, I. S.; RECHCIGL, J. E. Phosphogypsum in agriculture: a review. *Advances in Agronomy*, v. 49, p. 55-119, 1993. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60793-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60793-2).
- ALVA, A. K.; SUMNER, M. E. Alleviation of aluminum toxicity to soybeans by phosphogypsum or calcium sulfate in dilute nutrient solutions. *Soil Science*, v. 147, n. 4, p. 278-85, Apr. 1989. DOI: [10.1097/00010694-198904000-00007](https://doi.org/10.1097/00010694-198904000-00007).
- ALVA, A. K.; SUMNER, M. E.; MILLER, W. P. Salt absorption in gypsum amended acid soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW PH, 2., 1990, Beckley. **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Springer, 1991. p. 93-97. (Developments in plant and soil sciences, v. 45).
- ALVAREZ V., V. H. **Efecto de los factores cantidad, intensidad y capacidad amortiguadora de fosfato en la evolución del fósforo disponible, de suelos derivados de cenizas volcánicas de La Meseta Tarasca, Edo. Michoacán**. 1982. 300 f. Tese (Doutorado em Ciências) -- Colegio de Potsgraduados, Chapingo.
- ALVAREZ V., V. H.; DIAS, L. E. **Enxofre**. Brasília, DF: Abeas, 1994. 106 p.
- ALVAREZ V., V. H.; DIAS, L. E.; RIBEIRO, A. C.; SOUZA, R. B. Uso de gesso agrícola. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999a. p. 67-78.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CATARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999b. p. 25-32.

- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 43-60.
- ALVES, M. E.; LAVORENTI, A. Sulfate adsorption and its relationships with properties of representative soils of the São Paulo State, Brazil. **Geoderma**, v. 118, n. 1-2, p. 89-99, Jan. 2004. DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00186-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00186-1).
- AMARAL, A. S. do; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 695-702, abr. 2001. DOI: [10.1590/S0100-204X2001000400013](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000400013).
- AMEZKETA, E.; ARAGÜÉS, R.; GAZOL, R. Efficiency of sulfuric acid, mined gypsum, and two gypsum by-products in soil crusting prevention and sodic soil reclamation. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 983-987, May 2005. DOI: [10.2134/agronj2004.0236](https://doi.org/10.2134/agronj2004.0236).
- ANDERSON, D. L.; JONES, D. B.; SNYDER, G. H. Response of a rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, v. 79, n. 3, p. 531-535, May/June 1987. DOI: [10.2134/agronj1987.00021962007900030026x](https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900030026x).
- ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H.; MARTIN, F. G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, v. 83, n. 5, p. 870-874, Sept./Oct. 1991. DOI: [10.2134/agronj1991.00021962008300050019x](https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300050019x).
- AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; MANHÃES M. S.; WEBER, H. Doses de calcário, gesso, mistura de calcário/gesso, interação calcário x fósforo e calcário x potássio em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 6., 1996, Maceió. **Anais...** Piracicaba: Stab, 1996. p. 477- 483.
- AZEREDO, D. F.; GLÓRIA, N. A.; MANHÃES, M. S. Efeitos da calagem na cana-planta e nas características químicas de dois solos do Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Piracicaba: Stab, 1981. p. 71-88.
- BELKACEM, S.; NYS, C. Effects des formes et doses d'amendements et de gypse sur les caractéristiques chimiques et les percolats d'un sol forestier acide. **Annales des Sciences Forestières**, v. 54, p. 69-180, 1997.
- BENEDINI, M. S. **Novo conceito no uso de calcário em cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1988. 19 p. (Série agrônoma, 16).
- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 565-573, May/June 2006. DOI: [10.1590/S0100-06832006000300016](https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300016).
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília, DF, 2017. 230 p.
- BRASIL. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução normativa SDA nº 35, de 04 de julho de 2006. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 1-10, 12 jul. 2006.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; CARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275-286, Mar./Apr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200008](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200008).
- CAIRES, E. F.; CHUERI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 27-34, Jan./Mar. 1998. DOI: [10.1590/S0100-06831998000100004](https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100004).
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUERI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 315-327, Apr./June 1999. DOI: [10.1590/S0100-06831999000200016](https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000200016).
- CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; CARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações Químicas do Solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 125-136, jan./fev. 2004. DOI: [10.1590/S0100-06832004000100013](https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100013).
- CARE, D. A. The effect of aluminum concentration on root hairs in white clover (*Trifolium repens* L.). **Plant and Soil**, v. 171, n. 1, p. 159-162, Apr. 1995. DOI: [10.1007/BF00009580](https://doi.org/10.1007/BF00009580).
- CARVALHO, L. J. C. B.; GOMIDE, R. L.; RODRIGUES, G. C.; SOUSA, D. G. M.; FREITAS-JÚNIOR, E. de. Resposta do milho à aplicação de gesso e déficit hídrico em solos de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1., 1985, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa-DDT, 1986. p. 61-83.
- CARVALHO, M. C. S.; RAIJ, B. van. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth.

- Plant and Soil**, v. 192, n. 1, p. 37-48, May 1997. DOI: [10.1023/A:1004285113189](https://doi.org/10.1023/A:1004285113189).
- CATE, J. R. B. **Sugestões para adubação com base na análise de solo**: primeira aproximação. Recife: North Carolina State University, 1965. 16 p.
- CAVALCANTI, F. J. de A.; SANTOS, J. C. P. dos; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L. da; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R. de; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B. de; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R.; V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**: 2ª aproximação. Recife: IPA, 1998. 198 p.
- CLARKSON, D. T. Interactions between aluminum and phosphorus on root surfaces cell wall material. **Plant and Soil**, v. 27, n. 3, p. 347-355, Dec. 1967. DOI: [10.1007/BF01376328](https://doi.org/10.1007/BF01376328).
- COLEMAN, N. T.; KAMPRATH, E. J.; WEED, S. B. Liming. **Advances in Agronomy**, v. 10, p. 475-522, 1959. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60073-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60073-5).
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 3ª aproximação. Belo Horizonte: Epamig, 1978. 80 p.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 4ª aproximação. Lavras, 1989. 159 p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre, 2004. 401 p.
- CORDEIRO, D. A. **Efeitos da calagem e da adubação potássica sobre a produção de colmo e o equilíbrio nutricional da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1978. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- CORRÊA, J. B.; COSTA, P. C. da; LOPES, A. S.; CARVALHO, J. G. de. Avaliação de H + Al pelo método SMP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIIRAS, 12, 1985, Caxambu. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1985. p. 111-112.
- DAL BÓ, M. A.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M.; THIÉBAUT, J. T. L.; NOVAIS, R. F. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio em colunas de solo cultivadas com cana-de-açúcar: I. Movimentação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, n. 3, p. 195-198, set./dez. 1986.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 328-354.
- DEMATTÊ, J. L. I. Solos arenosos de baixa fertilidade: estratégia de manejo. In: SEMINÁRIO AGROINDUSTRIAL, 5.; SEMANA “LUIZ DE QUEIROZ”, 29., 1986, Piracicaba. [**Anais...**] Piracicaba: [s.n.], 1986. Mimeografado.
- ELAWAD, S. H.; GASGHO, G. J.; STREET, J. J. Response of sugarcane to silicate source and rate: I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 3, p. 481-483, May/June 1982. DOI: [10.2134/agronj1982.00021962007400030019x](https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030019x).
- ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 4, p. 825-831, out./dez. 2001. DOI: [10.1590/S0103-90162001000400026](https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000400026).
- FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration: II. Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 1, p. 175 -180, Jan./Feb. 1988. DOI: [10.2136/sssaj1988.03615995005200010031x](https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010031x).
- FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: II. Long-term soil effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 652-658, Mar. 2000. DOI: [10.2136/sssaj2000.642652x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642652x).
- FERNANDES, M. B.; FREIRE, F. J.; COSTA, F. G. B. Gesso mineral como fonte de enxofre para cana-de-açúcar. **Caatinga**, v. 20, n. 4. p. 101-109, out./dez. 2007.
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-152.
- FOY, C. D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 7-12, p. 959-987, 1988. DOI: [10.1080/00103628809367988](https://doi.org/10.1080/00103628809367988).
- FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 29, p. 511-566, June 1978. DOI: [10.1146/annurev.pp.29.060178.002455](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.29.060178.002455).
- FREIRE, F. J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar**. 2001. 150 f. Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- FREIRE, F. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; VENEGAS, V. H. A.; MELLES, C. do C. A. **Calagem, gessagem e adubação do cafeeiro**. Belo Horizonte: EPAMIG, 1984. 20 p. (Epamig. Boletim técnico, 11).

- FURLANI, P. R.; BERTON, R. S. Atividade de cálcio e alumínio e desenvolvimento radicular. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** Uberaba: Ibrafos, 1992. p. 121-138.
- FURLANI, P. R.; CLARK, R. B. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions. **Agronomy Journal**, v. 73, n. 4, p. 587-594, July/Aug. 1981. DOI: [10.2134/agronj1981.00021962007300040005x](https://doi.org/10.2134/agronj1981.00021962007300040005x).
- GALLO, J. R. Estudo da solubilidade, em solução de ácido acético a 1%, de alguns materiais calcários de grau de finura comercial. **Bragantia**, v. 13, n. 10, p. 133-139, maio 1954. DOI: [10.1590/S0006-87051954000100010](https://doi.org/10.1590/S0006-87051954000100010).
- GALLO, J. R.; CATANI, R. A. Solubilidade de alguns tipos de calcários. **Bragantia**, v. 13, n. 5, p. 63-74, abr. 1954. DOI: [10.1590/S0006-87051954000100005](https://doi.org/10.1590/S0006-87051954000100005).
- GAMA, M. A. P.; PROCHNOW, L. I.; GAMA, J. R. N. F. Avaliação da acidez potencial pelo método pH SMP em solos do Nordeste Paraense. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 7.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 5.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 2., 1998, Caxambu. **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas: consolidando um paradigma: resumos**. Lavras: UFLA, 1998. p. 548.
- GARCIA, C. P. **Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem na compactação do solo e na produtividade da cana-de-açúcar**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -- Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu.
- GARRIDO, F.; ILLERA, V.; VIZCAYNO, C.; GARCÍA-GONZALEZ, M. T. Evaluation of industrial by-products as soil acidity amendments: chemical and mineralogical implications. **European Journal of Soil Science**, v. 54, p. 411-422, June 2003. DOI: [10.1046/j.1365-2389.2003.00522.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00522.x).
- GLOBALFERT. **Outlook Globalfert**: 2020. [S.l.], 2020. 155 p.
- ILLERA, V.; GARRIDO, F.; VIZCAYNO, C.; GARCÍA-GONZALEZ M. T. Field application of industrial by-products as Al toxicity amendments: chemical and mineralogical implications. **European Journal of Soil Science**, v. 55, p. 681-692, Dec. 2004. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2004.00640.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00640.x).
- INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. rev. e ampl. Piracicaba: Potafos, 1998. 177 p.
- KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; MARTINS, J. R.; SANTOS, E. J. S.; TISSOT, C. A. Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1107-1113, Oct./Dec. 2002. DOI: [10.1590/S0100-06832002000400029](https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400029).
- KAMINSKI, J.; SILVA, L. S. da; CERETTA, C. A.; SANTOS, D. R. dos. Acidez e calagem em solos do Sul do Brasil: aspectos históricos e perspectivas futuras. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 307-332, 2007.
- KAMPRATH, E. J. **Soil acidity and response to liming**. Raleigh: North Carolina State University, 1967. 21 p. (IST. Technical Bulletin, 4).
- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 46, p. 237-260, June 1995. DOI: [10.1146/annurev.pp.46.060195.001321](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.46.060195.001321).
- KOFFLER, N. F.; LIMA, J. F. W. F.; LACERDA, M. F.; SANTANA, J. F.; SILVA, M. A. **Caracterização edafo-climática das regiões canavieiras do Brasil**: Pernambuco. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1986. 78 p.
- KOYAMA, H.; TODA, T.; HARA, T. Brief exposure to low-pH stress causes irreversible damage to the growing root in *Arabidopsis thaliana*: pectin-Ca interaction may play an important role in proton-rhizotoxicity. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 355, p. 361-368, Feb. 2001. DOI: [10.1093/jexbot/52.355.361](https://doi.org/10.1093/jexbot/52.355.361).
- LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. rev. amp. Piracicaba: Potafos, 1998. 177 p.
- LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Anda, 2004. 110 p.
- MACEDO, C. C. de; KINET, J. M.; SINT JAN, V. van. Effects of duration and intensity of aluminum stress on growth parameters in four rice genotypes differing in aluminum sensitivity. **Journal of Plant Nutrition**, v. 20, n. 1, p. 181-193, 1997. DOI: [10.1080/01904169709365241](https://doi.org/10.1080/01904169709365241).
- MAEDA, S.; KURIHRA, C. H.; HERNANI, L. C.; FABRICIO, A. C.; SILVA, W. M. **Estimativa da acidez potencial, pelo método do pH SMP, em solos do Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa-CPAO, 1997. 25 p. (Embrapa-CPAO. Boletim de pesquisa, 3). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/241103/1/CPAODOCUMENTOS3ESTIMATIVADAACIDEZPOTENCIALPELOMETODOPHSMPEMSOLOSDOMATOGROSSOD2.pdf>. Acesso em: 25 set. 2020.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola**: adubos e adubação. 3. ed. São Paulo: Agronômico Ceres, 1981. 596 p.

- MALAVOLTA, E. O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta - perguntas e respostas. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** São Paulo: Ibrafos, 1992. p. 41-66.
- MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C. Calagem. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Planalsucar, 1983. p. 181-208.
- MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C.; ARAÚJO FILHO, J. T. Efeito da calagem sobre a cana-de-açúcar em solo argiloso fortemente ácido em Alagoas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 14., 1980, Cuiabá. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1980. p. 14-19.
- MARINHO, M. L.; ARAÚJO FILHO, J. T. **Calibração do Al no solo para cana-de-açúcar em Alagoas**. Piracicaba: IAA/ Planalsucar, 1981. 17 p.
- MARION, G. M.; HENDRICKS, D. M.; DUTT, G. R.; FULLER, W. H. Aluminum and silica solubility in soils. **Soil Science**, v. 121, n. 2, p. 76-85, Feb. 1976. DOI: [10.1097/00010694-197602000-00003](https://doi.org/10.1097/00010694-197602000-00003).
- MAYS, D. A.; MORTVEDT, J. J. Crop response to soil applications of phosphogypsum. **Journal of Environmental Quality**, v. 15, n. 1, p. 78-81, Jan./Mar. 1986. DOI: [10.2134/jeq1986.00472425001500010018x](https://doi.org/10.2134/jeq1986.00472425001500010018x).
- MCCORMICK, L. H.; BORDEN, F. Y. Phosphate fixation by aluminum in plant roots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, n. 5, p. 799-807, Sept./Oct. 1972. DOI: [10.2136/sssaj1972.03615995003600050031x](https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600050031x).
- MCLAY, C. D. A.; RITCHIE, G. S. P. Effect of gypsum on wheat grown in pots containing an acidic subsoil. In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 12., 1993, Perth. **Plant nutrition: from genetic engineering to field practice**. Dordrecht: Springer, 1993. p. 747-750, 1993. (Developments in plant and soil sciences, v. 45).
- MEDINA, C. de C.; BRINHOLI, O. Uso de resíduos agroindustriais na produção de cana-de-açúcar, açúcar e álcool. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 11, p. 1821-1825, nov. 1998.
- MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; BOHNEN, H. **Recomendações de adubo e calcário para os solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 1969. 38 p. (UFRGS-FAV. Boletim técnico, 2).
- MIRANDA, L. N. de; MIRANDA, J. C. C. de; REIN, T. A.; GOMES, A. C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 6, p. 563-572, jun. 2005. DOI: [10.1590/S0100-204X2005000600006](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000600006).
- MOHR, W. A influência da acidez sobre a fertilidade dos solos. In: CONGRESSO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 1., 1960, Campinas. **Anais...** São Paulo: Secretaria da Agricultura, 1960. 23 p.
- MORAES, E. R. de; MAGESTE, J. G.; PEIXOTO, J. V. M.; DOMINGUES, L. A. da S.; LANA, R. M. Q.; LEMES, E. M. Soil fertility under different tillage systems in sugarcane expansion area. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 8, p. 1236-1243, Aug. 2019. DOI: [10.21475/ajcs.19.13.08.p1504](https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.08.p1504).
- MOREIRA, A.; ALMEIDA, M. P. de; COSTA, D. G.; SANTOS, L. S. Acidez potencial pelo método do pH SMP no Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 89-92, jan. 2004. DOI: [10.1590/S0100-204X2004000100013](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100013).
- MORELLI, J. L.; DALBEN, A. E.; ALMEIDA, J. O. C.; DEMATTÊ, J. L. I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um Latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, n. 2, p. 187-194, maio/ago. 1992.
- NASCIMENTO, C. W. A. Acidez potencial estimada pelo pH SMP em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 679-682, July/Sept. 2000. DOI: [10.1590/S0100-06832000000300021](https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000300021).
- OLIVEIRA, E. C. A. de. **Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção**. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, v. 38, n. 1-2, p. 47-57, Aug. 1996. DOI: [10.1016/0167-1987\(96\)01021-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01021-5).
- ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V. C.; CARMELLO, Q. A. de C.; BEAUCLAIR, E. G. F. de. Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 14, n. 5, p. 13-17, maio/jun. 1996.
- PAVAN, M. A. Effect of SO_4^{2-} -salts on exchangeable aluminum. **Ciência e Cultura**, v. 45, n. 2, p. 123-126, 1993.
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 993-997, Sept./Oct. 1982. DOI: [10.2136/sssaj1982.03615995004600050021x](https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050021x).
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PEREIRA, F. J. Influence of calcium and magnesium salts on acid soil chemistry and calcium nutrition of apple. **Soil Science of America Journal**, v. 6, p. 1526-1530, Nov./Dec. 1987. DOI: [10.2136/sssaj1987.03615995005100060022x](https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060022x).

- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminium to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 6, p. 1201-1207, Nov./Dec. 1982. DOI: [10.2136/sssaj1982.03615995004600060017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600060017x).
- PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, E. L.; MIYAZAWA, M. Determinação indireta da acidez extraível do solo (H + Al) por potenciometria com a solução tampão SMP. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 39, p. 307-312, 1996.
- PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H.; MOURA, W. F.; CORRÊA, G. F. Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 265-274, Mar./Apr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200007](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200007).
- PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; SOUZA, J. M. P. F.; PÉREZ, D. V.; ANJOS, L. H. C. dos. Estimativa da acidez potencial pelo método do pH SMP em solos do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 159-162, jan./mar. 1998. DOI: [10.1590/S0100-06831998000100021](https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100021).
- PLANALSUCAR. **Relatório anual da seção de solos e adubação**. Rio Largo, 1983. 67 p.
- PLANALSUCAR. **Relatório anual da seção de solos e adubação**. Rio Largo, 1980. 78 p.
- PORTA, J. Methodologies for the analysis e characterization of gypsum in soils: a review. **Geoderma**, v. 87, n. 1-2, p. 31-46, Dec. 1998. DOI: [10.1016/S0016-7061\(98\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00067-6).
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 287-296, mar./abr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200009](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200009).
- QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2000. 111 p.
- QUAGGIO, J. A.; DECHEN, A. R.; RAIJ, B. van. Efeitos da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e a lixiviação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, n. 3, p. 189-194, set./dez. 1982.
- QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Correção da acidez do solo. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p. 14-19. (IAC. Boletim técnico, 100).
- QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v. 16, n. 3, p. 245-260, 1985. DOI: [10.1080/00103628509367600](https://doi.org/10.1080/00103628509367600).
- RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1981. 142 p.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres; Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1988. 88 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; FURLANI, P. R. Efeito, na reação do solo, da absorção de amônio e nitrato pelo sorgo, na presença e na ausência de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, n. 1, p. 131-136, jan./abr. 1988.
- RAMOS, L. A.; NOLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. de. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 849-857, Sept./Oct. 2006. DOI: [10.1590/S0100-06832006000500011](https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000500011).
- REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochimophysics**, v. 4, n. 1, p. 1-5, Jan. 1972.
- RENGEL, Z. Role of calcium in aluminum toxicity. **New Phytologist**, v. 121, n. 4, p. 499-513, Aug. 1992. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1992.tb01120.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01120.x).
- RENGEL, Z.; ZHANG, W. H. Role of dynamics of intracellular calcium in aluminium-toxicity syndrome. **New Phytologist**, v. 159, n. 2, p. 295-314, Aug. 2003. DOI: [10.1046/j.1469-8137.2003.00821.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00821.x).
- RIRIE, D.; TOTH, S. J.; BEAR, F. E. Movement and effect of lime and gypsum in soil. **Soil Science**, v. 73, n. 1, p. 23-36, Jan. 1952. DOI: [10.1097/00010694-195201000-00004](https://doi.org/10.1097/00010694-195201000-00004).
- RITCHEY, K. D.; FELDHAKE, C. M.; CLARK, R. B.; SOUSA, D. M. G. de. Improved water and nutrient uptake from subsurface layers of gypsum-amended soils. In: KARLEN, D. L.; WRIGHT, R. J.; KEMPER, W. O. (ed.). **Agricultural utilization of urban and industrial by-products**. Madison: ASA, 1995. p. 157-182. (ASA special publication, n. 58). DOI: [10.2134/asaspecpub58.c8](https://doi.org/10.2134/asaspecpub58.c8).
- RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna oxisols. **Soil Science**, v. 133, n. 6, p. 378-382, June 1982. DOI: [10.1097/00010694-198206000-00007](https://doi.org/10.1097/00010694-198206000-00007).
- RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in

a brazilian savannah oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, Jan./Feb. 1980. DOI: [10.2134/agronj1980.00021962007200010009x](https://doi.org/10.2134/agronj1980.00021962007200010009x).

ROCHA, A. T. da. **Gesso mineral na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar e implicações na produtividade agrícola e industrial**. 2007. 69 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

RODELLA, A. A.; ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Calibração de cálcio, magnésio e acidez do solo para a cana-de-açúcar cultivada na região de Cerrado. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 2, p. 45-48, 1984.

ROSSATO, O. B.; FOLTRAN, R.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARTELLO, J. M.; ROSSETO, R.; MCCRAY, J. M. Soil fertility, ratoon sugarcane yield, and post-harvest residues as affected by surface application of lime and gypsum in southeastern Brazil. **Bioscience Journal**, v. 33, n. 2, p. 276-287, Mar./Apr. 2017. DOI: [10.14393/BJ-v33n2-32755](https://doi.org/10.14393/BJ-v33n2-32755).

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CATARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação coma adubação potássica. **Bragantia**, v. 63, n. 1, p. 105-119, 2004. DOI: [10.1590/S0006-87052004000100011](https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000100011).

ROSSIELLO, R. O. P.; JACOB NETO, J. Toxidez de alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 375-418.

RYAN, P. R.; REID, R. J.; SMITH, F. A. Direct evaluation of the Ca²⁺-displacement hypothesis for Al toxicity. **Plant Physiology**, v. 113, n. 4, p. 1351-1357, Apr. 1997. DOI: [10.1104/pp.113.4.1351](https://doi.org/10.1104/pp.113.4.1351).

SÁ, J. C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS: UFLA, 1999. p. 267-320.

SALDANHA, E. C. M.; ROCHA, A. T. da; OLIVEIRA, E. C. A. de; NASCIMENTO, C. W. A. do; FREIRE, F. J. Uso do gesso mineral em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Caatinga**, v. 20, n. 1, p. 36-42, jan./mar. 2007.

SAMBATTI, J. A.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; TORMENA, C. A. Estimativa da acidez potencial pelo método do pH SMP em solos em formação caiuíá – noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 257-264, Mar./Apr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200006](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200006).

SANCHES, P. A.; SALINAS, J. G. Low-input technology for maneging oxisols and ultisols in tropical América.

Advances in Agronomy, v. 34, p. 279-406, 1981. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60889-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60889-5).

SANTOS, M. B. G. dos. **Influência da correção da acidez com calcário e gesso na movimentação de cátions e lixiviação de nitrogênio**. 1993. 132 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SCHMEHL, W. R.; HUMBERT, R. P. Nutrient deficiencies in sugar crops. In: SPRAGUE, H. B. (ed.). **Hunger signs in crops: a symposium**. 3rd. ed. New York: David McKay, 1964. p. 145-150.

SHAINBERG, I.; SUMNER, M. E.; MILLER, W. P.; FARINA, M. P. W.; PAVAN, M. A.; FEY, M. V. Use of gypsum on soils: a review. In: STEWART, B. A. (ed.). **Advances in Soil Science**. New York: Springer, 1989. p. 1-111.

SHAMSHUDDIN, J.; ISMAIL, H. Reactions of ground magnesium limestone and gypsum in soil with variable-charge minerals. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 106-112, Jan./Feb. 1995. DOI: [10.2136/sssaj1995.03615995005900010017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900010017x).

SHIGAKI, F.; FREITAS, N.; BERTO A.; CEDDIA, M. B.; ZONTA, E.; LIMA, E. Influência do estresse hídrico nos parâmetros de crescimento, acúmulo de N e produtividade de diferentes variedades de cana-de-açúcar em Miracema - RJ. **Revista Universidade Rural: Série Ciências da Vida**, v. 24, n. 1, p. 63-71, jan./jun. 2004.

SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soil with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Science Society of America Journal**, v. 25, n. 4, p. 274-277, July/Aug. 1961. DOI: [10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x).

SILVA, C. A.; AVELLAR, M. L.; BERNARDI, A. C. C. Estimativa da acidez potencial pelo pH SMP em solos do Semi-Árido do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 689-692, July/Sept. 2000. DOI: [10.1590/S0100-06832000000300023](https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000300023).

SILVA, E. B.; DIAS, M. S. C.; GONZAGA, E. I. C.; SANTOS, N. M. Estimativa da acidez potencial pelo pH SMP em solos da região norte do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 561-565, Apr./June 2002. DOI: [10.1590/S0100-06832002000200031](https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200031).

SILVA, E. de B.; COSTA, H. A. O.; FARNEZI, M. M. de M. Acidez potencial estimada pelo método do pH SMP em solos da região do Vale do Jequitinhonha no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 751-757, July/Aug. 2006. DOI: [10.1590/S0100-06832006000400016](https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000400016).

SILVA, I. R.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D. W.; RAPER, C. D.; RUFTY, T. W. Magnesium is more efficient than calcium

- in alleviating aluminum rhizotoxicity in soybean and its ameliorative effect is not explained by the Gouy-Chapman-Stern model. **Plant and Cell Physiology**, v. 42, n. 5, p. 538-545, May 2001. DOI: [10.1093/pcp/pce066](https://doi.org/10.1093/pcp/pce066).
- SILVA, N. M. da; RAIJ, B. van. O uso do gesso e do superfosfato simples na cultura do algodoeiro. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1992. p. 159-74.
- SIMÕES NETO, D. E. **Avaliação da fertilidade fosfatada e recomendação de fósforo para cana-de-açúcar em solos de Pernambuco**. 2008. 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- SINGH, B. R.; ABRAHAMSEN, G.; STUANES, A. Effects of simulated acid rain on sulfate movement in acid forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 1, p. 75-80, Jan./Feb. 1980. DOI: [10.2136/sssaj1980.03615995004400010017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400010017x).
- SOPRANO, E.; ALVAREZ V., V. H. Nutrientes lixiviados de colunas de solo tratados com diferentes sais de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 1, p. 25-29, jan./abr. 1989.
- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VITTI, G. C. Reactivity of sedimentary and metamorphic limestones of different particle sizes under controlled conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 50, n. 4, p. 464-473, 2019. DOI: [10.1080/00103624.2019.1566920](https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566920).
- SOUSA, D. M. G.; CARVALHO, L. J. C. B.; MIRANDA, L. N. Correção da acidez do solo. In: GOEDERT, W. J. (ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel; Brasília, DF: Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1985. p. 90-127.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 81-96.
- SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos cerrados**. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1995. 20 p. (EMBRAPA-CPAC. Circular técnica, 32).
- SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; LOBATO, E.; CASTRO, L. H. R. de. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 2, p. 193-198, maio/ago. 1989.
- SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.
- SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. de A.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p. 237-239. (IAC. Boletim técnico, 100).
- SUMNER, M. E. Gypsum and acid soils: the world scene. **Advances in Agronomy**, v. 51, p. 1-32, 1993. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60589-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60589-1).
- SYED-OMAR, S. R.; SUMNER, M. E. Effect of gypsum on soil potassium and magnesium status and growth of alfafa. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 22, n. 19-20, p. 2017-2028, 1991. DOI: [10.1080/00103629109368554](https://doi.org/10.1080/00103629109368554).
- TAN, K.; KELTJENS, W. G.; FINDENEGG, G. R. Effect of nitrogen form on aluminum toxicity in sorghum genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, n. 9, p. 1383-1394, 1992. DOI: [10.1080/01904169209364405](https://doi.org/10.1080/01904169209364405).
- TANG, C.; ZENGEL, Z.; DIATLOFF, E.; GAZEY, C. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. **Field and Crops Research**, v. 80, n. 3, p. 235-244, Jan. 2003. DOI: [10.1016/S0378-4290\(02\)00192-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00192-2).
- TAYLOR, G. J.; MCDONALD-STEPHENS, J. L.; HUNTER, D. B.; BERTSCH, P. M.; ELMORE, D.; RENGEL, Z.; REID, R. J. Direct measurement of aluminium uptake and distribution in single cells of *Chara corallina*. **Plant Physiology**, v. 123, n. 3, p. 987-996, July 2000. DOI: [10.1104/pp.123.3.987](https://doi.org/10.1104/pp.123.3.987).
- TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B. de; SALDANHA, M. F. C. pH do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 199-202.
- TISTALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 3rd. ed. New York: MacMillan, 1975. 694 p.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4th. ed. New York: Macmillan Publishing, 1985. 754 p.
- TOLRÀ, R. P.; POSCHENRIEDER, C.; LUPPI, B.; BARCELÓ, J. Aluminium-induced changes in the profiles of both organic acids and phenolic substances underlie Al tolerance in *Rumex acetosa* L. **Environmental and Experimental Botany**, v. 54, n. 3, p. 231-238, Nov. 2005. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.07.006).

VIATOR, R. P.; KOVAR, J. L.; HELMARK, W. B. Gypsum and compost effects on sugarcane root growth, yield, and plant nutrients. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 6, p. 1332-1336, Nov. 2002. DOI: [10.2134/agronj2002.1332](https://doi.org/10.2134/agronj2002.1332).

VILELA, L.; RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E. Respostas da soja e do milho ao enxofre num Latossolo vermelho-escuro sob vegetação de cerrado no distrito federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, n. 2, p. 281-285, maio/ago. 1995.

VITTI, G. C. **Uso eficiente do gesso agrícola na agropecuária**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2000. 30 p.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-325.

VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. de; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. de E. **Uso de gesso em sistema de produção agrícola**. Piracicaba: Gape, 2008. 104 p.

WADT, P. G. S. Alterações eletroquímicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com carbonato e sulfato de cálcio. **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 3, p. 519-524, July/Sept. 2000. DOI: [10.1590/S0103-90162000000300023](https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000300023).

WADT, P. G. S.; WADT, L. H. de O. Movimentação de cátions em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo incubadas com duas fontes de cálcio. **Scientia Agrícola**, v. 56, n. 4, p. 1157-1164, out./dez. 1999. Suplemento. DOI: [10.1590/S0103-90161999000500018](https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000500018).

ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. **Adubação da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil**. Piracicaba: PLANALSUCAR, 1981. 26 p. (PLANALSUCAR. Boletim técnico, 3).

Gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos na cana-de-açúcar

Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel | Fernando José Freire | Fábio Cesar da Silva | Cassio Hamilton Abreu Junior | Luis Fernando Sanglade Marchiori | Arnaldo José Raizer

Introdução

O setor sucroalcooleiro brasileiro gera anualmente expressivas produções de cana, açúcar e etanol. Ocupa extensivas áreas de terras agrícolas, nas quais se instalam grandes canaviais e enormes conglomerados industriais, com suas infraestruturas físicas, máquinas e equipamentos, além da participação de milhões de pessoas em suas atividades e operações.

O crescimento de toda a cadeia de produção da cana impulsiona investimentos em estudos e envolve a utilização racional dos subprodutos gerados no campo de produção ou na industrialização da cana. O bagaço gerado a partir da moagem da cana pode ser utilizado na produção de bioeletricidade (uma fonte de energia limpa), como adubo orgânico incorporado ao solo e na queima em caldeiras para geração de vapor visando a diversas finalidades, diminuindo até mesmo o consumo de madeira, nativa ou não. O bagaço de cana pode ainda ser usado na alimentação de animais ruminantes, haja vista o grande rebanho de bovinos produzido em sistema de confinamento no Brasil.

A grande quantidade de palhiço deixado no campo, mesmo que não seja aproveitado, alimenta a importante ciclagem de nutrientes que tanto beneficia a cultura da cana. Esse palhiço também pode ser aproveitado para alimentar as fornalhas para a geração de vapor e energia (Braunbeck; Cortez, 2005), bem como na produção da bioeletricidade e do bioetanol de

segunda geração, por hidrólise enzimática. Tais resíduos sólidos e efluentes, sejam eles intrínsecos à usina (como a torta de filtro, por exemplo) ou de fontes externas (como lodo de esgoto e composto de lixo), seguem as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004). O esquema de produção dos resíduos da agroindústria canavieira que decorrem do processo industrial de produção de açúcar e álcool encontra-se ilustrado na Figura 10.1.



Figura 10.1. Produção de resíduos decorrente da produção de açúcar e álcool por usina de açúcar com destilaria anexa.

Inovação no gerenciamento de resíduos na indústria da cana – 6 Bios e as gerações tecnológicas

Usina sustentável

A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável surgiu em 1987 como forma de dar

continuidade a um projeto da Organização das Nações Unidas (ONU), isto é, desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazerem suas próprias necessidades (WWF, 2023). É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Mais amplo que a simples racionalização da utilização dos recursos naturais, o conceito de desenvolvimento sustentável envolve não apenas questões ambientais ou ecológicas, mas também questões econômicas e sociais. Adota-se, então, a visão do *triple bottom line* (Rossi; Rios, 2014), na qual as organizações passam a se preocupar não somente com suas atividades produtivas e com a utilização racional dos recursos naturais, mas também com sua atuação na sociedade (Figura 10.2).

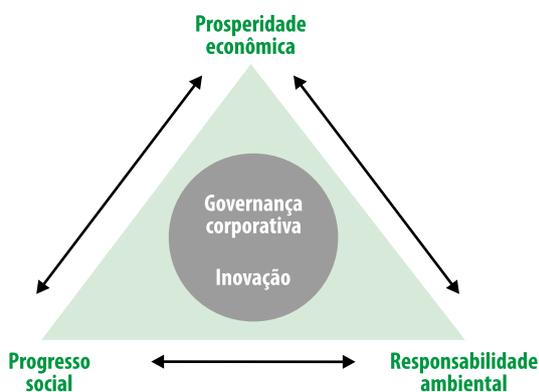


Figura 10.2. Os três pilares da sustentabilidade (*triple bottom line*).

Fonte: Rossi e Rios (2014).

Dessa forma, estão dentro desse conceito os processos tecnológicos conhecidos como 6 Bios (Bioetanol, Bioaçúcar, Bioeletricidade, Biodiesel, Biofom e Bioágua), os quais foram desenvolvidos pela Dedini, que, mais uma vez, apresenta um produto mundialmente pioneiro, que é a Usina Sustentável Dedini (USD) (o balanço dos gases do efeito estufa da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar está apresentado no Apêndice A). A USD atende e amplia os requi-

sitos de sustentabilidade (Gurgel, 2009b). Esse conceito de Usina de Biodiesel integrada à Usina Sucroalcooleira, como é o caso da Usina Barrácool, a primeira 4 Bios no mundo, que integra a produção de Bioaçúcar, Bioetanol, Bioeletricidade e Biodiesel em uma única planta (Olivério et al., 2010b, 2010c).

Bioetanol

O uso do bioetanol é uma das poucas soluções estratégicas disponíveis para resolver dois importantes problemas atuais: a substituição do petróleo e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A produção de biocombustíveis e de energia limpa é uma oportunidade para o Brasil, que tem a chance de se firmar também como o principal exportador dessa commodity e, principalmente, de tecnologia, equipamentos e serviços para países que venham a produzir esse biocombustível localmente.

Melhorar a eficiência da transformação da cana-de-açúcar em bioetanol é um dos grandes desafios para manter a competitividade brasileira no mercado internacional. Em uma análise crítica do modelo de produção brasileiro, fica evidenciado que o principal desafio (ou *gap*) tecnológico ocorre no processo fermentativo, devido a sua baixa eficiência. Atualmente novos sistemas de fermentação estão sendo desenvolvidos, os quais modificam os conceitos atuais. Entre eles, há o sistema de fermentação que utiliza o conceito dos biorreatores com novo design de construção para a recuperação do etanol perdido por evaporação. Esse sistema, que é totalmente automatizado, resulta em maior assepsia ao substituir os trocadores de placas pelo sistema *chiller* para o resfriamento do mosto. Além disso, trabalha com o mosto e o pé de cuba concentrados, a fim de gerar um vinho de teor alcoólico maior, ocasionando o aumento de produtividade e rendimento do processo

(Cortez et al., 2016). Esse sistema pode ser projetado para operação contínua, em batelada alimentada ou flexível, que permite a operação em ambos os casos.

No processo de recuperação do etanol produzido, a principal inovação é a destilação contínua, que visa otimizar tanto a eficiência energética quanto operacional. Essa nova tecnologia decorre de novo conceito de destilarias totalmente adequadas aos principais padrões de segurança e com menor consumo de energia e demanda por água (Olivério et al., 2010b).

Além da otimização energética pela melhoria da eficiência operacional, nos últimos anos a principal força motivadora para atender à necessidade de maximizar a eficiência energética das plantas novas e existentes tem sido a cogeração de energia elétrica ou produção de bioeletricidade. Dentro dessa realidade, foi desenvolvido um sistema de destilação para a obtenção do etanol hidratado, chamado de *split feed*¹, sendo possível aumentar a produção na destilaria em aproximadamente 60%, por meio do aproveitamento do mesmo vapor existente na planta (Cortez et al., 2016).

Na obtenção de álcool anidro, foram introduzidas novas tecnologias de desidratação, desde a substituição dos antigos sistemas de desidratação com o uso de ciclo-hexano (ou ciclohexano) pelo sistema de peneiras moleculares, que elimina a necessidade de qualquer agente químico desidratante, o que reduz consideravelmente o consumo de vapor e água. A evolução do sistema se deu pelo desenvolvimento da peneira molecular (em inglês: *low steam consumption* – LSC), que, pelo uso da recompressão de vapor e automatização (Cortez et al., 2016), maximizou a eficiência energética do sistema, integrando-se totalmente ao conceito de usina sustentável.

¹ Sistema de destilação totalmente automatizado pela Siemens/Chemtech, com integração térmica e uso de vácuo.

Bioeletricidade

A cana-de-açúcar gera dois produtos principais: o bioaçúcar e o bioetanol. Para a geração desses produtos, o consumo necessário de energia para o acionamento dos equipamentos e processos sempre foi suprido pela autogeração de energia, produzida a partir do consumo do bagaço da cana, para queima em caldeiras e geração de vapor (Olivério et al., 2010a, 2010b).

Para a cogeração de energia, há necessidade de adequação e investimentos em equipamentos que suportem altas pressões e temperaturas de operação das caldeiras de leito fluidizado, possibilitando a geração de vapor com elevada eficiência energética. Nesse sentido, o fornecimento e a distribuição de energia tornaram-se estratégicos para o planejamento e a expansão de qualquer unidade produtiva, justificando a preocupação tanto com o aumento da oferta de energia e a otimização do seu uso, quanto com a substituição de fontes de energias poluidoras e não renováveis por fontes não poluidoras e provenientes de fontes renováveis, como a biomassa, por exemplo. Atualmente, o fornecimento de bioeletricidade pela rede de usinas e destilarias já é um novo negócio, que possibilita aumento de receita e lucros, utilizando-se a mesma matéria-prima: a cana-de-açúcar.

Biodiesel

As usinas de biodiesel devem operar em Processo de Produção Contínua por Rota Etilica ou Metilica, pois viabilizam o processo, a partir do óleo de soja e do sebo bovino (como ocorre na Usina Barrálcool), principalmente com metano, apresentando menor custo, gera menos coprodutos e efluentes e consumo menos energia e utilidades.

A unidade de produção de biodiesel na Usina Barrálcool foi implantada pela empresa Dardini (2009) e conta com tecnologia de ponta,

desenvolvida pela empresa italiana Balestra. A planta de biodiesel tem uma série de características inovadoras e de conceito completo, incluindo o tratamento das matérias-primas (Cortez et al., 2016). A planta estabelecida pela empresa Dedini (2009), que foi instalada em Barra dos Bugres, MT, como citado por Cortez et al. (2016), pode utilizar qualquer tipo de óleos vegetais e gorduras animais, aproveitando da melhor forma os subprodutos, como é o caso do tratamento da glicerina. A fabricação de biodiesel pode ser efetuada com o processo de transesterificação e esterificação. A unidade de biodiesel segue padrões internacionais de segurança e tem capacidade de produção de 194 m³ de biodiesel por dia.

Biofom

A preocupação com os recursos naturais não renováveis, como os combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, tem obrigado muitas empresas a buscar alternativas para substituí-los em seus processos produtivos. Com base nesse cenário, foi desenvolvido o Biofom (biofertilizante organomineral), patenteado pela Dedini (2018). Trata-se de um fertilizante produzido com os resíduos da agroindústria sucroalcooleira (vinhaça concentrada, torta de filtro, cinzas de caldeira e fuligem das chaminés), que se apresenta como uma solução para substituir a adubação mineral da cana-de-açúcar e de outras culturas, adequando os teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). O produto proveniente dessa mistura, após a complementação e o tempo de maturação necessários, é transformado em adubo organomineral, que contém os elementos requeridos para a necessidade da cultura da cana, além de melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo, devido ao teor de matéria orgânica do produto (Gurgel, 2012). O manejo agrônômico e o detalhamento da produção do Biofom serão tratados mais adiante.

Bioágua

Foi dado um importante passo em busca da sustentabilidade econômica, social e ambiental das usinas de bioaçúcar e bioetanol, para as quais foram desenvolvidas plantas autossuficientes na geração de água e usinas produtoras de água.

Esses conceitos são inovadores e inéditos no mercado mundial: as usinas autossuficientes em água não demandam abastecimento externo de mananciais, pois a água presente na cana é suficiente para atender às necessidades dos processos internos da usina.

A evolução desse conceito é a otimização dessa tecnologia, fazendo com que a usina de bioaçúcar e bioetanol recupere uma quantidade maior de água proveniente da cana-de-açúcar em comparação à que será utilizada nos processos internos, tornando possível exportar esse excedente para uso industrial.

As usinas que adotarem tais projetos não precisarão captar água dos mananciais ou de poços para o processo produtivo. A água que elas utilizarão está contida na própria cana. Em 1 t de cana, é possível obter 700 L de água. Existem perspectivas de projetos em que a unidade industrial, além de ter a mesma característica da anterior, poderá disponibilizar água extra para outros usos, como na irrigação, ou para outras empresas, e assim se tornar uma exportadora.

De acordo com dados do Centro de Tecnologia Canavieira (Oliveira, 2008), na média do consumo do estado de São Paulo, as usinas consomem 1.830 kg (equivalente a 1.830 L de água) por tonelada de cana. Além desse volume, entram na produção mais os 700 L de água por tonelada de cana, totalizando 2.530 L de água. Com a mudança de processos ao longo do sistema produtivo do etanol ou do açúcar, como, por exemplo, a concentração da vinhaça de 3 até 60% de matéria seca, aproximadamente, foi possível não só evitar o uso de água de ma-

nanciais, mas também recuperar grande parte do líquido usado no processo. No caso da usina exportadora, aproveitam-se 400 L de água da cana e 300 L são disponibilizados como excedente (Cortez et al., 2016).

Uso agrícola de resíduos e efluentes da agroindústria sucroenergética

Geração de resíduos e efluentes na agroindústria sucroenergética

Resíduos como águas de lavagem, cinzas, torta de filtro, fuligem de caldeira e vinhaça necessitam de um rigoroso controle ambiental, que, no estado de São Paulo, é feito pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), a fim de cumprir a legislação vigente e sua caracterização. Quanto ao bagaço de cana, quando é aproveitado diretamente como combustível na indústria, sem disposição no ambiente, o controle ambiental é exercido sem maiores dificuldades. As quantidades produzidas desses resíduos dependem do(s) tipo(s) de produto(s) final(is) que a indústria foi projetada para operar — de acordo com o fluxograma de produtos, subprodutos e resíduos da agroindústria tradicional da cana-de-açúcar ilustrado na Figura 10.3. Usinas que produzem apenas açúcar, nas quais não há resíduo de vinhaça, e destilarias autônomas não produzem torta de filtro. A produção de águas de lavagem, bagaço e cinzas é comum a todas. Todavia ainda há diferenças em relação à quantidade produzida devido ao tipo de equipamento em operação. Por exemplo, a caldeira do tipo grelha produz muito mais cinzas do que a de leite fluidizado, pelo fato de a primeira ter uma combustão mais incompleta do que a segunda.

Outro aspecto relevante é que, com o incremento de tecnologia no processo industrial dos

últimos anos, houve aumento na produção média de açúcar e de etanol por tonelada de cana moída. Segundo Orlando Filho et al. (1983), houve rendimentos médios de 94 kg de açúcar Very High Polarization (VHP), 12 L de etanol hidratado para cada tonelada de cana processada, em usina de açúcar com destilaria anexa, e 70 L de etanol para cada tonelada de cana em destilarias autônomas. No entanto, Bertoni (2007) atualizou esses rendimentos para 110 kg de açúcar VHP, 13 L de etanol hidratado no caso das usinas de açúcar com destilaria anexa e 80 L de etanol hidratado para destilarias autônomas. Com isso, aumentaram também as quantidades de resíduos, principalmente vinhaça.

Em geral, entre 10 e 18 L de vinhaça são gerados para cada litro de etanol hidratado produzido nas destilarias (Stupiello, 1987; Buzolin, 1997). Entretanto, frequentemente esses valores variam de 12 a 15 L de vinhaça por litro de etanol hidratado, dependendo dos equipamentos e processos de industrialização. Há uma tendência de que, com avanços tecnológicos, esses resíduos não ultrapassem 10 a 12 L por litro de etanol hidratado produzido.

Caracterização e utilização de resíduos agroindustriais

Águas de lavagem

A agroindústria da cana-de-açúcar consome em média 1.830 L de água por tonelada de cana, de acordo com dados do Centro de Tecnologia Canavieira (Waldheim et al., 2001; Oliveira, 2008). Essa água apresenta um pH de aproximadamente 4,8 e uma demanda biológica de oxigênio (DBO) que varia de 200 a 1.200 mg L⁻¹ (Piacente, 2005). Essa água pode ser recirculada, utilizada na fertirrigação, incorporada à vinhaça, tratada ou descartada.

A meta do setor sucroalcooleiro é de consumir quantidades inferiores a 1 m³ de água por

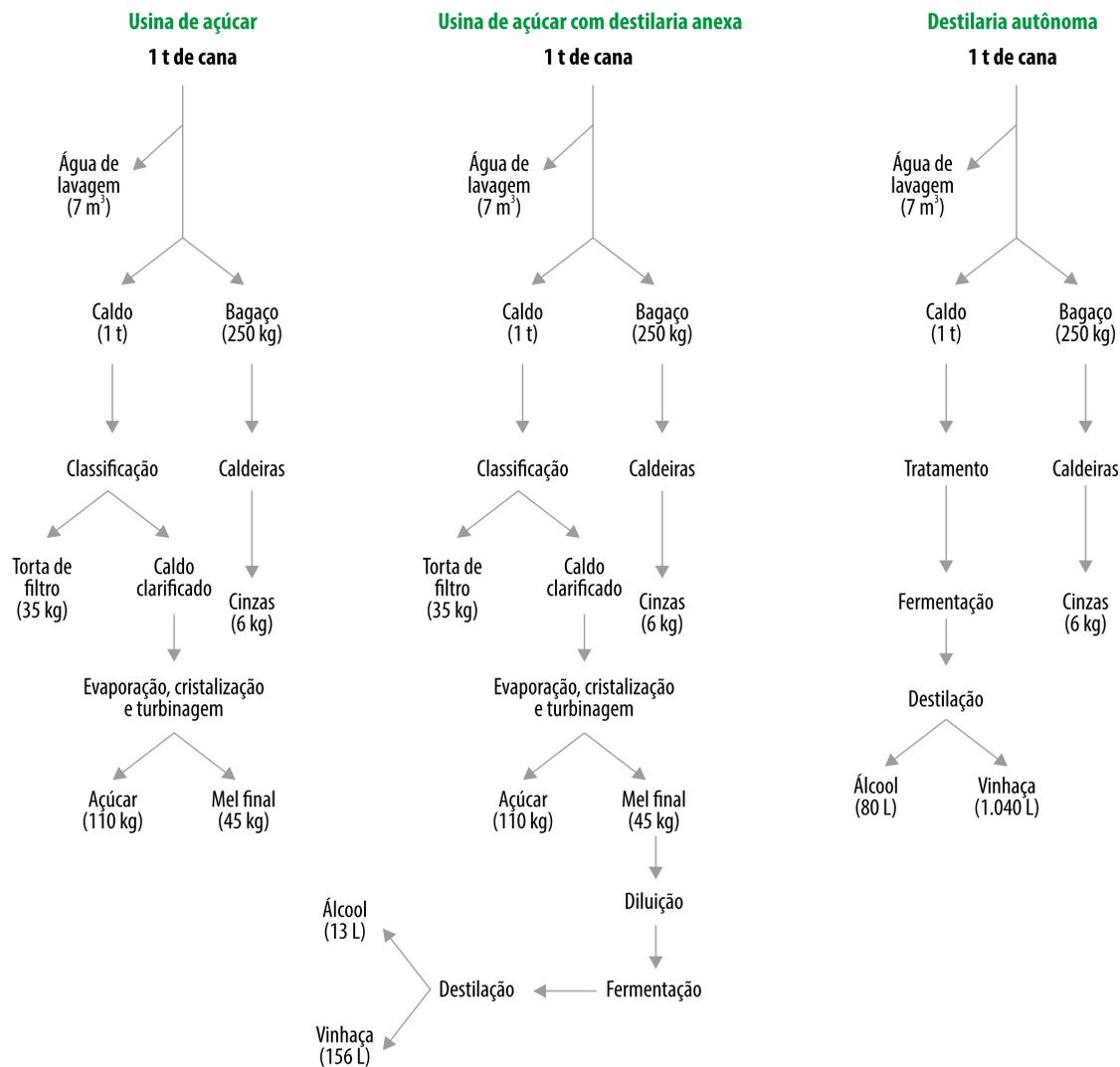


Figura 10.3. Fluxograma de produtos, subprodutos e resíduos da agroindústria tradicional da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Orlando Filho et al. (1983), Bertoini (2007) e Centro de Tecnologia Canaveira (2019).

tonelada de colmo. A prática da colheita de cana feita mecanicamente proporcionou reduções significativas no processo industrial. Além disso, o reúso dessas águas é uma alternativa de fundamental importância, principalmente quando há plenamente estabelecido o plano de gestão de recursos hídricos, em que a cobrança pelo uso da água se diferenciará entre usuário pagador e poluidor pagador.

Na maioria dos países produtores de açúcar, existem normas de controle de efluentes líquidos que estabelecem um limite da quantidade de orgânicos, que varia entre 15 e 60 mg L⁻¹ de DBO (Purchase, 1995). O Banco Mundial faz exi-

gências quanto ao máximo de concentração de poluentes nos efluentes, como pode ser observado na Tabela 10.1.

Muitas são as alternativas que permitem alcançar um balanço hídrico equilibrado, promovendo reduções consideráveis no uso da água, como técnicas de reúso, retorno de condensáveis, implementação de limpeza a seco da cana, macromedição do consumo e desassoreamento das represas de captação. Isso certamente fará com que as usinas operem sem alterar a quantidade e a qualidade dos corpos de água adjacentes às atividades industriais.

Tabela 10.1. Indicadores e respectivos valores máximos exigidos pelo Banco Mundial para efluentes líquidos das usinas do setor sucroalcooleiro.

Indicador	Valor máximo
pH	6,5–8,5
DBO ⁽¹⁾	30 mg L ⁻¹
DQO ⁽²⁾	250 mg L ⁻¹
Sólidos totais em suspensão	50 mg L ⁻¹
Óleos e gorduras	10 mg L ⁻¹
Nitrogênio total	10 mg L ⁻¹
Fósforo total	2 mg L ⁻¹

⁽¹⁾ Demanda bioquímica de oxigênio; ⁽²⁾ Demanda química de oxigênio.

Fonte: Rossetto (1987) e Purchase (1995).

Cinzas e fuligem

A produção de cinzas ocorre durante a queima do bagaço nas caldeiras para a geração de energia. Considerando-se que toda a cinza presente no bagaço se transforme em resíduo na caldeira, admite-se uma produção de 5 a 6 kg de cinzas por tonelada de cana moída (Figura 10.3). Isso equivale a aproximadamente 2,5% de cinzas no bagaço queimado ou 0,6% de cada tonelada de cana moída na indústria. Essa queima também produz materiais particulados que estão associados às cinzas e à fuligem.

Tanto as cinzas quanto a fuligem carregam consideráveis teores de nutrientes (Tabela 10.2), o

que as credencia para uso no setor de produção agrícola da empresa. As cinzas podem ser distribuídas em área total ou aplicadas localizada-mente no sulco de plantio. Outro uso comum é como incremento no processo de compostagem, melhorando a qualidade nutricional dos compostos.

Cordeiro et al. (2009) concluíram que as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar são uma matéria-prima com potencial para a produção de concreto, possuindo propriedades aglomerantes de material cimentício, apresentando como principal composto químico a sílica, normalmente em quantidade acima de 60% (m/m). Como são resíduos oriundos de subprodutos da própria cana-de-açúcar (queima do bagaço), que é uma grande extratora de sílica, a aplicação de cinzas e fuligem nos solos faz retornar parte considerável das quantidades extraídas na etapa de cultivo.

A fuligem como material particulado em suspensão pode ser adicionada à vinhaça e aplicada em fertirrigação. Quando sólida, pode ser misturada às cinzas e/ou ser mais um componente na formação de compostagem.

É recomendável monitorar as quantidades de metais pesados adicionados ao solo devido à aplicação de cinzas e fuligem, visando evitar possíveis contaminações, principalmente em aplicações prolongadas, nas quais os efeitos

Tabela 10.2. Composição química média das cinzas de caldeira e da fuligem produzidas pela queima do bagaço para produção de energia em agroindústria de cana-de-açúcar.

Material	Composição química (dag kg ⁻¹)					
	Al ₂ O ₃ + F ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Cinzas ⁽¹⁾	8,0	85,0	0,9	1,7	1,0	0,6
Fuligem ⁽²⁾	–	38–72	0,5–1,0	0,7–3,0	0,6–1,5	0,4–0,8

⁽¹⁾ Há presença de outros óxidos e metais pesados. ⁽²⁾ Em média, a fuligem apresenta 70% de água, outros óxidos e metais pesados.

Fonte: Adaptado de Pan et al. (1979), Planalsucar (1980) e Bertoncini (2007).

residuais podem elevar os teores desses contaminantes (Abreu Junior et al., 2005).

Os efeitos das cinzas e/ou fuligem aplicados isoladamente no solo, principalmente pelos seus teores de P e K, além de relativo efeito corretivo pelos teores de CaO e MgO, não são frequentes em canaviais no Brasil. Pineda (1956) e Pan et al. (1979) relatam efeitos desses resíduos no crescimento de cana-de-açúcar quando utilizados como fertilizantes.

Camargo et al. (1984) trabalharam com cinza de caldeira como tratamento para verificar possíveis alterações de características químicas em um Latossolo Roxo distrófico no estado de São Paulo. O estudo mostrou elevação no pH dos solos durante e após a incubação das amostras. Apesar do aumento de P disponível, os teores de K adicionados no resíduo não se apresentaram solúveis.

Esses resíduos são normalmente aplicados ao solo em associação com outros resíduos, principalmente a vinhaça (fuligem líquida), ou são utilizados como constituintes para formação de compostagem.

Bagaço

A caracterização do bagaço de cana-de-açúcar como resíduo parece ser inapropriada pelo valor energético desse subproduto da agroindústria, além de ser matéria-prima para outras indústrias, como, por exemplo, a de celulose de papel. Se a caracterização como resíduo fica comprometida, o uso do bagaço na agricultura canavieira como fertilizante ou condicionante de solo é de contestável implicação econômica.

Normalmente, todo bagaço produzido na agroindústria é utilizado como fonte de energia nas usinas de açúcar, com ou sem destilarias anexas. Estima-se que cerca de 25 a 30% do bagaço seja excedente, no caso de destilarias autônomas. Nesse caso, há uma possibilidade de

uso desse excedente na atividade agrícola da empresa, quando nenhum outro beneficiamento estiver disponível.

Em comparação com outros resíduos da agroindústria, o bagaço é considerado um subproduto nobre utilizado historicamente na geração de calor para os processos de industrialização do açúcar e do etanol. Com o desenvolvimento e o aperfeiçoamento do emprego do vapor, o uso do bagaço intensificou-se com o conceito de cogeração de energia, entendida como sendo a geração de calor na fornada interna da caldeira de geração de vapor do tipo flamotubular e transformada em trabalho no turbogerador, e foi desenvolvido paralelamente às inovações tecnológicas.

Cada tonelada de cana que é moída gera aproximadamente 250 kg de bagaço. Revertido em energia calórica, isso representa o equivalente a 560 mil quilocalorias. Essa mesma quantidade de cana produz 80 L de álcool, que proporcionam em torno de 448 mil quilocalorias de energia, ou seja, existe mais energia embutida no bagaço da cana do que no etanol isoladamente (Cortez et al., 1992).

A quantidade de bagaço retirada de 1 t de cana, aliada ao atual modelo tecnológico de equipamentos para cogeração empregado nas usinas brasileiras, proporciona o equivalente a 70 kWh de energia (Rodrigues, 2001). Desses, 20 kWh (28,6%) são utilizados para gerar vapor e movimentar os equipamentos que compõem toda a usina, enquanto cerca de 10 kWh (14,3%) são perdidos. Os 40 kWh (57,1%) restantes podem ser utilizados em programas de cogeração de energia.

Comparando a queima do bagaço com outros combustíveis fósseis, ela é mais limpa e gera menor impacto ambiental, uma vez que praticamente não libera compostos de enxofre (S), como SO₂ ou SO₃, que são relativamente comuns

na queima de óleos combustíveis. Além disso, sua queima é lenta, com uma temperatura de chama baixa, proporcionando pouca formação de óxido nítrico.

As crises energéticas que ocorrem no Brasil desde 2001, com as frequentes ameaças de “apagões” e a política de racionamento do governo, levaram pesquisadores, estudiosos e especialistas do setor energético a repensar a matriz energética nacional, com base quase que exclusivamente em hidrelétricas. Uma das saídas propostas é a construção de termoeletricas movidas a gás natural, cujo preço é fixado em dólar no mercado internacional. A outra baseia-se na utilização da capacidade instalada das usinas de cana para gerar excedentes energéticos a partir da queima de biomassa.

Dentro desse contexto de risco potencial de déficit no abastecimento de energia elétrica e de crise econômico-financeira do setor elétrico, algumas usinas começaram a viabilizar investimentos em equipamentos de cogeração mais modernos e eficientes, a fim de produzir excedentes de energia elétrica comercializáveis, como os chamados *greenfields*, que são usinas dedicadas somente à produção de bioeletricidade e bioetanol.

Em relação à bioeletricidade, a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Observatório..., 2020) cita que a capacidade instalada e atualmente outorgada no País pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) é de 169.664 MW. Em geral, a biomassa como fonte de energia representa 9% da potência outorgada na matriz elétrica do Brasil e ocupa a quarta posição na matriz, atrás da fonte hídrica, das termelétricas a gás natural e das eólicas, respectivamente. Destaca-se ainda que, em 2018, 82% da bioeletricidade fornecida ao Sistema Interligado Nacional (SIN) vieram do setor sucroenergético. Por fim, ressalta-se que apenas 15% do potencial da bioeletricidade sucroenergética é apro-

veitado. O aproveitamento pleno da biomassa presente nos canaviais teria potencial técnico para chegar a 142 mil gigawatts, quase sete vezes o volume ofertado em 2018, o que representaria atender mais de 30% do consumo de energia de SO_2 ou SO_3 . (Observatório..., 2020). Assim, a utilização de bagaço de cana-de-açúcar nas atividades agrícolas corresponde à última opção em uma grande cadeia de opções para esse subproduto.

A composição da matéria seca do bagaço apresenta baixos teores de N, o que praticamente inviabiliza sua utilização como fertilizante (Tabela 10.3). Como fonte de matéria orgânica, sua elevada relação C:N pode causar imobilização de N no solo por um período muito prolongado. Minhoni et al. (1990) estudaram a velocidade de decomposição de materiais orgânicos incorporados ao solo, com adição de N e fósforo natural, e concluíram que o bagaço de cana foi o material menos decomposto e que o fator mais limitante para essa decomposição foi o N. Assim, a alta relação C:N do bagaço e sua dependência do N presente no sistema inviabilizam sua utilização como fonte de matéria orgânica se não houver um pré-tratamento para humificação. Zambello Júnior e Orlando Filho (1982) não encontraram respostas para o incremento de produtividade da cana-de-açúcar com a aplicação de 2 t ha^{-1} de bagaço não humificado, na base seca, no sulco de plantio.

A adição de bagaço à torta de filtro, cinzas, fuligem e outros resíduos para compostagem pode ser uma alternativa para a utilização de bagaço como fonte de matéria orgânica em cana-de-açúcar. Entretanto, os efeitos energéticos do bagaço, segundo Cortez et al. (2016), são altamente positivos e o tornam muito mais vantajoso como fonte de energia (Tabela 10.3).

Tabela 10.3. Composição química média da matéria seca de bagaço de cana-de-açúcar.

Material	Composição química (dag kg ⁻¹)					
	C	H	O ₂	N	Cinzas	C:N
Bagaço	43–49	5,3–6,7	42–49	0,2–0,4	1,3–3,5	122–215

Fonte: Adaptado de Sagarra (1966) e Cortez et al (2016).

Torta de filtro

A torta de filtro é o resultado da filtragem do lodo obtido no processo de fabricação de açúcar em filtros rotativos para extração da sacarose residual da borra, que é um subproduto resultante da clarificação do caldo da cana-de-açúcar pelo emprego de polieletrólitos (Figura 10.4). Como a torta resulta do lodo decantado, há concentração de alguns metais, principalmente alumínio (Al), manganês (Mn), zinco (Zn) e ferro (Fe). Por causa de sua característica orgânica, apresenta elevada DBO, o que pode causar sérios danos ambientais se transportada em direção aos corpos d'água.

Foto: Raffaella Rossetto



Figura 10.4. Produção de torta de filtro, em filtros rotativos, para extração da sacarose residual da borra no processo de clarificação do caldo.

Estudos realizados por Ramalho e Amaral Sobrinho (2001) em solos do tipo Cambissolo que receberam sucessivamente torta de filtro durante 20 anos apontam aumento significativo na concentração dos teores totais de metais pe-

sados, como cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu) e níquel (Ni), e um potencial risco de contaminação do lençol freático pela possível percolação desses metais mais móveis.

A produção de torta de filtro é de 2,5 a 3,5% da quantidade de cana moída (União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2007). As dez maiores usinas de São Paulo, se for considerado o processamento de 571,34 milhões de toneladas de cana-de-açúcar da safra 2010/2011, produziram aproximadamente 17,14 milhões de toneladas de torta de filtro (Observatório..., 2020).

A composição química da torta de filtro é variável de acordo com os dados da Tabela 10.4. Por exemplo, nas usinas que clarificam o caldo utilizando P, há tendência de que haja maior riqueza desse elemento no resíduo. Entretanto, de maneira geral, é um resíduo que apresenta baixos teores de K.

Glória et al. (1977) detalharam a composição mineral da torta de filtro quanto à presença de formas de N, P e carbono (C) oxidável. Os autores concluíram que o resíduo apresenta quantidades consideráveis de matéria orgânica. No entanto, mostraram que o N predomina na forma proteica e que 30% do P total encontra-se em compostos orgânicos. Com isso, a liberação desses nutrientes é lenta, embora a relação C:N não seja elevada (Tabela 10.4).

Um dos primeiros trabalhos realizados no Brasil sobre o aproveitamento da torta de filtro como fertilizante foi realizado por Brasil Sobrinho (1958), o qual evidenciou o efeito desse resíduo

Tabela 10.4. Composição química média da torta de filtro gerada na fabricação de açúcar na agroindústria da cana-de-açúcar.

Composição química	Torta de filtro
	(dag kg ⁻¹)
Umidade	73
N	0,38
P ₂ O ₅	0,88
K ₂ O	0,06
CaO	0,94
MgO	0,28
SO ₄ ²⁻	3,55
SiO ₂	14,06
C	8,37
C:N	23,8
	(mg kg ⁻¹)
Fe	25.100
Mn	624
Cu	65
Zn	89
Mo	0,6

Nota: De um modo geral, a quantidade de fósforo (P) na torta sempre foi maior na originaria da fabricação do açúcar até o dobro.

Fonte: Adaptado de Glória et al. (1973), Glória e Magro (1977), Planalsucar (1980), Rossetto et al. (1984) e Cortez et al. (2016).

como complemento da fertilização mineral. O estabelecimento da dose necessária é baseado no teor de P do resíduo e no requerimento da cultura. Por exemplo, considerando um teor de P na torta de filtro de 0,88 dag kg⁻¹ (Tabela 10.4), uma dose de 20 t ha⁻¹ aplicada no sulco de plantio irá fornecer 176 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Isso representa a quantidade recomendada de P₂O₅ para solos que apresentam teores muito baixos ou baixos de P.

Quanto às recomendações para aplicação de torta de filtro, Rosseto e Santiago (2006) estabelecem para cana-planta a dosagem de 8 a 10 t ha⁻¹ (torta úmida) em área total em pré-

-plantio, de 15 a 35 t ha⁻¹ quando a aplicação se dá no sulco e de 40 a 60 t ha⁻¹ na entrelinha das soqueiras, substituindo parcial ou totalmente a adubação fosfatada, dependendo da dose de P₂O₅ recomendada.

A Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (1998) afirma que, em Pernambuco, quando se aplicam quantidades iguais ou superiores a 5 t ha⁻¹ de torta de filtro no sulco de plantio, a fertilização com micronutrientes será suprimida em cana-planta.

Nardin (2007) estudou os efeitos da aplicação de torta de filtro nas variedades de cana-de-açúcar SP89-1115 e IAC87-3396 e encontrou aumentos significativos de P, tanto em superfície como em subsuperfície (Tabela 10.5), mostrando que esse resíduo é capaz de substituir a adubação fosfatada de fundação quando manejado adequadamente.

A aplicação de torta de filtro pode rapidamente imobilizar o N do solo. Há rápida imobilização de N quando a torta de filtro é aplicada em solo sem aplicação posterior de N. Recomenda-se, portanto, que as aplicações de torta de filtro sejam realizadas, quando possível, com a antecedência necessária para permitir a mineralização da matéria orgânica contida nesse resíduo (Freitas et al., 1988).

É frequente a aplicação de torta de filtro compostada por causa do enriquecimento em nutrientes que esse processo acarreta. Por exemplo, teores de P em torta de filtro in natura de 0,88 dag kg⁻¹ podem aumentar para 1,5 dag kg⁻¹ na torta compostada. Nessa compostagem, é possível adicionar cinzas de caldeira, fuligem e gesso agrícola, desde que em quantidades adequadas e balanceadas, obtendo-se fertilizante orgânico ou organomineral.

Há relatos de aplicação de torta de filtro seca em doses menores do que as que são recomendadas para aplicação in natura ou fresca, na

Tabela 10.5. Alterações nas características químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico em duas profundidades, após 60 dias da incorporação de torta de filtro aplicada localizadamente, em área total ou sem incorporação.

Torta de filtro (t ha ⁻¹)	Característica química				
	pH	P	Ca	Mg	M.O.
		(mg dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)		(g kg ⁻¹)
0–0,25 m					
0	5,17	9,0	2,09	0,70	2,0
30 ⁽¹⁾	5,34	9,2	2,17	0,73	2,0
60 ⁽²⁾	5,73	15,4	2,42	0,83	2,1
0,25–0,50 m					
0	4,72	10,8	1,70	0,57	1,4
30 ⁽²⁾	4,77	19,5	1,70	0,57	1,4
60 ⁽²⁾	5,24	23,4	1,97	0,69	1,6

⁽¹⁾Aplicação no sulco de plantio. ⁽²⁾Aplicação em área total.
Fonte: Adaptado de Nardin (2007).

faixa de 15 a 35 t ha⁻¹ (Albuquerque; Marinho, 1979; Castro; Godoy, 1979; Coletti et al., 1980). Nesses casos, a torta precisa ser humificada.

Vinhaça

A vinhaça resulta da produção de etanol hidratado, após a fermentação do mosto e a destilação do vinho (Figura 10.5). Trata-se de um resíduo com cerca de 2 a 6% de constituintes sólidos, com destaque para os elevados teores de matéria orgânica. Dos efluentes líquidos da agroindústria da cana-de-açúcar, a vinhaça é a que possui a maior carga poluidora, pois apresenta, em média, uma DBO de 16.950 mg L⁻¹ e uma demanda química de oxigênio (DQO) de 28.450 mg L⁻¹. Sua disposição em cursos d'água pode causar sérios impactos ambientais, principalmente pela eutrofização das águas, como observado por Silva et al. (2007) e em estudo realizado no rio Piracicaba por Botelho (2013). Penatti (2013) afirma que, quando aplicada nas áreas de produção de cana-de-açúcar, a vinhaça pode alterar propriedades químicas do solo, aumentando a disponibilidade de alguns nutrientes para as plantas. Além disso, pode pro-

mover modificações nas propriedades físicas do solo, melhorando a agregação e elevando a capacidade de infiltração de água, podendo até mesmo promover a lixiviação de íons e contaminar águas subterrâneas. Por sua vez, pode gerar a dispersão de partículas finas do solo (argila), reduzindo a capacidade de infiltração de água e aumentando o escoamento superficial, o que pode levar à contaminação de águas superficiais. Quando aplicada racionalmente, a vinhaça tem importante valor fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar, pois concentra compostos minerais como K, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e S, elevando o seu teor de matéria orgânica.

Os teores de nutrientes na vinhaça estão diretamente relacionados com a origem do mosto que deverá ser fermentado e destilado (Tabela 10.6). Quando o mosto é proveniente do melaço (mel final que ocorre nas usinas de açúcar com destilaria anexa), a vinhaça apresenta maiores concentrações de matéria orgânica e K. Já quando o mosto tem origem no caldo de cana, como ocorre em destilarias autônomas, a vinhaça é mais diluída e apresenta uma considerável perda nutricional. A vinhaça resultante da fermenta-

Tabela 10.6. Características químicas de três tipos de vinhaça em alguns estados brasileiros.

Característica	Tipo de vinhaça por Estado											
	Melaço				Misto				Caldo			
	SP	RJ	PE	AL	SP	RJ	PE	AL	SP	RJ	PE	AL
pH	4,62	4,20	4,16	4,37	4,27	3,80	3,60	3,99	3,85	3,60	3,48	3,57
Matéria orgânica (%)	–	5,96	4,74	–	–	5,51	1,91	–	–	3,47	1,53	–
Cinzas (%)	–	1,73	1,49	–	–	0,98	0,92	–	–	0,54	0,64	–
C (%)	1,63	1,72	–	1,64	0,73	1,36	–	0,95	–	0,91	–	0,76
N (kg m ⁻³)	1,18	0,79	0,60	0,70	0,63	0,43	0,33	0,36	0,53	0,35	0,25	0,26
P ₂ O ₅ (kg m ⁻³)	0,18	0,14	0,22	0,34	0,11	0,14	0,24	0,61	0,10	0,11	0,18	0,49
K ₂ O (kg m ⁻³)	5,16	5,50	5,04	7,59	3,69	2,61	2,16	2,59	2,39	1,15	1,92	1,72
Ca (kg m ⁻³)	1,31	1,61	1,50	2,41	0,85	1,04	0,60	0,57	0,43	0,54	0,40	0,17
Mg (kg m ⁻³)	0,57	0,61	0,50	1,40	0,37	0,31	0,20	0,54	0,36	0,18	0,20	0,41
Zn (g m ⁻³)	–	3,09	4,30	2,92	–	49,79	2,20	1,89	–	2,28	2,80	1,84
Cu (g m ⁻³)	–	9,39	2,90	3,35	–	56,88	3,60	2,16	–	17,56	0,90	1,44
Mn (g m ⁻³)	–	11,06	6,70	5,54	–	5,50	5,90	1,90	–	3,28	5,10	6,03
Fe (g m ⁻³)	–	119,74	52,00	66,54	–	129,70	57,20	47,02	–	110,05	45,20	51,22

Fonte: Adaptado de Bolsanello e Vieira (1980), Medeiros (1981), Vasconcelos e Oliveira (1981) e Rossetto et al. (1984).

ção e destilação do mosto misto, que se compõe de melaço e caldo de cana, possui composição nutricional intermediária em relação aos outros tipos de mostos.

De maneira geral, não se observam grandes diferenciações na composição das vinhaças nas regiões canavieiras brasileiras, com exceção das quantidades de P observadas para a vinhaça no estado de Alagoas, no Nordeste do Brasil. Assim, a utilização desse resíduo em diferentes regiões brasileiras não deve ter alterações consideráveis, a não ser pela origem do mosto.

Com o aumento da produção de etanol no Brasil, também tem crescido vertiginosamente a produção de vinhaça, principalmente nas destilarias autônomas. Em 2006, a produção de vinhaça estava próxima de 200 bilhões de litros (Figura 10.5). No estado de São Paulo, desde 1967 é proibida a

disposição de vinhaça em rios, córregos e lagos. Assim se iniciou a destinação da vinhaça no solo. As usinas construíram tanques de acumulação, que são chamados de maracanãs, de modo a permitir o armazenamento de grandes volumes. Desses tanques, a vinhaça em estado de decomposição anaeróbica era destinada às áreas ditas de “inundação”, formando intensos alagados a fim de permitir sua infiltração no solo. Esses locais eram chamados de áreas de sacrifício.

Os elevados teores de K nesse resíduo, que podem ser observados na Tabela 10.6, fizeram com que Glória (1976) recomendasse seu uso como fertilizante. Essa mesma recomendação foi feita também pela Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar, 1979).

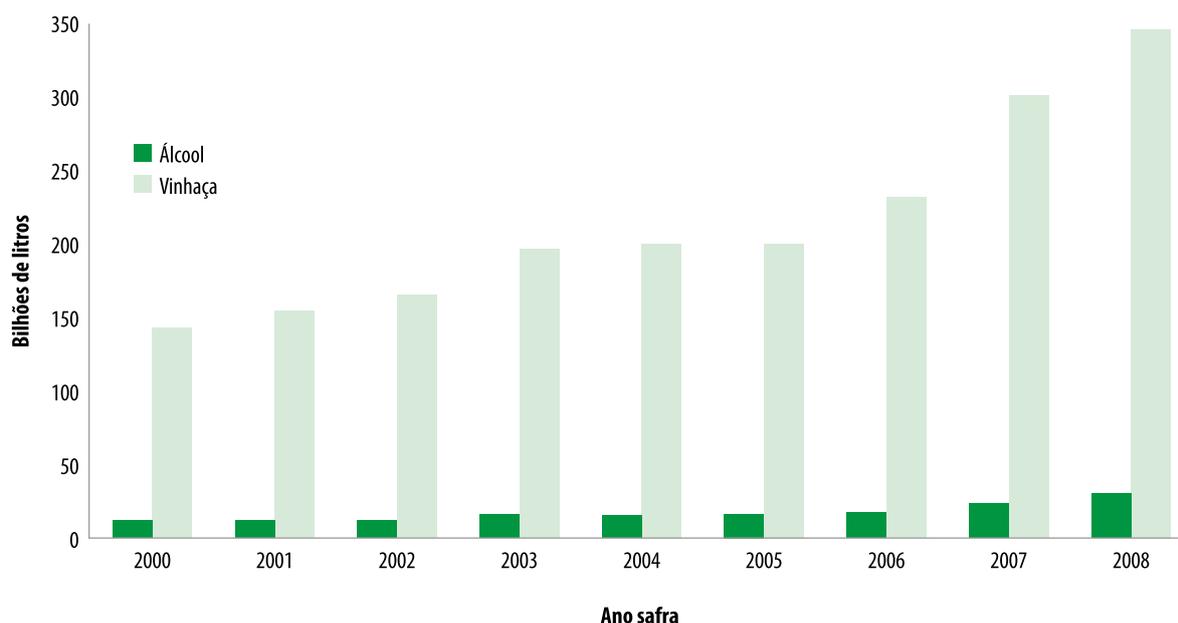


Figura 10.5. Evolução da produção de álcool e vinhaça na agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil.

Fonte: Adaptado do Observatório da Cana (2020).

Orlando Filho et al. (1983) calcularam a equivalência da vinhaça com fertilizantes minerais (ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio), mostrando a importância desse resíduo como fertilizante (Tabela 10.7).

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, com base no documento normativo *Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola*, de dezembro de 2006, orienta, controla e monitora a aplicação de vinhaça ao solo no estado de São Paulo (Cetesb, 2006). Esse documento, que tem servido de base para outros estados brasileiros produtores de cana, açúcar e etanol, contém

critérios e procedimentos para armazenamento, transporte e aplicação no solo, bem como a instrução para a formulação de um plano para aplicação de vinhaça.

Entre as suas principais recomendações estão as seguintes:

- Impermeabilização por meio do revestimento de canais e tanques e construção de poços de monitoramento na área, eliminando, assim, os maracanãs e as áreas de inundação e sacrifício.
- A área a ser utilizada para a aplicação de vinhaça não deve estar contida em áreas de preservação permanente (APPs) nem em

Tabela 10.7. Equivalência entre 1 m³ de vinhaça de diferentes origens e fertilizantes minerais.

Tipo de vinhaça (1 m ³)	Fertilizante/Equivalência (kg)		
	Ureia	Superfosfato triplo	Cloreto de potássio
Mosto de melação	1,49	0,45	9,22
Mosto de caldo	0,89	0,60	4,47
Mosto misto	0,65	0,49	2,55

Fonte: Orlando Filho et al. (1983).

reserva legal, distando no mínimo 6 m delas, com proteção de terraços de segurança.

- c) A profundidade do aquífero livre deve ser de, no mínimo, 1,5 m no momento da aplicação de vinhaça.
- d) Em áreas com declives superiores a 15%, devem-se tomar medidas necessárias que evitem escoamento superficial. Por esse motivo, é recomendável não se aplicar vinhaça nessas áreas.

A dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada nos solos é determinada pela fórmula abaixo (Cetesb, 2006):

$$\text{Vinhaça (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)} = [(0,05 \times CTC - K_s) \times 3.744 + 185] / K_{vi}$$

em que 0,05 representa a saturação máxima de K admitida na capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (*CTC*) que é de 5%; *K_s* é o teor de K no solo até 0,80 m de profundidade ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); 3.744 é a constante para transformação de *K_s* em kg ha^{-1} de K; 185 é a quantidade de K_2O extraída pela cultura (kg ha^{-1}) que o sistema considera; *K_{vi}* é a quantidade de K_2O contida na vinhaça (kg m^{-3}).

Quando o limite de 5% da *CTC* é atingido, a aplicação de vinhaça restringe-se à reposição do que foi extraído pela cultura, considerando-se os 185 kg ha^{-1} por cada ciclo de cultivo.

Em geral, utilizam-se doses entre 100 e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, de acordo com a concentração de K na vinhaça (Glória; Orlando Filho, 1984).

A porcentagem da área de fertirrigação com vinhaça das usinas é bastante variável, tanto em escala regional quanto dentro de uma mesma região. Existem usinas que vêm aplicando vinhaça em 70% da sua área de cultivo. No entanto, há usinas com aplicação bem abaixo desse percentual.

Os sistemas utilizados atualmente para fertirrigação da lavoura canavieira, com efluentes líquidos (vinhaça e águas residuárias), são os seguintes: caminhão-tanque convencional e aplicação por aspersão. Na aplicação por aspersão, são utilizados os sistemas de montagem direta e autopropelido com carretel enrolador, podendo esse ser alimentado diretamente de canais ou a partir de caminhões.

O sistema de fertirrigação com caminhões-tanque era o mais difundido para distribuição de vinhaça (Figura 10.6). Apresenta como vantagem o curto tempo exigido para sua implantação, isto é, basta adquirir a frota e colocá-la em operação. Como limitações desse sistema, destacam-se os seguintes: agravamento dos problemas de compactação de solos, impossibilidade de aplicação em áreas com cana-planta, dificuldades na operação em dias de chuva, baixa uniformidade de distribuição e pequena distância para a qual a prática da fertirrigação é economicamente viável, em comparação com a adubação mineral.



Foto: André Elia Neto

Figura 10.6. Distribuição da vinhaça por meio de caminhão-tanque/aplicadora.

O sistema por aspersão (Figura 10.7), conhecido como montagem direta, consiste basicamente em um conjunto motobomba acoplado a um aspersor tipo canhão, montado em um chassi com rodas. A vantagem principal desse sistema é o

menor custo por unidade de área fertirrigada. No entanto, a maior limitação é a exigência de uma rede de canais alimentadores, o que requer uma sistematização parcial do terreno e recortes do canavial, isso quando a implantação não é realizada na época correta ou na reforma do canavial.

Foto: André Elia Neto



Figura 10.7. Aplicação de vinhaça por aspersão feita por um conjunto motobomba instalado ao longo de um canal.

O sistema autopropelido com carretel enrolador (Figura 10.8) é o mais difundido atualmente nas usinas e destilarias. A vantagem principal desse sistema é o fato de ser semimecanizado, o que resulta em uma considerável redução de mão de obra. No entanto, exige maior potência da motobomba e, conseqüentemente, consome mais combustível.

Como evolução dos sistemas de aplicação de vinhaça, pode-se considerar a utilização de sistemas do tipo pivô central e a aplicação por



Foto: André Elia Neto

Figura 10.8. Detalhe do canal condutor de vinhaça – motobomba acoplada ao carretel enrolador.

meio de gotejamento subsuperficial, bem como a aplicação de vinhaça localizada (Figura 10.9).

Para aplicar essa vinhaça localizada de forma eficiente, o setor passou a contar com tecnologia especializada: tanques de fibra de vidro traçados por tratores, que permitem a aplicação da vinhaça de forma localizada na linha da cana e na quantidade certa. Também é possível adicionar a essa vinhaça outros nutrientes, fazendo uma adubação mais completa e de maior aproveitamento.

A vinhaça é transportada em caminhões-tanques até os canaviais que serão fertirrigados. Em seguida, é transferida para os tanques traçados por trator, que possuem uma barra com saídas direcionadas nas linhas da cana. O trator traciona esse tanque, que oferece maior precisão às aplicações, gerando maior benefício para

Fotos: Mauro Sérgio Nominato



Figura 10.9. Aplicação localizada de vinhaça com trator (A) e transferência da vinhaça do caminhão para o tanque do trator (B).

a planta. Esse método permitiu às usinas utilizarem a fertirrigação em 100% dos canaviais (Leal et al., 1983; Neves et al., 1983; Glória; Orlando Filho, 1984; Sengik et al., 1988; Lara Cabezas et al., 1994; Có Júnior et al., 2008).

Muitas pesquisas realizadas demonstram o efeito da vinhaça nas características químicas, físicas e biológicas do solo (Almeida et al., 1950; Ranzani, 1956; Rossetto et al., 1978; Coleti et al., 1981; Rosenfeld et al., 1981; Amaral Sobrinho et al., 1983; Leal et al., 1983; Neves et al., 1983; Orlando Filho et al., 1983; Glória; Orlando Filho, 1984; Azeredo et al., 1984; Camargo et al., 1984; Minihoni; Cerr, 1987; Sengik et al., 1988; Lara Cabezas et al., 1994; Có Júnior et al., 2008; Bebé et al., 2009; Barros et al., 2010; Miranda et al., 2012).

Resumidamente, os efeitos incluem a elevação do pH do solo (Figura 10.10), o enriquecimento em cátions trocáveis (Ca, Mg e K) no solo (Figura 10.11) e a influência na neutralização do Al trocável do solo (Figura 10.12).

Em sua avaliação ecotoxicológica da vinhaça, Alves (2015) verificou que o incremento de doses de vinhaça afasta minhocas e colêmbolos e pode inibir sua reprodução. Os ácaros foram menos sensíveis e houve crescimento da biomassa microbiana de carbono (BMC), metabolismo microbiano (C-CO₂) e colonização dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) nas raízes. Por

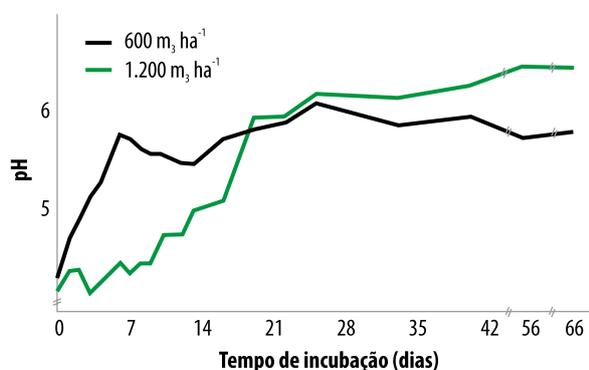


Figura 10.10. Elevação e variação do pH do solo em função do tempo de incubação com vinhaça nas doses de 600 e 1.200 m³ ha⁻¹.

Fonte: Adaptado de Neves et al. (1983).

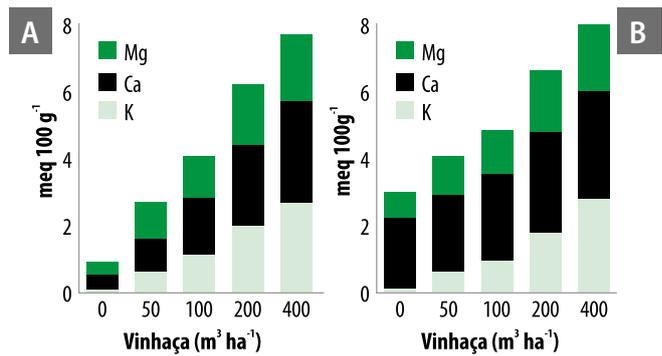


Figura 10.11. Teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) no complexo de troca de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (A) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (B) em função da aplicação de diferentes doses de vinhaça.

Fonte: Adaptado de Sengik et al. (1988).

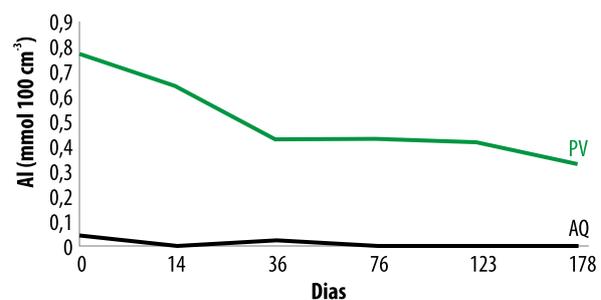


Figura 10.12. Teor de alumínio trocável em função da aplicação de 500 m³ ha⁻¹ de vinhaça em Argissolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico.

Fonte: Adaptado de Mattiazzo e Glória (1985).

sua vez, a estrutura da comunidade bacteriana sofreu redução de sua riqueza e diversidade. Os efeitos deletérios para a fauna do solo foram atribuídos ao alto teor de sais, especialmente de K.

Nunes et al. (1981) pesquisaram o efeito de doses de vinhaça (50, 100, 150, 200 e 400 m³ ha⁻¹) sobre as propriedades químicas de um solo em condições de laboratório. Os autores observaram que N-total, C e C:N não se alteraram; K, Ca e Mg tiveram aumentos em seus teores de acordo com o aumento das doses de vinhaça; enquanto os teores de Ca e Mg aumentaram mais do que foi incorporado pela vinhaça. Também, de acordo com o incremento das doses, houve aumento do pH, neutralização do Al⁺³ trocável e redução dos teores de P assimilável e de NO₃⁻.

Martins (2012) estudou os efeitos da aplicação de vinhaça sobre um Latossolo fase arenosa e afirmou que a vinhaça melhorou seus atributos químicos e aumentou os teores de alguns nutrientes como K e P. Indiretamente, promoveu efeitos positivos em atributos físicos como a estabilidade de agregados. Ainda minimizou efeitos de período seco sob a atividade microbiana, favoreceu o desenvolvimento de fungos e interferiu na atividade microbiana no período seco.

No entanto, alguns efeitos negativos no solo são atribuídos à aplicação de vinhaça, principalmente quando utilizada em altas doses. Entre eles destacam-se a salinização, o aumento da saturação de K, com consequente desbalanço de cátions, e a formação de complexos orgânicos que podem causar lixiviação de íons, como, por exemplo, o nitrato.

A salinização pode provocar dispersão de argilas e diminuição da permeabilidade do solo, afetando a disponibilidade de água no canal. Isso significa que a cana-de-açúcar tratada com vinhaça pode ter sua resistência à seca reduzida, o que é significativamente importante, principalmente em veranicos. A saturação de K no complexo de troca pode se elevar demasiadamente, aumentando as relações K:Ca e K:Mg quando são utilizadas doses elevadas de vinhaça. Camargo et al. (1984) mostraram que essa saturação pode chegar a valores aproximados de 15% quando se aplicam doses de vinhaça equivalentes a $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Isso é três vezes mais que a saturação por K máxima permitida pela Cetesb em canaviais paulistas. Nesse mesmo trabalho, os pesquisadores encontraram altas lixiviações de cátions, principalmente de K, Ca e Mg, atingindo 82% da quantidade aplicada de K abaixo dos 0,8 m de profundidade, quando utilizadas doses de $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça.

Em solos com problemas de elevadas saturações de K, o emprego de gesso tem sido uma alternativa viável. É necessário, no entanto, cau-

tela em relação às quantidades necessárias para essa correção, para que o gesso seja aplicado parceladamente, e não em uma única dose, que geralmente é superior a 10 t ha^{-1} . A correção desses desequilíbrios de cátions é uma intervenção de médio a longo prazo para que o problema seja resolvido de maneira adequada.

Para Rossetto (2006), a vinhaça apresenta alto poder fertilizante, porém tem também alto poder poluidor. Com isso, nem todo o resíduo produzido pode ser utilizado diretamente como fertilizante, principalmente in natura. Por exemplo, a restrição da Cetesb ao uso de vinhaça em solos que apresentam saturação por K acima de 5% restringe seu uso, tornando necessária a busca por alternativas

Almeida (2015) afirma que o sistema misto de transporte da vinhaça à lavoura é o que tem proporcionado resultados melhores às usinas. Para que a aplicação na lavoura por caminhões-tanque seja realizada de maneira econômica, foi desenvolvido o sistema chamado de pré-concentração da vinhaça. Isso permite reduzir a quantidade de vinhaça por litro de álcool de 13 a 16 L para 7 a 8 L, diminuindo significativamente os custos do transporte por caminhões. A pré-concentração é feita em evaporadores do tipo *falling film* de mono ou múltiplos efeitos, utilizando como fonte de energia o vapor de escape ou o vapor vegetal do processo de destilação existente. Os condensados obtidos podem ser reutilizados no processo industrial, reduzindo a necessidade de captação de água. Apresenta-se como alternativa a concentração da vinhaça para a produção de biofertilizantes ou a queima em caldeiras. Nesta última, a vinhaça é concentrada a 50 por 60 °Brix, também em evaporadores do tipo *falling film* de múltiplos efeitos, normalmente tubulares.

Os mesmos autores exemplificam que, considerando-se o caso da pré-concentração da vinhaça, para a produção de 600 mil litros de

etanol por dia, no processo convencional, produzem-se também $8.400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de vinhaça. Se a quantidade de vinhaça for reduzida pela metade, retiram-se aproximadamente 175 m^3 por hora de água ($4.200 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$), que poderia ser utilizada no processo. Com isso, o teor de sólidos dissolvidos passaria de 3,0 para 6,0% (m/m) e a quantidade de vinhaça passaria de $14,0 \text{ L L}^{-1}$ de álcool para $7,0 \text{ L L}^{-1}$ de álcool. Assim, considerando um caminhão-tanque de 50 m^3 , o número de viagens por dia seria reduzido de 168 para 84. Se a concentração da vinhaça fosse de 50 °Brix, a quantidade de água retirada seria de $7.896 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (329 m^3 por hora).

Outra utilização da vinhaça seria na produção de biofertilizantes, que consiste em concentrar a vinhaça até a obtenção de um composto organomineral constituído da vinhaça concentrada e dos demais subprodutos que são produzidos na usina: torta dos filtros, fuligem e cinzas da caldeira, resíduos da limpeza da cana e outros. Esse composto, depois de analisado, receberia, se necessário, outros sais minerais, o que resultaria num adubo organomineral para a cultura da cana-de-açúcar (Almeida, 2015).

A produção de biogás pela biodigestão da vinhaça foi apresentada às usinas na década de 1970. No entanto, não houve interesse devido ao longo tempo necessário para a biodigestão, que exigia enormes reatores, e aos custos elevados de implantação. Todavia, há enormes vantagens, como a produção de gás metano (CH_4) de alto valor energético ($\text{PCI} = 8.500 \text{ Kcal Nm}^{-3}$). Além disso, N, P e K permanecem na vinhaça biodigerida, permitindo seu uso na fertirrigação das plantações de cana. A vinhaça biodigerida depois da eliminação do ácido sulfídrico (H_2S) apresenta baixa agressividade para o aço, o que permite que seja concentrada em evaporadores de aço carbono e utilizada na fabricação de biofertilizantes. O lodo do biodigestor pode ser utilizado como adubo orgânico (Almeida, 2015).

Ao reduzir o tempo de biodigestão para 20 horas, as novas tecnologias voltaram a ser atrativas. A biodigestão anaeróbica da vinhaça consiste na degradação da matéria orgânica da vinhaça por meio de fermentação com diversos gêneros de bactérias anaeróbicas acetogênicas, que transformam parte da matéria orgânica em gases (basicamente metano e gás carbônico). Esse processo utiliza a vinhaça in natura e é realizado em grandes reservatórios (biorreatores), além de reduzir a carga orgânica (DBO) em 70%.

Dessa forma, a vinhaça com concentração de 25 a 30 kg de DQO por metro cúbico tem sua carga orgânica reduzida para 7,5 a 9,0 kg de DQO por metro cúbico, além de produzir biogás na ordem de 8,0 a 10,0 m^3 por Nm^3 de vinhaça, com uma concentração de metano no biogás de 60 a 65%. Existem seis aplicações para o gás metano, e as duas últimas citadas ainda estão em fase de pesquisa:

- a) Combustível em veículos — necessita ser purificado e concentrado para que seja obtida uma mistura com no mínimo 95% de metano. Necessita ser comprimido a 150/200 atm. Nessa fase, o gás é chamado de biometano. A queima em motores do ciclo diesel vem sendo aperfeiçoada, não havendo necessidade de modificações nos motores.
- b) Queima em caldeiras — a queima direta em caldeiras necessita também de uma purificação para a eliminação do S, que é altamente corrosivo.
- c) Combustível para secagem do creme de levedura, desviado do processo de fermentação para obtenção de ração (concentrado proteico).
- d) Queima do biogás em motores estacionários para gerar energia elétrica.
- e) Queima do biogás em turbinas a gás, também para gerar energia elétrica.

f) Queima do biogás em turbinas a gás no ciclo combinado, gerando energia elétrica para aproveitar o calor dos gases do escape em caldeira de recuperação (Almeida, 2015).

Na alimentação animal, Gorni et al. (1987) concluíram que a adição de vinhaça concentrada nas rações, no intervalo de 4, 8 e 12% (m/m), manteve o desempenho e as características de carcaça de suínos nas fases de crescimento e terminação.

Arrigoni (1993), em pesquisa que utilizou vinhaça em substituição à água na terminação de bovinos confinados, observou que a vinhaça associada ao bicarbonato de sódio mais óxido de magnésio melhorou o desempenho dos bovinos no confinamento, podendo substituir a água na dessedentação.

Hidalgo et al. (2011) mostraram que a vinhaça como aditivo alternativo na alimentação de aves melhorou o peso vivo dos animais. Os autores concluíram que o uso da vinhaça como

aditivo alimentar para as aves pode otimizar o uso dos nutrientes da dieta e propiciar melhor comportamento produtivo e reprodutivo, trazendo mais saúde, maior produtividade e retorno econômico ao reduzir o número de mortes e melhorar a eficiência na produção.

Há duas alternativas principais para o tratamento da vinhaça: biodigestão para produção de biogás e concentração. A Tabela 10.8 apresenta a composição da vinhaça in natura e concentrada, aplicada em lavouras de cana-de-açúcar (Albers, 2007). O uso da vinhaça concentrada oferece algumas soluções, tais como: a) o condensado com água é aproveitado na embebição de moendas e para outros fins; b) evita a contaminação do lençol freático; e, c) reduz os custos de deslocamento pela facilidade de transporte para distâncias maiores. Outra vantagem da vinhaça concentrada é o modo de aplicação no campo, uma vez que permite a aplicação sobre as leiras de cana-de-açúcar, levando ao aumento

Tabela 10.8. Composição de vinhaça in natura e concentrada utilizadas nas lavouras de cana-de-açúcar.

Propriedade	Unidade de medida	In natura (4% Brix)	Brix a 35%	Brix a 65%
pH		4,4–4,6	4,6–5,0	4,6–5,0
Temperatura	(°C)	80–100	50–60	50–60
DBO	(mg L ⁻¹)	19.800	173.250	321.750
DQO	(mg L ⁻¹)	45.000	393.750	731.250
Sólidos totais	(mg L ⁻¹)	52.700	461.125	856.375
Sólidos solúveis	(mg L ⁻¹)	40.000	350.000	650.000
Sólidos insolúveis	(mg L ⁻¹)	12.700	111.125	206.375
Nitrogênio (N)	(mg L ⁻¹)	480–710	4.200–6.213	7.800–11.538
Fósforo (P ₂ O ₅)	(mg L ⁻¹)	9–200	79–1.750	146–3.250
Potássio (K ₂ O)	(mg L ⁻¹)	3.340–4.600	29.225–40.250	54.275–74.750
Cálcio (CaO)	(mg L ⁻¹)	1.330–4.570	11.638–39.988	21.613–74.263
Magnésio (MgO)	(mg L ⁻¹)	580–700	5.075–6.125	9.425–11.375
Sulfato (SO ₄)	(mg L ⁻¹)	3.700–3.730	32.375–32.637	60.125–60.612
Relação vinhaça/álcool	(L L ⁻¹)	12	1,4	0,74

Fonte: Albers (2007).

da área de aplicação e ao ganho econômico pelo transporte.

Barbosa et al. (2006) utilizaram a vinhaça concentrada em doses equivalentes de 0, 180 e 270 kg ha⁻¹ de K e combinaram diversas doses e formulações de adubos minerais em Argissolo Vermelho-Amarelo. Os autores concluíram que houve aumento de produtividade sem alteração significativa das variáveis tecnológicas do caldo. De acordo com Albers (2007), a aplicação de vinhaça em soqueira de cana-de-açúcar, entre 90 e 120 m³ ha⁻¹ representa doses médias de 608, 417 e 175 kg ha⁻¹ de K₂O para a vinhaça de melaço, misto e caldo de cana, respectivamente. Considerando-se a vinhaça concentrada a 35%, para atingir 185 kg ha⁻¹ de K₂O é necessária a aplicação de 5,3 m³ ha⁻¹, que poderia ser feita por aspersão.

A concentração da vinhaça eleva seu poder fertilizante, permitindo a expansão de área e tornando viáveis aplicações em até 100 km de distância de onde é produzida, além de ser mais facilmente armazenada e usada em qualquer época (Albers, 2007). O grande desafio é o custo imobilizado na concentradora e sua integração à indústria sucroalcooleira.

Tratamento agroindustrial

Biodigestão da vinhaça

A biodigestão anaeróbica é uma alternativa de aproveitamento da vinhaça por ser economicamente viável e tratar-se de um efetivo meio de remoção da carga orgânica com a produção de biogás (Wilkie et al., 2000). Outra vantagem da digestão anaeróbica, quando comparada ao tratamento aeróbico convencional, é a baixa produção de lodo (Speece, 1983; Stafford, 1992).

A biodigestão anaeróbica é uma resposta recente às alternativas de aproveitamento da vi-

inhaça, pois permite a estabilização da matéria orgânica com desassimilação de uma mistura gasosa, tendo como componentes principais o metano e o dióxido de carbono (Gurgel, 2009a).

Sabe-se que vários grupos de microrganismos que produzem metano em substratos adequados atuam no processamento contínuo. Tais microrganismos estão presentes na natureza em ambientes anaeróbios, como fundos de lagoas, pântanos, rúmen de herbívoros e fezes de animais e humanos (Gurgel, 2014).

De acordo com Gurgel (2012), o processo de biodigestão anaeróbica ocorre em duas etapas. Na primeira, estão envolvidas bactérias fermentativas, não produtoras de metano, que atuam por hidrólise extracelular e quebram polímeros orgânicos em suas unidades fundamentais, incorporando e fermentando esses produtos de hidrólise em ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. No segundo estágio, tais produtos são transformados em metano e dióxido de carbono, por meio da ação das bactérias acetogênicas e metanogênicas.

As bactérias metanogênicas, em relação às bactérias produtoras de ácidos, reproduzem-se mais lentamente e são mais sensíveis às alterações das condições ambientais ou condições adversas, como a presença de compostos inibidores.

Como a vinhaça em geral encontra-se disponível em temperaturas entre 80 e 100 °C, não há problema de consumo energético para a manutenção da temperatura do processo, pois esse é realizado em biodigestores do tipo Uasb (*upflow anaerobic sludge blanket*), ilustrado na Figura 10.13, operando na faixa termofílica de trabalho.

Para viabilizar os processos biológicos para tratamentos dos efluentes industriais, são necessários equipamentos com grande capacidade de tratamento, além de boa eficiência na remoção

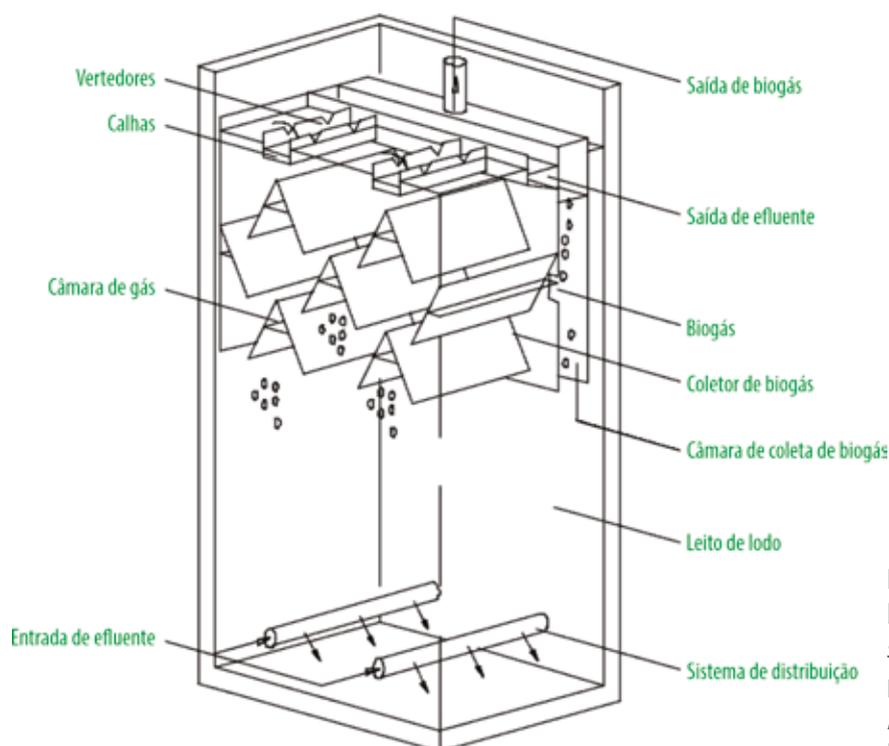


Figura 10.13. Reator anaeróbico Uasb (*upflow anaerobic sludge blanket*).

Ilustração: Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel
Fonte: Gurgel (2009b).

dos dejetos orgânicos. Na prática, isso significa que um reator industrial deverá ser capaz de trabalhar com altas taxas de carregamento orgânico e baixo tempo de retenção. Os parâmetros que determinam a capacidade de um reator anaeróbico podem ser classificados em fatores microbiológicos e físicos, conforme mostrado na Tabela 10.9 (Gurgel, 2014).

Os fatores microbiológicos estão ligados aos parâmetros fisiológicos, tais como temperatura, pH, alcalinidade e presença de compostos inibidores. Nos últimos anos, foram feitos muitos estudos para que fosse determinada a influência de cada um desses parâmetros no processo de

produção de biogás. Portanto, já estão especificados os valores ótimos e as faixas de tolerância para vários tipos de efluentes (Gurgel, 2014).

A limitação para um melhor aproveitamento desse potencial microbiano está relacionada a projetos de reatores anaeróbicos, principalmente aos aspectos físicos: capacidade de retenção dos microrganismos e contato do efluente/microrganismo.

Se o contato dos microrganismos com os efluentes for pouco eficiente, a transferência de massa será prejudicada, e não se poderá utilizar todo o potencial da atividade específica metanogênica da biomassa ativa presente no reator anaeróbico. A taxa de lodo (quantos quilogramas de DQO cada quilograma de lodo pode tratar por dia) estará muito abaixo dos valores teóricos esperados.

Esse contato pode ser melhorado com a expansão ou fluidização do leito de lodo granulado, por meio da aplicação de maiores velocidades de ascensão de efluentes ou biogás (aumentando a relação altura/diâmetro do reator e aplicando recirculação de parte do efluente tratado), chegando ao conceito dos reatores anaeróbicos de leito

Tabela 10.9. Fatores que definem a capacidade de tratamento de um reator anaeróbico.

Fator microbiológico	Fator físico
Atividade microbiana	Capacidade de detenção de microrganismos
Crescimento microbiano	Contato efluente/Microrganismos

Fonte: Gurgel (2009b).

expandido (do inglês *expanded granular sludge bed* – EGSB) (Gurgel, 2014). Entre os vários projetos do tipo EGSB que visam eliminar as deficiências encontradas nos reatores Uasb, destaca-se o reator anaeróbio de circulação interna (IC), por sua engenhosidade e simplicidade construtiva.

O reator IC (Figura 10.14) é baseado na instalação de dois reatores Uasb sobrepostos. O reator inferior recebe alto carregamento orgânico e o superior carga muito baixa. Sua vantagem principal é a segregação do biogás em um dos setores dentro do reator. A coleta do biogás na parte superior proporciona o arraste (*gas-lift*) do efluente e lodo anaeróbio para o topo do reator, onde é segregado e internamente circulado para a parte inferior dele, procedimento esse que lhe confere o nome (Gurgel, 2014).

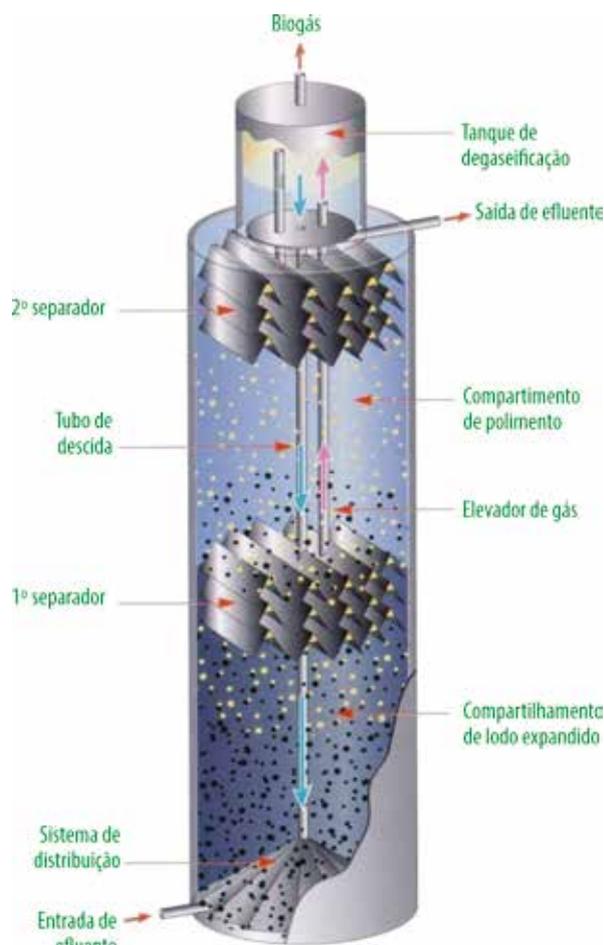


Figura 10.14. Reator anaeróbio de circulação interna.

Ilustração: Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel
Fonte: Gurgel (2014).

Quanto à implantação de unidades industriais, o comissionamento depende fundamentalmente da disponibilidade de lodo bacteriano já adaptado à vinhaça, com adequação das características de atividade e decantabilidade. Acrescente-se ainda que grandes quantidades de lodo são necessárias para a inoculação das unidades industriais (Olivério; Boscardiol, 2013; Gurgel, 2014).

Concentração de vinhaça – histórico e aspectos gerais

Desde os primórdios do Proálcool, nos anos 1970, a vinhaça tem sido uma preocupação constante, tanto pelo seu alto potencial poluidor, consequência de sua composição físico-química e do grande volume gerado no processo de produção de etanol, quanto pela possibilidade de sua utilização como mais uma fonte de rendimentos para a agroindústria. Felizmente, para as usinas e para o ambiente, a vinhaça hoje é vista mais como um subproduto rentável da produção de etanol do que como um efluente com poder contaminante.

Uma das responsáveis pelo custo de produção altamente competitivo da cana-de-açúcar brasileira, diante das outras matérias-primas utilizadas ao redor do mundo, a vinhaça fez da cana o único produto agrícola praticamente autossuficiente em adubação do solo. Substituiu quase que totalmente o uso de fertilizantes minerais na lavoura, aumentando os seus rendimentos agrícolas e ampliando a quantidade de cortes produtivos (Gurgel, 2014).

O custo da fertirrigação está sendo constantemente reduzido por novas e mais modernas técnicas de transporte e aplicação de vinhaça, seja por carretas e até por “treminhões” com tanques de grande volume, seja por tubulações disponíveis em novos materiais com maior resistência mecânica e à corrosão.

Os primeiros registros sobre concentração de vinhaça iniciam-se em 1954, quando a empresa austríaca Vogelbusch desenvolveu o primeiro concentrador, que usava evaporadores inclinados do tipo termossifão. Logo depois, a mesma Vogelbusch apresentou o evaporador do tipo *falling film* (ou película fina), no qual o líquido a evaporar escorre com alta velocidade pelas paredes internas dos tubos do trocador; com isso, seu tempo de permanência em contato com o vapor de aquecimento é reduzido, favorecendo a resistência às incrustações. Esse tipo de evaporador, que se revelou logo como o mais indicado para suportar líquidos com alto teor de sais incrustantes como a vinhaça, tem sido utilizado até hoje, além de ser difundido para uso nos evaporadores de caldo nas usinas brasileiras.

No Brasil, no início do Proálcool, duas unidades de concentração de vinhaça foram instaladas. Uma delas, a Usina Tima, em Pernambuco, então pertencente ao Grupo Votorantim, foi projetada por uma empresa nacional, a Borag, fornecedora de equipamentos para indústrias de suco, que funcionava integrada à destilaria de etanol. O sistema não obteve êxito devido aos problemas de incrustações e às frequentes paradas para limpeza, que atrapalhavam o funcionamento da destilaria. Tanto esse sistema de concentração como a própria usina se encontram hoje desativados.

A outra unidade foi instalada em Sertãozinho, no estado de São Paulo, na Usina Santa Elisa, em 1976, pela Conger S. A., então licenciada da Vogelbusch. O concentrador de vinhaça foi desenvolvido para um aparelho com capacidade de produção de 120 mil litros de etanol por dia. Na época, utilizando melaço para fermentação, sem prever a utilização de caldo direto, o projeto da concentração foi elaborado para alimentação de $70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vinhaça com 6% de sólidos, concentrando-a até 60°Brix .

Essa concentração operava em quádruplo efeito, utilizando um termocompressor de vapor

a $8,0 \text{ kgf cm}^{-2}$, o que resultava em um balanço similar a um quádruplo efeito, com um consumo de 13 t h^{-1} de vapor direto rebaixado. Seu condensador final era do tipo barométrico, com bomba de vácuo, e os vapores a serem condensados do último efeito tinham contato direto com a água utilizada, o que causava alguns problemas pela contaminação apresentada no circuito de água das torres de resfriamento. Esse problema foi resolvido na época, utilizando-se no condensador a água decantada do sistema de lavagem de cana, com uma vazão de $450 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O consumo de energia elétrica na planta era de 400 kWh para a produção final de $5,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vinhaça concentrada, o que equivale em peso a $7,0 \text{ t h}^{-1}$ do produto concentrado com densidade aproximada de $1,40 \text{ kg m}^{-3}$. Essa quantidade de vinhaça, se incinerada, produziria cerca de 1.400 kg h^{-1} de cinzas calcinadas.

A unidade ficou parada por causa do alto consumo de energia. Todavia, em 1999, com a implantação do sistema de cogeração de energia elétrica na usina, a unidade passou a funcionar continuamente, produzindo cerca de $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vinhaça concentrada. O sistema permitiu que a usina reduzisse o custo de transporte da vinhaça para as regiões mais afastadas e pudesse ter a flexibilidade de dosar a concentração de cada aplicação de vinhaça, conforme as características do solo. Para a aplicação da vinhaça concentrada ao solo, foi desenvolvido um caminhão-tanque com bomba de pressurização e barra aplicadora, de 7 m de largura, o que possibilitou a aplicação em cerca de 5 mil hectares (Barbosa, 2006; Biase, 2007).

Os evaporadores do primeiro ao terceiro efeito eram do tipo película fina de fluxo descendente, os quais possuíam controle automático de fluxo para injeção rápida de água quente para lavagem dos tubos se houvesse falta de líquido, como nos casos de falta de energia elétrica, parada das bombas mecânicas ou entupimento de

tubulações. O trocador do último efeito era do tipo recirculação forçada (ou flash), a fim de possibilitar a operação no estágio final de concentração de 45 a 60 °Brix, a fase em que, naturalmente, ocorrem os maiores problemas de incrustações.

A limpeza química era feita com ácido nítrico a 3%. Os problemas comuns de uma nova unidade com uma nova tecnologia sendo colocada em operação, como, por exemplo, problemas mecânicos de cavitação em bombas, não impediram a entrada em regime operacional contínuo e não dificultaram o aprendizado em relação ao trabalho com as limpezas e incrustações.

Em 1984, a destilaria Santa Isabel, em Novo Horizonte, estado de São Paulo, instalou um conjunto de evaporação misto, considerado como um pré-concentrador de vinhaça, comercialmente denominado Reduger. Nesse conjunto, os dois primeiros corpos de evaporação operavam como um pré-evaporador de caldo, elevando-o até 25 °Brix e permitindo sua posterior diluição com as águas condensadas dos três corpos finais, que operavam com concentração da vinhaça dos aparelhos de destilação de até 15 °Brix. Esse conjunto permitia uma redução de até 50% do volume total de vinhaça produzido, que era distribuído por caminhões na fertirrigação das lavouras.

Redução e concentração

Apesar de parecer uma redundância, é importante ter em mente essa diferença conceitual entre o que se pode fazer com a vinhaça depois de produzi-la no aparelho de destilação fracionada, considerando todos os aspectos técnicos e as implicações financeiras que cercam a instalação de um concentrador de vinhaça. É lógico que, ao partir para uma solução de alto nível tecnológico e de investimentos como esse, deve-se esgotar no processo industrial todas as possibilidades de redução do volume de vinhaça produzida a ser concentrada. Algumas dessas soluções parecem bastante simples e de

baixo custo, outras exigirão criatividade e novos investimentos, mas sempre deverão preceder à instalação do concentrador.

A instalação de aquecedores indiretos nas colunas de destilação e o uso de colunas de esgotamento de flegmas para produção separada de flegmaça e vinhaça já foram práticas comuns nas destilarias, as quais talvez tenham sido esquecidas ou abandonadas ao longo do tempo, mas que poderão ser retomadas.

O uso das flegmaças para lavagem de dornas, a reposição de sistemas de água, as diluições e as embebições são medidas fáceis de ser viabilizadas, as quais podem representar uma grande ajuda na redução do volume de efluentes.

Concentração de vinhaça

A vinhaça in natura possui teores de sólidos muito baixos, que variam de 2 a 10%, conforme a matéria-prima utilizada na fabricação de etanol. Nos processos em que só o caldo extraído é utilizado na fabricação de etanol, o teor de sólidos da vinhaça é normalmente mais baixo, resultando em volumes ainda maiores de vinhaça a ser descartada pela destilaria. Esse enorme volume de vinhaça acarreta custos de transportes também elevados.

Assim, são conhecidos três meios tecnológicos principais de diminuir a proporção de vinhaça em relação ao etanol produzido nas destilarias: concentração, digestão e organominerais.

Concentrar a vinhaça significa retirar água desse efluente, sem perda dos sólidos nela contidos, com conseqüente redução de volume. Essa redução, tomada em função da concentração (expressa em termos de °Brix), assume a forma de curva assintótica (Germek; Feigl, 1987 citado por Freire; Cortez, 2000), conforme ilustrado na Figura 10.15. O raio econômico de aplicação da vinhaça em função da concentração está na Figura 10.16.

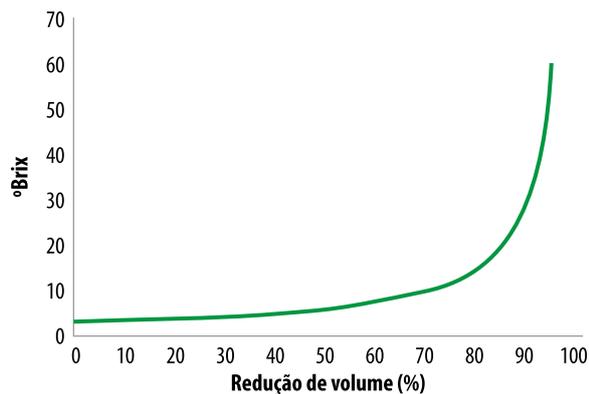


Figura 10.15. Relação entre o valor de Brix (°Brix) e a redução de volume (%) da vinhaça.

Fonte: Germek e Feigl (1987) citado por Freire e Cortez (2000).

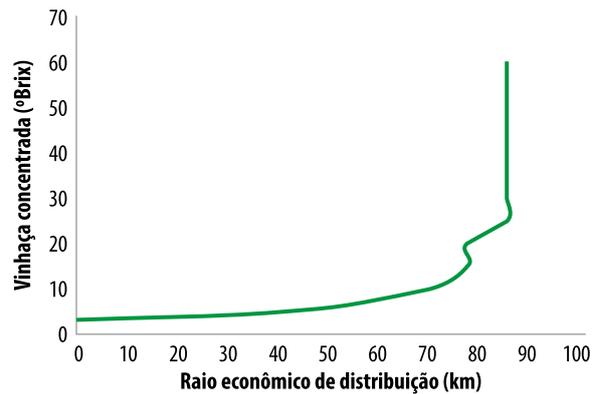


Figura 10.16. Raio econômico de aplicação da vinhaça em função da concentração.

Fonte: Germek e Feigl (1987) citado por Freire e Cortez (2000).

A vinhaça in natura fica restrita às áreas próximas da usina e quanto mais distante a lavoura, melhor o uso da concentração da vinhaça (questão econômica e ambiental), fato esse observado por Freire e Cortez (2000) (Figura 10.17).

Na Tabela 10.10, mostram-se os teores de nutrientes nas vinhaças concentrada e in natura, obtidas na Usina Santa Elisa.

Quanto ao processo de evaporação, destaca-se que todo evaporador é composto por uma superfície de aquecimento, onde ocorre a transferência de calor do fluido de aquecimento (vapor) para o fluido de processo (vinhaça), e por um meio onde ocorre a separação do vapor condensado do fluido concentrado. O que difere nos diversos tipos de evaporadores é a forma

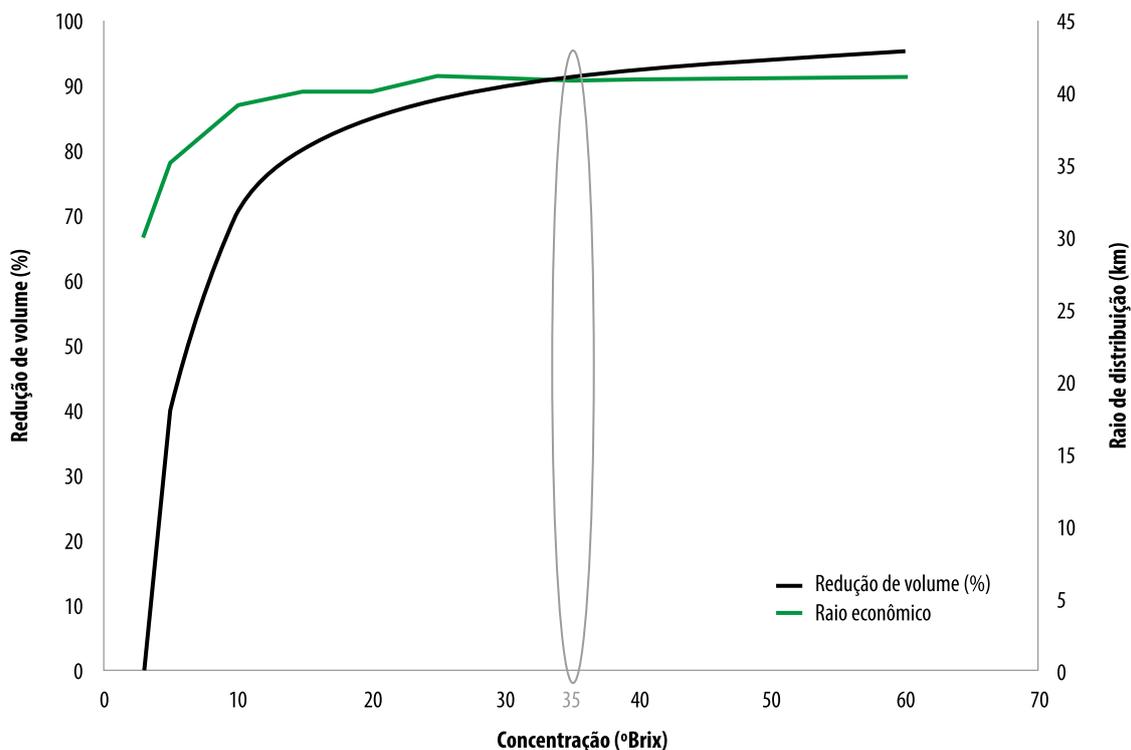


Figura 10.17. Raio econômico de aplicação da vinhaça x concentração x redução do volume.

Fonte: Germek e Feigl (1987) citado por Freire e Cortez (2000).

Tabela 10.10. Teores de nutrientes aplicados presentes nas vinhaças in natura e concentrada na Usina Santa Elisa.

Vinhaça	2004					
	K ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	MgO	M.O.	N total
	(kg m ⁻³)					
In natura	4,79	0,23	1,21	0,39	7,65	0,78
Concentrada	44,81	4,18	12,37	3,07	66,78	8,49
Vinhaça	2005					
	K ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	MgO	M.O.	N total
	(kg m ⁻³)					
In natura	4,60	0,18	0,72	0,81	–	0,46
Concentrada	40,72	1,85	6,26	10,59	–	85,83

Fonte: Gurgel (2009b).

como a separação entre o vapor vegetal e o fluido concentrado é feita (Franco, 2001).

Os evaporadores são grandes consumidores de energia. Em vista disso, são utilizadas várias estratégias para reduzir o consumo de energia, como o sistema de evaporação em múltiplos efeitos. Nesse arranjo, os evaporadores são montados em seqüência, de modo que o vapor ve-

getal de um evaporador (primeiro efeito) é utilizado para aquecer outro evaporador (segundo efeito) e assim sucessivamente. Na Figura 10.18, é apresentado o esquema ilustrativo de um evaporador de múltiplo efeito e, na Figura 10.19, o evaporador do tipo névoa turbulenta.

Conforme a Figura 10.18, o vapor evaporado no último efeito passa por um condensador, e o

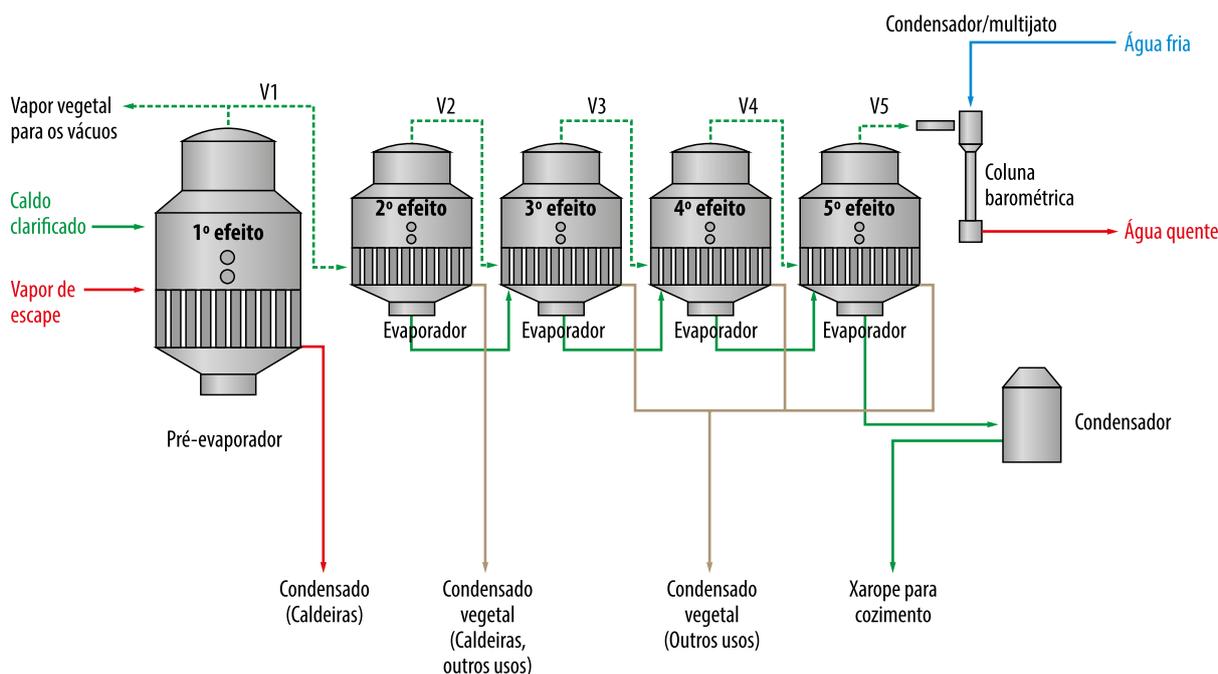


Figura 10.18. Esquema ilustrativo de um evaporador de múltiplo efeito.

Fonte: Adaptado de Elia Neto e Shintaku (2009).

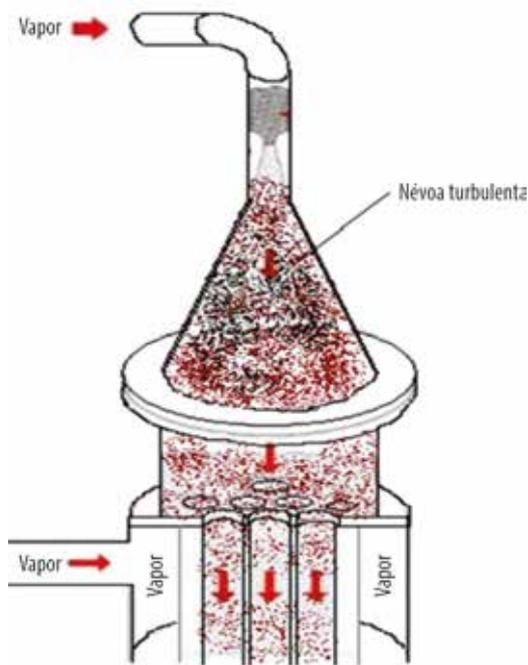


Figura 10.19. Evaporador do tipo névoa turbulenta.
Ilustração: Fernando Boscaroli.
Fonte: Boscaroli (2011).

processo é encerrado. Os vapores que saem do último corpo vão ao condensador. Esses vapores vêm acompanhados de gases não condensáveis e, como há necessidade de condensação intensa e de retirada deles, o condensador deve ser de grande potência a vácuo e dotado de dispositivos que permitam sua retirada. Em geral, utilizam-se condensadores barométricos nos quais a água é aspergida em grande quantidade sobre os vapores. Dividem-se em condensadores de contracorrente, de corrente paralela e injetores múltiplos ou multijatos (Assan, 2006).

Ressalta-se que quanto maior o número de efeitos, maior será a redução do consumo de energia. Esse arranjo permite utilizar somente o calor fornecido ao primeiro efeito (vapor de alimentação) para realizar todo o processo de evaporação. Além da economia de vapor, esse arranjo permite uma economia de água de resfriamento no condensador, já que este último é utilizado para condensar somente o vapor vegetal gerado no último efeito. Contudo, um maior número de efeitos ocasiona diferenças de

temperatura menores empregadas como força motriz em cada efeito, o que causa aumento na área de troca térmica necessária, bem como aumento dos custos fixos. Assim, a escolha do número de efeitos é definida a partir de um balanço econômico entre a economia de vapor e água de resfriamento e o custo do investimento.

Para concentrar a vinhaça de maneira eficiente, a tecnologia *thermally accelerated short time evaporation system* (Taste) tem como princípio de evaporação de água a névoa turbulenta descendente, com aceleração térmica, que consiste em explodir termicamente o líquido de entrada por meio de um *flash* parcial, resultando numa mistura de vapor e pequenas partículas líquidas (névoa). Essa névoa é gerada em cada um dos cones de distribuição que alimenta os tubos de cada um dos estágios do evaporador. O produto sob a forma de névoa cai livremente através dos tubos abertos, absorve o calor e causa a evaporação da água, aumentando mais ainda o seu volume. Ele é então acelerado termicamente, chegando a velocidades muito altas no final dos tubos, conforme ilustrado na Figura 10.19.

Os evaporadores de concentração de vinhaça possuem múltiplos efeitos a vácuo (até sete efeitos) (Gurgel, 2009b) e podem reduzir o volume desse resíduo em até seis vezes sem consumo adicional de vapor.

Nesse sistema, o vapor de aquecimento é admitido no primeiro efeito (vapor alcoólico proveniente da destilaria), enquanto os demais efeitos são aquecidos pelos vapores oriundos do efeito anterior. No último estágio de evaporação, o vapor é condensado em condensador barométrico de contato direto. Detalhes do processo de concentração de vinhaça com integração energética estão ilustrados nas Figuras 10.20, 10.21 e 10.22.

A vinhaça concentrada (até 65 °Brix) é o primeiro passo para a produção do Biofom (Gurgel, 2012).

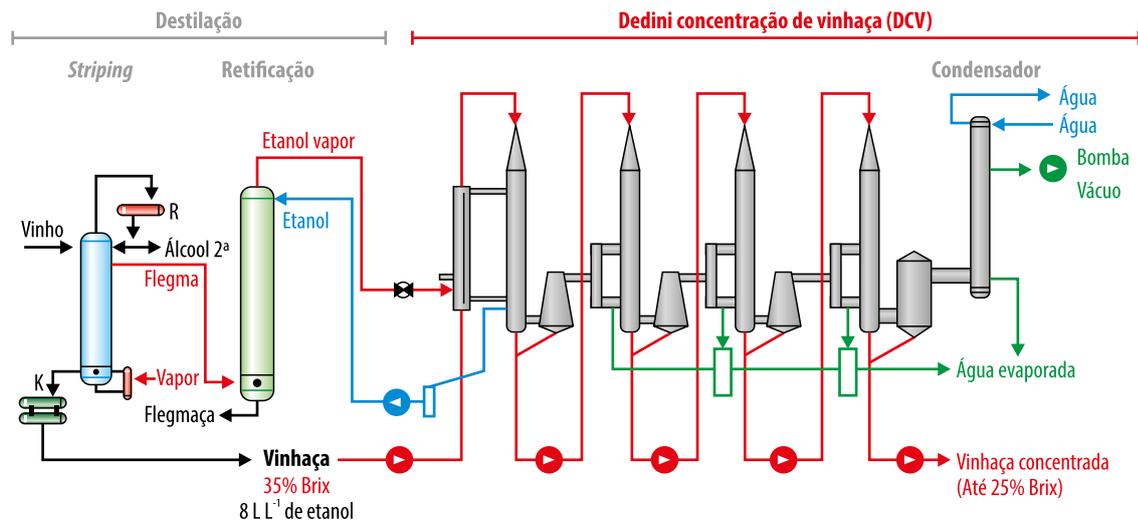


Figura 10.20. Concentração da vinhaça com integração energética com a destilaria.

Fonte: Gurgel (2009b).

Foto: Marçílio Nogueira do Amaral Gurgel



Figura 10.21. Visão geral do concentrador de vinhaça com integração energética (Grupo Raízen – Unidade Costa Pinto, Piracicaba, SP).

Foto: Marçílio Nogueira do Amaral Gurgel



Figura 10.22. Visão geral do concentrador de vinhaça com integração energética (Araraquara, SP).

A água recuperada da vinhaça pode ser reutilizada em diversas áreas da usina, como na embebição do sistema de extração do caldo, na diluição do fermento ou no preparo do mosto, contribuindo para a sustentabilidade do processo produtivo, visto que possibilita a redução da captação de água de mananciais.

O sistema é compacto, construído em aço inox 316, e de fácil instalação e limpeza, uma vez que o aquecimento e a evaporação rápida minimizam a ocorrência de incrustação. O equipamento possui sistema de limpeza *clean in place* (CIP), processo 100% automático que utiliza produtos químicos para eliminação de resíduos com alta eficiência térmica e baixo consumo de energia.

Esse processo de concentração de vinhaça também apresenta vantagens financeiras, uma vez que há redução significativa nos custos com transporte desse resíduo até a lavoura, seja esse por bombeamento seja por via transporte veicular.

Biofertilizante organomineral (granulado e farelado) – Biofom

Por meio da pesquisa, a agricultura está em constante processo de geração de novos conhecimentos, buscando elucidar as causas e os efeitos do uso de diferentes substâncias, a fim de obter maior eficiência na produção agrícola. O desenvolvimento e a produtividade das culturas são controlados, além dos fatores genéticos, ambientais e tratos culturais, por fatores fisiológicos e/ou hormonais. Além dos macros e micronutrientes, a utilização nas culturas agrícolas de biorreguladores, bioestimulantes ou bioativadores, também conhecidos no mercado como fertilizantes organominerais de última geração, tem se intensificado, com a obtenção de resultados importantes nas lavouras, o que gera a necessidade de se conhecer, com maior detalhe, o funcionamento desses compostos

químicos nas plantas. Os biofertilizantes são compostos bioativos², metabólitos, além de quelatos organominerais (Gurgel, 2012).

A mistura de dois ou mais reguladores vegetais com outras substâncias (aminoácidos, nutrientes e vitaminas) é chamada de bioestimulante (Castro; Vieira, 2003). A utilização dessas substâncias aumenta em importância, à medida que se aumenta o potencial genético das culturas e se eliminam fatores limitantes do clima e do solo, objetivando altos rendimentos e a melhoria da qualidade do produto colhido (Floss; Floss, 2007).

Durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, dependendo de sua composição, concentração e proporção das substâncias, os biofertilizantes estimulam o crescimento vegetal por meio da maior divisão, alongação e diferenciação celular. Dessa forma, ocorre aumento da capacidade de absorção de nutrientes e água, e isso se reflete diretamente no desenvolvimento e na produtividade das culturas (Castro; Vieira, 2003).

Segundo Silva et al. (2007), biofertilizantes líquidos são produtos naturais obtidos da fermentação de materiais orgânicos com água, na presença ou ausência de ar (processos aeróbicos ou anaeróbicos). Podem possuir composição altamente complexa e variável, dependendo do material empregado, contendo quase todos os macro e microelementos necessários à nutrição vegetal.

Com base nessas definições, o Biofom (biofertilizante organomineral) caracteriza-se como um biofertilizante, uma vez que todos os seus componentes são de origem vegetal e seu principal elemento, a vinhaça, é produto da fermentação

² Resíduo final da fermentação de compostos orgânicos, contendo células vivas ou latentes de microrganismos (bactérias, leveduras, algas e fungos filamentosos).

do caldo da cana-de-açúcar, possuindo assim células vivas e microrganismos.

Na indústria sucroalcooleira, modificações nos sistemas de produção podem representar grandes otimizações no processo industrial. Por meio do reprocessamento de resíduos da cana-de-açúcar, obtém-se um produto sólido, granulado ou farelado, denominado Biofom, que pode ser formulado de acordo com as necessidades do solo e da cultura (Figura 10.23).

Foto: Marçílio Nogueira do Amaral Gurgel



Figura 10.23. Biofom granulado e farelado.

A produção de Biofom consiste, basicamente, na mistura de cinzas da caldeira, fuligens da chaminé, torta de filtro e vinhaça concentrada (Figura 10.23), os quais são enviados para a formulação do biofertilizante organomineral, que, posteriormente, são secos em um secador granulador do tipo tambor rotativo.

No estudo realizado por Gurgel (2012), que contemplou a caracterização e análise do potencial agronômico da utilização do Biofom, em um testemunho envolvendo uma planta teste (milho), foram observadas diferenças entre os tratamentos (adubação com fertilizante mineral versus adubação com Biofom) até 45 dias após a semeadura. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade de São Paulo, em Piracicaba, SP, em 2008. Observou-se que o Biofom pode substituir a utilização do fertilizante mineral e que alguns tratamentos apresentaram o mesmo desempenho do fertilizante mineral. O produto reduz a geração de resíduos da

agroindústria sucroalcooleira, aproveitando-os racionalmente, além de contemplar a legislação ambiental vigente.

No referido estudo, foram destacados tanto a redução nos custos com fertilizante mineral quanto a redução de custos com transporte, operações e infraestrutura, dada a eliminação da aplicação de vinhaça, torta de filtro e cinzas, separadamente, no campo. Além disso, o emprego do Biofom elimina o mau cheiro da vinhaça, podendo ser formulado de acordo com as necessidades específicas da cultura.

A matéria orgânica aplicada via Biofom promove a melhoria das propriedades físico-químicas do solo, da CTC e da porosidade, o que favorece a absorção de água, nutrientes e reduz perdas causadas por lixiviação.

O Biofom é uma solução sustentável. Além de estar de acordo com as legislações vigentes, traz benefícios ao ambiente, pois todos os resíduos produzidos no processamento da cana-de-açúcar podem ser transformados em biofertilizante, o que minimiza o risco de poluição de aquíferos e do solo pela lavagem dos resíduos (Gurgel, 2012).

Aproveitamento de resíduos de fontes exógenas na cultura de cana-de-açúcar

Em pesquisa sobre a dinâmica do nitrogênio amídico (^{15}N -ureia) e amoniacal (^{15}N -aquamônia) no solo, aplicado conjuntamente com o coproduto do ácido glutâmico (Ajifer), Pereira (2008) concluiu que associar fertilizantes líquidos com o Ajifer in natura na mistura com as fontes de nitrogênio amídico (ureia) ou amoniacal (aquamônia) é viável e apresenta estabilidade física e química. O autor conclui ainda que a formulação contendo Ajifer + ureia + KCl aplicada sobre a palhada da cana-de-açúcar apresentou

maior recuperação de N total, em razão da grande capacidade da palhada da cana-de-açúcar de reter o íon amônio (NH_4^+) de fonte amídica.

O Ajifer é um subproduto da fabricação do glutamato monossódico na empresa Ajinomoto. De acordo com a CPRN DAIA (São Paulo, 2008), tem-se a descrição técnica do processo de produção do glutamato monossódico pela Ajinomoto e a geração do Ajifer como um subproduto. Dada a importância dos aminoácidos como unidade fundamental que compõe uma proteína, e como as células animais não sintetizam todos os 20 aminoácidos necessários à síntese das diversas proteínas, buscam-se outras fontes para obter oito dessas substâncias, incluindo a lisina. A lisina é produzida pela transformação do açúcar dissolvido em lisina líquida e cristal através de fermentação por meio da adição de insumos (microrganismos) na matéria-prima. Inicialmente, o açúcar é armazenado para posterior dissolução quando são incorporados os microrganismos e a amônia para a efetiva fermentação. Após a fermentação, o caldo é acidificado com ácido sulfúrico.

O tratamento do caldo fermentado consiste na extração, através de resina de troca iônica, da lisina do restante do caldo, sendo esse posteriormente encaminhado para o processo de evaporação, no qual o concentrado residual é utilizado para produção do Ajifer (produto secundário). Por fim, a lisina concentrada é cristalizada via agitação mecânica sob temperaturas controladas e, após a separação da fase líquida e sólida por meio de centrífugas, o produto é enviado para secagem. A produção de treonina é semelhante à da lisina, mas a extração da treonina do caldo residual é realizada por meio de microfiltração por membranas. Outro diferencial na produção da treonina é a obtenção do subproduto Ajifer na etapa de separação, na qual os produtos nas fases líquida e sólida sofrem segregação (Dedini, 2009). Na produção

da Ajinomoto, são utilizados açúcar, amônia líquida (NH_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 98%, ácido clorídrico (HCl) a 35%, ácido fosfórico (H_3PO_4) a 75% e soda cáustica (NaOH) a 50%. O processo industrial demanda utilização de vapor para as etapas de dissolução, concentração e secagem, entre outras (Gurgel, 2012).

Esterco de animais

A composição nutricional da adubação orgânica, em alguns casos, pode não ser balanceada devido à origem da matéria-prima empregada nesse tipo de adubação (Tabela 10.11), tornando necessária a complementação com fertilizantes minerais.

O maior empecilho para o emprego da adubação orgânica em grandes áreas é a falta de equipamentos adequados para a aplicação no campo, pois geralmente são materiais com alto teor de umidade, o que torna a atividade pouco eficiente, onerosa e demorada em relação à adubação mineral.

Dos adubos orgânicos, o esterco animal é considerado o mais importante, e seu principal nutriente é o N. Sua composição química possui outros elementos, como o P e o K. Apesar de ser bastante rico em nutrientes, pelo fato de a concentração dos elementos químicos presentes no adubo ser desbalanceada, o esterco animal deve ser aplicado e complementado por doses adicionais de fertilizantes minerais. A mistura de esterco com adubos fosfatados tem mostrado excelentes resultados, pois, além de ajudar a reter o P no solo, reduz as perdas de N.

Lodo de esgoto

O lodo de esgoto doméstico (LE), em vez do simples descarte em aterros sanitários ou incineração, como também outras aplicações como a conversão em óleo combustível, o reúso industrial e o tratamento no solo (*landfarming*)

Tabela 10.11. Composição química típica de vários materiais orgânicos de origem animal, vegetal e agroindustrial.

Material orgânico	Umidade	C:N	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Cd	Ni	Pb
	(g kg ⁻¹)													
Esterco bovino fresco	620	20	263	13	7	16	5	3	3	87	16	0	5	5
Esterco bovino curtido	340	21	485	23	18	32	30	9	3	329	38	0	3	2
Esterco de galinha	550	10	311	31	18	16	51	11	4	307	31	4	4	38
Esterco de porco	780	9	273	32	9	23	55	14	–	1.100	1.200	0	9	14
Composto de lixo	410	27	271	10	3	5	19	2	3	432	181	3	42	188
Lodo de esgoto (LE)	500	11	258	24	12	3	24	9	3	1.364	659	17	548	545
Composto com LE	335	12	197	16	1	1	4	1	1	942	290	2	32	83
Vinhaça in natura	950	17	200	12	2	60	20	8	10	60	100	–	–	–
Torta de filtro	770	27	348	13	9	3	22	3	13	87	57	–	–	–
Torta de mamona	90	10	495	49	8	12	20	5	–	141	80	–	–	–
Mucuna	870	20	462	23	5	23	15	3	–	46	23	–	–	–
Crotalaria juncea	860	25	500	20	3	21	14	3	–	14	7	–	–	–
Milho resteva	880	45	360	8	2	16	4	2	1	12	3	–	–	–
Aguapé	940	20	333	17	2	17	17	3	3	50	33	–	–	–

Fonte: Adaptado de Cantarella et al., (2022).

(Silva, 1995; Abreu Junior et al., 2005), pode ser aplicado na adubação de cana-de-açúcar, substituindo em 100% a adubação mineral nitrogenada (Franco et al., 2010). Essa aplicação traz muitos benefícios ambientais e ecológicos e pode aumentar a produtividade da cana com redução dos custos de produção.

A produção da cana-de-açúcar nos moldes atuais com o máximo aproveitamento dos resíduos e subprodutos gerados pode alcançar a sustentabilidade. Para isso os nutrientes envolvidos devem apresentar balanço nulo

ou positivo. As possíveis vias de exportação de nutrientes pela cana podem ser elencadas como aqueles presentes nos colmos, que são efetivamente o produto da colheita dessa cultura e variam entre 740 e 1.100 mg t⁻¹ de N; 27 e 62 mg t⁻¹ de P; 820 e 3.000 mg t⁻¹ de K; 89 e 213 mg t⁻¹ de Ca; 109 e 220 mg t⁻¹ de Mg; 116 e 359 mg t⁻¹ de S; 0,9 e 2,1 mg t⁻¹ de Zn; 0,5 e 0,9 mg t⁻¹ de Cu; 19 e 36 mg t⁻¹ de Fe; 8 e 21 mg t⁻¹ de Mn; e 9 e 35 mg t⁻¹ de Al (Orlando Filho, 1978; Primavesi et al., 1992). O LE pode compensar essas perdas.

O LE é um resíduo orgânico resultante do tratamento de águas residuárias nas estações de tratamento de esgotos (ETEs). Assim, a heterogeneidade de sua composição química é função das matérias-primas que o constituem (Silva et al., 2010). O LE proveniente de esgotos domésticos apresenta níveis de Cd, Cu, molibdênio (Mo), Ni, Zn e Pb, além de Mn, Fe, Al, Cr e mercúrio (Hg), entre outros menos frequentes, dentro dos teores permitidos para o uso agrônomo (Abreu Junior et al., 2005, 2008; Bettiol; Camargo, 2006).

A Resolução nº 375 do Conama (Brasil, 2006) determina a forma de condicionamento e utilização segura na agricultura. Sua utilização como fertilizante foi testada nas culturas de soja, milho, arroz, feijão, cana-de-açúcar e outras (Bettiol; Carvalho, 1982; Abreu Junior et al., 2005; Bettiol; Carmargo, 2006; Franco et al., 2010).

Em relação ao uso do LE, Chiba (2005) realizou um estudo no qual aplicou $8,2 \text{ t ha}^{-1}$ de LE (base seca) em cana-planta, juntamente com adubo fosfatado, e 16 t ha^{-1} de LE em cana-soca, em combinação com adubo nitrogenado. O autor verificou que o LE pode substituir até 25% do adubo fosfatado na cana-planta e 100% do adubo nitrogenado na cana-soca.

Em experimento utilizando o LE e fertilizantes minerais na cana-de-açúcar, Marques et al. (2007a) verificaram que a associação do LE com adubo mineral permitiu a economia de metade da adubação mineral recomendada, sem prejuízo à produtividade, à maioria das características químicas do solo e às características tecnológicas da cana-de-açúcar. Como o LE não fornece a quantidade adequada de K à cana-de-açúcar (Marques, 1990; Silva et al., 1996, 1998), uma fonte desse nutriente deve complementar seu uso (Abreu Junior et al., 2008). Para resolver essa questão, Franco (2003) observou que a combinação de LE, como fonte de N, com vinhaça, como fonte de K, foi tão eficiente quanto as

fontes minerais desses dois nutrientes (ureia e KCl) na produtividade e qualidade industrial da cana-planta na variedade SP81-3250.

Tasso Junior et al. (2007) verificaram os melhores resultados em produtividade quando se empregou LE complementado com KCL ($106,6 \text{ t ha}^{-1}$) no segundo corte (primeira cana-soca). Para o terceiro e quarto cortes, Camilotti et al. (2006) não encontraram diferenças na produtividade da cana-de-açúcar adubada com LE + KCL e vinhaça + ureia. Para finalizar, Nogueira et al. (2007) concluíram que, no quinto corte, o LE ou a vinhaça complementada apresentaram desempenhos comparáveis à fertilização mineral.

Em relação às características tecnológicas, Marques (1990), Marques et al. (1994) e Silva et al. (1996, 1998) não verificaram efeito do LE na pureza do caldo, ainda que pequenas diminuições no valor do Brix e da Pol³ possam ter ocorrido.

O potencial poluidor ambiental do LE é fator de restrição na sua utilização agrícola, especialmente por parte dos agricultores, e objeto de preocupação pelos agentes de controle ambiental (Abreu Junior et al., 2005, 2008; Bettiol; Camargo, 2006).

O estudo de doses de LE, variando de 0, 10, 20 e 40 t ha^{-1} (base seca), foi conduzido por Marques et al. (2007b), que observaram aumento nas concentrações de Cr, Ni, Pb e Zn no solo (na linha de plantio e nas entrelinhas), sendo a dose de 40 t ha^{-1} a que promoveu as maiores concentrações de metais-traços. Porém, mesmo na maior dose, os valores encontrados estão abaixo das concentrações máximas permitidas de metais-traços nos solos tratados com LE (Cetesb, 2006). Esse aumento das concentrações no solo não se refletiu nas partes aéreas das plan-

³ Pol é a porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada de peso normal determinada pelo desvio provocado pela solução no plano de vibração da luz polarizada.

tas, mas aparece acumulado nas raízes (Silva et al., 2000). Esse fato é corroborado por Camilotti et al. (2007), que verificaram que doses de LE, após três aplicações anuais sucessivas, não apresentaram potencial de contaminação do sistema solo-cana.

Estudo realizado por Silva et al. (2010) avaliou os efeitos da aplicação do LE no solo, com e sem complementação com adubo mineral NPK. Os autores concluíram que o LE atuou como fertilizante e corretivo de acidez para a cultura de cana-de-açúcar, principalmente como fonte de Ca, P, S e Zn, propiciando melhor perfilhamento e aumento da produtividade agrícola. A produtividade da cana-de-açúcar foi relacionada positivamente com a atividade da fosfatase ácida, refletindo no equilíbrio energético da cana-planta. Além do teor de P no solo, a atividade da fosfatase foi influenciada também pela ação secundária conjunta dos metais Cu, Zn e boro (B).

Franco et al. (2010) aplicaram quatro doses de LE (0, 3,6, 7,2 e 10 t ha⁻¹, base seca), de N (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N, via ureia) e de P (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, via superfosfato triplo) em cana-planta e verificaram que a produtividade de colmos (tonelada de cana por hectare – TCH) aumentou em função das doses de LE, de P e de N. Ainda, com a aplicação isolada de LE, a produtividade passou de 54,14 t ha⁻¹, no tratamento controle, para 105,91 t ha⁻¹, quando 10,8 t ha⁻¹ de LE foi aplicado. A produtividade máxima foi alcançada com a aplicação de 10,8 t ha⁻¹ de LE combinado com 115 kg ha⁻¹ de P₂O₅, via fertilizante fosfatado; nesse caso, o LE propiciou uma redução no uso de adubo fosfatado em relação à dose normalmente recomendada para esse nível de produção. Na cana-soca, os autores avaliaram o efeito residual da aplicação do LE na cana-planta, após adubação N-P-K em área total, e verificaram que a produtividade foi função exclusiva das doses de LE.

Em ensaio conduzido por Franco et al. (2010), os autores verificaram que a maturação e a qualidade tecnológica da cana não foram prejudicadas, medida pelo Brix, Pol (sacarose aparente), pureza, açúcares redutores e açúcares redutores totais na matéria-prima, tanto na cana-planta quanto na cana-soca, sendo o LE aplicado em função da demanda de N. A pesquisa determinou ainda a presença de elementos potencialmente tóxicos em todo o sistema solo-cana, incluindo no caldo da cana, que foi submetido à digestão ácida em sistema de micro-ondas e analisado pelas técnicas de ativação neutrônica (INAA) e de espectrometria de massa com plasma (ICP-MS), que apresentaram as seguintes concentrações médias, em µg kg⁻¹: Ag = 0,2–0,3; As = 1,0–3,3; B = 31–60; Be = 0,4–2,4; Cd = 1,7–14,1; Co = 5,6–16,0; Cr = 12,8–25,4; Cu = 377–610; Eu = 0,3–2,7; Hg = 0,2–4,3; La = 0,5–1,3; Mo = 1,0–4,7; Ni = 26–56; Pb = 18,6–39,5; Sb = 0,3–0,9; Sc = 0,5–1,3; Se = 0,38–0,17; Sm = 0,2–9,4; Th = 0,5–1,4; Tl = 1,9–6,8; V = 4,4–9,3; e, em mg kg⁻¹: Al = 1,9–4,2; Ba = 0,6–1,4; Ca = 86–205; Fe = 5,1–8,0; K = 822–2.239; Mg = 193–316; Mn = 7,6–14; Na = 0,3–1,2; P = 58–165; r = 0,7–2,0; Zn = 1,7–4,3 (Abreu Junior et al., 2008). Com exceção de Co, Mo, selênio (Se) e, principalmente, Cd e Zn, cujas concentrações foram maiores com a aplicação do LE, a concentração dos elementos no caldo não foi modificada pela adição do LE, quando comparada com a fertilização mineral, sendo consideradas normais (Nogueira et al., 2013).

Composto de lixo

A adição de composto de lixo (CL) ao solo aumenta a atividade e a biomassa microbiana e altera a dinâmica dos nutrientes (Abreu Junior et al., 2002). A aplicação de CL no solo aumenta a disponibilidade de matéria orgânica (MO), N, P, K, Ca, Mg e S, eleva o pH e a CTC e reduz a

acidez total ($H^+ + Al^{3+}$) (Mazur et al., 1983; Abreu Junior et al., 2000, 2002; Oliveira et al., 2002a).

Em ensaio com o uso de CL em cana-de-açúcar em campo, num Argissolo-Vermelho eutrófico, com doses de 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de CL combinadas com 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, comparadas com a aplicação de 600 kg ha⁻¹ da fórmula 4-20-20, ou seja, 24 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, Silva et al. (1996, 1998) verificaram aumento da fertilidade do solo em função do CL, com aumentos lineares de P e K no solo e no caldo da cana. A aplicação do CL aumentou a produtividade de colmos também de modo linear em 70, 78, 98 e 103 t ha⁻¹, respectivamente em relação às doses utilizadas; embora o tratamento NPK tenha produzido 121 t ha⁻¹. Verificaram ainda que não houve atraso na maturação da cana-de-açúcar pela aplicação do composto, entretanto a combinação do composto com P e/ou K proporcionou melhor acúmulo de açúcar nos colmos.

Oliveira (2000) avaliou doses de 0, 20, 40 e 60 t ha⁻¹ de CL (composto de lixo em base úmida) na cana-planta. Foi observado uma produ-

tividade crescente da cana de acordo com as doses de CL aplicadas, variando de 35 a 64 t ha⁻¹, chegando a superar o resultado de 54 t ha⁻¹ apresentado pela adubação NPK mineral. No entanto, os resultados de produtividade foram baixos em virtude da baixa disponibilidade de chuva naquele ano agrícola. Já durante o ciclo da cana-soca, tratada com 0, 24, 48 e 72 t ha⁻¹ de CL (t ha⁻¹ de composto em base úmida), o clima apresentou boa distribuição de chuvas. Nesse cenário, não houve diferença entre as doses de de CL e a adubação com NPK mineral. A produtividade foi da ordem de 140 t ha⁻¹ contra 100 t ha⁻¹ no tratamento controle.

Na cana-de-açúcar, a aplicação de CL deve ser feita em uma só dose, em área total ou no sulco de plantio, respeitando as recomendações resultantes da análise de solo e os teores de N, P e K de CL, como são mostrados nas Tabelas 10.12 e 10.13 (Silva et al., 2002b). Outra possibilidade é calcular a dose de CL apenas pela demanda de N pela cultura da cana (90 kg ha⁻¹ de N) (Raj et al., 1997), com base na quantidade de N adicionada pelo composto, considerando-se uma eficiência de aproveitamento de 40 a 50% do nutriente,

Tabela 10.12. Recomendação de uso de composto de lixo urbano na cultura de cana-de-açúcar⁽¹⁾, com base na interpretação dos teores de fósforo (P) e de potássio (K) obtidos pela análise química de solo e na composição do composto de lixo para o estado de São Paulo.

Composição do composto de lixo		P resina (mg dm ⁻³)				K ⁺ trocável (mmol _e dm ⁻³)		
		0-6	7-15	16-40	> 40	0-1,5	1,6-3,0	> 3,0
Nutriente	(%)	Dose de composto (t ha ⁻¹)						
P	> 0,6	15	10 ^(*)	5 ^(*)	-	-	-	-
	0,2 a 0,6	30	20	15	10 ^(*)	-	-	-
	< 0,2	50	35	25	10 ^(*)	-	-	-
K	> 1,2	-	-	-	-	15	10 ^(*)	5 ^(*)
	0,4 a 1,2	-	-	-	-	20	15	10 ^(*)
	< 0,4	-	-	-	-	50	30	20

^(*) Para doses de composto de 10 t ha⁻¹ ou menos, o efeito do composto se deve mais ao fornecimento de matéria orgânica e não mais ao suprimento de P e K.

⁽¹⁾ Produtividade esperada de 80 a 120 t ha⁻¹.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2002b).

Tabela 10.13. Recomendação de adubação para cana-de-açúcar com base no teor de nitrogênio do composto de lixo.

Teor de nitrogênio no composto de lixo (%)	Dose de composto (t ha ⁻¹)
> 3,5	20
1,8 a 3,5	30
< 1,8	45

Fonte: Silva et al. (2002b).

ou seja, o teor de N-total do composto multiplicado pelo fator de 0,4 a 0,5.

Silva et al. (2002b) afirmam que, para a cana-soca, é o P que deve apresentar maior resposta ao CL, enquanto a menor resposta deve-se ao K contido no material. A aplicação de CL normalmente é de 60 t ha⁻¹ quando aplicado sem suplementação de P ou 30 t ha⁻¹ com adição da metade da dose de P recomendada para a cultura da cana.

Existem observações que mostram que o CL incrementou a produtividade da cana mesmo em área já adubada com NPK mineral, já que promove a retenção de água, em função da matéria orgânica adicionada ao solo e dos micronutrientes presentes (Kiehl, 1985).

O uso de CL no solo preocupa pela alta mobilidade do nitrato, uma vez que doses elevadas desse íon podem causar eutrofização de águas superficiais (lagos, rios e nascentes) e ainda contaminação de águas subterrâneas (Abreu Junior et al., 2008).

O trabalho de Oliveira (2000), que aplicou em área total as doses de 20, 40 e 60 t ha⁻¹ de composto, base seca, na cana-de-açúcar, corrobora essa preocupação, pois verificou aumento na concentração de N-NO⁻³ na solução do solo a 0,3, 0,6 e 0,9 m de profundidade. Nas doses de 40 e 60 t ha⁻¹ de CL, o teor do nitrato na profundidade de 0,9 m apresentou concentrações de 10,51 a 20,93 mg L⁻¹ e 24,31 a 46,25 mg L⁻¹,

respectivamente, acima do limite máximo considerado para potabilidade da água, que é estabelecido pela Organização Mundial de Saúde (10 mg L⁻¹). Por sua vez, doses anuais de até 24 t ha⁻¹ de CL não ofereceram riscos de contaminação de aquíferos. Portanto, os riscos de contaminação de aquíferos por N-NO⁻³ devem ser considerados no planejamento de aplicações de CL em áreas agrícolas, sendo essencial o monitoramento do solo e de sua solução em profundidade para evitar riscos à qualidade das águas subterrâneas.

Em outro experimento, Oliveira et al. (2002b) avaliaram aplicações sucessivas de CL sobre a movimentação, em profundidade, dos metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em um Latossolo Amarelo distrófico. Como resultado, não observaram evidências de movimentação dos metais ao longo do perfil do solo, exceto para o Zn, que apresentou mobilidade no solo, e verificaram que, ao final do ciclo da cana-soca, houve aumentos significativos desse elemento químico até a camada de 0,4 m a 0,6 m de profundidade.

Rossetto et al. (2002) utilizaram doses de 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ (base seca), com quatro doses de N (0, 25, 50 e 75 kg ha⁻¹) e quatro doses de superfosfato triplo (0, 28, 56 e 112 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Os resultados apontaram que o nitrogênio isoladamente não teve efeito na produtividade, mas as doses de composto e de superfosfato tiveram efeitos linear e quadráticos, respectivamente, sobre a produtividade. Por meio de modelo matemático, os autores estimaram que a produtividade máxima foi obtida com a aplicação de 35 t ha⁻¹ do composto, combinado com 56 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Silva et al. (2002a) estudaram o efeito complementar do CL na adubação NPK mineral com 500 kg ha⁻¹ de 4-20-20 (24 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente), em que foram aplicados 30 t ha⁻¹ de CL suprimindo a metade do P requerido pela

cultura, na produção da cana-planta, variedade RB72454. As doses de CL testadas corresponderam a 10, 20, 30, 40 e 50 t ha⁻¹. Os autores não verificaram alteração na maturação da cana-de-açúcar até a dose de 30 t ha⁻¹ de CL e observaram que a produtividade de colmos aumentou linearmente com as doses de CL de até 50 t ha⁻¹. O melhor resultado foi a aplicação do adubo NPK + 50 t ha⁻¹ do composto, o que refletiu na maior produtividade de açúcar por hectare.

Considerações finais

São inúmeros os produtos e subprodutos gerados na agroindústria da cana-de-açúcar, dados robustos mostram forte tendência de maior utilização dos subprodutos com efeitos na sustentabilidade ambiental e da cultura, bem como na redução dos custos de produção. Além disso, são enormes os desafios e a demanda por novos usos para os subprodutos da cana que poderão atender a própria cultura e outras também.

A utilização de resíduos e efluentes em solo cultivado com cana-de-açúcar deve ser conduzida não somente para eliminar a sua nocividade, mas também para tornar atraente o seu uso, isto é, agregar valor ao produto, quer como fonte de nutrientes para a cultura quer como condicionador do solo.

De modo geral, a aplicação de resíduos e efluentes no solo abre perspectivas de estudos bastante amplos, especialmente em relação a subprodutos externos à agroindústria canavieira e sua utilização em condições tropicais.

Referências

- ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. de C. Uso agrícola de resíduos orgânicos: propriedades químicas do solo e produção vegetal. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. da; CARDOSO, E. J. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 391-470.
- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F.; ALVAREZ V., F. C. Condutividade elétrica, reação do solo e acidez potencial em solos adubados com composto lixo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 635-647, set. 2000. DOI: [10.1590/S0100-06832000000300016](https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000300016).
- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Carbono orgânico, nitrogênio, fósforo e enxofre em solos tratados com composto de lixo urbano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 769-780, set. 2002. DOI: [10.1590/S0100-06832002000300022](https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300022).
- ABREU JUNIOR, C. H.; NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, F. C.; PIRES, A. M. M.; FRANCO, A. Aproveitamento agrícola de resíduos no canavial. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; NOGUEIRA, T. A. R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; BERNARDI, J. H. (ed.). **Tecnologias na agroindústria canavieira**. Jaboticabal: FCAV, 2008. p. 184-210.
- ALBERS, M. Concentração de vinhaça: tecnologias, equipamentos, e sua integração energética numa destilaria. **Anais...** Jaboticabal: Ed. da Unesp, 2007.
- ALBUQUERQUE, G. A. C.; MARINHO, M. L. Influência da torta de filtro sobre a adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, v. 93, n. 1, p. 38-43, 1979.
- ALMEIDA, J. R. de. **O problema da vinhaça em São Paulo**. Piracicaba: Instituto Zimotécnico, 1953. 24 p. (Instituto Zimotécnico, 3).
- ALMEIDA, J. R. de; RANZANI, G.; VALSECHI, O. **A vinhaça na agricultura**. Piracicaba: Instituto Zimotécnico, 1950. 21 p. (Instituto Zimotécnico, 1).
- ALMEIDA, M. de. (coord.). **Vinhaça: principais técnicas de utilização**. **Piracicaba Engenharia Sucoalcooleira**, 22 nov. 2015. Disponível em: <http://piracicabaengenharia.com.br/vinhaca-principais-tecnicas-de-utilizacao>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- ALVES, P. R. L. **Avaliação ecotoxicológica da vinhaça de cana-de-açúcar no solo**. 2015. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X.; LEAL, J. R.; ROSSIELLO, R. O. P. Desnitificação e imobilização de nitrogênio em solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 263-268, 1983.
- ARRIGONI, M. B.; SILVEIRA, A. C.; FURLAN, L. R.; PARRÉ, C.; COSTA, C.; CURI, P.R. Avaliação de vinhaça líquida em substituição a água em terminação de bovinos em confinamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n.3, p. 1333-1340, 1993.
- ASSAN, M. A. C. **Avaliação do desempenho de um reator biológico de discos rotativos (biodisco) no tratamento de efluentes da indústria sucoalcooleira**. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia

Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos: classificação. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

AZEREDO, D. F.; ROBAINA, A. A.; LAVORENTI, N. A. Correlação ente algumas características de solo e resposta da cana soca à aplicação de vinhaça. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 3., 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Stab, 1984. p. 36-39.

BARBOSA, V. Novas tecnologias no uso da vinhaça e aspectos legais. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; AZANIA, A. A. de P. M.; TASSO JUNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. de A.; VALE, D. W. do (org.). **Tópicos em tecnologia sucroalcooleira**. Jaboticabal: Multipress, 2006. p. 141-150.

BARBOSA, V.; DURIGAN, A. M. P. R.; GLÓRIA, N. A. da; MUTTON, M. A. Uso de vinhaça 18 concentrada na adubação de soqueira de cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 24, n. 6, p. 26-31, jul./ago. 2006.

BARROS, R. P.; ALMEIDA, P. R. V.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M. L. B.; VIÉGAS, R. A.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.

BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, G. B.; OLIVEIRA, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 781-787, 2009.

BERTONCINI, E. I. Geração de resíduos da indústria da cana-de-açúcar. In: WORKSHOP ASPECTOS AMBIENTAIS DA CADEIA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR, 4., 2007, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2007. 1 CD-ROM.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349 p.

BETTIOL, W.; CARVALHO, P. C. T. Utilização de lodo de esgoto primário e fertilizantes organo-mineral IPT na cultura de milho. **Fertilizantes**, v. 4, n. 1, p. 14-5, 1982.

BIASE, L. P. de. Aspectos gerais da concentração das vinhaças. In: WORKSHOP DE GESTÃO DE ENERGIA E RESÍDUOS NA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA, 2., 2007, Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, 2007.

BOLSANELLO, J.; VIEIRA, J. R. Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça da

região de Campos-RJ. **Brasil Açucareiro**, v. 96, n. 5, p. 45-59, 1980.

BOSCARIOL, F. C. **Dedini concentração de vinhaça**: vaporização tipo névoa turbulenta. Disponível em: www.dedini.com.br. Acesso em: 10 maio 2011.

BOTELHO, R. G. **Avaliação da qualidade da água do rio Piracicaba (SP) e efeito da vinhaça para os organismos aquáticos antes e após a correção do pH**. 2013. Tese (Doutorado em Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba. DOI: 10.11606/T.64.2013.tde-24092013-161649. Acesso em: 24 mar. 2023.

BRASIL SOBRINHO, M. de O. C. do. **Estudos sobre o aproveitamento da torta de filtro de usina de açúcar como fertilizante**. 1958. 109 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 30 ago. 2006.

BRAUNBECK, O. A.; CORTEZ, L. A. B. O cultivo da cana-de-açúcar e o uso dos resíduos. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (org.). **Uso de biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Ed. da Unicamp, 2005. p. 215-246.

BUZOLIN, P. R. S. **Efeitos da palha residual da colheita mecanizada, associada a fontes de potássio e doses de nitrogênio, no solo e nas socas de cana-de-açúcar**. 1997. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal.

CAMARGO, O. A. de; BERTON, R. S.; GERALDI, R. N.; VALADARES, J. M. A. da S. Alterações de características químicas de um Latossolo Roxo distrófico incubado com resíduos da indústria álcool açucareira. **Bragantia**, v. 43, n. 1, p. 125-139, 1984. DOI: [10.1590/S0006-87051984000100011](https://doi.org/10.1590/S0006-87051984000100011).

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M. O.; SILVA, A. R. da; TASSO JUNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. de; NOGUEIRA, G. de A.; PRATI, F. Produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar cultivada com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 24, n. 3, p. 32-35, jan./fev. 2006.

CAMILOTTI, F.; MARQUES, M. O.; ANDRIOLI, I.; SILVA, A. R. da; TASSO JUNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. de. Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia**

Agrícola, v. 27, n. 1, p. 284-293, 2007. DOI: [10.1590/S0100-69162007000100023](https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100023).

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 3. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. 489 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

CASTRO, L. J. P. de; GODOY, O. P. Uso da torta de filtro no sulco de plantio da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **Brasil Açucareiro**, v. 94B, n. 5, p. 66-76, nov. 1979.

CASTRO, P. R. C.; VIEIRA, E. L. Biorreguladores e bioestimulantes na cultura do milho. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (ed.). **Milho: estratégias para alta produtividade**. Piracicaba: Esalq/USP, 2003. p. 99-115.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Biomass power generation: sugarcane bagasse and trash**. Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br>. Acesso em: 15 ago. 2022.

CETESB. **Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo, 2006. 12 p. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/P4_231.pdf. Acesso em: 6 jan. 2022.

CHIBA, M. K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**. 2005. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

CÓ JÚNIOR, C.; MARQUES, M. O.; TASSO JÚNIOR, L. C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 196-203, 2008. DOI: [10.1590/S0100-69162008000100020](https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100020).

COLETTI, J. T.; BITTENCOURT, V. C.; GIACOMINI, G. M. Torta de filtro rotativo em combinação com diferentes formas de fósforo, com vistas à substituição da torta de mamona e de fosfatos solúveis em água, na fertilização da cana planta. **Brasil Açucareiro**, v. 96, p. 16-27, 1980.

COLETTI, J. T.; DEMATTÊ, J. L. I.; GASPARINI, C. T.; LORENZETTI, J. M. Efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas dos solos da usina São José, Macatuba/SP. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., 1981. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Stab, 1981. p. 153-164.

COPERSUCAR (São Paulo). **Aproveitamento da vinhaça: viabilidade técnica econômica**. São Paulo, 1979. 66 p.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FARBAIM, E. de M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar

para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009. DOI: [10.1590/S0100-40422009000100016](https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100016).

CORTEZ, L. A. B.; BRITO CRUZ, C. H. de; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H.; SLUYS, M. van; MACIEL FILHO, R. (org.). **Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. São Paulo: Blucher, 2016. 224 p.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPP, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v. 2, n. 2, p. 1-17, 1992.

DEDINI. Processo para produção de fertilizante ogônio-mineral. Int. C05F5/00, C05G1/00. BR n. PI0801794-8. **Revista da Propriedade Industrial**, n. 2485, p. 837/950, ago. 2018.

DEDINI. **Relatório interno**. Piracicaba, 2009. 60 p.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A. Usos e reusos de água e geração de efluentes. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroalcooleira**. Brasília, DF: ANA, 2009. p. 69-180.

EMPRESA PERNAMBUCANA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Comissão Estadual de Fertilidade do Solo. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação**, Recife, 1998. 198 p.

FLOSS, E. L.; FLOSS, L. G. Fertilizantes organominerais de última geração: funções fisiológicas e uso na agricultura. **Revista Plantio Direto**, v. 16, n. 100, p. 26-29, 2007.

FRANCO, A. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

FRANCO, A.; ABREU JUNIOR, C. H.; PERECIN, D.; OLIVEIRA, F. C.; GRANJA, A. C. R.; BRAGA, V. S. Sewage sludge as nitrogen and phosphorus source for cane-plant and first ratoon crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 553-561, 2010. DOI: [10.1590/S0100-06832010000200029](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200029).

FRANCO, M. **Integração energética de sistemas de evaporação localizados abaixo do ponto pinch**. 2001. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p. (Série engenharia agrícola).

FREITAS, S. S.; CARDOSO, C. O. N.; CAMARGO, O. A.; LOPES, E. S. Mineralização e imobilização de nitrogênio em solo

- tratado com torta de filtro e carbonato de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 243-248, 1988.
- GLÓRIA, N. A. **Emprego da vinhaça para fertilização**. Piracicaba: Codistil, 1976. 31 p.
- GLÓRIA, N. A.; MAGRO, J. A. Utilização agrícola de resíduos da usina de açúcar e destilaria na Usina da Pedra. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DA AGROINDÚSTRIA AÇUCAREIRA, 4., Águas de Lindóia. **Anais...** São Paulo: Copersucar, 1977. p. 163-180.
- GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.
- GLÓRIA, N. A.; SANTA ANA, A. G.; BIAGI, E. Composição dos resíduos de usina de açúcar e destilados. **Brasil Açucareiro**. v. 81, n. 6, p. 78-87. 1973.
- GORNI, M.; BERTO, D. A.; MOURA, M. P. de; CAMARGO, J. C. de M. Utilização da vinhaça concentrada na alimentação de suínos em crescimento e terminação. **Boletim de Indústria Animal**, v. 44, n. 2, p. 271-279, 1987.
- GURGEL, M. N. A. A Usina Dedini para produção de BIOFOM - biofertilizante organomineral. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL E MOSTRA DE TECNOLOGIA DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA, 2009. Piracicaba. [Anais...]. Piracicaba: Simtec, 2009a.
- GURGEL, M. N. A. **Relatório interno da Divisão de Engenharia de Tecnologias**. Piracicaba: Dedini, 2009b.
- GURGEL, M. N. A. **Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado**. 2012. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- HIDALGO, K.; RODRÍGUEZ, B.; LÓPEZ, M.; IBEN, C.; ALBELO, A.; CÁRDENAS, M. **Vinhaça de destilaria como aditivo alternativo na alimentação de aves**. 2011. Disponível em: <https://pt.engormix.com/avicultura/artigos/vinhaça-alimentacao-aves-t37289.htm>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985. 492 p.
- LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O.; SCHIAVINATO JÚNIOR, P.; BOARETTO, A. E. Perdas gasosas de nitrogênio de vinhaça e ureia em solos cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, n. 3, p. 463-469, 1994.
- LEAL, J. R.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X.; ROSSIELLO, R. O. P. Potencial redox e pH: variações em um solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, n. 3, p. 257-261, 1983.
- MARQUES, M. O. **Efeitos da aplicação de lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. 1990. 164 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MARQUES, M. O.; BELLINGIERI, P. A.; MARQUES, T. A.; NOGUEIRA, T. A. R. Qualidade e produtividade da cana-de-açúcar cultivada em solo com doses crescentes de lodo de esgoto. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, p. 111-122, Apr./June 2007a.
- MARQUES, M. O.; BELLINGIERI, P. A.; MELO, W. J.; OLIVEIRA, F. C.; FREITAS, J. C.; SANTIAGO, G. Avaliação agroindustrial de cana-de-açúcar cultivada em solo acrescido de lodo de esgoto. In: REUNIÃO BRASILEIRA E FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., 1994, Petrolina. **Anais...** Petrolina: Embrapa-Cpatsa: SBCS, 1994. p. 335-336.
- MARQUES, M. O.; NOGUEIRA, T. A. R.; FONSECA, I. M.; MARQUES, T. A. Teores de Cr, Ni, Pb e Zn em Argissolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 1, p. 133-143, 2007b.
- MARTINS, M. de E. **Atributos de um latossolo sob aplicação de vinhaça e cultivo de cana-de-açúcar**. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Cuiabá.
- MATTIAZZO, M. E.; GLÓRIA, M. A. Efeito da vinhaça na acidez do solo. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 4, n. 2, p. 35-40, 1985.
- MAZUR, N.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A. Efeito do composto de resíduo urbano no pH e alumínio trocável em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 157-159, 1983.
- MEDEIROS, A. P. Composição química dos diferentes tipos de vinhaça nos Estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Saccharum**, v. 4, n. 12, p. 36-40, 1981.
- MINHONI, M. T. A.; CERRI, C. C. Decomposição de vinhaça em solo sob diferentes níveis de umidade: Liberação de CO₂, formação de biomassa microbiana e imobilização do nitrogênio adicionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 1, p. 25-30, 1987.
- MINHONI, M. T. A.; EIRA, A. F.; CARDOSO, E. J. B. N. Efeitos da adição de N e P sobre a decomposição de diferentes tipos de material orgânico no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 297-304, 1990.
- MIRANDA, T. L.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, E. F. F.; ROLIM, M. M. Alterações físicas e biológicas em solo cultivado com cana-de-açúcar após colheita e aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 150-158, 2012.

- NARDIN, R. R. **Torta de filtro aplicada em argissolo e seus efeitos agrônômicos em duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em duas épocas.** 2007. 39 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas.
- NEVES, M. C. P.; LIMA, I. T.; DÖBEREINER, J. Efeito da vinhaça sobre a microflora do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 131-136, 1983.
- NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 114, n. 15, p. 168-177, 2013. DOI: [10.1016/j.jenvman.2012.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.09.012).
- NOGUEIRA, T. A. R.; MARQUES, M. O.; FONSECA, I. M.; MENDONÇA, L. Q. H. de. Nutrientes em cana-de-açúcar de 5º corte cultivada em solo tratado com lodo de esgoto e vinhaça por quatro anos consecutivos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 2, p. 7-19, 2007.
- NUNES, M. R.; VELLOSO, A. C. X.; LEAL, J. R. Efeito da vinhaça nos cátions trocáveis e outros elementos químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 16, n. 2, p. 171-176, 20 mar. 1981.
- OBSERVATÓRIO da cana. 2020. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/#>. Acesso em: 21 fev. 2022.
- OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num latossolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar.** 2000. 246 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ABREU JUNIOR, C. H. Alterações em atributos químicos de um Latossolo pela aplicação de composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 529-538, 2002a. DOI: [10.1590/S0100-204X2002000400015](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000400015).
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ABREU JUNIOR, C. H. Movimentação de metais pesados em Latossolo adubado com composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1787-1793, 2002b. DOI: [10.1590/S0100-204X2002001200016](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001200016).
- OLIVEIRA, M. de. Mais que sustentável. **Revista Pesquisa Fapesp**, edição 151, set. 2008. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/mais-que-sustentavel>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- OLIVÉRIO, J. L.; BOSCARIOL, F. C. Expansion of the Sucrenergy industry and the New Greenfield Projects in Brazil from the view of the equipment industry”. **Proceedings of XXVIII ISSCT – International Society of Sugar Cane Technologists Congress**, São Paulo, 24 a 27 de junho de 2013.
- OLIVÉRIO, J. L.; BOSCARIOL, F. C.; MANTELATTO, P. E.; CÉSAR, A. R. P.; CIAMBELLI, J. R. P.; GURGEL, M. N. do A.; SOUZA, R. T. G. de. Integrated production of organomineral biofertilizer (BIOFOM®) using by-products from the sugar and ethanol agro-industry, associated with the cogeneration of energy. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 27, p. 1-9, 2010b.
- OLIVÉRIO, J. L.; BOSCARIOL, F.; PEREIRA CÉSAR, A. R.; GURGEL, M. N. A.; MANTELATTO, P. E.; YAMAKAWA, C. K. Water production plant. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 27, p. 1-6, 2010a.
- OLIVÉRIO, J. L.; CARMO, V. B.; GURGEL, M. N. A. The DSM – Dedini Sustainable Mill: a new concept in designing complete sugarcane mills. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technology**, v. 27, p. 1-32, 2010c.
- ORLANDO FILHO, J. **Absorção dos macronutrientes pela cana-de-açúcar (Saccharum spp.) variedade CB41-76, em três grandes grupos de solos no Estado de São Paulo.** 1978. 154 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G. M. A.; LEME, E. J. A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil.** Piracicaba: Planalsucar, 1983. p. 229-264.
- PAN, Y. C.; EOW, K. L.; LING, S. H. The effect of bagasse furnace ash on the growth of plant cane. **Sugar Journal**, v. 42, n. 7, p. 14-16, 1979.
- PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência.** Itu: Ottoni editora, 2013. 347 p.
- PEREIRA, L. R. **Dinâmica do nitrogênio amídico (15N-uréia) e amoniacal (15N-aquamônia) no solo aplicado conjuntamente com o co-produto do ácido glutâmico (Ajifer).** 2008. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- PIACENTE, F. J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.** 2005. 177 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PINEDA, F. A. Filder mud and bagasse ash as a profitable fertilizer. **Sugar y Azucar**, v. 51, n. 14, p. 44-45, 1956.

PLANALSUCAR. **Relatório anual da seção de solos e adubação**. Rio Largo, 1980. 78 p.

PRIMAVESI, O.; KORNDÖRFER, G. H.; DEUBER, R. Extração de minerais por colmos de cinco variedades de cana-planta em três solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBSC, 1992. p. 160-161.

PURCHASE, B. S. Disposal of liquid effluents from cane sugar factories. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 22, p. 49-54, 1995.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo: Fundag, 1997. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).

RAMALHO, J. F. G. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. do. Metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso de resíduos agroindustriais. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 120-129, jan./dez. 2001.

RANZANI, G. Consequências da aplicação do restilo ao solo (I). **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, v. 12-13, p. 57-67, 1956. DOI: 10.1590/S0071-12761956000100013.

RODRIGUES, R. Bagaço e álcool. **Revista Agroanalysis**, v. 21, n. 12, p. 66, dez. 2001.

ROSENFELD, U.; BAPTISTELLA, J. R.; LEME, E. J. A. Aplicação de vinhaça por aspersão em Latossolo Roxo. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., Rio de Janeiro, 1981. **Anais...** Rio de Janeiro: Stab, 1981. p. 235-248.

ROSSETTO, A. J. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987, v. 2. p. 435-504.

ROSSETTO, A. J.; MEDEIROS, A. M. L.; RESENDE, L. C. L.; MILLER, L. C. Companhia industrial e agrícola São João – subprodutos da indústria canavieira. **Saccharum STAB**, v. 7, p. 45-54, 1984.

ROSSETTO, A. J.; RESENDE, L. C. L.; ALONSO, J. C.; BUSSIOLY FILHO, S.; MARQUERON, L. N.; ALTENFELDER SILVA, J.; MILLER, L. C. Sistemas de distribuição de vinhaça na usina São João. **Saccharum STAB**, v. 1, n. 3, p. 37-47, 1978.

ROSSETTO, R. Aspectos ambientais do uso da vinhaça. In: SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE CANA-DE-AÇÚCAR, 10., 2006, Recife. **Anais...** Recife: Stab, 2006. 1 CD-ROM.

ROSSETTO, R.; BERTON, R. S.; LANDELL, M. G. A.; MATTIAZO, M. E. Produtividade e nutrientes na cana-de-açúcar em solo tratado com composto de Lixo Urbano. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 20, p. 28-31, 2002.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Adubação: resíduos alternativos**. 2006. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-açúcar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html. Acesso em: 23 jul. 2021.

ROSSI, M. F.; RIOS, R. P. A importância da contabilidade ambiental na evidencição de investimentos sustentáveis. **Revista Eletrônica Gestão e Negócios**, v. 5, n. 1, 2014.

SAGARRA, A. F. Bagaço: composição, conservação, armazenamento e aproveitamento industrial. In: SEMANA DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA, 3., 1966, Piracicaba. **Fermentação do mel final das usinas de açúcar**. Piracicaba: Instituto Zimotécnico, 1966. p. 280-294.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Coordenadoria de Licenciamento Ambiental e de Proteção de Recursos Naturais. **Súmula de Parecer Técnico CPRN/DAIA/166/08**. 2008. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/consema/2011/11/oficio_consema_2008_094/Sumula_do_Parecer_Tecnico_CPRN_DAIA_166-2008.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.

SENGIK, E.; RIBEIRO, A. C.; CONDÉ, A. R. Efeito da vinhaça em algumas propriedades de amostras de dois solos de Viçosa (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, n. 12, p. 11-15, 1988.

SILVA, A. F. S.; SILVA, F. C.; CESAR, M. A. A.; BERGAMASCO, A. F. Avaliação do efeito complementar da aplicação de composto de lixo em área adubada com fertilizantes NPK em cana-planta. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002a, Recife. **Anais...** Recife: Stab, 2002. p. 288-293.

SILVA, F. C. da. **Uso agrônômico de lodo de esgoto: efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar**. 1995. 160 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SILVA, F. C.; BERTON, R. S.; CHITOLINA, J. C.; BALLESTERO, S. D. **Recomendações técnicas para o uso agrícola do composto de lixo urbano no Estado de São Paulo**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002b. 17 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Circular técnica, 3).

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; ABREU JUNIOR, C. H.; BERTON, R. S.; BASSO, L. C.; BARBIERI, V. Impactos da aplicação de lodo de esgoto na cultura da cana-de-

- açúcar e no ambiente. **Holos Environment**, v. 10, n. 1, p. 62-82, 2010. DOI: [10.14295/holos.v10i1.4233](https://doi.org/10.14295/holos.v10i1.4233).
- SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEIXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 1-8, jan. 1998.
- SILVA, F. C.; FANTE JUNIOR, L.; PILOTTO, J. E.; RODRIGUES, J. A.; BOARETTO, A. E.; OLIVEIRA, J. C. M. de; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B. Evaluating the residual effects of sludge in root distribution and heavy metals in sugar cane crop. **International Sugar Journal**, v. 102, n. 1220, p. 424-430, 2000.
- SILVA, F. C.; FANTE JÚNIOR, L.; RODRIGUES, J. A.; PILOTTO, J. E.; BOARETTO, A. E.; OLIVEIRA, J. C. M.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B. Efeitos do lodo de esgoto na distribuição radicular e nos teores de metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Biociências**, v. 2, n. 2, p. 125-139, 1996.
- SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007a.
- SOUSA, S. A. V. de. Métodos de utilização e aplicação de vinhaça. In: WORKSHOP TECNOLÓGICO SOBRE VINHAÇA, 2007, Jaboticabal. [Anais...]. Jaboticabal: Unesp, 2007.
- SPEECE, R. E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. **Environmental Science & Technology**, v. 17, n. 9, p. A416-A427, 1983. DOI: [10.1021/es00115a725](https://doi.org/10.1021/es00115a725).
- STAFFORD, D. A. Anaerobic fermentation. **Journal of Society Dairy Technology**, v. 45, n. 3, p. 84-89, Aug. 1992.
- STUPIELLO, J. P. A cana-de-açúcar como matéria prima. In: PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 761-804.
- TASSO JÚNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; FRANCO, A.; NOGUEIRA, G. de A.; NOBILE, F. O. de; CAMILOTTI, F.; SILVA A. R. da. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 276-283, Apr. 2007. DOI: [10.1590/S0100-69162007000100022](https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100022).
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (São Paulo). **Produção e uso do etanol combustível no Brasil: respostas às questões mais frequentes**. São Paulo: Unica, 2007. 68 p.
- VASCONCELOS, J. N. de; OLIVEIRA, C. G. de. Composição química dos diferentes tipos de vinhaça das destilarias de álcool de Alagoas - safra 1978/79. **Saccharum STAB**, v. 4, n. 14, p. 32-36, 1981.
- WALDHEIM, L.; MORRIS, M.; LEAL, R. L. V. Biomass power generation: sugarcane and trash. In: BRIDGWATER, A. V. (ed.). **Progress in thermochemical biomass conversion**. Oxford: Blackwell, 2001. p. 509-523. DOI: [10.1002/9780470694954.ch41](https://doi.org/10.1002/9780470694954.ch41).
- WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 63-102, 2000. DOI: [10.1016/S0961-9534\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00017-9).
- WWF. Disponível em: http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/%20%20em%2023/03/2023. Acesso em: 17 jan. 2024.
- ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Utilização de resíduos da agroindústria, como complemento à adubação mineral da cana-de-açúcar. **Brasil açucareiro**, v. 95, p. 74-81, 1982.

Apêndice A

Redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) no ciclo de vida de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar com a implantação da Usina Sustentável Dedini (USD)

Este texto apresenta um balanço das emissões de CO₂ do ciclo de vida de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, considerando uma usina padrão usual como referência, para comparação das emissões evitadas com a implantação das novas tecnologias da Usina Sustentável Dedini (USD).

A metodologia adotada considerou, como referência, uma usina padrão, conforme Macedo e Seabra (2008)¹.

Como resultados, são apresentados cinco estágios de evolução, conforme a introdução de nova tecnologia, partindo-se do aumento da produtividade, uso de sistema mais eficiente de geração de excedente de energia elétrica, uso de 50% de palha como energético, uso de biofertilizante, uso de biodiesel (5% nos caminhões e 30% nos tratores), uso de 100% de palha como energético e substituição de 100% do diesel utilizado na usina por biodiesel.

Para cada estágio/ inovação, apresentam-se as emissões geradas, as emissões evitadas, o balanço líquido de emissões e a relação de comparação com as emissões geradas pela gasolina. Como metodologia, foram adotados os critérios usados por Macedo e Seabra (2008), conside-

rando quatro grupos no ciclo de vida de emissões do etanol:

Grupo 1 – Fluxos de carbono associados com absorção do carbono atmosférico e sua gradual liberação por oxidação. São considerados para este grupo os seguintes itens: absorção de carbono atmosférico (fotossíntese); liberação de carbono durante a queimada da cana (cerca de 80% das pontas e folhas, com eficiência de aproximadamente 90%); oxidação de resíduos não queimados no campo; liberação do CO₂ na fermentação da sacarose (etanol); liberação de CO₂ pela combustão do bagaço (usina ou outras indústrias); liberação de CO₂ pela combustão do etanol em motores de automóveis. Esses fluxos de emissões são considerados praticamente “neutros”, no total, exceto pelo aumento do teor de carbono no solo.

Grupo 2 – Fluxos de carbono associados com o uso de combustíveis e na produção de todos os insumos usados na agricultura e na indústria; também na fabricação de bens de capital usados na agricultura e na indústria, na fabricação de equipamentos, prédios, instalações e manutenção, sendo considerados: liberação de CO₂ no uso de combustíveis fósseis na agricultura (inclusive transportes); liberação de CO₂ devido ao uso de combustíveis fósseis na produção de insumos agrícolas (mudas, herbicidas, fertilizantes, etc.); liberação de CO₂ devido ao uso de combustíveis fósseis na produção de equipamento agrícola e na sua manutenção; liberação de CO₂ no uso de combustíveis fósseis na fabricação de equipamentos, construção de prédios e manutenção na área industrial. Esses fluxos são negativos (aumentam o CO₂ atmosférico).

Grupo 3 – Fluxos de gases de efeito estufa (GEEs) não associados com o uso de combustíveis fósseis são principalmente N₂O e CH₄. Foram considerados: liberação de outros GEEs (não CO₂) no processo de queima de cana; liberação de N₂O do solo, a partir do uso de fertilizantes;

¹ MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A. Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: ZUURBIER, P.; VOORE, J. van de. (ed.). **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment.** The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2008. p. 95-111.

liberação de outros GEEs (CO_2) na combustão de bagaço nas caldeiras; liberação de outros GEEs (não CO_2) na combustão de etanol nos motores. Esses fluxos também são negativos (aumentam o CO_2 atmosférico).

Grupo 4 – Este grupo inclui as emissões evitadas com o aumento da produtividade do uso do etanol na substituição de gasolina; emissões evitadas de GEEs na substituição de óleo combustível pelo bagaço para geração de energia excedente, na substituição de diesel por biodiesel produzido na própria usina e na substituição de fertilizantes minerais por fertilizantes organominerais (Biofom). São avaliadas as emissões dos grupos 2, 3 e 4; para o grupo 1, o balanço líquido é zero. Também se observa que as emissões dos grupos 2 e 3 são cerca de dez vezes menores que as do grupo 4, sendo normal para sistemas totalmente baseados em biomassa. Portanto, para o balanço de emissões teremos os seguintes itens:

- a) Emissões geradas: combustíveis fósseis, CH_4 e N_2O da queima da palha, N_2O do solo.
- b) Emissões evitadas: uso de bagaço excedente, uso do etanol, substituição do diesel pelo biodiesel, substituição do fertilizante mineral pelo fertilizante organomineral (Biofom).
- c) Emissões evitadas líquidas: é a diferença entre as emissões geradas e as emissões evitadas no ciclo, sendo, então, comparadas com as emissões geradas pela gasolina.

Para a realização da comparação dos balanços de emissões de GEEs, foram estudadas as seguintes etapas: 1) Produção de cana-de-açúcar; 2) Processamento da cana-de-açúcar; 3) Distribuição do etanol; 4) Uso do etanol. Em cada etapa, foram considerados os itens de consumo de combustível fóssil e as devidas emissões (geradas ou evitadas) em quilograma de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro produzido. Os dados básicos considerados na referência de Macedo

e Seabra (2008) foram obtidos a partir de parâmetros de performance do levantamento feito pelo Centro de Tecnologia Canavieira, referentes às safras 2005/2006 e 2006/2007 em 44 usinas associadas. Essas usinas estão localizadas na região Centro-Sul do Brasil, a qual é responsável por 90% do etanol produzido no País.

Os resultados são apresentados por meio da comparação com as emissões da gasolina, ou seja, 2.280 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro. A usina de referência apresentou uma emissão líquida de 260 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, evitando 88% das emissões comparadas com as da gasolina.

Com a introdução de novas tecnologias para aumentar a produtividade, passando de 86,3 L de etanol por tonelada de cana (tc) para 89,8 L de etanol por tc, obteve-se a emissão líquida de 241 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, que evita 89% das emissões comparadas com as da gasolina.

Em seguida, com a introdução de tecnologias no estado da arte, aumentando a geração de excedente de energia elétrica, passando de 9,2 para 50,7 MW; e a introdução do biodiesel integrado à usina para substituição de 5% do diesel consumido pelos caminhões e 30% do diesel consumido pelos tratores; bem como com a introdução do Biofom, substituindo grande parte do uso de fertilizantes minerais, obteve-se como emissão líquida (-) 269 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, que evita 112% das emissões comparadas com as da gasolina.

Com a introdução de 50% de palha como energético, a emissão líquida passou a (-) 740 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, o que evita 132% das emissões comparadas com as da gasolina. Com a introdução de 100% de palha como energético, a emissão líquida passou a (-) 2.615 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol

anidro, o que evita 215% das emissões comparadas com as da gasolina.

Com a substituição de 100% do diesel utilizado pelo biodiesel, a emissão líquida passou a (-) 4.991 kg de CO₂ por metro cúbico de etanol anidro, o que evita 219% das emissões comparadas com as da gasolina.

Uma usina que processa 2.160.000 t de cana-de-açúcar por safra, com a produção de 186.408.000 L de etanol por safra, no modelo considerado como referência, evita a liberação de 2,02 ou 2,20 kg de CO₂ por litro de etanol anidro. Portanto, no final da safra, a emissão evitada é de 410.097.600 kg de CO₂. Com a introdução de novas tecnologias — aumento da produtividade na produção de etanol, integração com a produção de biodiesel, maior geração de excedente de bioeletricidade e a produção

de Biofom —, evita-se a emissão de 2,97 kg de CO₂, acima dos 2,02 kg de CO₂ por litro de etanol anidro da referência, totalizando 4,99 kg de CO₂ por litro de etanol anidro. Portanto, no ciclo completo, a emissão de CO₂ pelo etanol é 219% menor que a da gasolina, conforme mostrado na Figura A1.

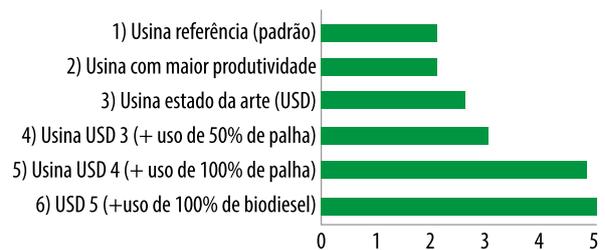


Figura A1. Emissões de CO₂ (quilograma) evitadas na produção de etanol (litros) ao serem tomadas com a implantação das novas tecnologias da Usina Sustentável Dedini (USD).

Microrganismos promotores de crescimento vegetal em cana-de-açúcar e outras gramíneas

Christiane Abreu de Oliveira Paiva | Eliane Aparecida Gomes | Sylvia Morais de Sousa |
Ubiraci Gomes de Paula Lana | Fabio Cesar da Silva | Fernando José Freire

Introdução

Diversas estratégias podem ser adotadas pelo agronegócio, incluindo a agroindústria sucroalcooleira, para otimizar os processos que impõem maiores custos de produção. Os fertilizantes contribuem para a maior parte desses custos, principalmente em solos de baixa fertilidade natural. Apenas para suprir a demanda nacional do agronegócio por nutrientes, o País importa, em média, 70% dos fertilizantes nitrogenados e fosfatados. Os dados do setor indicam que o mercado brasileiro de fertilizantes deve crescer 2,5% em 2020, com a entrega de 37 milhões de toneladas em comparação com 2019, que foi de 36,1 milhões de toneladas, o que significou um crescimento de 1,7% se comparado com o que o Brasil comprou no ano anterior (35,5 milhões de toneladas) (GlobalFert, 2020).

Estima-se que a produção de fertilizantes sintéticos, incluindo extração, transporte e fabricação, seja responsável por 1,2% da emissão de CO₂, sendo emitido 1 kg de CO₂ para cada kg de fósforo (P) e lançados 4,5 kg para cada kg de nitrogênio (N) consumido (Flynn; Smith, 2010). O uso excessivo de fertilizantes pode também levar à perda da qualidade biológica do solo e ao aumento da poluição do ar, bem como de rios e nascentes. Isso não somente resulta em impactos ambientais negativos pela emissão de gases e eutrofização de mananciais, mas também

afeta a produção de alimentos seguros para o consumidor final (Withers et al., 2018). Além disso, as recomendações técnicas para elevadas produtividades em solos de baixa fertilidade se tornam inviáveis pelo alto custo. Assim, considera-se que tecnologias que reduzam o custo da fertilização das culturas sejam estratégicas para a contabilidade econômica do negócio.

A utilização de insumos baseados em microrganismos é considerada uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável quando comparada aos métodos de fertilização tradicionais. Inoculantes microbianos, caracterizados por cepas de microrganismos que atuam positivamente no desenvolvimento das plantas, como as bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP), podem desempenhar papel importante na produção de culturas sustentáveis, reduzindo o impacto ambiental e os riscos à saúde humana. O uso de inoculantes microbianos pode ser considerado uma tecnologia que aumenta o componente biológico nos sistemas de produção, garantindo a saúde do solo, tanto pela possibilidade de diminuição do uso de fertilizantes sintéticos quanto pela adição de microrganismos benéficos (Nazir et al., 2018). Isso garante a essa prática um importante destaque dentro do manejo integrado de fertilizantes, alcançando visibilidade em programas importantes do governo, como no Plano ABC – Agricultura de Baixa Emissão de Carbono e,

mais recentemente, no Programa Nacional de Bioinsumos, que visam aproveitar o potencial da biodiversidade brasileira para reduzir a dependência em relação aos insumos sintéticos importados.

As BPCP são capazes de fornecer melhor adaptabilidade e sobrevivência às plantas sob condições de estresse biótico e abiótico, além de apresentar o potencial de mitigar o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes na agricultura (Bashan et al., 2014; Singh et al., 2016; Alori et al., 2017; Alori; Babalola, 2018). Elas são capazes de estimular o crescimento das plantas em diferentes estágios de desenvolvimento por meio de mecanismos diretos, como a aquisição de nutrientes, como N, P, potássio (K) e outros minerais essenciais, ou ainda a modulação de níveis de hormônios vegetais por meio de produção, estímulo ou inibição de fitormônios, como auxinas, giberelinas, citocininas, ácido abscísico e etileno, que podem levar ao aumento da superfície radicular e ao maior crescimento vegetativo (Tabassum et al., 2017; Backer et al., 2018; Nazir et al., 2018). As BPCP atuam também por mecanismos indiretos, que incluem o controle biológico de insetos-pragas e das doenças por competição ou antibiose e a resistência sistêmica induzida, além da tolerância a estresses abióticos, principalmente seca e salinidade (Varma et al., 2017; Backer et al., 2018; Nazir et al., 2018; Wallace; May, 2018; Sousa et al., 2020; Velloso et al., 2020).

A aplicação de inoculantes microbianos existe há mais de 100 anos, mas ganhou destaque nas últimas três décadas, com vários produtos comerciais no mercado (Alori et al., 2017). A Tabela 11.1 mostra os principais inoculantes lançados no Brasil para cana-de-açúcar e outras gramíneas. Existe grande potencial de crescimento do uso de inoculantes, uma vez que são comercializados por ano aproximadamente 80 milhões de doses de inoculantes para N, dos quais 87%

são direcionados para a cultura da soja e apenas 10% para gramíneas, segundo a Associação Nacional dos Produtores e Importadores de Inoculantes (Jones, 2019). Para P, apenas em 2019, foi lançado o primeiro inoculante no mercado nacional, denominado BiomaPhos, desenvolvido numa parceria da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) com a empresa Simbiose/Bioma-PR (Oliveira et al., 2020).

Nesse contexto, este capítulo abordará os principais mecanismos associados à BPCP ligados à fixação de N, à solubilização e mineralização de P, à promoção de crescimento e seus impactos na cana-de-açúcar e outras gramíneas, incluindo um panorama sobre os bioinoculantes recentemente lançados no mercado.

Fixação biológica de nitrogênio em cana-de-açúcar

O N é o nutriente mais limitante para o desenvolvimento da planta, podendo ser assimilado do solo na forma de amônio, nitrato e nitrito (Gopalakrishnan et al., 2017). Essas formas de N não são abundantes na maioria dos solos, sendo necessário o uso de fertilizantes químicos nitrogenados que são frequentemente perdidos por causa da chuva ou pela lixiviação (Pérez-Montañó et al., 2013; Santos et al., 2020b). Nesse contexto, o processo de fixação biológica de nitrogênio atmosférico destaca-se como uma tecnologia de base energética renovável e estratégica para o suprimento de N às plantas, incluindo os cereais e as gramíneas, que respondem pelo consumo da maior proporção de fertilizantes nitrogenados utilizados no globo.

A fixação biológica de N₂ (FBN) é um processo essencial para transformar o N₂ atmosférico em NH₃. Essa transformação é necessária porque o N₂ é uma molécula estável e abundante na atmosfera, que não pode ser utilizada pela

Tabela 11.1. Exemplos de inoculantes microbianos disponíveis no mercado brasileiro em 2020 para promoção de crescimento com foco em cana-de-açúcar e outras gramíneas.

Microrganismo	Nome do Produto	Empresa	Cultura	Função
<i>Micorriza</i> e <i>Bacillus subtilis</i>	No-Estio	Biogen	Milho	Tolerância à estresse hídrico
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> e <i>Trichoderma virens</i>	QuickRoots Technology	Accelaron	Milho	Fixação de nitrogênio e solubilização de fosfato e potássio
<i>Azospirillum brasilense</i> (Ab-V5 e Ab-V6)	Rizospirillum	Rizobacter	Milho	Fixação de nitrogênio
<i>A. brasilense</i> (Ab-V5 e Ab-V6)	Nodugram L	Nodusoja	Milho	Fixação de nitrogênio
<i>A. brasilense</i> (Ab-V5 e Ab-V6)	Azotrop	Biotrop	Milho, trigo, pastagens	Fixação de nitrogênio
<i>A. brasilense</i> (Ab-V5 e Ab-V6)	Bioma Maiz	Bioma	Milho	Fixação de nitrogênio
<i>Azospirillum</i> spp.	Nitragin Maíz	Monsanto BioAg	Milho	Fixação de nitrogênio
<i>A. brasilense</i> (Ab-V5 e Ab-V6)	Azp, Azp TF	Laboragro Inoculantes Agrícolas	Milho e trigo	Fixação de nitrogênio
<i>A. brasilense</i>	Masterfix Gramíneas	Stoller	Milho e arroz	Fixação de nitrogênio
<i>A. brasilense</i>	Nitro 1000	Nitro 1000	Arroz	Fixação de nitrogênio
<i>Penicillium bilaiae</i>	JumpStart Technology	Accelaron	Trigo	Solubilização de fosfato
<i>A. brasilense</i> cepa AZ 239	Nitragin Wave	Monsanto BioAg	Trigo	Fixação de nitrogênio
<i>Nitrospirillum amazonense</i>	Aprinza	Basf	Cana-de-açúcar	Fixação de nitrogênio e promoção de crescimento
<i>B. subtilis</i> e <i>Bacillus megaterium</i>	BiomaPhos	Bioma	Milho	Solubilização de fosfato e promoção de crescimento

Fonte: Embrapa (2020).

maioria dos microrganismos e pelas plantas nessa forma química. A FBN é um processo complexo, que requer a expressão de um conjunto de genes denominados genes *nif* (*nitrogen fixation*), os quais codificam proteínas envolvidas diretamente nesse processo, que, juntamente com outros genes estruturais, participam da ativação de proteínas de ferro e de uma série de proteínas regulatórias envolvidas na fixação de nitrogênio (Reed et al., 2011).

A reação de redução do N_2 a NH_3 é realizada por microrganismos que são chamados de fixadores de N ou diazotróficos. Esses microrganismos são classificados em dois grupos: microrganismos simbióticos e microrganismos de vida livre (Gopalakrishnan et al., 2017; Santos et al., 2020b). Grandes contribuições da FBN são observadas principalmente nas plantas da família das leguminosas, como soja e feijão, a partir de microrganismos simbióticos, como os rizóbios,

que formam nódulos nas raízes das plantas (Raza et al., 2020).

Entretanto, algumas plantas da família Poacea (antiga família Gramineae) têm também mostrado potencial para a FBN a partir da associação com microrganismos diazotróficos de vida livre. Bactérias de vida livre são capazes de interagir com as raízes, pois vivem próximas a ela na região rizosférica de modo que o nitrogênio fixado por essas bactérias possa ser facilmente absorvido pelas plantas. Além disso, as bactérias utilizam os exsudatos das raízes como fontes de carbono (aminoácidos, peptídeos, proteínas, enzimas, vitaminas e hormônios) (Tabassum et al., 2017; Santos et al., 2020b). Entre as bactérias fixadoras de N de vida livre estão as seguintes: *Azotobacter*, *Paenibacillus*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Azospirillum* e *Herbaspirillum* (Goswami et al., 2014; Santos et al., 2020b).

No caso específico da cultura da cana-de-açúcar cultivada no Brasil, há ganhos econômicos da ordem de 200 milhões de reais por ano, se for considerado que o processo de FBN contribui com cerca de 65% do N acumulado pela cultura (Reis et al., 2006, 2008). Ainda que se possam considerar esses ganhos apenas razoáveis quando comparados aos das leguminosas, a FBN tem papel fundamental no ambiente, principalmente pela redução da quantidade de nitrato acumulada nos corpos d'água, por causa da lixiviação do N aplicado por meio de fertilizantes químicos sintéticos.

Diferentes espécies de bactérias diazotróficas têm sido isoladas e descritas em cana-de-açúcar em diferentes solos e condições ambientais nos últimos 30 anos. Entre as bactérias associativas predominantes na rizosfera da cana-de-açúcar destacam-se os gêneros *Gluconacetobacter*, *Burkholderia*, *Beijerinckia*, *Azospirillum* e *Herbaspirillum* (Cavalcante; Döbereiner, 1988; Souza et al., 2016). Além de FBN, essas bactérias podem ser responsáveis por outros benefícios à

planta, tais como: produção de análogos aos hormônios vegetais, proliferação do sistema radicular, aumento da absorção de água e de nutrientes, solubilização de fosfatos inorgânicos, produção de sideróforos, além de poderem funcionar como agentes de controle biológico (Pii et al., 2015; Schlemper et al., 2018; Sousa et al., 2020).

Há evidências diretas e indiretas da ocorrência de FBN em cana-de-açúcar. Entre as evidências diretas está a identificação de um número considerável de bactérias com capacidade de fixar N₂ atmosférico associadas à cana (Sampaio et al., 1988; Urquiaga et al., 1992; Oliveira et al., 2002, 2006), cujas estimativas de contribuição são de, pelo menos, 40 a 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N obtidos a partir da FBN, usando plantas não inoculadas (Urquiaga et al., 2012; Baptista et al., 2014). Evidências indiretas vêm do fato de a cana-de-açúcar produzir, em cultivos contínuos no Brasil, grandes quantidades de colmos com adubações nitrogenadas relativamente modestas (Oliveira et al., 2004; Bordonal et al., 2018; Martins et al., 2020). As quantidades de N exportadas pelos colmos são semelhantes ou até menores do que as doses de N aplicadas ao longo do ciclo, sem contar que há perdas de N no sistema.

Contribuição da fixação biológica de nitrogênio à nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar

A contribuição da FBN à nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar é muito variada e está relacionada com estirpe, veículo de inoculação, genótipo da planta, altitude, temperatura, umidade e especialmente condições de fertilidade do solo e nível de N no solo (Oliveira et al., 2006; Schultz et al., 2017; Lopes et al., 2019). Apesar dessas variáveis, a seleção de estirpes eficientes adaptadas a diferentes condições climáticas pode reduzir as doses de fertilizantes nitrogenados sintéticos

aplicados no campo, deixando a cultura mais competitiva e ambientalmente mais sustentável (Lira et al., 2020). Nesse sentido, diferentes estudos têm mostrado que a seleção de estirpes eficientes na FBN é uma estratégia que pode aumentar a produtividade dessa cultura (Baldani; Baldani, 2005; Schultz et al., 2014, 2017).

Santos et al. (2017) usaram um consórcio de cinco estirpes (*Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum seropedicae*, *Herbaspirillum rubrisubalbicans*, *Nitrospirillum amazonense* e *Paraburkholderia tropica*) para inoculação de cana-de-açúcar. Os resultados mostraram que a inoculação, tanto na forma individual, quanto na mistura de duas ou mais estirpes, resultou em ganho de biomassa, aumento na absorção de nutrientes e modificações na arquitetura da raiz das duas cultivares de cana avaliadas, embora a magnitude dos efeitos tenha variado entre as estirpes e as cultivares. Foi observado também aumento de até 50% na massa seca da raiz seguindo à inoculação das plântulas na fase de germinação, com um aumento significativo no volume e na área da raiz, especialmente das raízes mais finas. Essas diferenças nas características radiculares podem ter influenciado positivamente a absorção de água pelas plântulas. No entanto, Martins et al. (2020) inocularam esse mesmo consórcio de cinco estirpes em duas cultivares de cana-de-açúcar e mostraram que as plantas-controle, mesmo sem inoculação, obtiveram mais de 65% de N a partir de FBN, o que indicou a presença de um grupo considerável e desconhecido de bactérias diazotróficas no microbioma das plantas. Concluíram também que a inoculação não resultou em aparente impacto na proporção de N derivado da FBN.

Confirmando o efeito de promoção de crescimento das plantas, foram identificados no estudo do microbioma de plantas de cana-de-açúcar gêneros de bactérias promotoras de crescimento já conhecidos, como *Azospirillum*,

Bacillus, *Beijerinckia*, *Bradyrhizobium*, *Erwinia*, *Enterobacter*, *Herbaspirillum* e *Gluconoacetobacter* (Souza et al., 2016). No entanto, houve o predomínio de outros grupos que não haviam sido estudados anteriormente, por exemplo, *Enterobacteriaceae*, *Pseudomonadaceae* e *Moraxellaceae*, que juntos contribuem com mais de 50% da abundância relativa em colmos. Além desses grupos, as famílias *Chitinophagaceae*, *Hyphomicrobiaceae*, *Rhizobiaceae*, *Sphingomonadaceae*, *Rhodospirillaceae* (exceção de *Azospirillum* e *Herbaspirillum*), *Sphingobacteriaceae* e *Sinobacteraceae* foram também altamente abundantes, porém a sua caracterização quanto à promoção de crescimento e à contribuição para a FBN ainda não foi explorada. Esses resultados sugerem que o microbioma de diferentes partes da planta pode conter microrganismos que são abundantes e que possuem funções biológicas diferentes da FBN, sendo, no entanto, relevantes para o desenvolvimento da planta (Souza et al., 2016). Desse modo, esses dados podem ajudar a explicar a dificuldade em demonstrar o efeito benéfico da inoculação com um grupo conhecido de bactérias diazotróficas, uma vez que essas podem não ser abundantes o suficiente nos tecidos da planta para garantir o fornecimento de N. No entanto, essa enorme diversidade desconhecida pode ser um recurso biotecnológico importante para processos biológicos, tais como a FBN (Souza et al., 2016).

Outros autores também questionaram se é possível incrementar a contribuição da FBN pelo uso de bactérias selecionadas como inoculantes para a cultura da cana-de-açúcar. Diferentes estudos têm mostrado que, apesar da inoculação com bactérias isoladas ou com um consórcio de bactérias diazotróficas, não foi observada modificação na contribuição da FBN advinda da inoculação, dando evidências de que os benefícios do inoculante para a cana-de-açúcar podem ser provenientes do efeito da promoção de

crescimento de plantas (Schultz et al., 2014; Santos et al., 2017, 2019). Martins et al. (2020) utilizaram o mesmo consórcio de cinco estirpes utilizadas por Santos et al. (2017) para inocular duas cultivares de cana. Os resultados mostraram que essas cultivares foram capazes de obter elevadas contribuições de N a partir da FBN, mesmo sem inoculação. Os autores afirmam que, apesar das cultivares de cana obterem mais de 65% do N a partir de FBN, continua o desafio de identificar quais bactérias são responsáveis por esse efeito e como elas interagem com as plantas; e concluem que a inoculação teve pouco impacto na proporção de N derivado da FBN. Pereira et al. (2019) consideram que a inoculação dessa mistura bacteriana com a aplicação de uma dose baixa de N (50 kg ha^{-1}) pode aumentar a produtividade da cana com redução dos custos. A partir desses estudos, em 2019, o primeiro inoculante comercial para a cultura da cana foi registrado no Brasil (cepa *N. amazonense*) por uma equipe da Embrapa em parceria com a empresa Basf.

Bactérias de interações associativas na rizosfera e bactérias endofíticas de cana-de-açúcar

As bactérias diazotróficas e colonizadoras de rizosfera de plantas foram mais intensamente estudadas no Brasil nas décadas de 1950 e 1960 quando se iniciaram os estudos na área de FBN em gramíneas. Em 1955, foi feito o primeiro relato sobre a ocorrência em cana-de-açúcar de bactérias fixadoras de N do gênero *Beijerinckia*, o que levou à descrição da espécie denominada *Beijerinckia fluminensis* (Döbereiner; Ruschel, 1958). Estudos mais detalhados mostraram que a população de *Beijerinckia* era mais pronunciada na região denominada rizoplano (solo aderente à superfície das raízes) do que na rizosfera (Döbereiner, 1961). Nesse mesmo estudo, foi encontrada a bactéria *Beijerinckia* em 95% das

amostras de solo localizadas nessa região das raízes e 62% em amostras de solo retiradas das entrelinhas. A quantificação da FBN em cana indicava uma contribuição de até $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N (Döbereiner et al., 1973).

Pesquisas com as bactérias denominadas associativas foram intensificadas com o relato de que a bactéria *Spirillum lipoferum* era o principal microrganismo fixador de N associado às raízes da gramínea forrageira *Digitaria decumbens* (Döbereiner; Day, 1975). Com base nas características fisiológicas, bioquímicas e de homologia de DNA, foi criado o gênero denominado *Azospirillum* (Tarrand et al., 1978). Uma espécie de *Azospirillum*, denominada *Azospirillum amazonense*, foi descrita por Magalhães et al. (1983) e posteriormente reclassificada para *N. amazonense* (Lin et al., 2014). Sua distribuição ecológica foi confirmada por meio da avaliação da ocorrência em outras gramíneas, como a cana-de-açúcar, nas quais altas populações da bactéria foram detectadas (Baldani et al., 1999). Uma das suas principais diferenças para as outras espécies consiste na capacidade de usar sacarose como fonte de carbono e na intolerância ao meio alcalino (Magalhães et al., 1983).

Experimentos em vaso e em campo com ^{15}N mostraram que 60–70% do N da planta de cana-de-açúcar podem ser provenientes da FBN, de acordo com o genótipo e as condições edafoclimáticas (Boddey; Döbereiner, 1995; Santos et al., 2017; Antunes et al., 2019). Como essas elevadas contribuições dificilmente poderiam ser atribuídas somente a bactérias da rizosfera, iniciaram-se, então, pesquisas de identificação de outras bactérias. No fim da década de 1980, verificou-se que havia bactérias endofíticas que colonizavam raízes, colmos e folhas no xilema e em espaços inter e intracelulares de algumas gramíneas, como, por exemplo, a cana-de-açúcar (Döbereiner, 1992). Essas bactérias são capazes de colonizar os vasos do xilema onde estão

sendo circundadas com películas provenientes da planta, lembrando os envelopes membranosos das leguminosas (Baldani; Döbereiner, 1999; Reis et al., 2011).

A primeira bactéria fixadora de N com características endofíticas foi isolada de solo da rizosfera, de raízes lavadas e raízes esterilizadas superficialmente de plantas de gramíneas e constituiu um novo gênero denominado *Herbaspirillum*, com a criação da espécie *H. seropedicae* (Baldani et al., 1986), que promove aumento significativo da matéria seca após inoculação em cana-de-açúcar (Marques Júnior et al., 2008). Nesta mesma década, foi verificado que um grupo de bactérias pertencentes à espécie *Pseudomonas rubrisubalbicans*, causador da doença denominada estria-mosqueada em cana-de-açúcar, apresentava características bastante semelhantes às do gênero *Herbaspirillum* (Döbereiner et al., 1990; Gillis et al., 1991). Estudos fisiológicos (Baldani et al., 1992) e moleculares foram realizados e culminaram na descrição da espécie *H. rubrisubalbicans* (Baldani et al., 1996). Essa espécie foi isolada de variedades de cana-de-açúcar sem apresentar sintomas da doença (Döbereiner et al., 1993) e tem sido utilizada na inoculação de cana-de-açúcar com efeito positivo significativo em várias características morfológicas e nutricionais (Lira et al., 2020).

A espécie *G. diazotrophicus* (Yamada et al., 1997) apresenta importantes características biotecnológicas, como promoção do crescimento vegetal, vias de metabolismo do açúcar, secreção de ácidos orgânicos e ocorrência de bacteriocinas (Bertalan et al., 2009). Várias outras espécies do gênero *Gluconacetobacter* foram descritas, incluindo *Gluconacetobacter azotocaptans*, *Gluconacetobacter sacchari*, *Gluconacetobacter maltaceti* e *Gluconacetobacter johanna*. Esta última foi uma homenagem à contribuição da pesquisadora Johanna Döbereiner para a área de FBN (Fuentes-Ramírez et al., 2001; Slapsak et al., 2013).

Colônias da bactéria endofítica *G. diazotrophicus* têm sido detectadas em raízes e colmos de diversas variedades de cana-de-açúcar em diferentes regiões canavieiras brasileiras (Döbereiner, 1992; Baldani et al., 2002; Chawla et al., 2014). Diferentes estudos mostraram que essa espécie produz compostos com capacidade antimicrobiana que inibe o crescimento de diversos fitopatógenos (Piñón et al., 2002; Nieto-Penalver et al., 2014). A inoculação de bactérias diazotróficas em cana, incluindo a *G. diazotrophicus*, contribuiu para a atenuação dos efeitos patogênicos em genótipos diferencialmente sensíveis ao raquitismo de soqueira (Carneiro Júnior, 2006). Efeitos antagônicos de *G. diazotrophicus* contra o fungo *Colletotrichum falcatum*, causador da podridão-vermelha em cana, foram demonstrados quando ambos foram cultivados juntos no meio de cultura (Muthukumarasamy et al., 2000). Estudos similares também mostraram efeitos antagônicos de *G. diazotrophicus* contra diversas outras espécies de fungos fitopatogênicos tanto em experimentos conduzidos in vitro quanto em casa de vegetação (Mehnaz; Lazarovits, 2006; Pellegrini et al., 2020).

Aumento da aquisição de P por microrganismos solubilizadores de fosfato

Observa-se frequentemente uma baixa concentração de P disponível para as plantas em solos altamente intemperizados e ácidos. Esse fato pode ser atribuído à adsorção de fosfato por minerais como óxidos de ferro e alumínio nos solos argilosos tropicais, e por cálcio, principalmente em solos de clima temperado (López-Arredondo et al., 2014), reduzindo assim sua absorção pelas plantas. Os níveis de P também são baixos nos solos muito arenosos por causa da baixa capacidade de adsorção do nutriente que, conseqüentemente, fica suscetível à lixiviação

(Sims et al., 1998). A fração inorgânica de fosfato mais abundante nos solos tropicais é o fosfato de ferro (Fe-P), seguido pelo fosfato de alumínio (Al-P) e fosfato de cálcio (Ca-P), que são formas pouco disponíveis para as plantas (Shaw, 2001). Adicionalmente, cerca de 80% do P total em áreas agrícolas de plantio direto estabelecido ou rotação de culturas está na forma orgânica, que também não é diretamente acessível às plantas (Novais; Smyth, 1999). Para agravar a situação, o P é derivado de reservas sedimentares ou magmáticas que não são renováveis (Blackwell et al., 2019). Por sua vez, a aplicação excessiva de fertilizantes fosfatados levanta questões importantes sobre sustentabilidade, uma vez que pode contribuir para o processo de poluição do solo, contaminação da água pela eutrofização de rios e mananciais e do ar, pela emissão de gases tóxicos no seu processo de fabricação que consome combustíveis fósseis (Withers et al., 2018).

Os fertilizantes fosfatados correspondem a 23% do montante importado de fertilizantes no País, o que significa 5,6 milhões de toneladas (Globalfert, 2019). A necessidade de aplicação de altas doses de fertilizantes para atender à demanda das culturas se traduz em maior dependência externa, já que mais de 50% dos fertilizantes fosfatados são importados.

Estudo realizado pela Embrapa e parceiros mostra que, nos últimos 50 anos, quase metade do P aplicado na agricultura na forma de fertilizante inorgânico continua no solo, constituindo uma reserva de mais de US\$ 40 bilhões, o que pode ajudar o Brasil a se precaver contra uma possível escassez futura do nutriente. Ao aprendermos a manejar e reciclar esse nutriente de forma mais eficiente, essa imensa reserva poderá ser mobilizada em favor da agricultura brasileira (Withers et al., 2018). Em geral, o estoque de P inorgânico nos solos está em aproximadamente 57%, enquanto o de P orgânico, na forma de monoéster, em cerca de 33%, o que indica alto potencial

para o uso agrônômico desse total acumulado (Menezes-Blackburn et al., 2018).

A atividade microbiana está intimamente relacionada com a ciclagem de nutrientes no solo (Gadd, 1999), e, ao longo do cultivo, a disponibilidade de P pode ser aumentada pela contribuição da microbiota do solo ou pelo uso dos inoculantes microbianos (Mendes et al., 2014; Ribeiro et al., 2018; Sousa et al., 2020; Oliveira et al., 2020). Em geral, um grama de solo fértil contém 10^1 a 10^{10} bactérias, e seu peso vivo pode exceder 2 mil quilogramas por hectare (Khan et al., 2009).

Microrganismos solubilizadores de fosfato (MSP) são conhecidos por aumentar a disponibilidade de P para as plantas a partir da síntese de compostos químicos eficientes na solubilização de fosfatos insolúveis presentes no solo. Entre toda a população microbiana do solo, bactérias solubilizadoras de P normalmente compreendem entre 1 e 50%, enquanto os fungos entre 0,1 e 0,5% de população total (Chen et al., 2006), com destaque para bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter* e *Burkholderia*, além de fungos dos gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* (Oliveira et al., 2009; Gomes et al., 2014; Etesami; Maheshwari, 2018; Kalayu, 2019).

O principal mecanismo de solubilização de P por microrganismos consiste na produção de ácidos orgânicos ou liberação de prótons (Satyaprakash et al., 2017; Abreu et al., 2017; Kumar et al., 2018; Kalayu, 2019). Ácidos orgânicos e inorgânicos produzidos por MSP dissolvem os fosfatos insolúveis do solo por quelação de cátions e competem com o fosfato por sítios de adsorção no solo (Khan et al., 2009). Os grupos hidroxila e carboxila dos ácidos quelam os cátions ligados ao fosfato, convertendo-os assim em formas solúveis.

As formas orgânicas do P no solo, como ácidos nucleicos, fosfolipídios, fosfatos de açúcar, ácido fítico, polifosfatos e fosfonatos, não estão disponíveis para as plantas e precisam ser mineralizadas por meio da decomposição da

matéria orgânica por microrganismos (Khan et al., 2009). Essa mineralização ocorre pela produção de fosfatases ou fosfohidrolases, como a fitase (Satyaprakash et al., 2017; Menezes-Blackburn et al., 2018; Kumar et al., 2018), que compreendem um amplo grupo de enzimas que catalisam a hidrólise das ligações fosfomonoéster, liberando assim o P inorgânico que será absorvido pelas plantas (Tapia-Torres et al., 2016; Menezes-Blackburn et al., 2018).

Uma estratégia promissora tanto em termos ambientais quanto econômicos é o uso combinado de fosfatos de rocha (baixa solubilidade) e MSP (Khan et al., 2007; Richardson et al., 2009; Gomes et al., 2014; Almeida et al., 2016), que pode aumentar a biomassa e/ou a produtividade em diferentes gramíneas, como trigo (Singh; Reddy, 2011; Emami et al., 2019), milho (Ribeiro et al., 2018), milho (Kaur; Reddy, 2015) e sorgo (Mattos et al., 2020). Diferentemente dos fertilizantes fosfatados sintéticos, os fosfatos naturais representam fontes de P insolúveis em água, apresentando, portanto, menor eficiência na disponibilização de P no solo em curto prazo (Korndörfer, 1999). No entanto, por causa do processo oneroso envolvido na produção industrial de fontes solúveis de P, a utilização de fosfatos naturais tem se tornado uma alternativa atrativa pelo baixo custo do produto, apesar de apresentarem menor eficiência agrônômica. No entanto, a magnitude da resposta da combinação de fosfato natural com MSP normalmente depende de vários fatores, principalmente das estirpes dos microrganismos, das formulações, da fonte de P e/ou do tipo de solo, do genótipo da planta, além das condições ambientais (Mattos et al., 2020).

Microrganismos solubilizadores de fosfato em gramíneas

A etapa inicial do desenvolvimento de inoculante que contenha MSP consiste em isolamento, seleção, identificação e avaliação dos microrga-

nismos com potencial para solubilização de fontes de fosfato insolúvel em condições de laboratório. A maioria dos MSP é isolada da rizosfera ou do interior das plantas (endofíticos), onde eles são conhecidos por serem metabolicamente mais ativos (Khan et al., 2009; Walpolá; Yoon, 2012; Selvi et al., 2017). Cepas isoladas da rizosfera de genótipos de milho eficientes no uso de P mostraram-se eficientes na solubilização de fontes inorgânicas de P, com disponibilização de até 67% do P total in vitro (Oliveira et al., 2009), demonstrando assim uso potencial como bioinoculante. Outras características, como a taxa de sobrevivência, adaptação e multiplicação dos microrganismos na rizosfera (competência rizosférica) e a capacidade de colonização e infecção das plantas hospedeiras (competência endofítica), devem ser avaliadas em testes de casa de vegetação e de campo (Sathya et al., 2016).

Resultados promissores têm sido observados em diferentes culturas. A inoculação de MSP em milho promoveu o aumento do crescimento das plantas e a absorção de nutrientes em condições de casa de vegetação e de campo (Kumar et al., 2007; Hameeda et al., 2008; Sousa et al., 2020). A maioria desses microrganismos promoveu efeitos significativamente positivos sobre rendimentos de grãos, peso seco total e conteúdo de P em plantas de milho. Em condições de campo, a inoculação de sementes de milho com *Penicillium oxalicum* em associação com o uso de fosfatos de rocha proporcionou aumento significativo do crescimento, da produção e do teor de P nas plantas (Singh; Reddy, 2011). Efeitos positivos também foram evidenciados em plantas de milho por meio de estirpes bacterianas solubilizadoras de fosfato dos gêneros *Serratia* e *Pseudomonas*, que promoveram aumento do crescimento, acúmulo de P e produtividade de até 85%, em comparação com o controle não inoculado (Hameeda et al., 2008). Em condições controladas, a inoculação do milho com MSP e a adubação com fosfatos de rochas

proporcionaram aumento do comprimento e da massa seca de raiz de 11 e 35%, respectivamente (Manzoor et al., 2017), além do aumento do conteúdo interno de P na planta de maneira proporcional ao ganho de massa seca (Oliveira et al., 2013; Sousa et al., 2020). Adicionalmente, trabalhos com milho demonstraram ganho de massa seca de raiz e maior acúmulo de P com a inoculação de cepas-elites de *Bacillus* isoladas pela Embrapa (Oliveira et al., 2013; Ribeiro et al., 2018).

O uso de microrganismos em conjunto com fertilizantes organominerais (fosfato de rocha, minerais e componente orgânico) também tem sido indicado em milho. Resultados de estudos da equipe de microbiologia do solo da Embrapa Milho e Sorgo indicaram produtividades similares entre os tratamentos de milho adubados com superfosfato triplo e com fertilizante organomineral pulverizado com MSP no sulco de plantio. Foi também observado um aumento do teor de P na parte aérea das plantas de milho e no solo em tratamentos que receberam a inoculação com MSP (Sousa et al., 2020). Amanullah e Khan (2015) observaram influência de bactérias solubilizadores de P na produção do milho adubado com composto orgânico e P nas doses de 75 e 100 kg ha⁻¹ do organomineral. Os autores indicaram que doses mais altas de P, juntamente com MSP, aumentaram a disponibilidade e a absorção desse nutriente, o que resultou em aumento da produtividade do milho. Almeida et al. (2016) observaram efeito significativo da inoculação com MSP na produção de massa seca da parte aérea do milho adubado com fontes organominerais. Os autores observaram também que a inoculação no plantio foi mais eficiente que a realizada 60 dias antes do plantio e citam que esse resultado pode estar relacionado com uma melhor sobrevivência dos microrganismos solubilizadores, quando aplicados sobre a fonte organomineral.

Atualmente, para culturas de grãos, já existem, no mercado de países como Canadá, Austrá-

lia, Egito e Índia, produtos fertilizantes obtidos a partir da mistura de fosfato de rocha, MSP e uma fonte de carbono, como resíduos de cana, mandioca, entre outros, os quais têm sido usados extensivamente na agricultura desses países com resultados positivos (Khalil et al., 2002).

Em trigo, a inoculação de MSP dos gêneros *Azotobacter* e *Bacillus* em condições de campo aumentou o rendimento de grãos em até 30 e 43%, respectivamente (Kloepper et al., 1992). Da mesma forma, um aumento de rendimento de 10 a 20% foi relatado em testes de campo usando uma combinação de *Bacillus megaterium* e *Azotobacter chroococcum* (Rodríguez; Fraga, 1999). A inoculação de trigo com diferentes espécies de *Pseudomonas* e *Bacillus* também aumentou a absorção de P e o rendimento de grãos (Walpola; Yoon, 2012). Recentemente, a inoculação com MSP do gênero *Paenibacillus* promoveu aumento significativo do P disponível no solo e da absorção de P pelas plantas, além de estimular consideravelmente a fixação biológica de N na rizosfera e na endosfera de plântulas de trigo (Li et al., 2020).

Em sorgo, a inoculação tanto com *Bacillus simplex* quanto com *Pseudomonas* promoveu aumento significativo da matéria seca e absorção de P (Rezakhani et al., 2020). Nessa mesma cultura, a inoculação com bactérias do gênero *Bacillus* aumentou significativamente a biomassa da raiz e o teor de P em experimentos em casa de vegetação, bem como a produtividade e o teor de P nos grãos em condições de campo (Mattos et al., 2020).

Em cevada, a inoculação de MSP da bactéria *Mesorhizobium mediterraneum* em solos tratados com fosfatos insolúveis aumentou em 100% o teor de P no solo, promovendo acréscimo significativo do teor de nutrientes e matéria seca (Peix et al., 2001). Plantas de cevada inoculadas com *Streptomyces roseocinereus* também aumentaram significativamente o comprimento

da parte aérea e da espiga, bem como o P disponível nas espigas e folhas (Chouyia et al., 2020).

A capacidade de solubilização de fosfato por microrganismos do solo é conhecida por influenciar positivamente também a produção de arroz (Sutaliya; Singh, 2005; Asuming-Brempong, 2013). A inoculação de *Trichoderma* aumentou significativamente a solubilização do fosfato de rocha e consequentemente a absorção de P pelas plantas de arroz (Chagas et al., 2015). Ainda em arroz, a inoculação com cepa de *Pantoea* aumentou a altura da planta, a biomassa, o crescimento da raiz e a absorção de P (Chen; Liu, 2019).

Em alguns casos, as mesmas cepas de MSP foram testadas em diferentes gramíneas. Isolados de *Azospirillum* promoveram maior produtividade em milho, sorgo e trigo, enquanto a inoculação com isolados de *Bacillus* resultou em maior rendimento em sorgo e trigo (Rodriguez; Fraga, 1999). Vários MSP também têm sido utilizados em interação com fungos micorrízicos com efeitos positivos sobre o crescimento das plantas, confirmando o potencial do uso de consórcios microbianos para a produção de bioinoculantes. A inoculação em trigo de diferentes espécies de bactérias solubilizadoras de fosfato combinadas com fungos micorrízicos arbusculares levou ao aumento na produção de matéria seca da parte aérea, no número de espigas e na produtividade de grãos de trigo (Yousefi et al., 2011).

Microrganismos solubilizadores de P em cana-de-açúcar

O P é um nutriente crítico para o desenvolvimento da cana-de-açúcar uma vez que desempenha papel essencial no desenvolvimento do sistema radicular e no perfilhamento, além de influenciar a atividade fotossintética, a longevidade e a produtividade da planta (Kingston, 2014; Santos et al., 2020a). Adicionalmente, sua influência na produção e na qualidade do

caldo tem sido bem estabelecida, tornando a aplicação de P parte importante dos programas de fertilização da cana. No entanto, apenas 10 a 30% do fertilizante fosfatado aplicado no primeiro ano de cultivo são absorvidos pelas raízes da cana, enquanto o restante acumula nos solos, como P fixado em argilas e cátions como cálcio (Ca), alumínio (Al) e ferro (Fe), uma forma não disponível para as plantas (Kingston, 2014). Assim, os solos apresentam grandes reservas de P que poderiam suportar os requerimentos das culturas por longo prazo se mobilizado pelo manejo adequado do solo, envolvendo adição de matéria orgânica e/ou uso de alternativas como os MSP.

Bactérias que colonizam as raízes exercendo efeitos positivos tais como fixação de nitrogênio e produção de hormônios têm sido bastante estudadas em cana-de-açúcar (Boddey et al., 2003; Caballero-Mellado, 2004; Perin et al., 2006). No entanto, apesar da importância comercial dessa cultura, o conhecimento da comunidade microbiana solubilizadora de P associada a ela ainda é escasso, existindo limitada informação sobre o papel das espécies microbianas no crescimento, desenvolvimento e desempenho da planta. Nesse sentido, o conhecimento das populações microbianas que ocorrem naturalmente na rizosfera ou colonizam tecidos internos das plantas (endofíticos) é uma etapa importante no isolamento, na caracterização e na seleção de microrganismos benéficos para produção de inoculantes microbianos para a cana-de-açúcar.

Entre os grupos de bactérias predominantes nas raízes da cana, destacam-se as *Proteobacterias*, cujos membros promovem o crescimento das plantas por mecanismos diversos, contribuindo com mais de 40% da população total, seguidas por *Acidobacteria* e *Actinobacteria* (Gao et al., 2019). Estudos que comparam plantas em diferentes estágios de desenvolvimento mostraram que a população microbiana predominante na

cana-soca, após 3 anos de cultivo, foi o grupo de *Acidobacterias*, enquanto as *Actinobacterias* apresentaram maior abundância na cana recém-plantada. *Acidobacteria*, que é um filo amplamente distribuído na rizosfera, pode atuar na degradação de polissacarídeos, portanto apresenta papel importante no ciclo do carbono. Por sua vez, sabe-se que as *Actinobacterias* desempenham papel na regulação das interações biológicas entre plantas, patógenos e o ambiente (Gao et al., 2019). Outros autores descreveram outros grupos de bactérias predominantes em cana, como os gêneros *Beijerinckia*, *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum*, *Burkholderia*, *Azospirillum*, *Pantoea*, *Pseudomonas* e *Microbacterium*, enquanto os principais grupos de fungos que ocorrem naturalmente associados às raízes ou no interior das plantas de cana são os seguintes: *Epicoccum*, *Trichoderma* e fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (Romão-Dumaresq et al., 2017).

Com o objetivo de ampliar o número de microrganismos isolados de plantas de cana, Armanhi et al. (2018) adicionaram caldo de cana estéril ao meio de cultura, o que favoreceu o cultivo de gêneros como *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Agrobacterium* e *Enterobacter*, os quais são adaptados a açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos e pequenas moléculas e respondem bem aos exsudatos na rizosfera da cana. A partir desses microrganismos selecionados em meio de cultura e do microbioma obtido independentemente de cultivo, foram criadas comunidades sintéticas formadas pelos microrganismos mais abundantes das raízes e dos colmos das plantas de cana (Armanhi et al., 2018). Os autores usaram essa comunidade sintética como inoculante de plântulas de milho e observaram que os microrganismos colonizaram as plantas inoculadas substituindo parcialmente a microbiota original e contribuindo com, aproximadamente, 54 e 49% da abundância relativa total de microrganismos rizosféricos e endofíticos da raiz,

respectivamente. Como resultado, as plantas inoculadas aumentaram 3,4 vezes a biomassa fresca quando comparadas com plantas não inoculadas, além de diferenças observadas no peso seco das plantas. Adicionalmente, as plantas inoculadas foram mais vigorosas, com folhas verde-escuras, que apresentavam sistemas radiculares mais ramificados com maior número de raízes laterais (Armanhi et al., 2018).

Um estudo recente avaliou o efeito da inoculação das bactérias *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis* e *Pseudomonas fluorescens* no desempenho da cana-de-açúcar ao final do ciclo (Rosa et al., 2020). O experimento foi conduzido em um solo com baixo P disponível. Foram aplicados os inoculantes separadamente ou em conjunto e cinco doses de P na forma de superfosfato triplo. A inoculação bacteriana com *B. subtilis* + *P. fluorescens* resultou em aumento na concentração de P na folha da cana. A combinação de *A. brasilense* + *B. subtilis* com aplicação de 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi o melhor tratamento, resultando em aumento da massa seca, acúmulo de P e aumento na produção do colmo em 38% em uma variedade de cana, reduzindo a fertilização de P em 75% para a mesma variedade cultivada em solo com baixo P. Além disso, a combinação *A. brasilense* + *B. subtilis* resultou em aumento do P disponível na camada superficial do solo depois da colheita em mais de quatro vezes, em comparação com os tratamentos não inoculados, o que indica que essa mistura de bactérias solubilizou parte do P do solo, disponibilizando seu uso para as plantas.

Alguns estudos têm avaliado o efeito da aplicação de fontes menos solúveis de P, como os fosfatos de rocha, em conjunto com inoculação com MSP. Nesse sentido, a inoculação com *B. megaterium* var. *Phosphaticum* foi avaliada no crescimento e na produção da cana-de-açúcar com e sem a adição de fosfato de rocha (Sundara et al., 2002). Foi observado que a inoculação

da bactéria aumentou o teor de P disponível para as plantas no solo. Observou-se também um aumento do perfilhamento, do peso do colmo e da produção em 12,6%. Adicionalmente, 50% do fertilizante solúvel fosfatado pode ser substituído pelo fosfato de rocha, uma fonte de P de menor custo quando aplicado em conjunto com MSP. A inoculação também melhorou a qualidade do caldo da cana, em termos de pureza e teor de açúcares.

O uso de diferentes fontes de fosfato de rocha e as interações na comunidade microbiana do solo com/sem inoculação de FMA também foram investigados (Gumiere et al., 2019). As fontes de fosfato avaliadas foram superfosfato simples, fosfato de rocha Catalão e fosfato de rocha Bayóvar. Os resultados indicaram que o uso da fonte Bayóvar resultou em maior teor de matéria seca total da cana-de-açúcar em ambos os tratamentos com ou sem inoculação com FMA. No entanto, uma redução da matéria seca total foi observada quando a fonte de P foi o superfosfato simples com a inoculação com FMA. Esse efeito negativo da colonização com FMA junto com fosfato solúvel pode estar relacionado ao custo líquido de carbono para manutenção e crescimento dos fungos, que excedeu os benefícios líquidos obtidos pela planta hospedeira com alto fornecimento de nutrientes. Esses resultados não apenas confirmam o efeito negativo da acidulação de fertilizantes fosfatados solúveis na colonização de FMA, mas também indicam efeito de antagonismo entre fonte e inóculo, resultando em uma redução na massa seca total. Adicionalmente, a fonte de fosfato afetou a matéria seca total e a estrutura das comunidades microbianas do solo. As interações bacterianas aumentaram nas fontes com alta porcentagem de P_2O_5 , enquanto as interações com fungos diminuíram.

Outra abordagem que utiliza enxofre inoculado com a bactéria *Acidithiobacillus* tem mostrado

resultados satisfatórios na disponibilidade de P a partir de fosfatos de rocha em solos ácidos brasileiros para diferentes culturas, incluindo a cana-de-açúcar. Isso ocorre porque, para a produção de fertilizantes fosfatados, ácidos fortes como ácido sulfúrico, fosfórico ou nítrico são adicionados para promover a solubilização das rochas, processo que requer alto consumo de energia (Straaten, 2002). No caso do experimento com *Acidithiobacillus*, a solubilização do fosfato de rocha ocorre pela produção de ácido sulfúrico pelas bactérias, evitando-se a aplicação de ácidos fortes na produção dos fertilizantes solúveis. Embora muitas dessas bactérias que oxidam enxofre ocorram naturalmente nos solos, as espécies mais importantes não são abundantes nos solos agrícolas, por isso é necessária a sua inoculação para produzir os efeitos desejados (Stamford et al., 2008). Por exemplo, um estudo avaliou a produção de biofertilizantes que utilizavam fosfato de rocha mineral (apatita) adicionado de biotita rica em potássio, além de enxofre inoculado com a bactéria *Acidithiobacillus*, e comparou a eficiência desse biofertilizante com fertilizantes solúveis na produção de cana (Stamford et al., 2006). Os biofertilizantes foram produzidos em sulcos onde as rochas, apatita ou biotita, são misturadas com enxofre elementar inoculado com *Acidithiobacillus*. Os resultados indicaram um aumento da massa fresca do colmo com a aplicação dos biofertilizantes e dos fertilizantes solúveis. Houve um aumento significativo dos conteúdos de N, P e K na matéria seca do colmo quando os biofertilizantes foram aplicados, indicando seu potencial uso como fonte de nutrientes para a cultura. Em outro estudo, duas variedades de cana-de-açúcar, três fontes de P (apatita, apatita misturada com *Acidithiobacillus* e superfosfato triplo) e três fontes de K (biotita, biotita misturada com *Acidithiobacillus* e KCl) foram aplicadas em um experimento de campo. Foi observada uma redução significativa no pH do solo, seguida de um aumento do P, K, Ca e magnésio (Mg) no solo com a

adição dos biofertilizantes em comparação com os fertilizantes sintéticos solúveis. Os autores concluíram que os biofertilizantes apresentam potencial uso como fonte de nutrientes para a cultura, mas que a redução do pH do solo precisa ser mais bem investigada (Stamford et al., 2008).

Comercialização e desafios da produção de bioinoculantes que contêm microrganismos solubilizadores de fosfato

Diversos estudos têm demonstrado que o uso de inoculantes comerciais que contêm MSP aumenta significativamente o P disponível e a absorção desse nutriente pelas plantas (Irshad et al., 2012). Essa capacidade foi comprovada inicialmente em vários estudos de validação em escala de bancada (Nahas et al., 1990; Richardson et al., 2009; Oliveira et al., 2009) que propiciaram o desenvolvimento de programas de inoculação de MSP, com resultados favoráveis em vários países, visando ao aumento da disponibilidade do P (Owen et al., 2015). Entre estes produtos pioneiros, podemos citar o Jumpstar (Khalil et al., 2002), formulado à base de *Penicillium bilai*, proveniente do Canadá, Bio-Phospho, Bio Promotor Phosphobacteria, Potash solubilizing liquid e Biozote-P, formulados à base de *Bacillus* e outros MSP, principalmente na Índia e no Paquistão (Tabassum et al., 2017).

No entanto, o sucesso comercial de um produto baseado em microrganismos promotores de crescimento, como os MSP, requer demanda de mercado viável e econômica, consistente e amplo espectro de ação, segurança e estabilidade, baixo custo e disponibilidade de adjuvantes, marketing de produtos que contêm bioinoculantes e interação entre pesquisa e indústria. Prosseguir com sucesso, do laboratório à escala industrial, seguido de seu uso no campo, é um

dos principais desafios atuais para o uso dos bioprodutos. Nem sempre os resultados promissores obtidos em bancadas são reproduzidos no campo, em razão da alta complexidade das interações inoculante-planta e inoculante-microbiota do solo.

Como parte do futuro dos bioinoculantes, a pesquisa deve se concentrar na otimização das condições de crescimento e no aumento da vida útil da formulação com microrganismos, na ausência de fitotoxicidade para as plantas, no aumento da tolerância a condições ambientais severas, no aumento da produção de safras e na rentabilidade para os agricultores (Tabassum et al., 2017). A maioria dessas condições é observada em produtos à base de *Bacillus*, que apresentam grande potencial para serem utilizados em sistemas integrados de produção agrícola, o que justifica a seleção e a caracterização de novas cepas.

Numerosas espécies do gênero *Bacillus* sp. são conhecidas por aumentar a solubilização de fosfatos e facilitar sua mobilização no solo. *Bacillus* é um dos principais microrganismos envolvidos na geração de produtos biotecnológicos para a agricultura, representando o grupo mais importante para uso no controle biológico na forma de inseticidas, fungicidas, bactericidas, nematocidas, bem como estimulantes de tolerância ao estresse e promotores do crescimento vegetal. Entre os agentes de biocontrole bacteriano, as espécies de *Bacillus* respondem por mais de 50% dos produtos comercializados, e *Bacillus thuringiensis* contribui com mais de 70% desse mercado (Ongena; Jacques, 2008). Isso se deve às diferentes propriedades desse grupo de bactérias, incluindo a capacidade de formar endósporos, permitindo que se adaptem a condições abióticas extremas, como temperatura, pH, radiação, dessecação, luz ultravioleta ou exposição a pesticidas (Bahadir et al., 2018). Além disso, os endósporos permitem maior resistência

dos produtos de estoque, aumentando a vida útil dos produtos à base de *Bacillus*.

BiomaPhos – exemplo de um caso de sucesso

Levando em consideração tudo isso, a equipe de microbiologia da Embrapa Milho e Sorgo vem pesquisando e selecionando, há quase 20 anos, microrganismos solubilizadores de diversos tipos de fosfatos com foco no gênero *Bacillus*. Resultados desses anos de pesquisa culminaram no desenvolvimento do produto BiomaPhos (Oliveira et al., 2009, 2020; Gomes et al., 2014; Abreu et al., 2017; Ribeiro et al., 2018; Sousa et al., 2020), que contém as cepas *B. subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119). Esse produto foi lançado em 2019, pela Embrapa Milho e Sorgo, em parceria com a empresa Bioma¹, que o registrou no Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) e iniciou, no Brasil, a comercialização do BiomaPhos como inoculante para solubilização de fosfato. Em 2021, a Bioma obteve o registro do produto BiomaPhos Soja, com validação agrônômica para essa cultura. Em mais um avanço, também no ano de 2021, foi obtido registro do BiomaPHOS que continha as cepas de *Bacillus* com a expansão de uso no Mapa para a cultura da cana-de-açúcar, cujo nome de comercial é SolubPhos Cana.

Trata-se de um inoculante líquido recomendado para o tratamento de sementes ou para aplicação no sulco de semeadura. O mecanismo de ação do produto consiste no fato de que as bactérias presentes se associam à planta desde o início da formação da raiz. Com isso, elas se multiplicam e colonizam a rizosfera da planta, além de produzirem ácidos orgânicos que solubilizam o P presente na porção do solo em contato com as raízes da planta (rizosfera), tornando-o prontamente disponível para a absorção e

assimilação da cultura. Além disso, o BiomaPhos atua na mineralização do P presente na matéria orgânica do solo (fitato) e contribui para o suprimento de P às plantas.

Para que fossem selecionadas cepas de MSP adaptadas às condições agrícolas do País e houvesse sucesso no estabelecimento dessas cepas em lavouras comerciais, inicialmente foram isolados cerca de 300 microrganismos de solo rizosférico de milho (em cinco regiões agrícolas no Brasil) predominantemente cultivado em sucessão com soja e feijão (Oliveira et al., 2009). Posteriormente, cerca de 150 microrganismos endofíticos foram isolados da raiz, do colmo e da folha de milho, também provenientes de amostras de várias regiões agrícolas do País (Abreu et al., 2017; Ribeiro et al., 2018).

Durante as várias etapas de seleção em escala de bancada, foram constatadas outras características de promoção de crescimento, como a capacidade de produzir ácido indol-acético (AIA), formar biofilme, produzir sideróforos, exopolissacarídeos, enzimas fosfatases e fitases, bem como a capacidade de confirmar o potencial de solubilização de diversos tipos de fosfatos, como os fosfatos de rocha e de ferro, além de mineralizar P orgânico.

Concomitantemente, foram realizados estudos de validação com plantas de milheto em solo adubado com fosfato convencional e fosfato de rocha Araxá e Itafós, em condições controladas. Nesses estudos, a inoculação das cepas CNPMS B2084 e CNPMS B119 separadamente promoveu ganho de biomassa de parte aérea e raiz e acúmulo de P, entre outros nutrientes, nos tecidos (Oliveira et al., 2013; Ribeiro et al., 2018). Quando inoculadas em plântulas de milho cultivadas em sistema hidropônico, as mesmas cepas estimularam incremento de área de superfície do sistema radicular, massa seca, acúmulo de nutrientes e aumento de raízes mais finas (Sousa et al., 2020),

¹ Disponível em: www.bioma.ind.br

além do indicativo de tolerância ao estresse hídrico induzido (Velloso et al., 2020).

Em condições de campo, os resultados mostraram que quando o milho foi inoculado com as cepas CNPMS B2084 e CNPMS B119, houve incremento significativo de 12% na produção, enquanto a inoculação com a cepa CNPMS B119 melhorou o acúmulo de P do grão em 21%, em comparação com o controle não inoculado. Além disso, as plantas inoculadas com essas cepas mostraram um aumento em torno de 24% no teor de P nos grãos, em comparação com o controle não inoculado (Oliveira et al., 2020; Sousa et al., 2020).

Em termos de ganhos em sacas de milho, os resultados de campo em quatro safras agrícolas e dois locais, em experimentos conduzidos pela Embrapa Milho e Sorgo, também apontam que é possível um aumento médio superior a 7 sacas por hectare por meio da combinação do inoculante contendo MSP e uma proporção adequada de fertilizantes fosfatados (Oliveira et al., 2020). Em uma dessas avaliações, após 3 anos de cultivo no estado de Goiás, esse ganho chegou a 16,5 sacas por hectare com a inoculação da cepa CNPMS B2084 em área de solo com fertilidade construída e sem adição do adubo fosfatado. Na área que recebeu adubação com o superfosfato triplo, onde ocorreu a inoculação da cepa CNPMS B119, o ganho foi de 34,5 sacas em relação ao tratamento controle, sem inoculação (Sousa et al., 2020).

O aumento do acúmulo de P nos grãos também foi positivo com a inoculação da cepa CNPMS B119 em diferentes anos agrícolas. Esses resultados em conjunto demonstram o potencial dessas cepas de aumentar a produção e proporcionar maior teor de P nos grãos. Tudo isso possivelmente está associado à maior aquisição desse elemento nos estágios iniciais de crescimento, pelo aumento do sistema radicular e pela ação de solubilização localizada na rizosfera, proporcionando maior eficiência de absorção do adubo fosfatado e de for-

mas não disponíveis desse elemento na rizosfera (Oliveira et al., 2020; Sousa et al., 2020). A aquisição de P (acúmulo na planta) tem sido relatada como mais importante que o teor de P disponível no solo para o crescimento das raízes e o rendimento de grãos (Mahanta et al., 2018).

Nas avaliações finais de validação, nas quais foi utilizada a formulação do inoculante comercial BiomaPhos com as duas cepas em mistura, destacaram-se os resultados dos ensaios realizados em Palotina, PR, e em Santa Maria, RS, onde ocorreram ganhos de 16 e 17 sacas a mais de milho em relação ao controle não inoculado, respectivamente (Oliveira et al., 2020). A inoculação do BiomaPhos levou ao aumento significativo da produtividade de grãos em milho (ganho médio de 8,9%) nos seguintes estados: Paraná, Bahia, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás (Oliveira et al., 2020). Em geral, os testes foram realizados em lavouras de produtores nessas cinco regiões no País, em áreas de, no mínimo, 20 ha, com e sem a inoculação do BiomaPhos, e as adubações com P foram aplicadas conforme recomendação local.

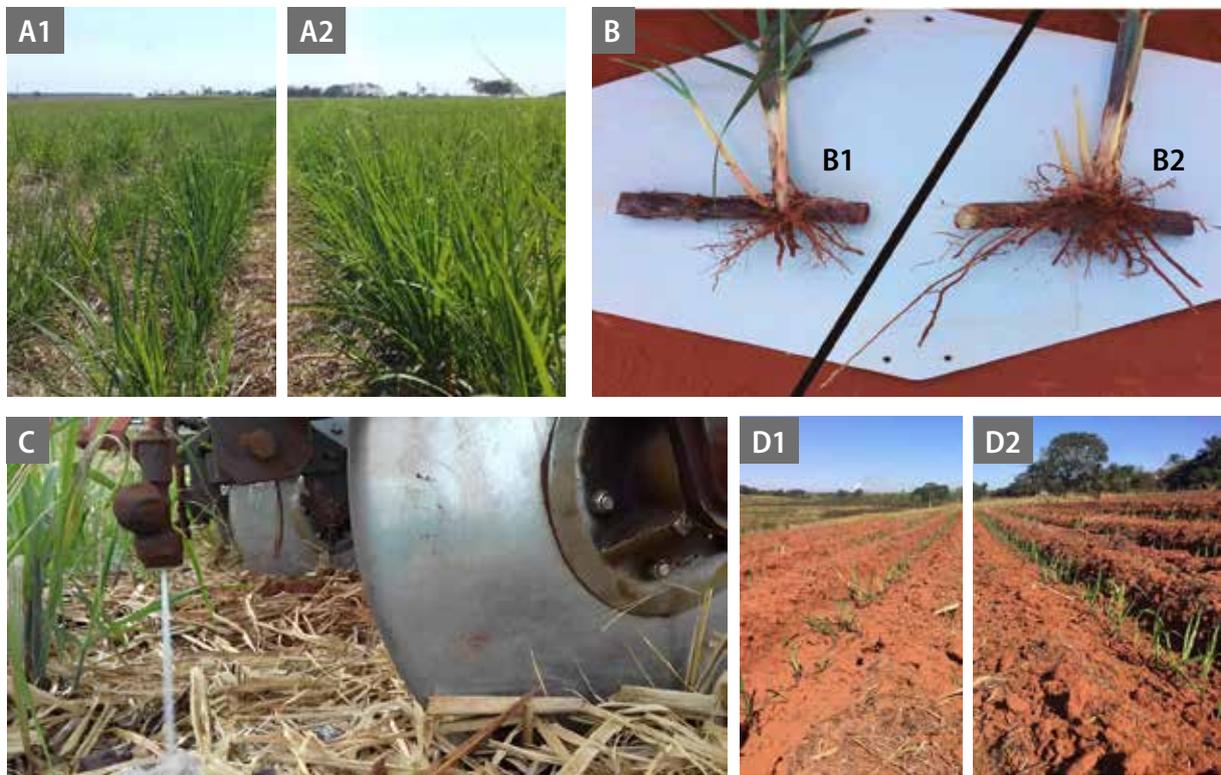
Desde o lançamento do inoculante BiomaPhos, resultados positivos vêm sendo relatados pelos produtores em todo o Brasil. Em 2019, foi utilizado em cerca de 350 mil hectares de milho e de soja, principalmente, e na safra 2020/2021 em 1,5 milhão de hectares. Atualmente, o inoculante já foi avaliado em mais de 500 áreas comerciais de 15 estados em lavoura de milho e de soja e encontra-se em expansão de uso com novos registros para outras culturas, incluindo a cana-de-açúcar. Nessas regiões avaliadas, os ganhos médios, considerando safra e safrinha de 2019/2020, estão em torno de 11 sacas por hectare para milho e 5 sacas por hectare para soja. A análise de numerosos experimentos realizados pela empresa parceira e o relato de produtores têm mostrado que os ganhos de produtividade com a aplicação do inoculante variam conforme os locais e tipos de solo. Além disso, o acesso às

reservas de P no solo e a redução da adubação fosfatada com o uso do inoculante necessitam ser avaliados com critério para o melhor posicionamento do produto de acordo com a adubação e o tipo de solo, otimizando seu uso para diversas culturas em diferentes regiões do Brasil.

Em áreas experimentais da Embrapa Agricultura Digital localizadas em usinas e áreas da Coplacana, foi avaliada a eficácia do inoculante líquido comercial SolubPhos Cana na cultura da cana-de-açúcar, em sistema de produção similar ao manejo comercial empregado em canaviais destinados à produção de açúcar, etanol e biomassa (Cançado et al., 2021). Os resultados indicaram que as doses crescentes do inoculante líquido SolubPhos Cana, variando de 250 mL ha⁻¹ até 1 L ha⁻¹, foram capazes de promover de forma crescente, o aumento em toneladas de cana por hectare (TCH) e toneladas de açúcar por hecta-

re (TAH), mesmo com a metade da dose de P₂O₅ recomendada, indicando que o inoculante líquido SolubPhos Cana aumenta a disponibilidade de P para as plantas de cana, o que refletiu de forma positiva e estatisticamente significativa nos parâmetros de produtividade avaliados nas condições experimentais e nas variedades de cana-de-açúcar empregadas nos experimentos de campo (Cançado et al., 2021).

Outros produtos comerciais à base de MSP estão em fase de estudos e avaliação dentro de projetos da Embrapa para avaliação de doses de fosfato e recomendação de uso do produto BiomaPhos especificamente na cultura da cana-de-açúcar. Resultados preliminares com a inoculação no sulco de plantio e aplicação no corte da cana-soca, no estado de São Paulo, indicam um aumento da biomassa e arranque superior da cultura (Figura 11.1).



Fotos: Guilherme Medeiros Simbióse

Figura 11.1. Soqueira de cana-de-açúcar 60 dias após inoculação com BiomaPhos (A2) e controle (A1), em Guarani D'Oeste, SP. Muda pré-brotada com 35 dias após a aplicação do BiomaPhos (B2) e controle (B1), em José Bonifácio, SP. Aplicação do BiomaPhos em cana-soca (C), em Guarani D'Oeste, e plantio de cana com BiomaPhos (D2) e controle (D1), em Orindiúva, SP.

Considerações finais

O uso de produtos biológicos é uma tendência mundial que contribui para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas nos aspectos econômicos (preços mais acessíveis), ambientais (reduzem contaminação do meio ambiente e dos usuários) e sociais (podem ser utilizados pelos vários extratos de produtores – da agricultura familiar à comercial). De acordo com os novos objetivos da Organização das Nações Unidas (ONU), em 2020, ideias sustentáveis e responsáveis (responsabilidade com a saúde humana, meio ambiente e com o bem-estar social) são funções de empresas, entidades de pesquisa e governo para construção da segurança alimentar e do equilíbrio ambiental.

Nesse sentido, a Embrapa iniciou uma busca por microrganismos na biodiversidade brasileira para identificar isolados que permitissem desenvolver um produto específico para os agricultores, utilizando bactérias fixadoras de N e solubilizadoras de P, as quais funcionassem bem nas condições de solo e clima brasileiro.

Apesar de alguma controvérsia sobre a contribuição da FBN em cana-de-açúcar, principalmente com o argumento de que esse processo não garante o suprimento de N para cultivos de média e alta produtividade (inclusive citando-se estudos realizados na África do Sul e na Austrália, que evidenciaram que a FBN não é uma fonte significativa desse nutriente em cana-de-açúcar, é prudente entender que esse processo é complementar a uma adequada fertilização nitrogenada, desde que não sejam antagônicos. Contribuições significativas da FBN em cana-de-açúcar no Brasil foram constatadas e representam relevantes informações para as condições brasileiras, principalmente pela expressiva dependência que esse processo tem em relação às variedades. Importante ressaltar que, em 2019, foi registrado no Brasil pela Embrapa o primei-

ro inoculante comercial para a cultura da cana-de-açúcar com a cepa fixadora de nitrogênio *Nitrospirillum amazonense*.

É ainda incipiente a questão da inoculação em campo pelas dificuldades encontradas para o desenvolvimento de inoculantes eficientes, principalmente em socarias que rebrotam durante o período mais seco do ano, dificultando a FBN, que é favorecida por condições em que haja suprimento adequado de água. Nesse sentido, escreve que a FBN é ainda uma questão aberta para eficientes programas de fertilização nitrogenada. Isso sugere o desenvolvimento de programas temáticos, como atualmente vem desenvolvendo a Embrapa, que certamente deverá contribuir consideravelmente para a geração de informação técnica necessária para o aprimoramento da FBN em cana-de-açúcar.

Quanto ao fósforo, a tecnologia da Embrapa recém-lançada no produto BiomaPhos e OMSUGO ECO para a cana-de-açúcar, é um exemplo interessante das diferentes etapas entre o início da pesquisa científica e a disponibilização do produto aos agricultores em condições tropicais. Os resultados positivos no campo, até mesmo em outras culturas além do milho, como soja, batata, feijão e cana-de-açúcar, chamam a atenção das indústrias produtoras de inoculantes, que são fundamentais nas etapas de formulação, produção em larga escala, comercialização do produto e treinamento dos agricultores. Além dos ganhos ambientais, é possível a redução dos custos com a adubação fosfatada sintética, tornando o processo ainda mais eficiente. Como as cepas de *Bacillus* não apresentam especificidade de hospedeiro, abre-se uma perspectiva de aumento de produtividades e aumento da eficiência de adubação em várias culturas não previstas inicialmente pela Embrapa e parceiros.

De forma geral, o uso de microrganismos promotores de crescimento da cana-de-açúcar pode ainda ser otimizado com combinações apropriadas

de seleção de estirpes, condições ambientais e genótipos de plantas. Nesse sentido, esforços adicionais devem ser feitos no desenvolvimento de bons inoculantes comerciais e sistemas de produção que permitam reduzir a quantidade de fertilizantes químicos usados para aumentar a fertilidade do solo e a produtividade dessa cultura.

Referências

- ABREU, C. S.; FIGUEIREDO, J. E. F.; OLIVEIRA, C. A.; SANTOS, V. L.; GOMES, E. A.; RIBEIRO, V. P.; BARROS, B. A.; LANA, U. G. P.; MARRIEL, I. E. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017. DOI: [10.4238/gmr16019294](https://doi.org/10.4238/gmr16019294).
- ALMEIDA, C. N. S.; SANTOS, F. C. dos; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; FREITAS, A.; PAIVA, C. A. de O. **Adução organomineral em associação com microrganismos solubilizadores de fósforo no milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 38 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 147).
- ALORI, E. T.; BABALOLA, O. O. Microbial inoculants for improving crop quality and human health in Africa. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. 9, e2213, 2018. DOI: [10.3389/fmicb.2018.02213](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02213).
- ALORI, E. T.; DARE, M. O.; BABALOLA, O. O. Microbial inoculants for soil quality and plant health. **Sustainable Agriculture Reviews**, v. 12, p. 281-307, Jan. 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-48006-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48006-0_9).
- AMANULLAH; KHAN, A. Phosphorus and compost management influence maize (*Zea mays*) productivity under semiarid condition with and without phosphate solubilizing bacteria. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, article 1083, 2015. DOI: [10.3389/fpls.2015.01083](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01083).
- ANTUNES, J. E. L.; FREITAS, A. D. S. de; OLIVEIRA, L. M. S. de; LYRA, M. D. C. P. de; FONSECA, M. A. C.; SANTOS, C. E. R. S.; OLIVEIRA, J. P.; ARAÚJO, A. S. F. de; FIGUEIREDO, M. V. B. Sugarcane inoculated with endophytic diazotrophic bacteria: effects on yield, biological nitrogen fixation and industrial characteristics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, e20180990, 2019. DOI: [10.1590/0001-3765201920180990](https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180990).
- ARMANHI, J. S. L.; SOUZA, R. S. C. de; DAMASCENO, N. B.; ARAÚJO, L. M. de; IMPERIAL, J.; ARRUDA, P. A community-based culture collection for targeting novel plant growth-promoting bacteria from the sugarcane microbiome. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, article 2191, 2018. DOI: [10.3389/fpls.2017.02191](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02191).
- ASUMING-BREMPPONG, S. Phosphate solubilizing microorganisms and their ability to influence yield of rice. **Agricultural Science Research Journal**, v. 3, n. 12, p. 379-386, 2013.
- BACKER, R.; ROKEM, J. S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SUBRAMANIAN, S.; SMITH, D. L. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, article 1473, 2018. DOI: [10.3389/fpls.2018.014](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.014).
- BAHADIR, P. S.; LIAQAT, F.; ELTEM, R. Plant growth promoting properties of solubilizing *Bacillus* species isolated from the Aegean region of Turkey. **Turkish Journal of Botany**, v. 42, n. 2, p. 183-196, 2018.
- BALDANI, J. I.; AZEVEDO, M. S.; REIS, V. M.; TEIXEIRA, K. R.; OLIVARES, F. L.; GOI, S. R.; BALDANI, V. L. D.; DÖBEREINER, J. Fixação biológica de nitrogênio em gramíneas: avanços e aplicações. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p. 621-666.
- BALDANI, J. I.; BALDANI, V. L. D. History on the biological nitrogen fixation research in graminaceous plants: special emphasis on the Brazilian experience. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 77, n. 3, p. 549-579, 2005.
- BALDANI, J. I.; BALDANI, V. L. D.; SELDIN, L.; DÖBEREINER, J. Characterization of *Herbaspirillum seropedicae* gen. Nov., sp.nov., a root-associated nitrogen-fixing bacterium. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 36, n. 1, p. 86-93, Jan. 1986. DOI: [10.1099/00207713-36-1-86](https://doi.org/10.1099/00207713-36-1-86).
- BALDANI, J. I.; POT, T. B.; KIRCHHOF, G.; FALSEN, E.; BALDANI, V. L. D.; OLIVARES, F. L.; HOSTE, B.; KERSTERS, K.; HARTMANN, A.; GILLIS, M.; DOBEREINER, J. Emended description of *Herbaspirillum*: Inclusion of [*Pseudomonas*] *rubrisubalbicans* a mild plant pathogen, as *Herbaspirillum rubrisubalbicans* comb. nov.; and classification of a group of clinical isolates (EF group 1) as *Herbaspirillum* species 3. **International Journal of Systematic Bacteriology**, v. 46, n. 3, p. 802-810, July 1996.
- BALDANI, J. I.; REIS, V. M.; BALDANI, V. L. D.; DOBEREINER, J. A brief story of nitrogen fixation in sugarcane: reasons for success in Brazil. **Functional Plant Biology**, v. 29, n. 4, p. 417-423, Apr. 2002. DOI: [10.1071/PP01083](https://doi.org/10.1071/PP01083).
- BALDANI, V. L. D.; BALDANI, J. I.; OLIVARES F. L.; DOBEREINER, J. Identification and ecology of *Herbaspirillum seopedicae* and the closely related *Pseudomonas rubrisubalbicans*. **Symbiosis**, v. 19, p. 65-73, 1992.

- BALDANI, V. L. D.; DÖBEREINER, J. Alternativas para uma agricultura mais ecológica. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p. 171-174.
- BAPTISTA, R. B.; MORAIS, R. F. de; LEITE, J. M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Variations in the ¹⁵N natural abundance of plant-available N with soil depth: their influence on estimates of contributions of biological N₂ fixation to sugar cane. **Applied and Soil Ecology**, v. 73, p.124-129, Jan. 2014. DOI: [10.1016/j.apsoil.2013.08.008](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.008).
- BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, J. P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998-2013). **Plant and Soil**, v. 378, n. 1/2, p. 1-33, 2014. DOI: [10.1007/s11104-013-1956-x](https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x).
- BERTALAN, M.; ALBANO, R.; DE PADUA, V.; ROUWS, L.; ROJAS, C.; HEMERLY, A. Complete genome sequence of the sugarcane nitrogen-fixing endophyte *Gluconacetobacter diazotrophicus* Pal5. **BMC Genomics**, v. 10, article 450, 2009. DOI: [10.1186/1471-2164-10-450](https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-450).
- BIGGS, I. M.; STEWART, G. R.; WILSON, J. R.; CRITCHLEY, C. ¹⁵N natural abundance studies in Australian commercial sugarcane. **Plant and Soil**, v. 238, n. 1, p. 21-30, 2002. DOI: [10.1023/A:1014280420779](https://doi.org/10.1023/A:1014280420779).
- BLACKWELL, M.; DARCH, T.; HASLAM, R. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements. **Frontiers in Agricultural Science Engineering**, v. 6, n. 4, p. 332-340, 2019. DOI: [10.15302/J-FASE-2019274](https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019274).
- BODDEY, R. M.; DÖBEREINER, J. Nitrogen fixation associated with grasses and cereals: recent progress and perspectives for future. **Plant and Soil**, v. 42, p. 241-250, 1995. DOI: [10.1007/978-94-009-1706-4_24](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1706-4_24).
- BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; REIS, V. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil**, v. 252, p. 139-149, 2003. DOI: [10.1023/A:1024152126541](https://doi.org/10.1023/A:1024152126541).
- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA JUNIOR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, article 13, 2018. DOI: [10.1007/s13593-018-0490-x](https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x).
- CABALLERO-MELLADO, J.; MARTINEZ-AGUILAR, L.; PAREDES-VALDEZ, G.; ESTRADA DE LOS SANTOS, P. *Burkholderia unamae* sp. nov., in N₂-fixing rhizospheric and endophytic species. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 54, n. 4, p. 1165-1172, 2004. DOI: [10.1099/ijs.0.02951-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.02951-0).
- CANÇADO, G. M. de A.; VASCONCELOS, J. C. S.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; CRISTOFOLETTI, D.; SEVERINO, F. J.; PINTO JUNIOR, A. S.; MEDEIROS, G. de; BARBOSA, L. A. F.; SPERANZA, E. A.; ANTUNES, J. F. G. **Utilização de inoculante líquido solubilizador de fosfato formulado a base dos isolados de *Bacillus megaterium* (B119) e *Bacillus subtilis* (B2084) no plantio da cana-de-açúcar**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2021. 25 p. (Embrapa Agricultura Digital. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 49).
- CARNEIRO JÚNIOR, J. B. **Efeito do tratamento térmico e da inoculação de bactérias endofíticas no controle do raquitismo da soqueira da cana-de-açúcar**. 2006. 92 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro.
- CAVALCANTE, V. A.; DÖBEREINER, J. A new acid-tolerant nitrogen-fixing bacterium associated with sugarcane. **Plant and Soil**, v. 108, p. 23-31, May 1988. DOI: [0.1007/BF02370096](https://doi.org/10.1007/BF02370096).
- CHAGAS, L. F. B.; CHAGAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, M. R. de; MILLER, L. de O.; COLONIA, B. S. O. Evaluation of the phosphate solubilization potential of *Trichoderma* strains (*Trichoplus* JCO) and effects on rice biomass. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 15, n. 3, p. 794-804, 2015. DOI: [10.4067/S0718-95162015005000054](https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000054).
- CHAWLA, N.; PHOUR, M.; SUNEJA, S.; SANGWAAN, S.; GOYAL, S. *Gluconacetobacter diazotrophicus*: an overview. **Research in Environment and Life Sciences**, v. 7, n. 1, p. 1-10, Jan. 2014.
- CHEN, Q.; LIU, S. Identification and characterization of the phosphate-solubilizing bacterium *Pantoea* sp. S32 in reclamation soil in Shanxi, China. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, article 2171, Sept. 2019. DOI: [10.3389/fmicb.2019.02171](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02171).
- CHEN, Y. P.; REKHA, P. D.; ARUN, A. B.; SHEN, F. T.; LAI, W. A.; YOUNG, C. C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. **Applied Soil Ecology**, v. 34, n. 1, p. 33-41, 2006. DOI: [10.1016/j.apsoil.2005.12.002](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002).
- CHOUYIA, F. E.; ROMANO, I.; FECHTALI, T.; FAGNANO, M.; FIORENTINO, N.; VISCONTI, D.; IDBELLA, M.; V.; O. P. Solubilizing *Streptomyces roseocinereus* MS1B15 with multiple plant growth-promoting traits enhance barley development and regulate rhizosphere microbial population. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, article 1137, Aug. 2020. DOI: [10.3389/fpls.2020.01137](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01137).
- DÖBEREINER, J. History and new perspectives of diazotrophs in association with non-leguminous plants. **Symbiosis**, v. 13, p. 1-13, 1992.

- DÖBEREINER, J. Nitrogen-fixing bacteria of the genus *Beijerinckia* Derx in the rhizosphere of sugar cane. **Plant and Soil**, v. 15, p. 211-216, 1961.
- DÖBEREINER, J.; DAY J. M. Associative symbioses in tropical grasses: characterization of microorganisms and nitrogen-fixing sites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NITROGEN FIXATION, 1., 1975, Pullman. **Proceedings...** Pullman: Washington State University, 1975. p. 518-538.
- DÖBEREINER, J.; DAY, J. M.; DART, P. J. Fixação de nitrogênio na rizosfera de *Paspalum notatum* e da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 8, n. 7, p. 153-157, 1973.
- DÖBEREINER, J.; PIMENTEL, J. P.; OLIVARES, F. L.; URQUIAGA, S. Bactérias diazotróficas podem ser endofíticas ou fitopatogênicas? **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 62, p. 319, 1990.
- DÖBEREINER, J.; REIS, V. M.; PAULA, M. A.; OLIVARES, F. L. Endophytic diazotrophs in sugar cane, cereals and tuber plants. In: PALACIOS, R.; MORA, J.; NEWTON, W. E. (ed.). **New horizons in nitrogen fixation**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 671-676.
- DÖBEREINER, J.; RUSCHEL, A. P. Uma nova espécie de *Beijerinckia*. **Revista de Biologia**, v. 1, p. 261-272, 1958.
- EMAMI, T.; MIRZAEIluHEYDARI, M.; MALEKI, A.; BAZGIR, M. Effect of native growth promoting bacteria and commercial biofertilizers on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare*) under salinity stress conditions. **Cellular and Molecular Biology**, v. 65, n. 6, p. 22-27, 2019. DOI: [10.14715/cmb/2019.65.6.5](https://doi.org/10.14715/cmb/2019.65.6.5).
- EMBRAPA. **Aplicativo Bioinsumos**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/7227/aplicativo-bioinsumos>. Acesso em: 6 fev. 2023.
- ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 156, p. 225-246, 2018. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2018.03.013](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013).
- FLYNN, H. C.; SMITH, P. **Greenhouse gas budgets of crop production: current and likely future trends**. Paris: International Fertilizer Association Industry, 2010. 67 p.
- FUENTES-RAMÍREZ, L. E.; BUSTILIOS-CRISTALES, R.; TAPIA-HERNANDEZ, A.; JIMENEZ-SALGADO, T.; WANG, E. T.; MARTINEZ-ROMERO, E.; CABALLERO-MELLADO, J. Novel nitrogen-fixing acetic acid bacteria, *Gluconacetobacter johanna* sp. nov. and *Gluconacetobacter azotocaptans* sp. nov. associated with coffee plants. **International Journal Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 51, n. 4, p. 1305-1314, 2001. DOI: [10.1099/00207713-51-4-1305](https://doi.org/10.1099/00207713-51-4-1305).
- GADD, G. M. Fungal production of citric and oxalic acid: Importance in metal speciation, physiology and biogeochemical processes. **Advances in Microbial Physiology**, v. 41, p. 47-92, 1999. DOI: [10.1016/S0065-2911\(08\)60165-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2911(08)60165-4).
- GAO, X.; WU, Z.; LIU, R.; WU, J.; ZENG, Q.; QI, Y. Rhizosphere bacterial community characteristics over different years of sugarcane ratooning in consecutive monoculture. **BioMed Research International**, ID4943150, 2019. DOI: [10.1155/2019/4943150](https://doi.org/10.1155/2019/4943150).
- GILLIS, M.; DÖBEREINER, J.; POT, B.; GOOR, M.; FALSEN, E.; HOSTE, B.; KERSTERS, K. Taxonomic relationships between [*Pseudomonas*] *rubrisubalbicans*, some clinical isolates (EF group 1), *Herbaspirillum seropedicae* and [*Aquaspirillum*] *autotrophicum*. In: POLSINELLI, M.; MATERASSI, R.; VINCENZINI, M. (ed.). **Nitrogen fixation**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. p. 293-294. (Development in Plant and Soil Sciences, v. 48).
- GLOBALFERT. **Entrega de fertilizantes deve chegar a 37 milhões de toneladas em 2020**. Disponível em: <https://www.globalfert.com.br/noticias/mercado/entrega-de-fertilizantes-deve-chegar-a-37-milhoes-de-toneladas-em-2020>>. Acesso em: 28 ago. 2020.
- GLOBALFERT. **Volume de importação de fertilizantes no Brasil em 2018**. Disponível em: <https://www.globalfert.com.br/boletins/volume-de-importacao-de-fertilizantes-no-brasil-em-2018>. Acesso em: 23 abr. 2019.
- GOMES, E.; SILVA, U.; MARRIEL, I.; OLIVEIRA, C.; LANA, U. Rock phosphate solubilizing microorganisms isolated from maize rhizosphere soil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 1, p. 69-81, 2014. DOI: [10.18512/1980-6477/rbms.v13n1p69-81](https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v13n1p69-81).
- GOPALAKRISHNAN, S.; SRINIVAS, V.; SAMINENI, S. Nitrogen fixation, plant growth and yield enhancements by diazotrophic growth-promoting bacteria in two cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 11, p. 116-123, July 2017. DOI: [10.1016/j.bcab.2017.06.012](https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.06.012).
- GOSWAMI, D.; DHANDHUKIA, P.; PATEL, P.; THAKKER, J. N. Screening of PGPR from saline desert of Kutch: growth promotion in *Arachis hypogea* by *Bacillus licheniformis* A2. **Microbiology Research**, v. 169, n. 1, p. 66-75, Jan. 2014. DOI: [10.1016/j.micres.2013.07.004](https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.07.004).
- GUMIERE, T.; ROUSSEAU, A. N.; COSTA, D. P. da; CASSETARI, A.; COTTA, S. R.; ANDREOTE, F. D.; GUMIERE, S. J.; PAVINATO, P. S. Phosphorus source driving the soil microbial interactions and improving sugarcane development. **Scientific Reports**, v. 9, article 4400, 2019. DOI: [10.1038/s41598-019-40910-1](https://doi.org/10.1038/s41598-019-40910-1).

- HAMEEDA, B.; HARINI, G.; RUPELA, O. P.; WANI, S. P.; REDDY, G. Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna. **Microbiological Research**, v. 163, n. 2, p. 234-242, 2008.
- IRSHAD, M.; ANWAR, Z.; AFROZ, A. Characterization of Exo 1,4-b glucanase produced from *Trichoderma viride* through solid-state bio-processing of orange peel waste. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 3, n. 5, p. 580-584, 2012.
- JONES, F. Lançado o primeiro produto nacional formulado com microrganismos para facilitar a absorção de fósforo do solo. **Pesquisa Fapesp**, n. 285, p. 77-78, nov. 2019.
- KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, ID4917256, 2019. DOI: [10.1155/2019/4917256](https://doi.org/10.1155/2019/4917256).
- KAUR, G.; REDDY, M. S. Effects of phosphate-solubilizing bacteria, rock phosphate and chemical fertilizers on maize-wheat cropping cycle and economics. **Pedosphere**, v. 25, n. 3, p. 428-437, June 2015.
- KHALIL, I. H.; CARVER, B. F.; KRENZER, E. G.; MACKOWN, C. T.; HORN, G. W.; RAYAS-DUARTE, P. Genetic trends in winter wheat grain quality with dual-purpose and grain-only management systems. **Crop Science**, v. 42, n. 4, p. 1112-1116, 2002. DOI: [10.2135/cropsci2002.1112](https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1112).
- KHAN, A.; JILANI, V.; AKHTAR M. S.; NAQVI, S. M. S.; RASHEED M. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. **Journal of Agricultural and Biological Science**, v. 1, n. 1, p. 48-58, 2009.
- KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; WANI, P. A. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 27, p. 29-43, 2007. DOI: [10.1007/978-90-481-2666-8_34](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_34).
- KINGSTON, G. **Mineral nutrition of sugarcane**. New York: John Wiley, 2014.
- KLOPPER, J. W.; BEAUCHAMP, C. J. A review of issues related to measuring colonization of plant roots by bacteria. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 38, n. 12, p. 1219-1232, 1992. DOI: [10.1139/m92-202](https://doi.org/10.1139/m92-202).
- KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 2, p. 391-396, 1999. DOI: [10.1590/S0103-90161999000200019](https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000200019).
- KUMAR, A.; KUMAR, A.; PATEL H. Role of microbes in phosphorus availability and acquisition by plants. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 1344-1347, 2018.
- KUMAR, B.; TRIVEDI, P.; PANDEY, A. *Pseudomonas corrugate*: a suitable bacterial inoculant for maize grown under rainfed conditions of Himalayan region. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 12, p. 3093-3100, 2007. DOI: [10.1016/j.soilbio.2007.07.003](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.003).
- LI, Y.; LI, Q.; GUAN, G.; CHEN, S. Phosphate solubilizing bacteria stimulate wheat rhizosphere and endosphere biological nitrogen fixation by improving phosphorus content. **PeerJ**, v. 8, e9062, 2020. DOI: [10.7717/peerj.9062](https://doi.org/10.7717/peerj.9062).
- LIN, S.-Y.; HAMEED, A.; SHEN, F.-T.; LIU, Y.-C.; HSU, Y.-H.; SHAHINA, M.; LAI, W.-A.; YOUNG, C.-C. Description of *Niveispirillum fermenti* gen. nov., sp. nov., isolated from a fermentor in Taiwan, transfer of *Azospirillum irakense* 1989 as *Niveispirillum irakense* comb. nov., and reclassification of *Azospirillum amazonense* 1983 as *Nitrospirillum amazonense* gen. nov. **Antonie Van Leeuwenhoek**, v. 105, n. 6, p. 1149-1162, 2014. DOI: [10.1007/s10482-014-0176-6](https://doi.org/10.1007/s10482-014-0176-6).
- LIRA, D. N. S.; ARAUCO, A. M. S.; BOECHAT, C. L.; MOITINHO, M. R.; LACERDA, J. J. J.; COSTA MARTINS, E. C. Associative diazotrophic bacteria inoculated in sugarcane cultivars: implications on morphophysiological attributes and plant nutrition. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190155, 2020. DOI: [10.36783/18069657rbcs20190155](https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190155).
- LOPES, V. R.; BESPALHOK FILHO, J. C.; FIGUEIREDO, G. G. O.; OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E. Interaction between sugarcane families and plant growth-promoting bacteria in two crop cycles. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 2, p. 527-538, 2019. DOI: [10.5433/1679-0359.2019v40n2p527](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p527).
- LÓPEZ-ARREDONDO, D. L.; LEYVA-GONZÁLEZ, M. A.; GONZALEZ-MORALES, S. I.; LÓPEZ-BUCIO, J.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, v. 65, p. 95-123, 2014.
- MAGALHÃES, F. M. M.; BALDANI, J. I.; SOUTO, S. M.; KUYKENDALL, J. R.; DÖBEREINER, J. A new acid tolerant *Azospirillum* species. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, v. 55, n. 4, p. 417-430, 1983.
- MAHANTA, N.; LIU, A.; DONG, S.; NAIR, S. K.; MITCHELL, D. A. Enzymatic reconstitution of ribosomal peptide backbone thioamidation. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 115, n. 12, p. 3030-3035, 2018. DOI: [10.1073/pnas.1722324115](https://doi.org/10.1073/pnas.1722324115).
- MANZOOR, M.; ABBASI, M. K.; SULTAN, T. Isolation of phosphate solubilizing bacteria from maize rhizosphere and their potential for rock phosphate solubilization-mineralization and plant growth

- promotion. **Geomicrobiology Journal**, v. 34, n. 1, p. 81-95, 2017.
- MARQUES JÚNIOR, R. B.; CANELLAS, L. P.; SILVA, L. G.; OLIVARES, F. L. Promoção de enraizamento de microtoletes de cana-de-açúcar pelo uso conjunto de substâncias húmicas e bactérias diazotróficas endofíticas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1121-1128, jun. 2008. DOI: [10.1590/S0100-06832008000300020](https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300020).
- MARTINS, D. S.; REIS, V. M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; PEREIRA, W.; SOUSA, J. S.; BODDEY, R. M. Both the contribution of soil nitrogen and of biological N₂ fixation to sugarcane can increase with the inoculation of diazotrophic bacteria. **Plant and Soil**, v. 454, p. 155-169, 2020.
- MATTOS, B. B.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; MARRIEL, I. E.; LANA, U. G. P.; SCHAFFERT, R. E.; OLIVEIRA, C. A. Sorghum genotypes response to inoculation with phosphate solubilizing bacteria. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 19, e1177, 2020. DOI: [10.1007/s11104-020-04621-1](https://doi.org/10.1007/s11104-020-04621-1).
- MEHNAZ, S.; LAZAROVITS, G. Inoculation effectas of *Pseudomonas putida*, *Gluconacetobacter azotocaptans* and *Azospirillum lipoferum* on corn plant growth under greenhouse conditions. **Microbial Ecology**, v. 51, n. 3, Apr. p. 326-335, 2006. DOI: [10.1007/s00248-006-9039-7](https://doi.org/10.1007/s00248-006-9039-7).
- MENDES, G.; FREITAS, A. L. M.; PEREIRA, O. P.; SILVA, I. R.; VASSILEV, N. B.; COSTA, M. D. Mechanisms of phosphate solubilization by fungal isolates when exposed to different P sources. **Annals of Microbiology**, v. 64, p. 239-249, 2014. DOI: [10.1007/s13213-013-0656-3](https://doi.org/10.1007/s13213-013-0656-3).
- MENEZES-BLACKBURN, D.; GILES, C.; DARCH, T.; GEORGE, T. S.; BLACKWELL, M.; STUTTER, M.; SHAND, C.; LUMSDON, D.; COOPER, P.; WENDLER, R.; BROWN, L.; ALMEIDA, D. S.; WEARING, C.; ZHANG, H.; HAYGARTH, P. M. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. **Plant and Soil**, v. 427, p. 5-16, 2018. DOI: [10.1007/s11104-017-3362-2](https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2).
- MUTHUKUMARASAMY, R.; REVATHI, G.; VADILELU, M. Antagonistic potential of N₂-fixing *Acetobacter diazotrophicus* against *Colletotrichum falcatum* Went., a causal organism of red-rot of sugarcane. **Current Science**, v. 78, n. 9, p. 1063-1065, May 2000.
- NAHAS, E.; BANZATTO, D. A.; ASSIS, L. C. Fluorapatite solubilization by *Aspergillus niger* in vinasse medium. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 8, p. 1097-1101, 1990. DOI: [10.1016/0038-0717\(90\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90035-X).
- NAZIR, N.; KAMILI, A. N.; SHAH, D. Mechanism of plant growth promoting rhizobacteria (pgpr) in enhancing plant growth: a review. **International Journal of Management, Technology and Engineering**, v. 8, p. 709-721, 2018.
- NIETO-PENALVER, C. G.; SAVINO, M. J.; BERTINI, E. V.; SANCHEZ, L. A.; DE FIGUEROA, L. I. C. Gluconic acid produced by *Gluconacetobacter diazotrophicus* Pa15 possesses antimicrobial properties. **Research in Microbiology**, v. 165, n. 7, p. 549-558, 2014. DOI: [10.1016/j.resmic.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.resmic.2014.06.003).
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Ed. da Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- OLIVEIRA, A. L. M. de; CANUTO, E. L. de; URQUIAGA, S.; REIS, V. M.; BALDANI, J. I. Yield of micropropagated sugarcane varieties in different soil types following inoculation with endophytic diazotrophic bacteria. **Plant and Soil**, v. 284, p. 23-32, 2006. DOI: [10.1007/s11104-006-0025-0](https://doi.org/10.1007/s11104-006-0025-0).
- OLIVEIRA, A. L. M.; CANUTO, E. L.; SILVA, E. E.; REIS, V. M.; BALDANI, J. I. Survival of endophytic diazotrophic bacteria in soil under different moisture levels. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 35, n. 4, p. 295-299, 2004. DOI: [10.1590/S1517-83822004000300005](https://doi.org/10.1590/S1517-83822004000300005).
- OLIVEIRA, A. L. M.; URQUIAGA, S.; DOBEREINER, J.; BALDANI, J. I. The effect of inoculating endophytic N₂-fixing bacteria on micropropagated sugarcane plants. **Plant and Soil**, v. 242, p. 205-215, 2002. DOI: [10.1023/A:1016249704336](https://doi.org/10.1023/A:1016249704336).
- OLIVEIRA, C. A.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SCOTTI, M. R.; CARNEIRO, N. P.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; SÁ, N. M. H. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, n. 9, p. 1782-1787, Sept. 2009. DOI: [10.1016/j.soilbio.2008.01.012](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.012).
- OLIVEIRA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C. dos; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JÚNIOR, R. **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 18 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 260).
- OLIVEIRA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; MATTOS, B. B.; SANTOS, F. C. dos; OLIVEIRA, M. C.; ALVES, V. M. C. **Metodologia de aplicação de microrganismos solubilizadores de fósforo em sementes visando melhor aproveitamento deste nutriente pelas plantas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 88).

- ONGENA, M.; JACQUES, P. *Bacillus lipopeptides*: versatile weapons for plant disease biocontrol. **Trends in Microbiology**, v. 16, n. 3, p. 115-125, 2008. DOI: [10.1016/j.tim.2007.12.009](https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.12.009).
- OWEN, B. M.; MANGELSDORF, D. J.; KLIEWER, S. A. Tissue-specific actions of the metabolic hormones FGF15/19 and FGF21. **Trends in Endocrinology and Metabolism**, v. 26, n. 1, p. 22-29, Jan. 2015. DOI: [10.1016/j.tem.2014.10.002](https://doi.org/10.1016/j.tem.2014.10.002).
- PEIX, A.; RIVAS-BOYERO, A. A.; MATEOS, P. F.; RODRIGUEZ-BARRUECO, C.; MARTÍNEZ-MOLINA, E.; VELAZQUEZ, E. Growth promotion of chickpea and barley by a phosphate solubilizing strain of *Mesorhizobium mediterraneum* under growth chamber conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 1, p. 103-110, Jan. 2001. DOI: [10.1016/S0038-0717\(00\)00120-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00120-6).
- PELLEGRINI, M.; ERCOLE, C.; DI ZIO, C.; MATTEUCCI, F.; PACE, L.; DEL GALLO, M. In vitro and in planta antagonistic effects of plant growth-promoting rhizobacteria consortium against soilborne plant pathogens of *Solanum tuberosum* and *Solanum lycopersicum*. **FEMS Microbiology Letters**, v. 367, n. 13, Fnaa09, July 2020. DOI: [10.1093/femsle/fnaa099](https://doi.org/10.1093/femsle/fnaa099).
- PEREIRA, W.; SOUSA, J. S.; SCHULTZ, N.; REIS, V. M. Sugarcane productivity as a function of nitrogen fertilization and inoculation with diazotrophic plant growth-promoting bacteria. **Sugar Tech**, v. 21, p. 71-82, 2019. DOI: [10.1007/s12355-018-0638-7](https://doi.org/10.1007/s12355-018-0638-7).
- PÉREZ-MONTAÑO, F.; JIMÉNEZ-GUERRERO, I.; CONTRERAS SÁNCHEZ-MATAMOROS, R.; LÓPEZ-BAENA, F. J.; OLLERO, F. J.; RODRÍGUEZ-CARVAJAL, M. A.; BELLOGÍN, R. A.; ESPUNY, R. Rice and bean AHL-mimic quorum-sensing signals specifically interfere with the capacity to form biofilms by plant-associated bacteria. **Research in Microbiology**, v. 164, n. 7, p. 749-760, Sept. 2013. DOI: [10.1016/j.resmic.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.resmic.2013.04.001).
- PERIN, L.; MARTÍNEZ-AGUILAR, L.; PAREDES-VALDEZ, G.; BALDANI, J. I.; ESTRADA DE LOS SANTOS, P.; REIS, V. M.; CABALLERO-MELLADO, J. *Burkholderia silvatlantica* sp. nov., a diazotrophic bacterium associated with sugarcane and maize. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 56, n. 8, p. 1931-1937, 2006. DOI: [10.1099/ijs.0.64362-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.64362-0).
- PII, Y.; MIMMO, T.; TOMASI, T.; TERZANO, R.; CESCO, S.; CRECCHIO, C. Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 51, p. 403-415, 2015. DOI: [10.1007/s00374-015-0996-1](https://doi.org/10.1007/s00374-015-0996-1).
- PIÑÓN, D.; CASAS, M.; BLANCH, M.; FONTANIELLA, B.; BLANCO, Y.; VICENTE, C.; SOLAS, M. T.; LEGAZ, M. E. *Gluconacetobacter diazotrophicus*, a sugarcane endosymbiont, produces a bacteriocin against *Xanthomonas albilineans*, a sugarcane pathogen. **Research in Microbiology**, v. 153, n. 6, p. 345-351, July-Aug. 2002. DOI: [10.1016/S0923-2508\(02\)01336-0](https://doi.org/10.1016/S0923-2508(02)01336-0).
- RAMÍREZ, L. E.; CABALLERO-MELLADO, J. Bacterial biofertilizers, In: SIDDIQUI, Z. A. (ed.). **PGPR: biocontrol and biofertilization**. Dordrecht: Springer, 2006. p. 43-172.
- RAZA, A.; ZAHRA, N.; HAFEEZ, M. B.; AHMAD, M.; IQBAL, S.; SHAUKAT, K.; AHMAD, G. Nitrogen fixation of legumes: biology and physiology. In: HASANUZZAMAN, M.; ARAÚJO, S.; GILL, S. (ed.). **The plant family Fabaceae**. Singapore: Springer, 2020.
- REED, S. C.; CLEVELAND, C. C.; TOWNSEND, A. R. Functional ecology of free-living nitrogen fixation: a contemporary perspective. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 42, p. 489-512, Aug. 2011.
- REIS, V. M.; OLIVEIRA, A. L. M. de; SILVA, M. F. da; OLIVARES, F. L.; BALDANI, J. I.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Inoculants for sugar cane: the scientific bases for the adoption of the technology for biofuel production. In: DAKORA, F. D.; CHIMPHANGO, S. B. M.; VALENTINE, A. J.; ELMERICH, C.; NEWTON, W. E. (ed.). **Biological nitrogen fixation: towards poverty alleviation through sustainable agriculture**. Dordrecht: Springer, 2008. p. 67-68.
- REIS, V. M.; OLIVEIRA, A. L. M.; BALDANI, V. L. D.; OLIVARES, F. L.; BALDANI, J. I. Fixação biológica de nitrogênio simbiótica e associativa. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 153-174.
- REIS, V. M.; VANDERLEYDEN, J.; SPAEPEN, S. N₂ fixing endophytes of grasses and cereals. In: POLACCO, J. C.; TODD, C. D. **Ecological aspects of nitrogen metabolism in plants**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011. p. 231-253.
- REZAKHANI, L.; MOTESHAREZADEH, B.; TEHRANI, M. M.; ETESAMI, H.; HOSSEINI, H. M. Effect of Silicon and phosphate-solubilizing bacteria on improved phosphorus (P) uptake is not specific to insoluble p-fertilized sorghum (*Sorghum bicolor* L.) plants. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 39, p. 239-253, May 2020. DOI: [10.1007/s00344-019-09978-x](https://doi.org/10.1007/s00344-019-09978-x).
- RIBEIRO, V. P.; MARRIEL, I. E.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G. P.; MATTOS, B. B.; OLIVEIRA, C. A.; GOMES, E. A. Endophytic *Bacillus* strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, S1, p. 40-46, 2018. DOI: [10.1016/j.bjm.2018.06.005](https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.06.005).
- RICHARDSON, A. E.; BAREA, J.; MCNEILL, A. M.; COMBARET-PRIGENT, C. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. **Plant and Soil**, v. 321, p. 305-339, 2009. DOI: [10.1007/s11104-009-9895-2](https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2).
- RODRIGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, v. 17, n. 4/5, p. 319-339, Oct. 1999. DOI: [10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2).

- ROMÃO-DUMARESQ, A. S.; FRANCO, H. C. J.; BORGES, B. M. M. N.; BATISTA, B. D.; QUECINE, M. C. Beneficial microorganisms associated with sugarcane crops: the green gold for clean energy. In: AZEVEDO, J. de; QUECINE, M. (ed.). **Diversity and benefits of microorganisms from the tropics**. Cham: Springer, 2017.
- ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E. S.; JALAL, A.; GALINDO, F. S.; BUZETTI, S.; FERNANDES, G. C.; BARCO NETO, M.; PAVINATO, P. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Inoculation with growth-promoting bacteria associated with the reduction of phosphate fertilization in sugarcane. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, article 32, 2020. DOI: [10.3389/fenvs.2020.00032](https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00032).
- SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; VICTORIA, R. L.; TRIVELIN, P. C. O. Redistribution of the nitrogen reserves of ¹⁵N enriched stem cuttings and dinitrogen fixed by 90-day-old sugarcane plants. **Plant and Soil**, v. 108, p. 275-279, May 1988. DOI: [10.1007/BF02375659](https://doi.org/10.1007/BF02375659).
- SANTOS, R. M.; DIAZ, P. A. E.; LOBO, L. L. B.; RIGOBELLO, E. C. Use of plant growth-promoting rhizobacteria in maize and sugarcane: characteristics and applications. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, article 136, Sept. 2020a. DOI: [10.3389/fsufs.2020.00136](https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00136).
- SANTOS, S. G. dos; RIBEIRO, F. da S.; ALVES, G. C.; SANTOS, L. A.; REIS, V. M. Inoculation with five diazotrophs alters nitrogen metabolism during the initial growth of sugarcane varieties with contrasting responses to added nitrogen. **Plant and Soil**, v. 451, p. 25-44, 2020b. DOI: [10.1007/s11104-019-04101-1](https://doi.org/10.1007/s11104-019-04101-1).
- SANTOS, S. G. dos; CHAVES, V. A.; RIBEIRO, F. S.; ALVES, G. C.; REIS, V. M. Rooting and growth of pre-germinated sugarcane seedlings inoculated with diazotrophic bacteria. **Applied Soil Ecology**, v. 133, p. 12-23, Jan. 2019. DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.08.015](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.015).
- SANTOS, S. G. dos; RIBEIRO, F. D.; FONSECA, C. S.; PEREIRA, W.; SANTOS, L. A.; REIS, V. M. Development and nitrate reductase activity of sugarcane inoculated with five diazotrophic strains. **Archives of Microbiology**, v. 199, p. 863-873, 2017. DOI: [10.1007/s00203-017-1357-2](https://doi.org/10.1007/s00203-017-1357-2).
- SATHYA, A.; VIJAYABHARATHI, R.; GOPALAKRISHNAN, S. Soil microbes: the invisible managers of soil fertility. In: SINGH, D. P.; SINGH, H. B.; PRABHA, R. **Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity**. New York: Springer, 2016. v. 2, p. 1-16.
- SATYAPRAKASH, M.; NIKITHA, T.; REDDI, E. U. B.; SADHANA, B.; VANI, S. S. Phosphorous and phosphate solubilizing bacteria and their role in plant nutrition. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 4, p. 2133-2144, 2017. DOI: [10.20546/ijcmas.2017.604.251](https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.251).
- SCHLEMPER, T. R.; DIMITROV, M. R.; GUTIERREZ, F. A. O.; VEEN, J. A. van; SILVEIRA, A. P. D.; KURAMAE, E. Effect of *Burkholderia tropica* and *Herbaspirillum frisingense* strains on sorghum growth is plant genotype dependent. **PeerJ**, v. 6, e5346, July 2018.
- SCHULTZ, N.; PEREIRA, W.; SILVA, P. A.; BALDANI, J. I.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M. Yield of sugarcane varieties and their sugar quality grown in different soil types and inoculated with a diazotrophic bacteria consortium. **Plant Production Science**, v. 20, n. 4, p. 366-374, Aug. 2017. DOI: [10.1080/1343943X.2017.1374869](https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1374869).
- SCHULTZ, N.; SILVA, J. A.; SOUSA, J. S.; MONTEIRO, R. C.; OLIVEIRA, R. P.; CHAVES, V. A.; PEREIRA, W.; SILVA, M. F.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S. Inoculation of sugarcane with diazotrophic bacteria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 359-371, 2014. DOI: [10.1590/S0100-06832014000200005](https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200005).
- SELVI K. B.; PAUL, J. J. A.; VIJAYA, V.; SARASWATHI, K. Analyzing the efficacy of phosphate solubilizing microorganisms by enrichment culture techniques. **Biochemistry and Molecular Biology Journal**, v. 3, n. 1, p. 1-7, 2017. DOI: [10.21767/2471-8084.100027](https://doi.org/10.21767/2471-8084.100027).
- SHAW, J. N. Iron and aluminum oxide characterization for highly-weathered Alabama ultisols. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 1/2, p. 49-64, 2001. DOI: [10.1081/CSS-100102992](https://doi.org/10.1081/CSS-100102992).
- SIMS, J. T.; SIMARD, R. R.; JOERN, B. C. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research. **Journal of Environmental Quality**, v. 27, n. 2, p. 277-293, 1998. DOI: [10.2134/jeq1998.00472425002700020006x](https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020006x).
- SINGH, J. S.; KOUSHAL, S.; KUMAR, A.; VIMAL, S. R.; GUPTA, V. K. Book review: microbial inoculants in sustainable agricultural productivity-Vol. II: functional application. **Frontiers of Microbiology**, v. 7, article 2105, Dec. 2016. DOI: [10.3389/fmicb.2016.02105](https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02105).
- SINGH, H.; REDDY, M. S. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils. **European Journal of Soil Biology**, v. 47, n. 1, p. 30-34, Jan.-Feb. 2011. DOI: [10.1016/j.ejsobi.2010.10.005](https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.10.005).
- SLAPSAK, N.; CLEENWERCK, I.; DE VOS, P.; TRCEK, J. *Gluconacetobacter maltaceti* sp. nov., a novel vinegar producing acetic acid bacterium. **Systematic and Applied Microbiology**, v. 36, n. 1, p. 17-21, Feb. 2013. DOI: [10.1016/j.syapm.2012.11.001](https://doi.org/10.1016/j.syapm.2012.11.001).
- SOUSA, S. M. de; PAIVA, C. A. O.; ANDRADE, D. L.; CARVALHO, C. G. de; RIBEIRO, V. P.; PASTINA, M. M.; MARRIEL, I. E.; LANA, U. G. de P.; GOMES, E. A. Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, Dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 867-877, May 2020. DOI: [10.1007/s00344-020-10146-9](https://doi.org/10.1007/s00344-020-10146-9).

- SOUZA, R. S. C.; OKURA, V. K.; ARMANHI, J. S. L.; JORRÍN, B.; LOZANO, N.; SILVA, M. J. da; GONZÁLEZ-GUERRERO, M.; ARAÚJO, L. M. de; VERZA, N. C.; BAGHERI, H. C.; IMPERIAL, J.; ARRUDA, P. Unlocking the bacterial and fungal communities assemblages of sugarcane microbiome. **Scientific Reports**, v. 6, article 28774, June 2016.
- STAMFORD, N. P.; LIMA, R. A.; LIRA JÚNIOR, M. A.; SANTOS, C. E. R. S. Effectiveness of phosphate and potash rocks with *Acidithiobacillus* on sugar cane yield and their effects in soil chemical attributes. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 24, p. 2061-2066, 2008. DOI: [10.1007/s11274-008-9710-x](https://doi.org/10.1007/s11274-008-9710-x).
- STAMFORD, N. P.; LIMA, R. A.; SANTOS, C. R. S.; DIAS, S. H. L. Rock biofertilizers with *Acidithiobacillus* on sugarcane yield and nutrient uptake in a Brazilian soil. **Geomicrobiology Journal**, v. 23, n. 5, p. 261-265, 2006. DOI: [10.1080/01490450600760658](https://doi.org/10.1080/01490450600760658).
- STRAATEN, P. van. **Rocks for crops**: agrominerals of sub-Saharan Africa. Nairobi: International Center for Research in Agroforestry; Guelph: University of Guelph, 2002. 338 p.
- SUNDARA, B.; NATARAJAN, V.; HARI, K. Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane and sugar yields. **Field Crops Research**, v. 77, n. 1, p. 43-49, Aug. 2002. DOI: [10.1016/S0378-4290\(02\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00048-5).
- SUTALIYA, R.; SINGH, R. N. Effect of planting time, fertility level and phosphate solubilizing bacteria on growth, yield and yield attributes of winter maize (*Zea mays*) under rice (*Oryza sativa*) - maize cropping system. **Indian Journal of Agronomy**, v. 50, n. 3, p. 173-175, 2005.
- TABASSUM, B.; KHAN, A.; TARIQ, M.; RAMZAN, M.; KHAN, M. S. I.; SHAHID, N.; AALIYA, K. Bottlenecks in commercialization and future prospects of PGPR. **Applied Soil Ecology**, v. 121, p. 102-117, Dec. 2017. DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.09.030](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.030).
- TAPIA-TORRES, Y.; RODRÍGUEZ-TORRES, M. D.; ELSER, J. J.; ISLAS, A.; SOUZA, V.; GARCÍA-OLIVA, F.; OLMEDO-ÁLVAREZ, G. How to live with phosphorus scarcity in soil and sediment: lessons from bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 82, p. 4652-4662, July 2016. DOI: [10.1128/AEM.00160-16](https://doi.org/10.1128/AEM.00160-16).
- TARRANT, J. J.; KRIEG, N. R.; DÖBEREINER, J. A taxonomic study of the *Spirillum lipoferum* group, with the descriptions of a new genus, *Azospirillum* gen.nov. and two species *Azospirillum lipoferum* (Beijerinck) comb.nov. and *Azospirillum brasilense* sp.nov. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 24, n. 8, p. 967-980, Aug. 1978. DOI: [10.1139/m78-160](https://doi.org/10.1139/m78-160).
- URQUIAGA, S.; CRUZ, K. H. S.; BODDEY, R. M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen-15 and Nitrogen-balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 1, p. 105-114, Jan. 1992. DOI: [10.2136/sssaj1992.03615995005600010017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010017x).
- URQUIAGA, S.; XAVIER, R. P.; MORAIS, R. F. de; BATISTA, R. B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J. M.; MAIA E SÁ, J.; BARBOSA, K., P.; RESENDE, A., S.; ALVES, B. J., R.; BODDEY, R. M. Evidence from field nitrogen balance and ¹⁵N natural abundance data for the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, v. 356, p. 5-21, 2012. DOI: [10.1007/s11104-011-1016-3](https://doi.org/10.1007/s11104-011-1016-3).
- VARMA, P. K.; UPPALA, S.; PAVULURI, K.; CHANDRA, K. J.; CHAPALA, M. M.; KUMAR, K. V. K. Endophytes: role and functions in crop health. In SINGH, D.; SINGH, H.; PRABHA, R. (ed.). **Plant-microbe interactions in agro-ecological perspectives**. Singapore: Springer, 2017. p. 291-310.
- VELLOSO, C. C. V.; OLIVEIRA, C. A.; GOMES, E. A.; LANA, U. G. P.; CARVALHO, C. G.; GUIMARÃES, L. J. M.; PASTINA, M. M.; SOUSA, S. M. de. Genome-guided insights of tropical *Bacillus* strains efficient in maize growth promotion. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 96, n. 9, f157, Sept. 2020. DOI: [10.1093/femsec/fiaa157](https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa157).
- WALLACE, J. G.; MAY, G. Endophytes: the other maize genome. In: BENNETZEN, J.; FLINT-GARCIA, S.; HIRSCH, C.; TUBEROSA, R. (ed.). **The maize genome**. Cham: Springer, 2018. p. 213-246.
- WALPOLA, B. C.; YOON, M. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: a review. **African Journal of Microbiology Research**, v. 6, n. 37, p. 6600-6605, Sept. 2012. DOI: [10.5897/AJMR12.889](https://doi.org/10.5897/AJMR12.889).
- WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S. de; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G. de; NUNES R. S.; ROSELEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, O. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, article 2537, 2018. DOI: [10.1038/s41598-018-20887-z](https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z).
- YAMADA, Y.; HOSHINO, K.; ISHIKAWA, T. The phylogeny of acetic acid bacteria based on the partial sequences of 16S ribosomal RNA: the elevation of the subgenus *Gluconoacetobacter* to generic level. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, v. 61, n. 8, p. 1244-1251, Jan. 1997. DOI: [10.1271/bbb.61.1244](https://doi.org/10.1271/bbb.61.1244).
- YOUSEFI, A.; KHAVAZI, K.; MOEZI, A.; REJALI, F.; NADIAN, H. Phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi impacts on inorganic phosphorus fractions and wheat growth. **World Applied Sciences Journal**, v. 15, n. 9, p. 1310-1318, 2011.

Aplicação da agricultura de precisão em cana-de-açúcar

Célia Regina Grego | Eduardo Antonio Speranza | Guilherme Martineli Sanches |
Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues | Ariovaldo Luchiari Júnior

Introdução

O sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva, visando ao aumento de retorno econômico, da sustentabilidade e da minimização do efeito ao ambiente, é a definição do termo “agricultura de precisão” segundo a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (Brasil, 2013).

As duas grandes vertentes da agricultura de precisão segundo Molin et al. (2015) se baseiam na variabilidade espacial e nas tecnologias relacionadas à automação. Os autores ressaltam que a variabilidade espacial nada mais é do que identificar no campo ou área cultivada a não uniformidade, ou seja, características agrônômicas e ambientais diferentes, independentemente de sua dimensão. Segundo Grego et al. (2014b), a variabilidade espacial pode ser identificada pela técnica chamada de geoestatística, que investiga e mapeia um ou mais atributos de interesse por meio de amostragens, sensores ou sistema de informação geográfica. Como resultado, a variabilidade espacial permitirá o gerenciamento das unidades diferenciadas por meio do uso de insumos localizados em taxas variáveis.

A segunda vertente da agricultura de precisão está relacionada à automação e compreende os sistemas de direcionamento, telemetria, controle de tráfego e automações das operações do plantio à colheita (Molin et al., 2015). Cada vez mais, o produtor conta com a automação para obter melhor desempenho da produção e o monitoramento preciso do desenvolvimento das plantas. O uso de veículos aéreos não tripu-

lados (Vants), popularmente conhecidos como drones, por exemplo, permite ao produtor tomar decisões que podem trazer impacto direto na lucratividade final por permitir o monitoramento mais preciso da lavoura em curto prazo de tempo.

As tecnologias de agricultura de precisão voltadas às culturas compreendem basicamente o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, a aplicação localizada de corretivos, fertilizantes e herbicidas, manejo e controle localizado de pragas e doenças, monitoramento do índice de vegetação por imagem de satélite ou ARPs e da produtividade. Segundo Bernardi et al. (2014), há um número elevado de elementos que ainda não estão adequadamente tratados pela agricultura de precisão. A Figura 12.1 traz alguns detalhamentos de elementos que devem ser considerados no sistema.

Uma das principais culturas agrícolas do Brasil, a cana-de-açúcar ocupa atualmente 8,66 milhões de hectares (Conab, 2018) e ainda é cultivada, em sua maioria, com baixa automação, com exceção da colheita, que é mecanizada devido à adoção de práticas sustentáveis. Entretanto, a situação está mudando gradativamente nos últimos anos e a importância da utilização de tecnologias de automação na etapa de plantio vem ganhando espaço. Assim, a tendência é o crescimento em mecanização a partir do plantio e a intensificação de toda a atividade sucroalcooleira. Portanto, a adoção de técnicas ligadas à agricultura de precisão é uma grande oportunidade de tornar o sistema produtivo da cana mais

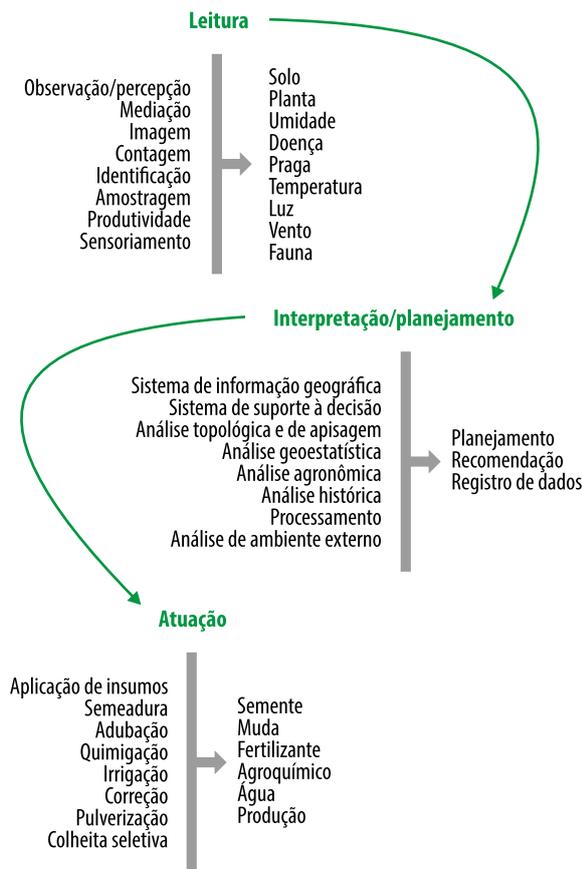


Figura 12.1. Ciclo da agricultura de precisão em três etapas.

Fonte: Adaptado de Bernardi et al. (2014).

eficiente, permitindo o aumento da produtividade e a redução dos custos de produção.

Segundo Camelini (2013), a tecnologia de piloto automático pelo posicionamento global de alta precisão em tempo real (RTK, Real Time Kinematic) sistematiza a segurança das informações georreferenciadas obtidas diretamente no campo, o que pode permitir aumento de quantidade de metros lineares nos canaviais reformados, reduzindo a quantidade de terraços, melhorando o aproveitamento da água e aumentando significativamente a eficiência das máquinas, sobretudo das colhedoras. No cenário atual do cultivo da cana, principalmente nas grandes usinas, além do controle da taxa de aplicação com o direcionamento localizado dos fertilizantes e corretivos, é possível receber e enviar dados por meio da transmissão sem fio, garantindo maior

agilidade, segurança e redução de custo com a gestão das informações.

Grande parte dos estudos da aplicação da agricultura de precisão em cana-de-açúcar abrange melhoria do manejo da adubação nitrogenada (Amaral et al., 2015a), mapeamento da infestação de plantas daninhas para aplicação localizada de herbicida (Yano, 2018), técnicas de identificação da variabilidade espacial do solo e da planta (Grego et al., 2014a), utilização de mineração de dados para identificação de unidade diferenciada de manejo (Speranza, 2017), estimativa de atributos de qualidade e produtividade da cana-de-açúcar por meio de sensoriamento proximal (Andrade et al., 2014) e avaliação do uso de monitores de produtividade para otimizar a operação de colheita (Cherubin, 2017). Esses estudos, em sua maioria, são fundamentados em princípios da sustentabilidade e conservação do solo, na busca de novas alternativas tecnológicas e informações para suporte à tomada de decisão. Contudo, ainda há grandes desafios para tornar o sistema de agricultura de precisão usual nas propriedades e usinas que cultivam cana-de-açúcar. De modo geral, acredita-se que as grandes propriedades agropecuárias, assim como os produtores e as usinas de cana-de-açúcar, estejam bem preparadas para o uso da agricultura de precisão. Contudo, segundo Grego et al. (2014a), embora mecanizada, a cultura da cana-de-açúcar ainda requer avanços em sistemas de produção amparados por técnicas baseadas em agricultura de precisão. Além disso, a adoção da tecnologia no setor ainda requer alto custo de implementação sem garantia de retorno esperado a curto prazo.

Considerando os benefícios e os desafios expostos em relação à adoção da agricultura de precisão na cana-de-açúcar, são apresentados neste capítulo os principais temas e tecnologias envolvidos e adotados atualmente.

Implantação da agricultura de precisão para cana-de-açúcar

A implantação da agricultura de precisão para cana, assim como para as demais culturas, depende primeiramente da caracterização da variabilidade dos atributos do solo com suficiente representação espacial. Posteriormente, a variabilidade obtida permitirá estabelecer correlações com parâmetros de desenvolvimento da planta, do clima, do relevo e da produtividade da cultura.

Variabilidade espacial em áreas de cana-de-açúcar

A variabilidade espacial, segundo Vieira et al. (2008), significa que medidas tomadas em locais diferentes podem apresentar valores diferentes. A variação de um fenômeno no espaço causada por processos naturais sempre existiu, por isso, na natureza, a variabilidade espacial deve ser considerada para melhor entendimento do que acontece no campo de estudo.

De acordo com Vieira (2000), quando se considera a variabilidade espacial, a hipótese é de que as amostras sejam relacionadas entre si de acordo com a distância, ou seja, amostras separadas por distâncias menores são mais parecidas do que as separadas por maiores distâncias.

A cultura da cana-de-açúcar é muito dependente das interações com os ambientes de produção relata Prado et al. (2008), por isso o setor vem adotando largamente uma forma de classificação em ambientes de produção a partir do tipo de solo. Segundo Prado et al. (2008), o ambiente de produção é a interação das condições do solo (físico-hídricas e químicas) com o clima (precipitação e evapotranspiração) que podem interferir no potencial de produtividade. Os componentes dos ambientes de produção são influenciados pelos seguintes aspectos: profundidade do solo, a qual tem direta relação

com a disponibilidade de água e com o volume de solo explorado pelas raízes; pela fertilidade, como fonte de nutrientes para as plantas; pela textura, relacionada com os níveis de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e disponibilidade hídrica; e pela água, vital para a sobrevivência das plantas e parte da solução do solo (Prado et al., 2008).

Apesar da importância para o sistema de produção de cana-de-açúcar, Sanches et al. (2019) observaram que a amostragem de solo realizada para a classificação dos ambientes é pouco representativa, o que muitas vezes não detalha a variabilidade espacial existente. Os talhões, segundo Sanches et al. (2019), são geralmente compostos por grandes áreas que recebem poucas divisões quanto à classificação do ambiente de produção. Para tanto, uma investigação da variabilidade espacial dentro do talhão indicará se existem regiões diferentes que necessitem ser manejadas diferentemente com melhor precisão.

Amostragem do solo para cana-de-açúcar

Uma caracterização precisa da variabilidade do solo é necessária para o uso correto e adequado de fertilizantes, garantindo uma produção mais rentável e sustentável. Um dos principais desafios para adoção da agricultura de precisão, segundo Molin et al. (2015) e Sanches et al. (2018), é a amostragem de solo, principalmente em relação à quantidade de amostras, pois, para obter um adequado mapeamento dos atributos físicos e químicos do solo, é preciso realizar uma amostragem densa o suficiente, o que muitas vezes a torna economicamente inviável. Para tanto, é necessário realizar um planejamento estratégico da amostragem em relação à distância e à quantidade de pontos. A densidade amostral e a distância entre os pontos limitam diretamente o fator interpolação, ou seja,

a distância entre pontos não deve ser maior do que o limite para estabelecer a relação de dependência espacial entre eles. A distância ideal é um ponto crítico e ainda gera muita polêmica, pois depende do tamanho da área, do histórico do manejo da área, do tipo de solo e ainda do fato de ser econômica e operacionalmente viável.

Quando se trata de agricultura de precisão, Molin et al. (2015) relatam que, na amostragem de solo, para fins de fertilidade, normalmente é coletada uma amostra a cada 0,5 ha até no máximo 2 ha. Na grade amostral, o posicionamento do ponto pode ser regular em forma de quadrados, em ilhas ou em forma trapezoidal, ou ao acaso, em que as amostras são coletadas de forma aleatória (Vieira et al., 2008).

De acordo com Molin et al. (2015), e consequentemente de amostragens georreferenciadas, na amostragem de solo para fins de fertilidade, é normalmente feita uma amostra a cada 0,5 ha até no máximo 2 ha. Na grade amostral, segundo Vieira et al. (2008), o posicionamento do ponto pode ser regular, equidistante, ou de forma aleatória.

A amostragem direcionada, ou amostragem por unidades de gestão diferenciada (UGD), é feita com base nas informações sobre locais específicos do talhão que necessitem de maior ou menor amostragem (Molin et al., 2015). A amostragem nesse caso é direcionada pela variabilidade de outro atributo, geralmente coletado em alta densidade, como sensores de solo ou planta. Segundo Vieira et al. (2008), as amostragens devem ser suficientemente próximas para que se consiga caracterizar as possíveis manchas de variabilidade nos talhões de cana. Se houver informações indicativas da variabilidade, como histórico de plantio, mapas pedológicos e de relevo, medidas com sensores de solo, imagens de satélite e ARPs, que possam identificar regiões com diferentes índices de vegetação, é possível calcular a quantidade de pontos de amostra-

gem. Isso permitirá fazer uso de uma amostragem inteligente, cujo objetivo seja concentrar a amostragem nas regiões onde exista maior variabilidade e diminuir nos locais mais uniformes, com consequente redução dos custos de coleta e análise.

O planejamento de amostragem direcionada foi trabalhado por Campos et al. (2009), ao correlacionarem espacialmente o modelo digital de elevação do terreno com o mapeamento de atributos físicos e químicos do solo para separar ambientes de produção. Com isso foi possível definir o manejo diferenciado da adubação e a alocação de cultivares de cana-de-açúcar em um talhão com área de 505 ha.

Os sensores de solo podem ser muito úteis para uma amostragem direcionada, pois fornecem dados de grande densidade amostral em um curto espaço de tempo, e esses, por sua vez, podem ser correlacionados com outros dados de maior dificuldade de obtenção. Sanches et al. (2017), ao trabalharem com uma densidade de uma amostra para 3,0 ha, com o auxílio dos mapas de condutividade elétrica do solo obtidos por sensor em uma área com cana-de-açúcar, conseguiram detectar a variabilidade espacial do conteúdo de argila com adequada precisão, sendo similar ao mapa onde se utilizaram quatro amostras por hectare (uma amostra para 0,25 ha), representando um grande avanço para a caracterização dos solos.

De acordo com Molin et al. (2015), a escolha do método de amostragem interfere não só na qualidade do mapa final do atributo interpolado, mas também na própria intervenção da aplicação em taxas variadas de insumos na lavoura.

Sensor para identificação de variabilidade espacial do solo

Dentro do contexto histórico de tecnologias acessíveis para aquisição de informações de

qualidade da variabilidade dos solos, a condutividade elétrica aparente (CEa) tem se destacado como um método eficaz e rápido, com alta resolução e baixo custo, para avaliar a fertilidade do solo (Sudduth et al., 2005) e o potencial produtivo das lavouras (Luchiari Júnior et al., 2002; Corwin; Lesch, 2003, 2005; Kitchen et al., 2005).

A CEa foi utilizada primeiramente em estudos geológicos, mas, nos últimos anos, tem se destacado como uma ferramenta poderosa para uso na agricultura. Isso se deve ao fato de a CEa estar correlacionada com atributos importantes para caracterização da fertilidade dos solos, como salinidade, teor de argila, capacidade de troca de cátions (CEC), tamanho e distribuição dos poros e matéria orgânica (Triantafyllis et al., 2000; Domsch; Giebel 2004; Corwin; Lesch, 2005; McBratney et al., 2005; Ekwue; Bartholomew, 2011; Molin; Faulin, 2013). Outro aspecto positivo dessa tecnologia é a estabilidade espacial e temporal das leituras de CEa, conforme identificado por Serrano et al. (2018), que verificaram uma estabilidade temporal significativa durante 7 anos em um campo de pastagem, permitindo assim sua utilização para a gestão localizada das lavouras. Recentemente, Castioni et al. (2019) mostraram o potencial de aplicação da ferramenta para avaliação da qualidade física do solo e sua relação intrínseca com o conteúdo de macro e microporosidade.

Os métodos mais utilizados para avaliação da CEa nos campos agrícolas são por sensores de contato direto ou por indução eletromagnética (IEM). Entre os equipamentos mais utilizados comercialmente, destaca-se o Veris 3100 (Veris technologies, Kansas, Estados Unidos da América), que utiliza o princípio do contato direto e o EM38-MK2 (Geonics, Toronto, Canadá), que utiliza o princípio de IEM (Figura 12.2).

Ambos os equipamentos são capazes de gerar mapas de variabilidade da CEa do solo com precisão e confiabilidade (Figura 12.3). Enquanto o equipamento de contato direto necessita que os discos penetrem no solo para realizar as medidas (Figura 12.2A), o sensor de IEM é capaz de mensurar a CEa sem necessidade de contato com o solo, sendo arrastado sobre a superfície (Figura 12.2B). Para o bom funcionamento dos equipamentos, o sensor de IEM deve ser mantido longe da influência de metais para que as leituras sejam fidedignas às condições do solo. O sensor de contato direto não apresenta leituras confiáveis em solos com baixo nível de umidade e compactados, impedindo que os discos conduzam corrente elétrica por meio de suas partículas. Apesar da amplitude dos valores de CEa serem diferentes para os equipamentos, que é dependente do princípio de mensuração e das condições locais de umidade e temperatura do solo no momento da leitura, é possível

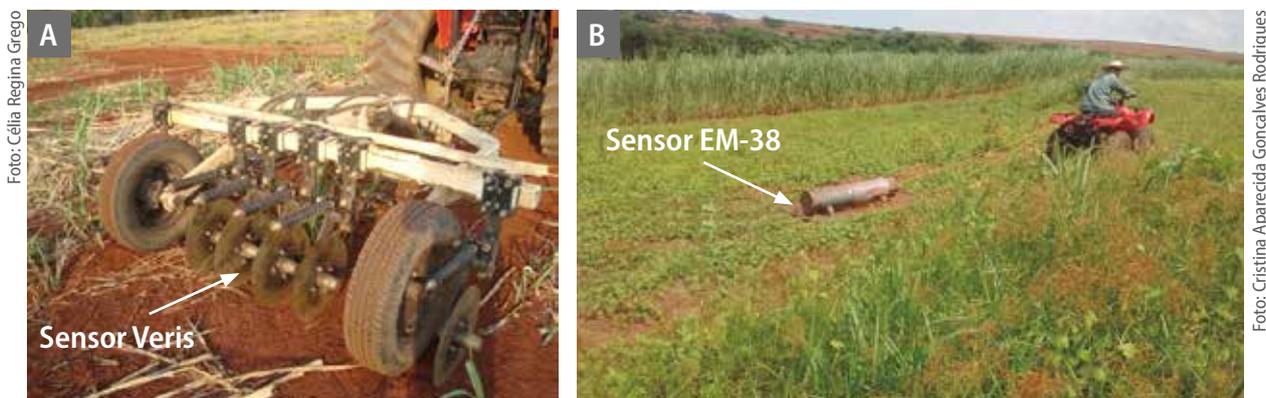


Figura 12.2. Utilização dos sensores de condutividade elétrica aparente do solo: Veris 3100 (Veris technologies, Kansas, United States) (A) e EM38-MK2 (Geonics, Toronto, Canada) (B).

visualizar que os mapas obtidos pelos sensores apresentam semelhança na variabilidade espacial da CEa (Figura 12.3). Vale destacar também que os equipamentos podem ser configurados para mensurar a CEa em diferentes profundidades do solo, e o Veris 3100 apresenta configurações para leituras nas camadas de 0,00–0,30 m e 0,00–0,90 m e o EM38-MK2 nas camadas de 0,00–0,38 m, 0,00–0,75 m e 0,00–1,50 m.

Sendo uma informação capaz de refletir a variabilidade físico-química do solo, a CEa ainda é pouco utilizada nos campos de cana-de-açúcar. Em uma ampla revisão de literatura, Heil e Schmidhalter (2017) relataram várias aplicações potenciais de um sensor de IEM, mas nenhum dos trabalhos revisados pelos autores é proveniente de campo de produção de cana-de-açúcar. No Brasil, a CEa tem sido utilizada principalmente na definição do potencial produtivo das lavouras (Siqueira et al., 2015), no mapeamento da fertilidade dos solos, no teor de umidade e

na definição de zonas de manejo (Molin et al., 2015). Além disso, a maioria dos estudos em cana-de-açúcar no Brasil utilizaram sensores que medem a CEa pelo princípio de contato direto (Molin; Castro, 2008; Valente et al., 2012; Sanches et al., 2018), e poucos são os estudos que utilizam sensores de indução eletromagnética (Siqueira et al., 2015; Sanches et al., 2019).

Para garantir o manejo adequado e sustentável das lavouras de cana-de-açúcar, o mapeamento da fertilidade do solo deverá ser realizado cada vez com maior rigor e qualidade. Assim, a CEa é uma informação com grande potencial para superar esse desafio.

Monitoramento da cultura

Os mapas gerados a partir de propriedades da cultura, especialmente os mapas de produtividade histórica, são considerados por muitos como a informação mais indicativa da

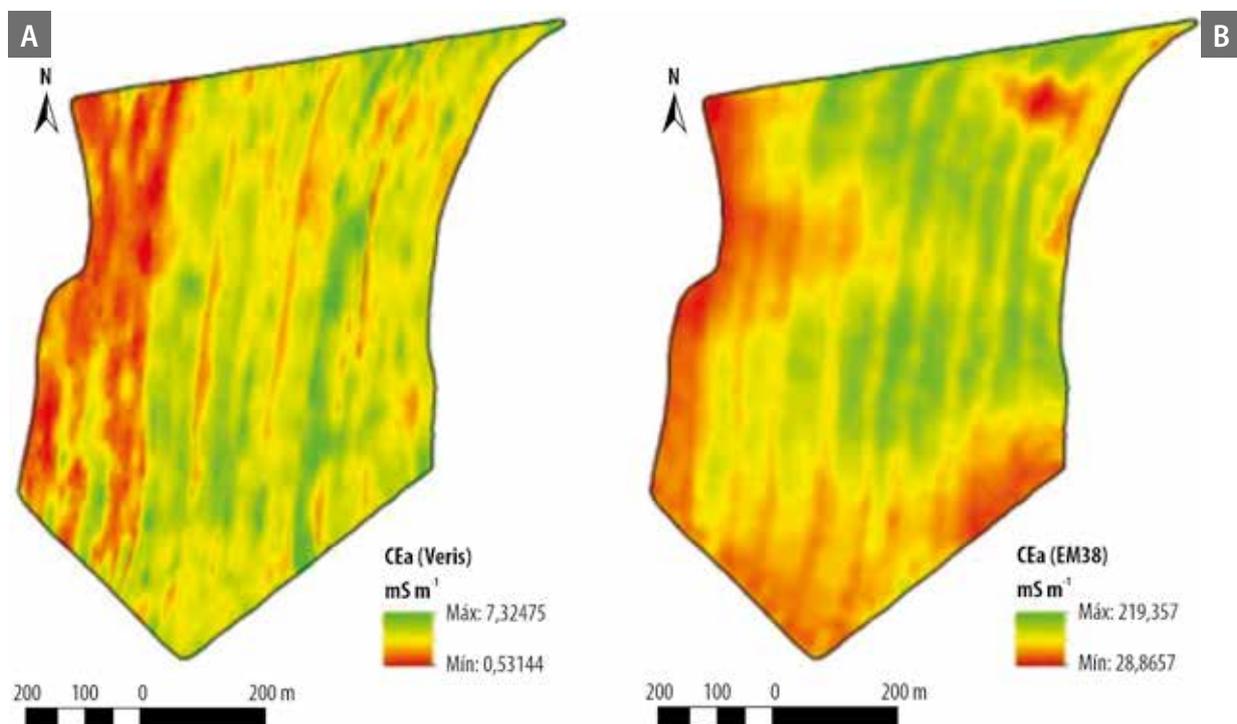


Figura 12.3. Mapa de condutividade elétrica aparente (CEa) de uma lavoura de cana-de-açúcar de 50 ha. Mapa de CEa mensurado pelo equipamento Veris 3100 na camada 0,00–0,30 m (A) e EM38-MK2 na camada 0,00–0,38 m (B).

Fonte: Sanches (2015).

variabilidade espacial de uma lavoura (Molin et al., 2015). Entretanto, devido a uma série de fatores, esses mapas nem sempre estão disponíveis, ou estão disponíveis com resolução espacial insuficiente. Como alternativa, os índices calculados a partir de bandas espectrais também podem ser utilizados na identificação da variabilidade espacial de uma cultura. Um dos mais utilizados é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (em inglês *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI). Esta seção descreve inicialmente as formas pelas quais são obtidos mapas de NDVI a partir de sensoriamento proximal e remoto, considerando as resoluções espaciais utilizadas em agricultura de precisão. Em seguida, são apresentadas as diferentes maneiras pelas quais são obtidos mapas de produtividade na cultura de cana-de-açúcar.

O índice de vegetação de diferença normalizada e ferramentas de obtenção

O índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) é um índice que tem como objetivo descrever a diferença entre a refletância de bandas espectrais nas regiões do vermelho e infravermelho próximo de uma cobertura vegetal (Weir; Herring, 2000). Desse modo, mapas de NDVI podem ser utilizados em atividades agrícolas que necessitam estimar a densidade da biomassa presente em diferentes locais da lavoura (Zhang et al., 2003). A equação a seguir define o cálculo do NDVI para uma determinada localização geográfica, considerando os valores de refletância no vermelho (*Red*) e infravermelho próximo (*NIR*) segundo Rouse Junior et al. (1974):

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Devido à possibilidade de espacialização a partir de sensoriamento proximal ou remoto, os mapas de *NDVI* são potenciais identificadores de variabilidade espacial da biomassa de uma cul-

tura agrícola. Desse modo, esses mapas podem ser utilizados em agricultura de precisão tanto para atividades mais comuns e diretas, como a aplicação de fertilizantes e corretivos à taxa variada (Rosa et al., 2015; Amaral et al., 2015b), quanto para atividades mais complexas que exigem a utilização de ferramentas de mineração de dados e outros atributos do solo e da cultura, como o delineamento de unidades de gestão diferenciada (Pedroso et al., 2010; Chang et al., 2014). Além disso, esses mapas são geralmente bem correlacionados com mapas de produtividade (Liakos et al., 2015; Pantazi et al., 2016), fazendo com que séries temporais de imagens obtidas em diferentes fases do crescimento da cultura permitam a espacialização da estimativa de produtividade de uma área de cultivo.

Uma das ferramentas mais utilizadas em agricultura de precisão para obtenção de mapas de NDVI com alta resolução espacial é o sensoriamento de refletância do dossel das plantas. Essa ferramenta é muito utilizada em atividades de aplicação localizada de insumos, a partir da identificação georreferenciada de deficiências nutricionais e incidência de pragas. O *crop circle* (Holland Scientific Inc., Lincoln, Nebraska, USA) é um exemplo de equipamento utilizado para essa finalidade (Figura 12.4).

Sensores para obtenção de refletância do dossel das plantas são capazes de obter dados em seis diferentes bandas espectrais, cobrindo as



Foto: Célia Regina Greco

Figura 12.4. *Crop circle* em ação na cana-de-açúcar.

regiões do verde, vermelho, azul, infravermelho próximo e red-edge. Na literatura, podem ser encontrados diversos trabalhos que utilizam mapas de NDVI gerados a partir de sensores desse tipo. Sharma et al. (2015) realizaram um estudo de sua utilização para previsão da produtividade em cultura de milho. Bu et al. (2017) realizaram comparações da capacidade de predição de produtividade gerados a partir de diferentes imagens de satélite e de sensores terrestres.

Especificamente para a cultura de cana-de-açúcar, foram desenvolvidos poucos trabalhos que utilizam sensores de refletância do dossel, e esses estão concentrados em poucos grupos de pesquisa do estado de São Paulo. Inamasu et al. (2006) observaram uma boa correlação entre os valores de NDVI e a quantidade de nitrogênio aplicada. Mais recentemente, Amaral et al. (2015a) compararam diferentes sensores de refletância do dossel para identificação da variabilidade de diversos parâmetros da cultura da cana-de-açúcar e verificaram uma alta correlação entre a quantidade de biomassa e os valores de NDVI. Posteriormente, Amaral et al. (2015b) propuseram um algoritmo para calcular a taxa de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar com base em dados de produtividade e valores de Normalized Difference Red-Edge (NDRE), índice similar ao NDVI, que é obtido a partir das bandas no espectro do vermelho e red-edge.

A partir desses trabalhos, é possível concluir que as informações fornecidas por sensores de refletância do dossel das plantas podem ser úteis para diferentes aplicações de agricultura de precisão em cana-de-açúcar. Entretanto, as soluções propostas precisam ser validadas diretamente no sistema de produção, onde a sua contribuição para que o produtor atinja os objetivos da adoção da agricultura de precisão possa ser avaliada em situações reais.

O sensoriamento remoto é outra maneira pela qual podem ser obtidos mapas de NDVI para monitoramento das culturas em agricultura de precisão. Os mapas de NDVI de melhor custo-benefício para monitoramento dos talhões da cana-de-açúcar a partir de sensoriamento remoto são obtidos por: a) sensores ópticos (sensores passivos de baixa, média e alta resolução espacial) e radares (sensores ativos de micro-ondas) a bordo dos satélites artificiais orbitais da terra; e b) câmeras de captura de imagens (RGB, NIR, SWIR, Red-Edge, RED+NIR, multiespectral e termais) instaladas nas ARPs (popularmente conhecidas como drones).

Atualmente, o uso das ARPs pelos produtores rurais vem se tornando cada vez mais comum, devido à diminuição de custos de aquisição, à facilidade de uso e aos avanços tecnológicos, o que propicia resultados mais rápidos e muito eficazes aos tomadores de decisão que obtêm informações diretas da realidade do campo em tempo real (Figura 12.5).

O setor sucroalcooleiro foi o pioneiro na adoção das ARPs como aliadas na agricultura de precisão para o gerenciamento da aplicação de tratos culturais e monitoramento da cultura de cana (Jorge; Inamasu, 2014). Das imagens obtidas a partir de câmeras acopladas nas ARPs em sobrevoo aos canaviais, pode-se obter a estimativa da biomassa e da produtividade do talhão (monitoramento da safra), detectar irregularidade na irrigação, identificar falhas na linha de plantio, monitorar o estágio fenológico, detectar infestação de plantas daninhas, pragas e doenças. Com as ARPs também é possível verificar os danos na cultura determinados por condição climática desfavorável, como período de estiagem, estresse hídrico nas plantas ou danos por temporais. (Poletti, 2016; Façal et al., 2017).

Após o processamento das imagens das câmeras (troca de dados entre câmeras e softwares que decodificam as imagens por modelos



Foto: Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues

Figura 12.5. Aeronave remotamente pilotada (ARP), modelo Verok Horus, com autonomia de até 2 horas e cobertura até 4.300 ha.

matemáticos), podem-se obter, entre outros, os índices de vegetação para construção dos mapas de NDVI ou NDRE. Conforme Molin et al. (2015), para que a agricultura de precisão entre em prática (gestão inteligente com base em dados), sempre é necessário avaliar, quantificar e mapear a variabilidade espacial existente nos campos cultivados. Portanto, a série histórica de mapas de NDVI do mesmo talhão de cana é uma ferramenta que permite identificar grande parte dessa variabilidade espacial da área de cultivo (Molin et al., 2015; Speranza et al., 2018). Assim, as ARPs oferecem como grande vantagem a possibilidade de fazer sobrevoos semanais nos talhões de cana, a baixo custo, durante todo o período de produção (Anderson; Gaston, 2013), viabilizando o monitoramento da fenologia da cultura.

A cultura da cana-de-açúcar também possui características favoráveis para identificação, ma-

peamento e monitoramento pelas imagens de satélites. A série LandSat foi a precursora para uso na agricultura (Formaggio; Sanches, 2017). Atualmente, conforme os autores, os mais utilizados em órbita com o mesmo objetivo são os seguintes: a) o sistema LandSat-8; b) o sensor Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que é útil para a estimativa de cana colhida ao longo da safra, isso devido à elevada resolução temporal; c) os satélites NOAA, que são utilizados, sobretudo, em modelos climáticos e de previsão do tempo atmosférico (Embrapa Territorial, 2018); d) o Sentinel-2, que tem resolução espacial média e é administrado pela Agência Espacial Europeia (The European Space Agency, 2017) para monitoramento da vegetação, do solo, da água, da agricultura, entre outros; e e) o Synthetic Aperture Radar (SAR), que é um sistema de micro-ondas (radares), cuja tecnologia tem migrado de grandes plataformas para sistemas cada vez mais leves e compactos

(Paradella et al., 2015). Eles operam na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético e desempenham bem o monitoramento da umidade do solo e da área agrícola, pois são sensíveis a vários parâmetros biofísicos da cultura como Índice de Área Foliar, biomassa e altura do dossel (McNairn; Brisco, 2004).

O desafio a ser seguido é o desenvolvimento de algoritmos que interpretem as imagens obtidas, de forma a produzir informações de acordo com o tipo de cultura analisada.

Mapa de colheita

O manejo adequado da variabilidade espacial da produtividade das lavouras de cana-de-açúcar é um dos fatores-chave para garantir maior retorno econômico da produção. Esse manejo deve levar em conta a variabilidade espacial intrínseca do solo e da cultura, gerindo a lavoura de acordo com as suas reais necessidades.

A análise biométrica permite estimar a produtividade da cana-de-açúcar em qualquer período da safra. Segundo Brasil (2013), a produtividade agrícola pode ser estimada por parâmetros biométricos como diâmetro, número e comprimento de colmos. A produtividade da cana-de-açúcar pelo método de Gheller et al. (1999) estima o peso total da parcela por meio da multiplicação do número de colmos da área amostrada pelo peso médio de dez colmos (Figura 12.6). A partir do peso médio estimado em cada ponto amostral, e tendo em vista o espaçamento entrelinhas conhecido, pode-se calcular a produtividade por hectare.

Entre as tecnologias e técnicas preconizadas pela agricultura de precisão, os monitores de produtividade, em conjunto com os sistemas de informação geográfica (SIG), são ferramentas com alto potencial para maximizar o rendimento das culturas e minimizar os custos de produção, procurando identificar e eliminar as possíveis causas de redução na produtividade.



Foto: Célia Regina Grego

Figura 12.6. Pesagem de colmos para avaliação biométrica e obtenção da produtividade da cana-de-açúcar em TCH.

Os monitores de produtividade são essenciais no acompanhamento e na identificação dos problemas nas lavouras para a correta tomada de decisão. Amplamente desenvolvido e utilizado nas lavouras de grãos, os monitores de produtividade ainda são pouco utilizados nas lavouras comerciais de cana-de-açúcar no Brasil (Magalhães; Cerri, 2007). Alguns autores revelam a importância do uso dos monitores de produtividade para investigar a correlação da produtividade com os atributos do solo e delimitar zonas de manejo (Souza et al., 2010; Sanches et al., 2019). Sanches et al. (2019) acompanharam a produtividade de três safras de uma

lavoura de cana-de-açúcar de 30 ha (Figura 12.7) e mostraram que o conteúdo de matéria orgânica do solo e o pH foram os atributos mais importantes, os quais afetaram diretamente a variabilidade da produtividade no espaço e no tempo, respectivamente. Os autores sugerem ainda que o mapeamento de fatores limitantes do solo pode auxiliar na criação de zonas de manejo para melhorar a rentabilidade dos canaviais.

Diante desse contexto, os resultados apresentados na literatura evidenciam que a ausência dessa ferramenta pode trazer prejuízos econômicos aos produtores, uma vez que somente por meio dos monitores é possível identificar, com precisão, o local onde ocorrem reduções na produtividade. Em conjunto com outras ferramentas, como imagens de ARPs e de satélite, torna-se possível tomar medidas mitigatórias, como a reforma do local ou até mesmo a não aplicação de fertilizantes, aumentando a eficiência na utilização dos recursos. A aplicação de fertilizante com nitrogênio também pode ser beneficiada por meio dessa ferramenta, aplicando-se o fertilizante de acordo com a variabilidade da produtividade agrícola da cultura, aumentando a lucratividade da produção e poluindo menos os recursos naturais.

Análise e interpretação de dados para atuação em agricultura de precisão

Devido à quantidade de atributos do solo e da cultura que podem ser avaliados, seja pela análise de solo seja pelo sensoriamento proximal ou remoto, os procedimentos realizados em agricultura de precisão podem ser considerados como altamente dependentes dos dados.

Segundo Souza et al. (2010), um dos aspectos que mais geram dúvidas está relacionado à interpretação das informações decorrentes da análise dos dados e posterior transformação desses em ferramentas que auxiliem na tomada de decisão para o correto tratamento da variabilidade espacial que existe nos canaviais.

O principal objetivo da análise e interpretação dos dados para atuação em agricultura de precisão é transformar as diferentes camadas de dados geradas em mapas que sejam capazes de proporcionar informações que auxiliem na tomada de decisão pelo produtor. Nesse sentido, a atividade de delineamento de zonas de manejo (ZM) é um exemplo de aplicação desse tipo de conceito. As etapas que compõem o processo de delineamento de ZM em agricultura de

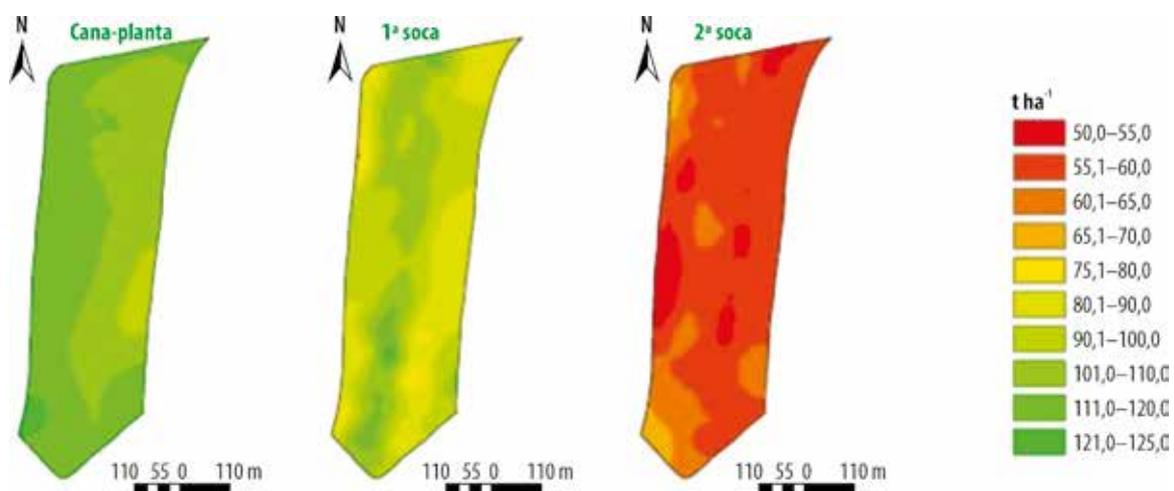


Figura 12.7. Mapa de produtividade da cana-de-açúcar para a cana-planta e para a 1ª e a 2ª soca em uma lavoura comercial de cana-de-açúcar de 30 ha.

Fonte: Adaptado de Sanches et al. (2019).

precisão estão associadas a um processo mais geral, conhecido como descoberta de conhecimento em bancos de dados (em inglês *knowledge discovery database* – KDD). Considerando essas questões, Santos e Saraiva (2015) definiram um modelo de referência para o delineamento de zonas de manejo em agricultura de precisão, considerando suas diversas etapas (Figura 12.8).

Após a coleta, segue a etapa de filtragem, na qual os dados são verificados com o intuito de eliminar valores fora da faixa permitida pelo sensor utilizado, erros de posicionamento ou georreferenciamento, e até mesmo valores muito acima da média do conjunto de dados, conhecidos como *outliers*. Na etapa de seleção de dados, uma das atividades mais importantes é a geração de mapas padronizados para todos os atributos selecionados, a partir da utilização de técnicas de geoestatística.

Na análise de dados, quanto maior o número de técnicas trabalhadas em conjunto ou em complementariedade, como a geoestatística e a mineração de dados detalhados a seguir, maior a capacidade de obter resultados compatíveis com a realidade.

Geoestatística e geração de mapas

A variabilidade espacial pode ser modelada com precisão pela geoestatística que, segundo Soares (2006), é uma ferramenta que caracteriza a dispersão espacial e temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de recursos naturais e outros fenômenos em que os

atributos manifestem certa estrutura no espaço e no tempo. A geoestatística parte do princípio de que quanto menor a distância entre as amostras, maior o grau de dependência entre elas (Grego et al., 2014c; Oliveira et al., 2015).

A geoestatística abrange a construção e o ajuste do semivariograma (gráfico que relaciona a semivariância relacionada com a distância), a interpolação de dados de acordo com os parâmetros de ajuste desses semivariogramas (Isaaks; Srivastava, 1989; Vieira, 2000; Vieira et al., 2008) e, por fim, a construção de mapas precisos onde podem ser observadas as manchas de variabilidade, permitindo tomada de decisão precisa e com maior eficiência.

De posse dos dados coletados, antes da análise geoestatística propriamente dita, é feita uma investigação estatística exploratória para identificar se há dados discrepantes e se os dados apresentam ou não normalidade de distribuição de frequência. Se for necessário, poderão ser refeitas análises de laboratório, transformações, novas coletas e, conforme o caso, pode-se até desconsiderar valores discrepantes.

Para a execução da análise geoestatística, a parte mais importante está no ajuste do semivariograma a uma função de melhor correspondência, sendo as funções esférica, exponencial e gaussiana as mais usadas para ajustes de semivariogramas de dados agroambientais. Vieira (2000) salienta que o semivariograma é a assinatura da variabilidade espacial. O ajuste do semivariograma, quando verificada a existência de variabilidade espacial, fornece os três

Definição de MZ



Figura 12.8. Modelo de referência de processo de delineamento de zonas de manejo em agricultura de precisão.

Fonte: Adaptado de Santos e Saraiva (2015).

parâmetros de dependência: 1) efeito pepita (C_0); 2) variância estrutural (C); e 3) alcance (a). Esses parâmetros são imprescindíveis para a interpolação de dados pelo método da Krigagem ordinária e garantem a não tendenciosidade e variância mínima para a construção de mapas precisos de variabilidade. Uma informação valiosa fornecida nessa etapa é o alcance da variabilidade do atributo avaliado, que indica até que distância os pontos podem ser considerados semelhantes.

O ajuste do semivariograma a uma função é efetuado prioritariamente pela seleção inicial de:

- Maiores coeficiente de determinação (R^2).
- Menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR)
- Maiores avaliador do grau da dependência espacial (GD):

$$GD(\%) = C/(C + C_0) \times 100$$

em que GD = grau de dependência espacial e c = variação estrutural.

A interpretação do GD mais recente e detalhada foi proposta por Seidel e Oliveira (2016), em que, de acordo com o modelo de ajuste do semivariograma, a dependência espacial se classifica em fraca (GD até 9%) moderada (de 9 a 20%) e forte (maior do que 20%). Na Figura 12.9, tem-se um modelo de semivariograma ajustado à função gaussiana com GD forte segundo a classificação de Seidel e Oliveira (2016). Esse ajuste foi realizado para dados de condutividade elétrica do solo de 0–30 cm de profundidade, medido com sensor Veris, numa área de 17 ha cultivada com cana-de-açúcar.

Em caso de dúvida sobre qual modelo representa melhor o ajuste do semivariograma, a decisão final é realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem. E, ainda, se não for possível realizar o ajuste a uma função, ou seja, se não houver um cresci-

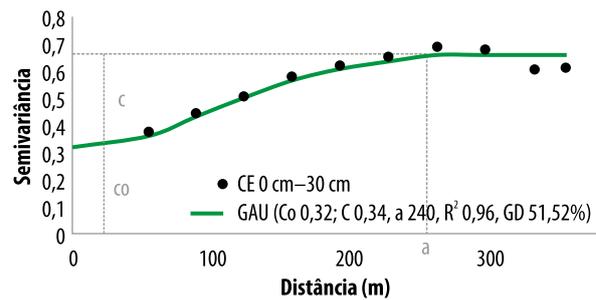


Figura 12.9. Modelo de semivariograma ajustado à função gaussiana para dados de condutividade elétrica do solo e seus parâmetros de ajuste: $C_0 = 0,32$; $C = 0,34$; $a = 240$; $R^2 = 0,96$; $GD = 51,52$.

mento da semivariância em função da distância até o alcance, chamado de efeito pepita puro, a interpolação não poderá ser realizada pela krigagem. Nesse caso, o usuário deverá tomar a decisão se deve ou não utilizar um outro interpolador menos criterioso, como inverso do quadrado da distância, média móvel, entre outros.

Existem softwares específicos para análise geoestatística e os mais recomendados pela comunidade científica são os seguintes: GS+ (Gamma Design Software, 2008), VESPER (Oliveira et al., 2015), programas do pacote GEOEST descrito em Vieira et al. (2002); e GEOR (R Core Team, 2019). Desses, o único que não possui acesso livre é o GS+, e todos têm oferecido resultados confiáveis, basta ao usuário se aperfeiçoar e desprender algum tempo de treinamento variável de acordo com cada um deles. Após a interpolação por krigagem ordinária, a construção dos mapas pode ser realizada em qualquer ambiente de sistema de informação geográfica, como no software de acesso livre QGIS (QGIS, 2020), pois a variância mínima da estimativa foi garantida pela krigagem realizada anteriormente. Portanto, no ambiente SIG, recomenda-se somente a representação espacial para a construção dos mapas de contorno ou isolinhas.

Uma vez estabelecida a existência de variabilidade espacial na área, a interpretação dos mapas gerados é uma informação valiosa no planejamento do manejo produtivo.

Mineração de dados e delineamento de zonas de manejo

Zonas de manejo são áreas do terreno que possuem semelhanças quanto ao potencial produtivo, à eficiência do uso de insumos e ao risco de impacto ambiental (Luchiari Júnior et al., 2002). Esses autores aplicaram o conceito de zonas homogêneas de manejo em solos tropicais de Cerrado, cultivados com culturas anuais em plantio direto. O uso da técnica de mineração de dados, nesse caso, é de grande importância na realização da principal etapa do processo, que compreende a transformação de mapas de diferentes variáveis em mapas de ZM. Na metodologia de técnicas de mineração de dados, são implementados algoritmos de aprendizado de máquina específicos para a extração de padrões a partir dos dados, conhecidos com algoritmos de agrupamento (Jain et al., 1999). Os algoritmos de agrupamento permitem o particionamento de um conjunto de dados n -dimensional em grupos distintos com o menor erro possível, obtidos a partir de métodos iterativos que permitem o ajuste de uma função objetivo por meio de medidas de dissimilaridade. Na literatura, essa etapa do delineamento de ZM é normalmente realizada com a utilização de algoritmos de agrupamento particionais, especialmente o *fuzzy c-means* (Bezdek et al., 1984; Kitchen et al., 2005; Bazzi et al., 2013). Entretanto, para que sejam obtidos mapas de boa qualidade que agreguem informações valiosas para o produtor, as etapas de filtragem e seleção de dados devem ter sido executadas com êxito. Os algoritmos de agrupamento permitem a utilização de diferentes quantidades de variáveis de entrada e diferentes parâmetros de ajuste, como a quantidade desejada de ZM, o que pode resultar em diferenças na obtenção do mapa final. Desse modo, a etapa de avaliação dos mapas deve ser realizada com o apoio de ferramentas estatísticas, para que sejam evitados erros em escolhas subjetivas por um ou outro mapa de ZM para uma determinada aplicação.

Na literatura, existem poucos trabalhos relacionados ao delineamento de ZM para a cultura de cana-de-açúcar. Entre os mais recentes, Speranza et al. (2014) verificaram o potencial de diferentes combinações entre dados de condutividade elétrica do solo, altimetria e produtividade histórica para o delineamento de ZM utilizando algoritmos de agrupamento. Janrao et al. (2019) utilizaram dados de micro e macronutrientes do solo em uma área de cultivo de cana-de-açúcar para verificar a eficiência de diferentes algoritmos de agrupamento para o delineamento de ZM. Esses trabalhos, porém, utilizaram-se de dados da cultura de cana-de-açúcar apenas para validar ferramentas computacionais, ou seja, sem nenhum objetivo agrônômico específico. Por sua vez, o trabalho de Oliveira Filho et al. (2015) visou ao delineamento de ZM para a aplicação de subsoagem diferenciada, a partir da identificação de áreas com diferentes níveis de compactação do solo a partir de medidas de resistência à penetração. Speranza et al. (2018) utilizaram dados de condutividade elétrica do solo para delinear ZM em uma área de cultivo de cana-de-açúcar, com o intuito de reduzir o adensamento de futuras amostragens de solo em zonas onde a variabilidade espacial é menor (Figura 12.10). Em outras culturas, os mapas de zonas de manejo são utilizados para diversas atividades, tais como aplicação de insumos e corretivos à taxa variada, controle da lâmina de água de irrigação e diferentes densidades de semeadura. O projeto em Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa (Embrapa, 2020), em conjunto com seus parceiros, tem trabalhado em pesquisas na área de cana-de-açúcar para alavancar o uso de ferramentas de análise e interpretação de dados para o estabelecimento de zonas de manejo para diferentes atividades de intervenção que possam ser executadas por meio dos recursos já disponíveis na propriedade. Com isso, é esperado que o produtor entenda a agricultura de precisão como uma ferramenta para gestão racional da sua lavoura.

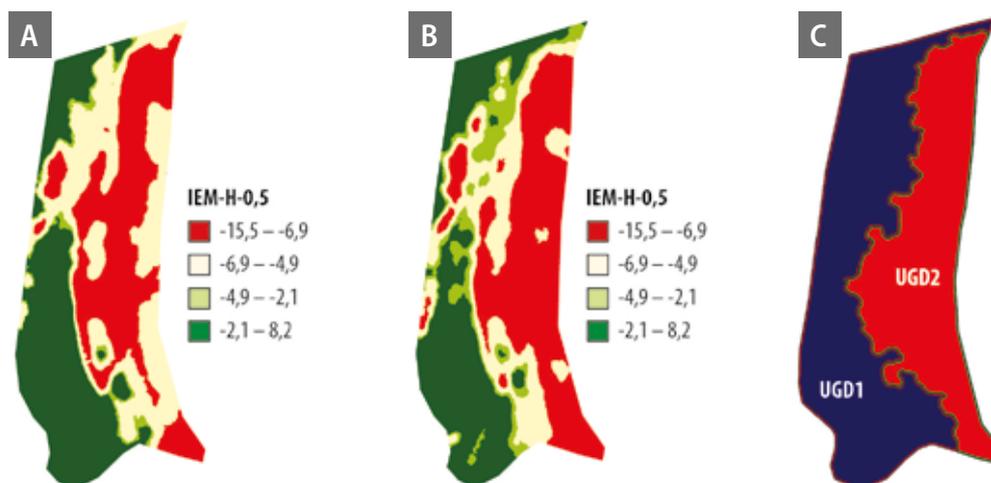


Figura 12.10. Mapa de condutividade elétrica do solo por indução eletromagnética (IEM) a 0,5 m de profundidade (A); mapa de condutividade elétrica do solo por IEM a 1 m de profundidade (B); mapa de duas zonas de manejo (Unidade de Gestão Diferenciada 1 e 2 – UGD) obtido a partir de algoritmo de agrupamento utilizando os dados de A e B (C). Condutividade elétrica expressa em $mS\ m^{-1}$.

Fonte: Speranza et al. (2018).

Aplicação localizada de insumos

Considerando o exposto neste capítulo, é de amplo conhecimento que a agricultura de precisão incorpora práticas de gestão na tentativa de aumentar a produtividade e a rentabilidade das áreas rurais, e os benefícios são alcançados pelo tratamento local, considerando a variabilidade espacial observada nesse nível. Zamykal e Everingham (2009) reforçam que, quando se empregam as melhores práticas de agricultura de precisão para gerenciar a aplicação de insumos do solo, haverá benefícios no aumento de produtividade, lucratividade, qualidade do produto, gestão ambiental e desenvolvimento rural.

Desde 2012, a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), em parceria com usinas brasileiras de cana-de-açúcar, vem avaliando indicadores de produtividade e gastos com fertilizantes em aplicações baseadas em taxa fixa e variável (Tabela 12.1). Magalhães et al. (2014) e Sanches et al. (2018, 2019) mostram os campos de pesquisa onde os indicadores foram obtidos.

Tabela 12.1. Indicadores de produtividade e gastos com corretivos e fertilizantes em lavouras de cana-de-açúcar (cana-planta e cana-soca) onde taxas fixas e variáveis foram adotadas.

Indicador ⁽¹⁾	Unidade	Taxa variável	Taxa fixa
Produtividade média	t ha ⁻¹ por ciclo	80,80	79,70
Corretivo			
Calcário	kg ha ⁻¹ por ciclo	1.452,00	1.550,00
Gesso	kg ha ⁻¹ por ciclo	1.178,00	1.326,00
Fertilizante (cana-planta)			
N	kg ha ⁻¹	61,60	83,20
P ₂ O ₅	kg ha ⁻¹	164,40	204,00
K ₂ O	kg ha ⁻¹	157,20	125,00
Fertilizante (cana-soca)			
N	kg ha ⁻¹	103,00	159,50
P ₂ O ₅	kg ha ⁻¹	7,10	0,00
K ₂ O	kg ha ⁻¹	119,00	90,00

⁽¹⁾ Os indicadores foram obtidos em campos experimentais na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), em parceria com usinas de cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Magalhães et al. (2014).

A adubação do solo com o uso de taxa variável se mostrou eficiente na redução da quantidade de fertilizantes aplicados no campo, com exceção do potássio, que foi aplicado em quantidades maiores em comparação à taxa fixa. Nos trabalhos de Magalhães et al. (2014) e Sanches et al. (2018, 2019), os mapas de prescrição de nitrogênio foram baseados nos mapas de produtividade, aplicando-se 1 kg de nitrogênio por tonelada produzida e respeitando-se a dose mínima de 60 kg de nitrogênio por tonelada produzida. Os resultados mostraram que é possível produzir a mesma quantidade de biomassa com a aplicação de quantidades menores de insumos. Entre os fertilizantes, o nitrogênio foi o que apresentou a maior diferença entre as taxas fixa e variável, uma diferença de 21,6 e 56,5 kg ha⁻¹ para a cana-planta e a cana-soca, respectivamente.

Em outro trabalho, Magalhães e Sanches (2015) avaliaram cinco cenários para verificar os benefícios da aplicação de calcário por meio de amostragem direcionada e técnicas geoestatísticas: a) cenário 1 – krigagem ordinária em grade regular (1 amostra para 0,25 ha); b) cenário 2 – média por talhão em grade regular (1 amostra para 2,5 ha); c) cenário 3 – interpolação pelo inverso da distância em grade regular (1 amostra para 2,5 ha); d) cenário 4 – krigagem ordinária em grade direcionada pela CEa (1 amostra para 2,5 ha); e e) cenário 5 – krigagem com deriva externa em grade direcionada pela CEa (1 amostra para 2,5 ha).

Considerando o cenário 1 como o mais realista (amostragem densa) e o cenário 2 como o mais praticado pelos produtores de cana-de-açúcar no Brasil, os autores constataram que a aplicação total de calcário seria de 30 e 40 t, respectivamente. Por meio de uma amostragem direcionada (cenários 4 e 5), os autores mostraram ser possível aplicar calcário nos locais corretos e nas quantidades necessárias para corrigir a aci-

dez do solo, demonstrando uma melhor abordagem para gerenciar as reais necessidades apresentadas pela cultura.

No cenário atual, onde os recursos são cada vez mais escassos e a preocupação com o meio ambiente é cada vez maior, os indicadores mostram que uma aplicação de insumo a uma taxa variada na cultura de cana-de-açúcar é viável e contribui para um manejo localizado mais eficiente das lavouras. Além disso, a aplicação racional de insumos pode contribuir para a redução das importações brasileiras de fertilizantes.

Tecnologia habilitadora on farm

A agricultura de precisão para cana-de-açúcar caminha para tecnologia habilitadora de apoio à tomada de decisão no manejo agrônomo da cultura da cana-de-açúcar considerando a pesquisa on farm. A abordagem on farm parte de um delineamento de execução de pesquisa dentro da fazenda, ou seja, são desenvolvidas, adaptadas e validadas estratégias de manejo sítio-específico nas áreas produtivas por meio de maquinário e ferramental disponível no campo.

Dos resultados de pesquisa no Brasil em agricultura de precisão vinculados ao manejo da variabilidade espacial do solo e da planta para cana-de-açúcar, a abordagem on farm ainda é pouco explorada. Esse enfoque vai além da investigação por divisão em ambientes de produção. Demattê e Demattê (2009) propõem a intervenção e validação dentro de cada talhão. A grande vantagem da realização de pesquisas on farm é a realização da experimentação em condições de campo com a tecnologia disponível pelo produtor, visando ao aumento da produtividade com redução dos danos ambientais e dos custos, gerando soluções inovadoras e aplicadas à realidade dos sistemas de produção.

Um dos poucos exemplos práticos da aplicação on farm em cana foi realizado por Speranza (2017) na Fazenda Aparecida, em Mogi Mirim, SP, num talhão de cana-de-açúcar, cujo objetivo foi a aplicação de doses de insumos a uma taxa variada, considerando mapas de unidade de gestão diferenciada de atributos do solo e crescimento vegetativo das plantas. A aplicação de insumos foi realizada com base no mapa contendo três zonas diferenciadas de manejo A, B e C (Figura 12.11A), delimitadas por geoestatística e mineração de dados, a partir de um conjunto de dados altamente correlacionados, além da utilização de mapas de declividade. Considerando a validação on farm da agricultura de precisão, a aplicação da taxa variada de insumos foi realizada com equipamento com regulagem manual disponível na fazenda, e a aplicação das diferentes doses em faixas contínuas no sentido horizontal das linhas de plantio, seguindo as demarcações prévias de curvas de nível da área. Três diferentes doses de aplicação dos insumos foram definidas considerando o tipo do insumo (uma mistura de um terço de calcário, um terço de gesso e um terço de cloreto de potássio) e a dose habitual aplicada na propriedade, aplicados de maneira uniforme: 1.500 kg ha^{-1} , que corresponde à dose utilizada pela fazenda; 750 kg ha^{-1} , metade da taxa nor-

malmente aplicada; e 375 kg ha^{-1} , que corresponde a um quarto da taxa normalmente aplicada (Figura 12.11B).

Segundo Speranza (2017), a aplicação prática em campo agrícola on farm foi útil para um manejo econômico da aplicação de insumos, uma vez que poderiam ser utilizadas, sem prejuízos para a produtividade do talhão, taxas de 750 kg ha^{-1} nas áreas A e C, e de 375 kg ha^{-1} na área B. Além disso, o autor salienta que o uso de equipamento simples para aplicação diferenciada de insumos, disponível na fazenda, trouxe motivação para o produtor permitir a validação da agricultura de precisão no campo.

Perspectivas para agricultura de precisão na cana-de-açúcar

Com a evolução do setor canavieiro, observa-se que os produtores e as usinas sucroalcooleiras passam a ter preocupação crescente com o meio ambiente, forçados pela necessidade de comprovar a viabilidade do produto como fonte de energia alternativa viável econômica e ambientalmente. Nesse cenário, surge o interesse crescente pela agricultura de precisão com o

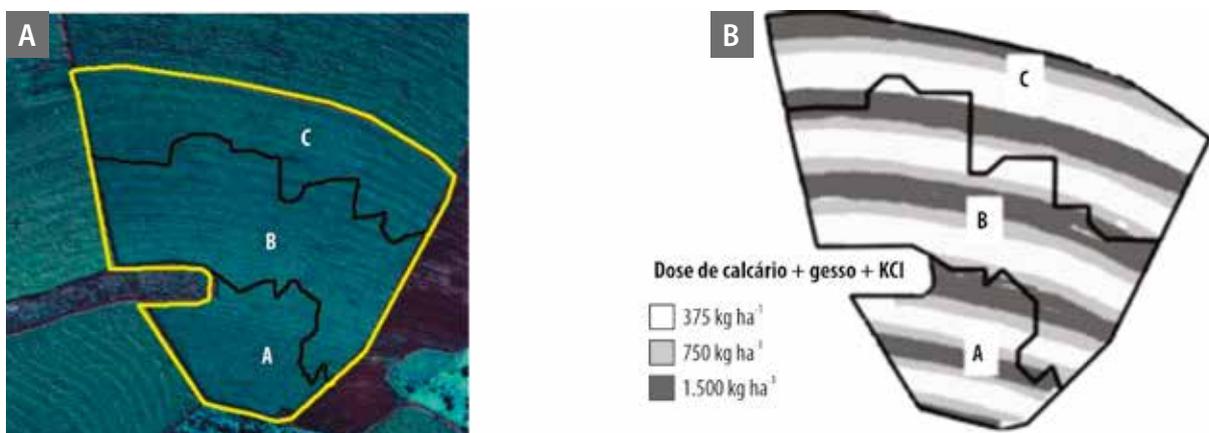


Figura 12.11. Talhão de cana com três zonas de manejo A, B e C (A); mapa de aplicação de mistura de insumos a uma taxa variada, considerando três diferentes doses para cada uma das zonas representadas por faixas com três diferentes tons de cinza (B).

Fonte: Adaptado de Speranza (2017).

objetivo de aumentar a produtividade e de garantir a sustentabilidade da cultura da cana-de-açúcar não só pela importância da cultura para o Brasil, mas também pelo alto grau tecnológico observado em muitas lavouras e pelo forte apelo ambiental que as práticas de agricultura de precisão permitem implementar.

Embora altamente mecanizada, a cultura da cana-de-açúcar ainda requer intensificação em sistemas de automação via agricultura de precisão. Segundo Grego et al. (2014a), ainda não se tem registro efetivo do uso de monitores para obtenção de mapas de produtividade de cana-de-açúcar. Há uma grande demanda pela tecnologia de piloto automático, o que permitirá ganhos reais no gerenciamento preciso do plantio, reduzindo as perdas durante a colheita. Pesquisas recentes desenvolvidas por Cherubin (2017) e Sanches et al. (2017) revelam que o uso da tecnologia dos monitores de produtividade na cultura da cana ainda é incipiente, apesar de já existir há alguns anos e de haver interesse do setor por esse tipo de ferramenta. Segundo esses especialistas, o monitoramento e a análise do mapa de produtividade de um talhão ficam em segundo plano diante de outros problemas que o setor encontra atualmente, tais como perdas na colheita, falta de capacidade operacional, dificuldades em colher cana tombada, limitações no número de linhas colhidas simultaneamente, arranquio de soqueira e controle da altura do corte de base.

Cabe ressaltar que os fabricantes de máquinas agrícolas ainda encontram grandes dificuldades para adaptar plenamente suas soluções à realidade da cultura da cana, que possui características diferenciadas em relação a outras culturas, para as quais há técnicas mais consolidadas, como as culturas de grãos. Segundo Cameline (2013), é preciso reconhecer que a cana-de-açúcar oferece condições particulares, que implicam

grandes estímulos para a adoção da agricultura de precisão, como a abrangência da ocupação e a centralização do gerenciamento das operações em campo, visto que a variabilidade espacial é grande, justificando os investimentos em maquinários, que podem ser compartilhados por áreas relativamente próximas. As análises laboratoriais de solo também podem ser internalizadas a depender do volume, o que resulta em ganhos de escala. Para grande parte das usinas, segundo Cameline (2013), o aumento de produtividade na ordem de 5% no primeiro ano justificaria todo o investimento necessário para adoção da agricultura de precisão.

Não restam dúvidas de que o setor canavieiro necessita de avanços em relação aos monitores de produtividade para os próximos anos. Além disso, o que se busca em um futuro próximo é que usinas e produtores de cana consigam mudar a visão a respeito das tecnologias e enxergar que existe variabilidade na produção de cana-de-açúcar até mesmo em pequenas escalas (dentro de cada talhão), e uma forma adequada de visualizar essa variabilidade e tomar decisões certas é por meio do ferramental da agricultura de precisão.

Considerações finais

As tecnologias da agricultura de precisão voltadas às culturas compreendem basicamente o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, a aplicação localizada de corretivos, fertilizantes e herbicidas, o manejo e o controle localizado de pragas e doenças, o monitoramento do índice de vegetação por imagem de satélite ou aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) e da produtividade. Para a cana-de-açúcar, uma das principais culturas agrícolas do Brasil, o cultivo, em sua maioria, ainda é realizado com baixa automação, com exceção da colheita que é mecanizada devido à adoção de práticas sustentáveis. Entretanto, a

situação está mudando gradativamente nos últimos anos e a importância da utilização de tecnologias de automação na etapa de plantio da cana vem ganhando espaço. Assim, a tendência é um maior crescimento em mecanização a partir do plantio e da intensificação de toda a atividade sucroalcooleira. Portanto, a adoção de técnicas ligadas à agricultura de precisão é uma grande oportunidade de tornar o sistema produtivo da cana mais eficiente, permitindo o aumento da produtividade e a redução dos custos. Considerando os benefícios e os desafios expostos em relação à adoção da agricultura de precisão na cana-de-açúcar, foram apresentados neste capítulo os principais temas e tecnologias envolvidos e adotados atualmente.

Referências

- AMARAL, L. R. **Sensor ótico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F. B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 15-28, Feb. 2015a. DOI: [10.1007/s11119-014-9377-2](https://doi.org/10.1007/s11119-014-9377-2).
- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; SCHEPERS, J. S. Algorithm for variable-rate nitrogen application in sugarcane based on active crop canopy sensor. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 4, p. 1513-1523, July-Aug. 2015b. DOI: [10.2134/agronj14.0494](https://doi.org/10.2134/agronj14.0494).
- ANDERSON, K.; GASTON, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 3, p. 138-146, Apr. 2013. DOI: [10.1890/120150](https://doi.org/10.1890/120150).
- ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; MENEZES, S. J. M. da C. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o Sebal e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 433-442, July/Sept. 2014. DOI: [10.1590/0102-778620130022](https://doi.org/10.1590/0102-778620130022).
- BAZZI, C. L.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; NÓBREGA, L. H. P.; ROCHA, D. M. Management zones definition using soil chemical and physical attributes in a soybean area. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 5, p. 952-964, Sept./Oct. 2013. DOI: [10.1590/S0100-69162013000500007](https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000500007).
- BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113993/1/Agricultura-de-precisao-2014.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- BEZDEK, J. C.; EHRLICH, R.; FULL, W. FCM: the fuzzy c-means clustering algorithm. **Computers & Geosciences**, v. 10, n. 2-3, p. 191-203, 1984. DOI: [10.1016/0098-3004\(84\)90020-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(84)90020-7).
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. Brasília, DF: Mapa; ACS, 2013. 36 p. (Boletim técnico).
- BU, H.; SHARMA, L. K.; DENTON, A.; FRANZEN, D. W. Comparison of satellite imagery and ground-based active optical sensors as yield predictors in sugar beet, spring wheat, corn, and sunflower. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 1, p. 299-308, Jan./Feb. 2017. DOI: [10.2134/agronj2016.03.0150](https://doi.org/10.2134/agronj2016.03.0150).
- CAMELINI, J. H. Agricultura de precisão para cana-de-açúcar: expressão local de um processo global. In: ENCUENTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA, 14., 2013, Peru. **Reencuentro de saberes territoriales latinoamericanos: anais**. Lima: Egal, 2013.
- CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. de; MONTANARI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 297-304, May/June 2009. DOI: [10.1590/S1415-43662009000300011](https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300011).
- CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. de O.; BARBOSA, L. C.; MENANDRO, L. M. S.; CARVALHO, J. L. N. Straw removal affects soil physical quality and sugarcane yield in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 789-900, Dec. 2019. DOI: [10.1007/s12155-019-10000-1](https://doi.org/10.1007/s12155-019-10000-1).
- CHANG, D.; ZHANG, J.; ZHU, L.; GE, S. H.; LI, P. Y.; LIU, G. S. Delineation of management zones using an active canopy sensor for a tobacco field. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 109, p. 172-178, Nov. 2014. DOI: [10.1016/j.compag.2014.09.019](https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.09.019).
- CHERUBIN, N. Monitor de produtividade: como usá-lo a favor do seu canavial. **Revista RPAnews**, 1 set. 2017. p. 36-40. Disponível em: https://www.unicamp.br/unicamp/sites/default/files/2017-09/impresao_boxnet_2017-09-11_-_14h26m08s.pdf. Acesso em: 30 abr. 2019.
- CONAB. **Conab divulga 2º levantamento da safra 2018/19 de cana-de-açúcar**: safra de cana estimada em 635 milhões de toneladas terá produção de 30 bilhões

- de litros de etanol. 2018. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/conab-levantamento-safra-2018-19-cana-de-acucar-210818>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, Mar. 2005. DOI: [10.1016/j.compag.2004.10.005](https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005).
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, May 2003. DOI: [10.2134/agronj2003.4550](https://doi.org/10.2134/agronj2003.4550).
- DEMATTÊ, J. L. I.; DEMATTÊ, J. A. M. Ambientes de produção como estratégia de manejo na cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, n. 127, p. 10-18, set. 2009.
- DOMSCH, H.; GIEBEL, A. Estimation of soil textural features from soil electrical conductivity recorded using the EM38. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 389-409, Aug. 2004. DOI: [10.1023/B:PRAG.0000040807.18932.80](https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040807.18932.80).
- EKWUE, E. I.; BARTHOLOMEW, J. Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 2, p. 95-103, Feb. 2011. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2010.11.002](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.002).
- EMBRAPA. **Projetos: Agricultura de Precisão (AP) para sustentabilidade do sistema produtivo agrícola, pecuário e florestal brasileiro**. [2020]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/212226/agricultura-de-precisao-ap-para-sustentabilidade-do-sistema-produtivo-agricola-pecuario-e-florestal-brasileiro>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de monitoramento**. Campinas, [2018]. Disponível em: <http://www.sat.cnpem.embrapa.br>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- FAIÇAL, B. S.; FREITAS, H.; GOMES, P. H.; MANO, L. Y.; PESSIN, G.; CARVALHO, A. C. P. L. F. de; KRISHNAMACHARI, B.; UYAMA, J. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 138, p. 210-223, June 2017. DOI: [10.1016/j.compag.2017.04.011](https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.011).
- FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: version 9.0**. Michigan, 2008.
- GHELLER, A. C. A.; MENEZES, L. L.; MATSUOKA, S.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H. P.; ARIZONO, H.; GARCIA, A. A. F. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. Araras: Ed. da UFScar, 1999. 7 p.
- GREGO, C. R.; ARAUJO, L. S. de; VICENTE, L. E.; NOGUEIRA, S. F.; MAGALHÃES, P. S. G.; VICENTE, A. K.; BRANCALIAO, S. R.; VICTORIA, D. de C.; BOLFE, E. L. Agricultura de precisão em cana-de-açúcar. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014a. p. 442-457. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1002013/1/4223.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014b. p. 74-83. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1002010/1/4221.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- GREGO, C. R.; RODRIGUES, C. A. G.; VAZ, C. M. P.; VICENTE, L. E.; HURTADO, S. M. C.; RABELLO, L. M.; BRANCALIAO, S. R.; JORGE, L. A. de C.; AFFONSO, R. B. Integração espacial de dados para agricultura de precisão na unidade piloto com cana-de-açúcar, Mogi Mirim, SP. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014c. p. 458-466. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1002020/1/4225.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U. Improved evaluation of field experiments by accounting for inherent soil variability. **European Journal of Agronomy**, v. 89, p. 1-15, Sept. 2017. DOI: [10.1016/j.eja.2017.05.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.05.004).
- INAMASU, R. Y.; SOUZA, R. de; PORTO, A. J. V.; FORTES, C.; LUCHIARI, A.; SCHEPERS, J. S.; SHANAHAM, J. F.; FRANCIS, D. D. Active sensor readings for assessing sugarcane crop canopy chlorophyll status. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 8., 2006, Minneapolis. **Abstracts...** Minneapolis, 2006. p. 156.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.
- JAIN, A. K.; MURTY, M. N.; FLYNN, P. J. Data clustering: a review. **ACM Computing Surveys**, v. 31, n. 3, p. 264-323, Sept. 1999. DOI: [10.1145/331499.331504](https://doi.org/10.1145/331499.331504).
- JANRAO, P.; MISHRA, D.; BHARADI, V. Clustering approaches for management zone delineation in precision agriculture for small farms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE COMPUTING IN SCIENCE, TECHNOLOGY AND MANAGEMENT, 2019, Jaipur. **Proceedings...** Rochester: SSRN, 2019. DOI: [10.2139/ssrn.3356457](https://doi.org/10.2139/ssrn.3356457).

- JORGE, L. A. de C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 109-134. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1003485/1/CAP8.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 285-308, Mar. 2005. DOI: [10.1016/j.compag.2004.11.012](https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012).
- LIAKOS, V.; TAGARAKIS, A.; FOUNTAS, S.; NANOS, G. D.; TSIROPOULOS, Z.; GEMTOS, T. Use of NDVI to predict yield variability in a commercial apple orchard. In: STAFFORD, J. V. (ed.). **Precision agriculture'15**. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2015. p. 553-559. DOI: [10.3920/978-90-8686-814-8_69](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-814-8_69).
- LUCHIARI JÚNIOR, A.; SHANAHAN, J.; SCHEPERS, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, A.; INAMASU, R.; FRANCA, G.; MANTOVANI, E.; GOMIDE, R. Crop and soil based approaches for site specific nutrient management. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. **Meio ambiente e a nova agenda para o agronegócio de milho e sorgo: [palestras]**. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo; Florianópolis: Epagri, 2002.
- MAGALHÃES, P. S. G.; CERRI, D. G. P. Yield monitoring of sugar cane. **Biosystems Engineering**, v. 96, n.1, p.1-6, Jan. 2007. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2006.10.002](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.10.002).
- MAGALHÃES, P. S. G.; SANCHES, G. M. Improving the kriging of soil attributes using soil electrical conductivity as external drift. In: NEAR SURFACE GEOSCIENCE, 2015, Turin. **Proceedings...** Turin: Eage, 2015.
- MAGALHÃES, P. S. G.; SANCHES, G. M.; FRANCO, H. C. J.; DRIEMEIER, C.; KÖLLN, O. T.; BRAUNBECK, O. A. Precision agriculture in sugarcane production: a key tool to understand its variability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 12., 2014, Sacramento, CA. **[Proceedings...]**. [Sacramento, CA]: Ispa, 2014.
- MCBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 7-23, Feb. 2005. DOI: [10.1007/s11119-005-0681-8](https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8).
- MCNAIRN, H.; BRISCO, B. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 525-542, 2004. DOI: [10.5589/m03-069](https://doi.org/10.5589/m03-069).
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. de. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 567-573, Nov./Dec. 2008. DOI: [10.1590/S0103-90162008000600001](https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600001).
- MOLIN, J. P.; FAULIN, G. Di C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 1, p. 1-5, Jan./Feb. 2013. DOI: [10.1590/S0103-90162013000100001](https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000100001).
- OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. (ed.). **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 159 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/146817/1/GeoVesper-Versao-Online.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. de O.; MEDEIROS, J. F. de; SILVA, P. C. M. da; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 186-193, Feb. 2015. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p186-193](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p186-193).
- PANTAZI, X. E.; MOSHOU, D.; ALEXANDRIDIS, T.; WHETTON, R. L.; MOUAZEN, A. M. Wheat yield prediction using machine learning and advanced sensing techniques. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 57-65, Feb. 2016. DOI: [10.1016/j.compag.2015.11.018](https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.018).
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R. dos; SILVA, G. G. da. Radares imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2015. p. 2506-2513.
- PEDROSO, M.; TAYLOR, J.; TISSEYRE, B.; CHARNOMORDIC, B.; GUILLAUME, S. A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 199-208, Jan. 2010. DOI: [10.1016/j.compag.2009.10.007](https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.007).
- POLETTI, M. O controle biológico na esteira da agricultura de precisão. **Dinheiro Rural**, 30 nov. 2016. Disponível em: <https://www.dinheiro rural.com.br/noticia/artigo/o-controle-biologico-na-esteira-da-agricultura-de-precisao>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- PRADO, H. do; PÁDUA JÚNIOR, A. L.; GARCIA, J. C.; MORAES, J. F. L. de; CARVALHO, J. P. de; DONZELI, P. L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A.

(ed.). **Cana de açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 179-204.

QGIS. **A free and open source geographic information system**. 2020. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 19 nov. 2020.

R CORE TEAM. **R language definition**. 2019. Disponível em: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-lang.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2020.

ROSA, H. J. A.; AMARAL, L. R. do; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 840-848, Sept. 2015. DOI: [10.1590/S0100-204X2015000900013](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000900013).

ROUSE JUNIOR, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM**, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC: Nasa, 1974. v. 1, p. 309-317.

SANCHES, G. M. **Variabilidade espacial dos atributos do solo por meio da condutividade elétrica aparente**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas.

SANCHES, G. M.; DUFT, D. G.; KÖLLN, O. T.; LUCIANO, A. C. dos S.; DE CASTRO, S. G. Q.; OKUNO, F. M.; FRANCO, H. C. J. The potential for RGB images obtained using unmanned aerial vehicle to assess and predict yield in sugarcane fields. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15-16, p. 5402-5414, 2018. DOI: [10.1080/01431161.2018.1448484](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1448484).

SANCHES, G. M.; MAGALHAES, P. S. G.; FRANCO, H. C. J. Agricultura de Precisão: uma realidade para a cana-de-açúcar? **Revista Canavieiros**, v. 10, n. 130, p. 46-48, abr. 2017.

SANCHES, G. M.; PAULA, M. T. N. de; MAGUALHÃES, P. S. G.; DUFT, D. G.; VITTI, A. C.; KOLLN, O. T.; BORGES, B. M. N.; FRANCO, H. C. J. Precision production environments for sugarcane fields. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 1, p.10-17, Jan./Feb. 2019. DOI: [10.1590/1678-992x-2017-0128](https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0128).

SANTOS, R. T.; SARAIVA, A. M. A Reference process for management zones delineation in precision agriculture. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 3, p. 727-738, Mar. 2015. DOI: [10.1109/TLA.2015.7069098](https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7069098).

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. de. A classification for a geostatistical index of spatial dependence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-10, 2016. DOI: [10.1590/18069657rbcs20160007](https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160007).

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. da; Gestão diferenciada das pastagens baseada na monitorização

da condutividade elétrica aparente do solo. **Revista de Ciências Agrárias**, 41, n. 4, p. 881-892, dez. 2018. DOI: [10.19084/RCA18163](https://doi.org/10.19084/RCA18163).

SHARMA, L. K.; BU, H.; DENTON, A.; FRANZEN, D. W. Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, U.S.A. **Sensors**, v. 15, n. 11, p. 27832-27853, Nov. 2015. DOI: [10.3390/s151127832](https://doi.org/10.3390/s151127832).

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. de F. e; DAFONTE, J. D. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 215-223, Apr./June 2015. DOI: [10.1590/1678-4499.0234](https://doi.org/10.1590/1678-4499.0234).

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006. 214 p. (Coleção ensino da ciência e da tecnologia, 9).

SOUZA, Z. M. de; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; MANDONI, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 840-847, abr. 2010. DOI: [10.1590/S0103-84782010005000048](https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000048).

SPERANZA, E. A. **Mineração de dados espaciais aplicada no delineamento de unidades de gestão diferenciada em agricultura de precisão**. 2017. 340 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SPERANZA, E. A.; ANTUNES, J. F. G.; INAMASU, R. Y. Uso de imagens de sensoriamento remoto para identificação de variabilidade espacial em Agricultura de Precisão. In: **SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL**, 7., 2018, Jardim, MS. **Anais...** Jardim, MS: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2018. p. 283-292. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1099230/1/PLUsoimagensGeopantanal.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.

SPERANZA, E. A.; CIFERRI, R. R.; GREGO, C. R.; VICENTE, L. E. A cluster-based approach to support the delineation of management zones in precision agriculture. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-SCIENCE**, 10., 2014, Guarujá. **Conference proceedings**, 2014. p. 119-126. DOI: [10.1109/eScience.2014.42](https://doi.org/10.1109/eScience.2014.42).

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; WIEBOLD, W. J.; BATCHELOR, W. D.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; CLAY, D. E.; PALM, H. L.; PIERCE, F. J.; SCHULER, R. T.; THELEN, K. D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 263-283, Mar. 2005. DOI: [10.1016/j.compag.2004.11.010](https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.010).

THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **Introduzindo o Sentinel-2**. [2017]. Disponível em: <https://www.esa>.

[int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2](#). Acesso em: 6 mar. 2020.

TRIAANTAFILIS, J.; LASLETT, G. M.; MCBRATNEY, A. B. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 1009-1017, May 2000. DOI: [10.2136/sssaj2000.6431009x](#).

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. de; PINTO, F. de A. de C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 683-690, Oct./Dec. 2012. DOI: [10.1590/S1806-66902012000400009](#).

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 1-45.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. Aplicações de geoestatística em pesquisas com cana-de-açúcar. In:

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). **Cana de açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p. 839-852. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/17769/1/2222.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2019.

WEIR, J.; HERRING, D. **Measuring vegetation (NDVI & EVI)**. 2000. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation>. Acesso em: 30 nov. 2019.

YANO, I. H. **Mapeamento de infestações de plantas daninhas em lavouras de cana-de-açúcar por aeronave remotamente pilotada (RPA)**. 2018. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas.

ZAMYKAL, D.; EVERINGHAM, Y. L. Sugarcane and precision agriculture: quantifying variability is only half the story – a review. In: LICHTFOUSE, E. (ed.). **Climate change, intercropping, pest control and beneficial microorganisms**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 189-218. (Sustainable agricultura reviews, v. 2). DOI: [10.1007/978-90-481-2716-0_9](#).

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 3, p. 471-475, Mar. 2003. DOI: [10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](#).

Tecnologia *blockchain* para a rastreabilidade da cadeia produtiva sucroalcooleira¹

Alexandre de Castro | Bárbara Elis Pereira Silva | Edgard Henrique dos Santos |
Fábio Cesar da Silva | Francisco José Severino | Inácio Henrique Yano | José Geraldo Vidal Vieira |
Mariana Abdalla Granelli | Miguel Ivan Lacerda de Oliveira | Paulo Sérgio de Arruda Ignácio

Introdução

A tecnologia *blockchain* foi definida pela primeira vez por Satoshi Nakamoto em seu artigo, no qual descrevia um novo sistema de moeda digital que permitia a transferência de valores entre as duas partes envolvidas sem a necessidade de uma instituição intermediando o processo (Nakamoto, 2009). A criptomoeda à qual Nakamoto (2009) se referiu era o Bitcoin, e a tecnologia que permitiria essa nova forma de transacionar era a *blockchain*.

Em sua essência, a *blockchain* é uma tecnologia que armazena transações de forma permanente, não sendo possível apagá-las posteriormente, somente atualizá-las sequencialmente (Mougayar, 2018). Ela pode ser compreendida como uma coleção de bloco de dados concatenados por meio de técnicas criptográficas de proteção da informação. Essas técnicas consistem em codificar o conteúdo de uma mensagem de comprimento variável para dados de comprimento fixo via protocolos de integridade e autenticação baseados em cifras de uso único, ou função *hash* de mão única (Castro, 2017; Minto Neto et al., 2018; Ethereum Foundation, 2021).

Para associar identidades digitais da *blockchain* a documentos eletrônicos, os padrões de tran-

sações contratuais e gestão de tráfego entre dispositivos automatizados são efetuados por pares (nós) conectados via internet, e passam por protocolos que garantem confiabilidade relacionada à assinatura e validação (*endorsement*) do histórico de dados, como ilustrado no modelo da Figura 13.1.

O modelo apresentado na Figura 13.1 é composto por quatro blocos principais numerados (*Block n*), em que o primeiro é o bloco gênese ou *Block 0*. Os blocos são compostos por um cabeçalho e um corpo (Data). Este último, por sua vez, é composto pelas transações T, numeradas sequencialmente. Na Figura 13.1, nota-se o detalhe do bloco Cabeçalho 2, que contém a *hash* do próprio bloco ou *hash* do bloco corrente [*atual_hash(Block 2)*] e a *hash* do bloco anterior [*anterior_hash(Block 1)*]. A *hash* permite que se tenha segurança de que os dados ligados aos blocos não sofreram alterações, característica fundamental da *blockchain* (Yano et al., 2018).

Cada transação pode ser entendida como uma ação passível de rastreabilidade, que é certificada pelos nós da rede, podendo haver sigilo de todo o seu conteúdo ou de parte dele. Essas transações são agrupadas de maneira semelhante em um livro-razão, também utilizado em operações contábeis, e, por essa característica,

¹ Declaração: a propriedade intelectual, os direitos de licenciamento e a exploração comercial do sistema de rastreabilidade com tecnologia *blockchain* embarcada desenvolvida no âmbito dos projetos Saic 23800.20/0028-1 e Saic 23800.19/0035-9 são exclusivamente pertencentes à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

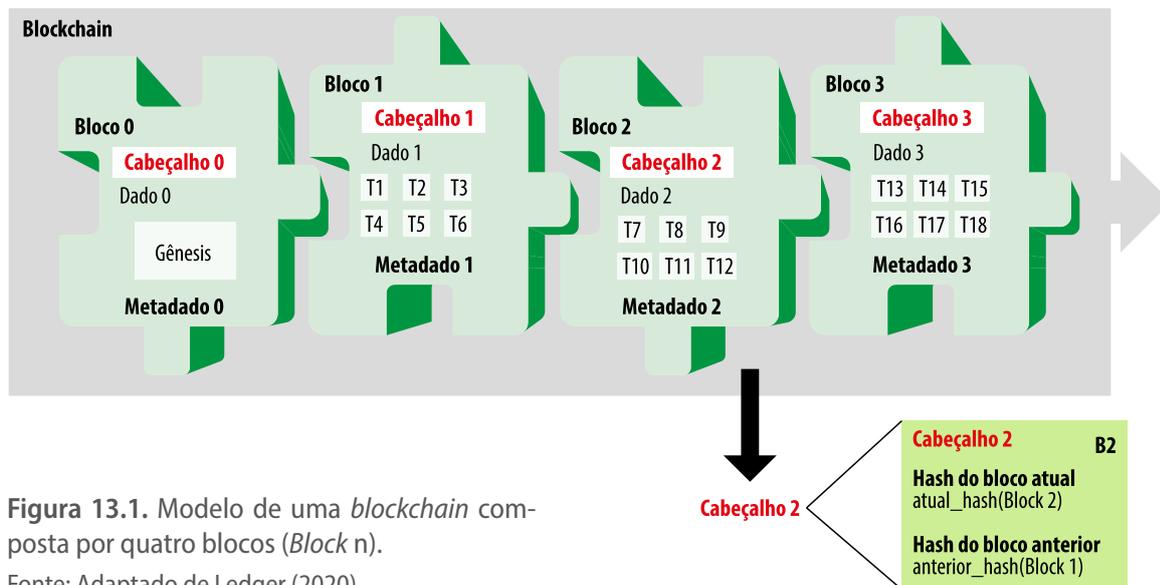


Figura 13.1. Modelo de uma *blockchain* composta por quatro blocos (*Block n*).

Fonte: Adaptado de Ledger (2020).

o conjunto é chamado de *ledger* (livro-razão em inglês).

Os *ledgers* são a base dentro de uma estrutura de ferramentas computacionais para implementação de sistemas de transações com a tecnologia *blockchain* em ambientes corporativos. Como possível exemplo de utilização dessa tecnologia, serão apresentados modelos agroindustriais simplificados de rastreabilidade de processos produtivos da indústria das culturas da cana-de-açúcar.

Fundamentos da tecnologia e os *smart contracts* (contratos inteligentes)

Algumas das características mais importantes da *blockchain* são a imutabilidade (Abeyratne; Monfared, 2016) e um mecanismo (ou algoritmo) de consenso (Abeyratne; Monfared, 2016; Kim; Laskowski, 2018; Kshetri, 2018; Zheng et al., 2018; Baliga, 2020). Como visto anteriormente, a *blockchain* permite que as redes de negócios criem livros contábeis compartilhados, que são distribuídos e replicados para fornecer

garantia, proveniência, imutabilidade e finalidade na propriedade e transferência de ativos de negócios (Viswanathan et al., 2019). A seguir, descreve-se um pouco sobre cada uma dessas características.

- Imutabilidade: nos registros da tecnologia *blockchain*, as entradas são vinculadas de forma matemática através dos *hashes*. A vinculação não apenas permite criar o caminho entre um conjunto de entradas, mas também garante que, se houver alguma manipulação, ela seja refletida automaticamente, a fim de garantir que as transações registradas sejam imutáveis, assegurando a integridade dos dados (Abeyratne; Monfared, 2016).
- Mecanismo de consenso: a cadeia de blocos é atualizada por meio do protocolo de consenso, que garante uma ordem comum e inequívoca de transações e dos blocos de forma a assegurar a integridade e a consistência das transações ali contidas para todos os nós, que estão distribuídos geograficamente (Baliga, 2020).
- Proveniência e rastreabilidade: a tecnologia *blockchain* pode ser utilizada para rastrear

ativos digitais, pois todos os dados podem ser verificados por essa rede (Bambara; Allen, 2018). O fato de as informações relacionadas a um fabricante serem compartilhadas por uma rede de nós e de os dados armazenados na *blockchain* serem imutáveis garante a proveniência dos dados de fabricação de determinado produto. O cliente é capaz de rastrear dados históricos de desempenho do fabricante e pode verificar a autenticidade e a procedência dos dados. Esse compartilhamento de informações pode aumentar a reputação do provedor de serviços e melhorar as chances de conquistar novos negócios (Angrish et al., 2018).

- d) **Auditabilidade:** um livro-razão compartilhado e transparente aumenta a cooperação entre reguladores e entidades reguladas. Dessa forma, a tecnologia *blockchain*, que registra todas as transações, torna-se um repositório de dados compartilhados para todas as entidades (nós) envolvidas. Essa característica permite a mudança do monitoramento pós-transação para o monitoramento sob demanda/imediato, além de melhorar a capacidade dos reguladores de garantir a legalidade, a segurança e a estabilidade dos mercados, permitindo o acesso a dados auditáveis e imutáveis (Aste et al., 2017).

Um dos conceitos mais importantes associados a essa tecnologia são os *smart contracts* (contratos inteligentes), os quais permitem a execução automática de acordos e pressagiam um mundo sem intermediários. As condições e as regras dos “contratos” são estabelecidas em códigos de computador, e a confiança é garantida por consenso entre os participantes (Sánchez-Gómez et al., 2020). Assim, os sistemas baseados na tecnologia *blockchain*, que suportam *smart contracts*, permitem processos e interações mais complexos, de forma que estabelecem um novo

paradigma com aplicativos praticamente ilimitados (Casino et al., 2019).

Um contrato inteligente é um documento eletrônico, com protocolos de transações computadorizadas, que ratifica um acordo de vontades entre as partes, a fim de adquirir, proteger, transferir, modificar, preservar ou extinguir direitos. A ideia de um contrato inteligente é automatizar sua execução por meio de algoritmos de comunicação em uma rede de informática com interfaces acessíveis às partes. Os campos de aplicação de um contrato inteligente seriam os estágios de seleção, negociação, compromisso, desempenho e arbitragem (Haber; Stornetta, 1991; Petroni et al., 2020). De acordo com Sánchez-Gómez et al. (2020), para determinadas aplicações, os *smart contracts* podem facilitar a execução de obrigações e a automação de processos entre as partes, embora a utilização desse tipo de protocolo requeira uma abordagem interdisciplinar, combinando práticas tecnológicas, econômicas e de legitimação.

Esses contratos podem ser implantados em plataformas de *blockchain* através de scripts e armazenados com endereços específicos para chamadas funcionais semelhantes àquelas realizadas em outras linguagens de computador programáveis (Watanabe et al., 2015). Tecnicamente, quando *smart contracts* são implantados em uma rede *blockchain*, eles são transferidos para cada nó conectado à medida que as transações são executadas; por sua vez, essas transações acionam as condições prescritas nos *smart contracts*, que atuam como códigos de computador para executar fluxos de processos relacionados ou notificações, através de rotinas computacionais (*scripts*) desenvolvidas para esse fim.

O uso potencial de *smart contracts* em cadeias produtivas pode ser visto, por exemplo, como um processo abrangente de auditoria administrativa, que, se fosse baseada em papel,

poderia prejudicar o desempenho geral da cadeia produtiva, por causa das condições limitadas e do esforço necessário para assegurar a rastreabilidade e a credibilidade do processo, tanto de transformação do produto quanto da própria auditoria em si. Isso ocorre porque as condições e os acordos regulamentados podem ser codificados em *smart contracts* para atuação automática sem depender de ação humana, evitando de forma eficiente fraudes, roubos ou outros riscos gerenciais (Chang; Chen, 2020).

Os diferentes tipos de rede *blockchain*

Os diferentes tipos de *blockchain* existentes contemplam estruturas de acesso públicas, privadas e de consórcio, e cada um deles pode ser aplicado em determinados cenários para obter melhores vantagens e eficácia (Chang; Chen, 2020). Como visto no início deste capítulo, a tecnologia *blockchain* como plataforma para computação de serviço foi aplicada pela primeira vez com o Bitcoin, uma tecnologia de livre-razão distribuída com objetivo monetário. No entanto, com a necessidade de mais transações e com a possibilidade de aplicação de seus fundamentos em diversos segmentos, na esteira do desenvolvimento do Bitcoin surgiram outras plataformas (Rizal et al., 2019), como:

- a) Ethereum: atende as necessidades de transações que não envolvem apenas transações financeiras.
- b) Hyperledger: projeto guarda-chuva de código aberto hospedado pela The Linux Foundation e introduzida para aprimorar as tecnologias de *blockchain*, buscando operar em torno de quatro requisitos — transações privadas, identidade e auditabilidade, interoperabilidade e portabilidade. Contém uma variedade de frameworks, bibliotecas,

interfaces a aplicativos, como (Tonelli et al., 2019):

- Hyperledger Sawtooth: conjunto modular de *blockchain* desenvolvido pela Intel, que usa um novo algoritmo de consenso chamado *Proof of Elapsed Time* (PoeT).
- Hyperledger Iroha: projeto de algumas empresas japonesas para criar uma aplicação que seja fácil de ser incorporada a uma estrutura *blockchain*.
- Hyperledger Fabric: projeto liderado pela International Business Machines (IBM), cuja tecnologia é um plug e executa a implementação da tecnologia *blockchain*. Projetada como uma base para desenvolver aplicativos *blockchain* de alto dimensionamento com um grau flexível de permissões.
- Hyperledger Burrow: desenvolve uma máquina de contrato inteligente admissível ao longo da especificação da Ethereum.
- Hyperledger Indy: um livro distribuído, construído especificamente para a identidade descentralizada. Ele fornece ferramentas, bibliotecas e componentes reutilizáveis para criar e usar identidades digitais independentes baseadas em *blockchains* ou em outras *ledgers* distribuídas para interoperabilidade.

Blockchain no processo produtivo

A cadeia produtiva é um processo dinâmico, um fluxo contínuo de materiais e informações combinadas entre os membros da cadeia, contemplando o processo de transformação desde a matéria-prima até o produto final (Jain et al., 2009).

As empresas buscam inicialmente conseguir pedidos de clientes no mercado, e esse é o início do processo de gestão que deve orientar o fluxo de produtos pela cadeia de suprimentos. A transparência da informação é necessária desde o recebimento dos pedidos até a manutenção do relacionamento entre os membros da cadeia de suprimentos (Gunasekaran et al., 2001).

O aumento das demandas globais na cadeia produtiva neste mundo acelerado implica um gerenciamento mais transparente e eficiente da cadeia de suprimentos, que pode ser encontrado com o uso de tecnologias emergentes da Indústria 4.0, entre elas a *blockchain* combinada com a Internet das Coisas (IoT). Essas tecnologias prometem maior controle e monitoramento das transações realizadas entre os agentes integrados na cadeia de suprimentos (Awwad et al., 2018).

As tecnologias digitais estão direcionando o desenvolvimento econômico e social, de forma disruptiva, e a *blockchain* é um exemplo disso por tratar-se de uma ferramenta fundamental para a democracia descentralizada no contexto da governança eletrônica (e-governança), aumentando a eficiência, a transparência e a sustentabilidade das cidades inteligentes (Oliveira et al., 2020).

Ainda se destaca como o principal benefício em processos produtivos na melhoria da segurança e rastreabilidade: a tecnologia *blockchain* permite fazer um acompanhamento digital dos produtos em cada fase de produção, desde os fornecedores até os consumidores por meio do compartilhamento digital da informação do produto, como local de origem, número de lote, data de caducidade ou temperatura de armazenamento. Tais informações são registradas de forma imutável na cadeia de blocos. Adicionalmente, a tecnologia permite que a informação guardada seja verificada pelos componentes da

rede, o que garante a precisão da informação (Fernandez et al., 2018).

Por representar uma maneira nova de colaborar e realizar negócios, a confiança e a transparência que proporciona converte a *blockchain* na solução ideal para múltiplos usos, entre empresas colaboradoras, bem como departamentos isolados, que requerem processos de reconciliação de transações complexas, tais como processamento de pagamentos, gestão de disputas, gestão do programa de fidelidade e gestão de promoções comerciais. Qualquer instância na qual haja tarefas e dados duplicados ou faltem dados fiáveis é propícia para a aplicação da *blockchain* (Tavares; Ignácio, 2020).

O conhecimento e o desenvolvimento dos potenciais de utilização da *blockchain* na cadeia produtiva, combinados com o aumento de exigência dos órgãos reguladores na indústria de alimentos, têm potencial de acelerar a adoção dessa tecnologia no controle e gerenciamento logístico da indústria alimentícia em busca de rastreabilidade e transparência de processos (Shilling, 2018).

É fundamental o aumento da transparência na cadeia produtiva em todos os segmentos de mercado, mas destaca-se que a indústria alimentícia (a partir da utilização de *blockchain* para a monitoramento das operações desde a origem dos produtos) tem permitido que algumas grandes organizações de varejo nos Estados Unidos reduzam o risco de contaminação dos produtos oferecidos a seus consumidores (Shilling, 2018).

Blockchain no agronegócio

A utilização da tecnologia *blockchain* na cadeia produtiva do agronegócio surgiu em alguns países asiáticos como uma solução para garantir a confiabilidade da cadeia de suprimentos

alimentícia (FSC, do inglês *food supply chain*), principalmente nos mercados mais populosos. Nesses mercados, o consumo diário de comida é intenso e complexo, causando alguns distúrbios na sociedade, como contaminação e problemas de saúde relacionados ao transporte e à distribuição, bem como aos problemas de adulteração de produtos e compras de origem duvidosa (Tan; Thi, 2020). Mesmo assim, sistemas de rastreabilidade na cadeia de suprimentos alimentícia não são frequentemente utilizados pela maioria dos mercados ao redor do mundo.

Em alguns mercados asiáticos, são utilizados sistemas de rastreamento em *blockchain* para garantir a transparência e a rastreabilidade do processo ao longo da cadeia, o que permite que o usuário final tenha acesso, no momento da compra, às informações de todo o processo de transformação do produto comprado, desde seu início, conforme ilustrado na Figura 13.2.

No fluxo apresentado (Figura 13.2), a coleta de informações sobre a matéria-prima envolve a identificação dos sistemas produtores a partir da instalação de um código QR. Esse código

pode ser aplicado, por exemplo, em um animal ou em um produto extraído da natureza, e contém informações já parametrizadas sobre suas características, permitindo assim o rastreamento na sequência dos processos. Os dados relacionados ao transporte (ex.: motorista, manuseio e rotas) podem também ser incluídos no registro, assim como informações da empresa que está recebendo. Informações sobre carga, condições do veículo e viagem podem também ser coletadas e adicionadas à base de dados.

Todas as fases do processo de fabricação podem ser gravadas em cada um dos produtos de maneira manual ou automática por meio da aplicação da IoT durante o processo de transformação. A integração com sistemas de gerenciamento de armazenagem — Warehouse Management System (WMS) — e sistemas de informação empresarial — Enterprise Resource Planning (ERP) — auxilia na conexão das etapas subsequentes, na padronização da informação e na disponibilização do conteúdo a ser gravado na *blockchain*.

Considerando o detalhamento da informação, o estágio de distribuição seguirá um processo

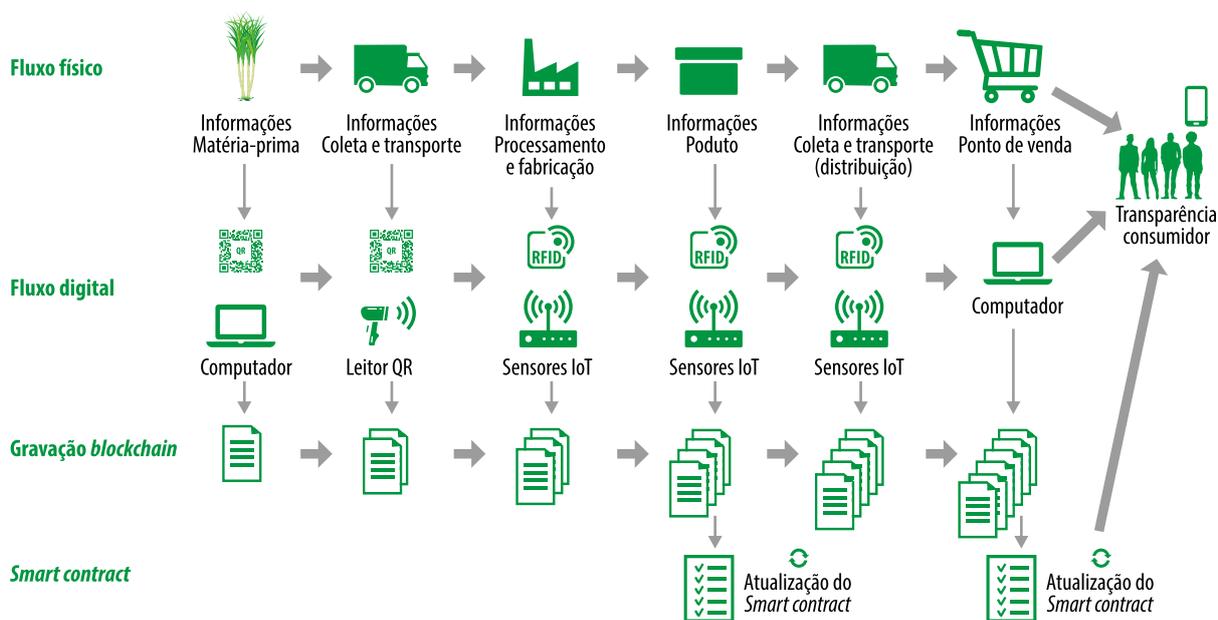


Figura 13.2. Modelo conceitual de um sistema de rastreabilidade de produtos com *blockchain*.

Fonte: Adaptado de Tan e Thi (2020).

parecido com o estágio de transporte da matéria-prima para a fábrica, movimentando produtos identificados com lotes de produção. A utilização de *smart contracts* a partir desse ponto pode auxiliar nas transações diárias de abastecimento do mercado e permitir a liberação das transações sem interferência humana. Nos pontos de distribuição e revenda, os consumidores podem ter acesso a todo o trajeto e às interferências que cada um dos produtos sofreu na cadeia de abastecimento, por meio de acesso a um dispositivo que está conectado a uma interface para usuários (Tavares; Ignácio, 2020).

Os potenciais benefícios da maior transparência e do melhor rastreamento são fortemente percebidos no ciclo de entrega de qualquer cadeia de suprimentos. Quanto mais capitalizadas são essas cadeias, aumentam as possibilidades de discrepâncias no fluxo de informações e na qualidade do produto entregue. Com uma concorrência cada vez maior no mercado, nenhuma organização quer perder nesse quesito, e essa tecnologia demonstra sua utilidade também nesses casos (Corrêa, 2019).

A Figura 13.3 ilustra um modelo simplificado de cadeia produtiva e transações na linha do tempo registradas em *blockchain* de rastreabilidade.

Com base na natureza da origem da cana-de-açúcar (cana própria ou cana de fornecedor), o

modelo de *blockchain* que mais se adequa à cadeia produtiva é o de governança centralizada (rede privada ou semiprivada), com distribuição em uma quantidade de nós não muito grande. Nesse tipo de modelo, o objetivo principal não é a geração de criptomoedas, mas sim a criação de uma trilha de auditoria com informações seguras da cadeia produtiva (Silva et al., 2019; Yano et al., 2019). Os processos de auditoria geralmente são realizados por amostragem, o que implica que elementos que não fazem parte da amostra podem escapar da auditoria. A tecnologia *blockchain* pode auxiliar na auditabilidade de dados, uma vez que qualquer alteração ao longo da cadeia afeta toda a trilha.

Em resumo, as seguintes situações (ou um arranjo misto entre elas) podem ocorrer:

- a) *Blockchain* pública: sistema distribuído geralmente em grande quantidade de nós, no qual os servidores situados em cada nó montam e verificam as assinaturas digitais (*hashes*). Esse modelo tem governança descentralizada e, dependendo da quantidade de nós da rede, pode haver grande custo computacional envolvido e, conseqüentemente, alto custo com energia elétrica suportada por fontes poluentes.
- b) *Blockchain* privada: sistema distribuído, de menor porte, com governança centralizada

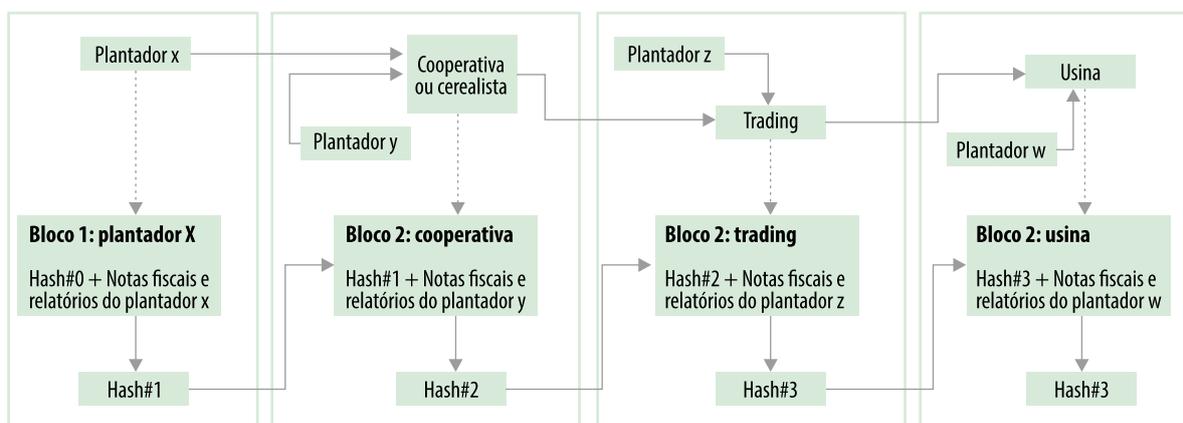


Figura 13.3. Modelo simplificado de cadeia produtiva com informações custodiadas e registradas em *blockchain*.

e com custo computacional igual ou não muito maior que o custo de manutenção de um banco de dados.

A Figura 13.4 ilustra um exemplo de *blockchain* privada que está sendo implementada no projeto-piloto intitulado Sistema de Rastreabilidade Utilizando Tecnologia *Blockchain* para Produtos e Processos Agroindustriais da Cadeia Produtiva Sucroalcooleira². O projeto está sendo conduzido no âmbito do acordo de cooperação técnica firmado entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e o Grupo Granelli, registrado no Sistema de Acompanhamento de Instrumentos Contratuais (Saic)³ sob o número 23800.20/0028-1. Esse projeto-piloto é um desdobramento de uma solução de inovação intitulada Software de Rastreamento e Comparti-

lhamento de Dados Dentro da Cadeia Produtiva a Cana-de-Açúcar via Tecnologia *Blockchain*, que faz parte do projeto Desenvolvimento de Soluções Tecnológicas com Escopo na Recuperação da Produtividade da Cana-de-Açúcar⁴, que está sendo realizado no âmbito do acordo de cooperação técnica (Saic 23800.19/0035-9) firmado entre a Embrapa e a Cooperativa dos Plantadores de Cana do Estado de São Paulo (Coplacana). No âmbito desse projeto, é previsto o desenvolvimento computacional de um software *blockchain* capaz de rastrear, registrar, armazenar, organizar e disponibilizar informações coletadas ao longo da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, desde a implantação no campo até as etapas finais de produção de açúcar e etanol em unidades agroindustriais cooperadas da Coplacana.



Figura 13.4. Processo de rastreabilidade implementado na unidade agroindustrial Usina Granelli Ltda.

² Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/218627/sistema-de-rastreabilidade-utilizando-tecnologia-blockchain-para-produtos-e-processos-agroindustriais-da-cadeia-produtiva-sucroalcooleira>.

³ Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/extrato-de-acordo-de-cooperacao-tecnica-438880241>.

Segundo a Figura 13.4, um banco de dados é alimentado pela Usina Granelli Ltda. de forma a conter informações de lotes de fabricação, como originação e insumos agrícolas utilizados no

⁴ Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/extrato-de-contrato-392587440>.

processo agroindustrial. As informações agrícolas originadas nos fornecedores de matéria-prima cooperados da Coplacana são disponibilizadas em páginas web e acessadas via códigos de barras bidimensionais (QR Codes). Por meio de ferramentas criptográficas, as informações dos lotes de fabricação são gravadas em uma cadeia de blocos (*blockchain*), de modo que cada lote recebe uma assinatura digital para criar uma trilha segura de auditabilidade dos dados.

No desenho de uma *blockchain* privada, a governança é centralizada na rede da usina, e os servidores estão localizados em unidades industriais da própria usina. Eventualmente (não necessariamente), pontos da rede podem também estar situados ao longo da cadeia de produtiva. Esse é um modelo de baixo que pode até mesmo ser suportado por cogeração de energia elétrica nas usinas por meio de biomassa.

As unidades industriais podem funcionar como *hubs*, e seus fornecedores diretos ou indiretos disponibilizam dados primários que observam a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) (Brasil, 2018). Então, a inserção de dados na *blockchain* é realizada pela usina via plataforma web. Nesse modelo de rede privada, a usina pode ser responsável por inserir tanto os dados primários quanto os dados industriais na *blockchain*, e a montagem e as verificações de *hashes* ou assinaturas digitais ocorrem em servidores localizados na própria usina. Essa é uma rede privada minimamente distribuída ao longo da cadeia de suprimentos de uma usina, que não gera custos significativos com energia elétrica.

Blockchain para rastreabilidade de crédito de descarbonização

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) foi instituída pela Lei nº 13.576/2017 (Brasil, 2017). Seu principal direcionamento é o

estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, de forma a incentivar o aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes do País (Brasil, 2017, 2021). No âmbito do programa RenovaBio, o crédito de descarbonização (CBio) é a métrica de sustentabilidade utilizada. A emissão de 1 CBio equivale à captura de 1 t de CO₂ da atmosfera. A quantidade de CBios emitida por uma planta industrial produtora de biocombustível é diretamente proporcional às informações de sustentabilidade da cadeia produtiva. Isso significa que uma cadeia produtiva mais sustentável emitirá mais CBios por volume de biocombustível produzido; já a cadeia produtiva menos sustentável emitirá menos CBios por volume de biocombustível produzido (Bossle, 2020).

Como exemplo, consideremos a Usina A, que emite, em média, 1 CBio para cada 1.000 L de biocombustível (valor hipotético). Por sua vez, a Usina B é mais eficiente e emite, em média, 2 CBios para cada 1.000 L de biocombustível produzido, pois sua matéria-prima processada tem origem em cadeia produtiva mais sustentável.

Então, a usina que comprova a origem sustentável da matéria-prima emite mais CBios e obtém uma receita melhor com a venda do ativo. A parte obrigada (produtoras e distribuidoras de combustíveis fósseis) deve adquirir CBios até alcançar a meta estabelecida, que, para o ano de 2020, está em torno de 14 milhões de CBios emitidos pelas usinas de biocombustíveis (dos quais 10 milhões já foram negociados até o momento). Ocorre que não somente a cadeia da cana, mas outras cadeias produtivas como a de grãos podem ser bastante complexas. As esmagadoras geralmente possuem fornecedores indiretos e, muitas vezes, com contatos de curto prazo. Assim, é difícil saber, com precisão, a origem do produto quando chega ao portão da usina. Essa falta de informação prejudica

até mesmo a elegibilidade do setor de grãos no programa RenovaBio. Para garantir a segurança da origem da matéria-prima, é preciso rastrear as transações ao longo da cadeia produtiva. De acordo com a Lei nº 13.576 (Brasil, 2017), as informações necessárias para a comprovação da sustentabilidade da cadeia de suprimentos incluem dados industriais e dados primários (agrícolas), que compreendem, por exemplo, notas fiscais da produção total de cana, teor de impurezas vegetais e minerais, consumo de corretivos, palha recolhida total, consumo de fertilizantes sintéticos, consumo de fertilizantes orgânicos, consumo de combustíveis, consumo de eletricidade, entre outros. Nesse ponto, a tecnologia *blockchain* pode funcionar como uma ferramenta eficaz de rastreabilidade, ajudando a promover a elegibilidade da usina de biocombustível no programa, além de proporcionar aumento da emissão de CBios.

A técnica de *blockchain* tem sido usada em sistemas de rastreabilidade para garantir o registro permanente das transações, o que facilita a auditoria de dados. Um algoritmo de consenso pode restringir o que pode ou não ser incluído. O controle de inclusão de informações pode ser centralizado, descentralizado ou misto, facilitando o trabalho da usina, que passa a funcionar como um *hub* da rede. Assim, rastrear de forma segura por meio da tecnologia *blockchain* facilitaria o trabalho das empresas certificadoras. Ao ganhar elegibilidade, a usina pode também buscar o aumento de receita com o acréscimo de sua métrica de CBios emitidos por volume de biocombustível produzido.

Considerações finais

A tecnologia *blockchain*, devido a sua natureza segura quanto à informação, garante a imutabilidade dos registros de todas as transações ao longo de uma cadeia de suprimentos. Além disso, por ser operacionalmente distribuída,

facilita a inclusão de diversos participantes no processo produtivo. Essa tecnologia apresenta grande potencial no apoio a sistemas de gestão de riscos, possuindo ainda a vantagem de facilitar a auditoria de dados primários ao integrar unidades agroindustriais a seus fornecedores de matéria-prima. Pela maior transparência das informações que proporciona, a tecnologia *blockchain* favorece o ciclo de entrega e auxilia no processo de rastreabilidade de qualquer cadeia de suprimentos.

Referências

- ABEYRATNE, S. A.; MONFARED, R. P. Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger. *IJRET: international journal of research in engineering and technology*, v. 5, n. 9, p. 1-10, Sept. 2016. DOI: [10.15623/ijret.2016.0509001](https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0509001).
- ANGRISH, A.; CRAVER, B.; HASAN, M.; STARLY, B. A case study for Blockchain in manufacturing: "FabRec": a prototype for peer-to-peer network of manufacturing nodes. *Procedia Manufacturing*, v. 26, p. 1180-1192, 2018. DOI: [10.1016/j.promfg.2018.07.154](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.154).
- ASTE, T.; TASCA, P.; DI MATTEO, T. Blockchain technologies: foreseeable Impact on Industry Society. *IEEE Computer*, v. 50, n. 9, p. 18-28, Sept. 2017. DOI: [10.1109/MC.2017.3571064](https://doi.org/10.1109/MC.2017.3571064).
- AWWAD, M.; KALLURU, S. R.; AIRPULLI, V. K.; ZAMBRE, M. S.; MARATHE, A.; JAIN, P. Blockchain technology for efficient management of supply chain. In: NORTH AMERICAN INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 3., 2018, Washington, DC. *Proceedings...* Washington, DC: IEOM, 2018. p. 440-449.
- BALIGA, A. **Understanding blockchain consensus models**. Pune: Persistent, 2020. Disponível em: <https://www.persistent.com/wp-content/uploads/2017/04/WP-Understanding-Blockchain-Consensus-Models.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- BAMBARA, J. J.; ALLEN, P. R. **Blockchain: a practical guide to developing business, law, and technology solutions**. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- BOSSLE, R. Preço do CBio volta a cair e título é negociado, em média, por R\$ 43,73 em novembro. *NovaCana*, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/industria/financeiro/preco-cbio-volta-cair-titulo-negociado-media-r-43-73-novembro-011220>. Acesso em: 24 jan. 2021.

- BRASIL. Congresso. Câmara dos deputados. Centro de Documentação e Informação. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 4, 27 dez. 2017.
- BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Dispõe sobre a proteção de dados pessoais e altera a Lei nº 12.965, de 23 de abril de 2014 (Marco Civil da Internet). **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 59, 15 ago. 2018.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RenovaBio**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- CASINO, F.; DASAKLIS, T. K.; PATSAKIS, C. A systematic literature review of *blockchain*-based applications: current status, classification and open issues. **Telematics and Informatics**, v. 36, p. 55-81, Mar. 2019. DOI: [10.1016/j.tele.2018.11.006](https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006).
- CASTRO, A de. Quantum one-way permutation over the finite field of two elements. **Quantum Information Processing**, v. 16, n. 6, p. 1-18, June 2017. DOI: [10.1007/s11128-017-1599-6](https://doi.org/10.1007/s11128-017-1599-6).
- CHANG, S. E.; CHEN, Y. When blockchain meets supply chain: a systematic literature review on current development and potential applications. **IEEE Access**, v. 8, p. 62478-62494, 2020, DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2983601](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983601).
- CORRÊA, H. L. **Administração de cadeias de suprimentos e logística**: integração na era da Indústria 4.0. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- ETHEREUM FOUNDATION. **Intro to Ethereum**. 2021. Disponível em: <https://ethereum.org/en/developers/docs/intro-to-ethereum/#what-is-a-blockchain>. Acesso em: 30 maio 2021.
- FERNÁNDEZ, D. H. **Aplicación de la tecnología blockchain en el supply chain en los sectores industriales**. 2018. 85 p. Dissertação (Mestrado em Logística) – Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales, Valladolid.
- GUNASEKARAN, A.; PATEL C.; TIRTIROGLU, E. Performance measures and metrics in a supply chain environment. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 21, n. 1/2, p. 71-87, 2001. DOI: [10.1108/01443570110358468](https://doi.org/10.1108/01443570110358468).
- HABER, S.; STORNETTA, W. S. How to time-stamp a digital document. In: MENEZES, A. J.; VANSTONE, S. A. (ed.). **Advances in cryptology – CRYPTO '90**: proceedings. Berlin: Springer-Verlag, 1991. p. 437-455. (Lecture notes in computer science, 537).
- JAIN, V.; WADHWA, S.; DESHMUKH, S. G. Select supplier-related issues in modeling a dynamic supply chain: potential, challenges and direction for future research. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 11, p. 3013-3039, 2009. DOI: [10.1080/00207540701769958](https://doi.org/10.1080/00207540701769958).
- KIM, H. M.; LASKOWSKI, M. Toward an ontology-driven blockchain design for supply-chain provenance. **Intelligent Systems in Accounting Finance and Management**, v. 25, n. 1, p. 18-27, Jan./Mar. 2018. DOI: [10.1002/isaf.1424](https://doi.org/10.1002/isaf.1424).
- KSHETRI, N. Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. **International Journal of Information Management**, v. 39, p. 80-89, Apr. 2018. DOI: [10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005).
- LEDGER. In: HYPERLEDGER. **A blockchain platform for the enterprise**. 2020. Disponível em: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/latest/ledger/ledger.html>. Acesso em: 21 fev. 2020.
- MINTO NETO, J. G.; SANTOS, E. H. dos; CASTRO, A. de. **Protocolo para cifra de uso único via função NOT controlada**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2018. 19 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 43). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1090389/1/Boletim43.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2020.
- MOUGAYAR, W. **Blockchain para negócios**: promessa, prática e aplicação da nova tecnologia da internet. Rio de Janeiro: Alta Books, 2018.
- NAKAMOTO, S. **Bitcoin**: a peer-to-peer electronic cash system. [2009]. 9 p. Disponível em: bitcoin.org/bitcoin.pdf. Acesso em: 10 jan. 2021.
- OLIVEIRA, T. A.; MIGUEL, O.; RAMALHINHO, H. Challenges for connecting citizens and smart cities: ICT, e-governance and blockchain. **Sustainability**, v. 12, n. 7, p. 1-21, 2020. DOI: [10.3390/su12072926](https://doi.org/10.3390/su12072926).
- PETRONI, B. C. A.; GONCALVES, R. F.; IGNÁCIO, P. S. de A.; REIS, J. Z.; MARTINS, G. J. D. U. Smart contracts applied to a functional architecture for storage and maintenance of digital chain of custody using blockchain. **Forensic Science International: digital investigation**, v. 34, n. 3, p. 1-15, 2020. DOI: [10.1016/j.fsidi.2020.300985](https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2020.300985).
- RIZAL, S.; ANDRIAN, H. R.; KURNIAWAN, N. B.; SUHARDI. Secure service computing system platform based on blockchain — a systematic literature review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ICT FOR SMART SOCIETY, 2019, Bandung. **Proceedings...** Bandung: School of Electrical Engineering and Informatics ITB, 2019. p. 1-6. DOI: [10.1109/ICISS48059.2019.8969843](https://doi.org/10.1109/ICISS48059.2019.8969843).

- SÁNCHEZ-GÓMEZ, N.; TORRES-VALDERRAMA, J.; GARCÍA-GARCÍA, J. A.; GUTIÉRREZ, J. J.; ESCALONA, M. J. Model-based software design and testing in blockchain smart contracts: a systematic literature review. **IEEE Access**, v. 8, p. 164556-164569, 2020. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3021502](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021502).
- SHILLING, R. Keeping the supply chain safe. **Food Engineering**, v. 90, n. 10, p. 54-59, Oct. 2018.
- SILVA, F. G. C. e; SILVA, F. C. da; CASTRO, A. de; YANO, I. H. Avaliação da técnica de blockchain na rastreabilidade na agroindústria a sucroenergética. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 39., 2019, Santos. **Os desafios da engenharia de produção para uma gestão inovadora da Logística e Operações: anais**. Rio de Janeiro: Abepro, 2019. p. 1-12. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1114038/1/AvaliacaotecnicablockchainEnegep.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- TAN, A.; THI, N. P. A proposed framework model for dairy supply chain traceability. **Sustainable Futures**, v. 2, p. 1-6, 2020. DOI: [10.1016/j.sftr.2020.100034](https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100034).
- TAVARES, P. R. dos S.; IGNÁCIO, P. S. de A. A expansão de modelos blockchain aplicados em diferentes cadeias de suprimentos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 40., 2020, Foz do Iguaçu. **Contribuições da engenharia de produção para a gestão de operações energéticas sustentáveis: anais**. Rio de Janeiro: Abepro, 2020.
- TONELLI, R.; LUNESU, M. I.; PINNA, A.; TAIBI, D.; MARCHESI, M. Implementing a microservices system with blockchain smart contracts. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON BLOCKCHAIN ORIENTED SOFTWARE ENGINEERING, 2., 2019, Hangzhou. [Proceedings...]. Piscataway: IEEE, 2019. p. 22-31. DOI: [10.1109/IWBOSE.2019.8666520](https://doi.org/10.1109/IWBOSE.2019.8666520).
- VISWANATHAN, R.; DASGUPTA, D.; GOVINDASWAMY, S. R. Blockchain solution reference architecture (BSRA). **IBM Journal of Research and Development**, v. 63, n. 2/3, p. 1-12, Mar./May 2019. DOI: [10.1147/JRD.2019.2913629](https://doi.org/10.1147/JRD.2019.2913629).
- WATANABE, H.; FUJIMURA, S.; NAKADAIRA, A.; MIYAZAKI, Y.; AKUTSU, A.; KISHIGAMI, J. J. Blockchain contract: a complete consensus using blockchain. In: IEEE GLOBAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS, 4., 2015, Osaka. [Abstract book]. Piscataway: IEEE, 2015. p. 577-578. DOI: [10.1109/GCCE.2015.7398721](https://doi.org/10.1109/GCCE.2015.7398721).
- YANO, I. H.; CASTRO, A. de; CANÇADO, G. M. de A.; SILVA, F. C. da. **Proposta de utilização de uma blockchain para o registro de teores de dextrana na produção de açúcar**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2019. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado técnico, 132). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1116191/1/Comunicado132.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- YANO, I. H.; SANTOS, E. H. dos; CASTRO, A. de; BERGIER, I.; SANTOS, P. M.; OLIVEIRA, S. R. de M.; ABREU, U. G. P. de. **Modelo de rastreamento bovino via Smart Contracts com tecnologia Blockchain**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2018. 21 p. (Embrapa informática Agropecuária. Comunicado técnico, 130). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1101384/1/ModelorastreamentoCT130.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- ZHENG, Z.; XIE, S.; DAI, H. N.; CHEN, X.; WANG, H. Blockchain challenges and opportunities: a survey. **International Journal of Web and Grid Services**, v. 14, n. 4, p. 352-375, Jan. 2018. DOI: [10.1504/IJWGS.2018.095647](https://doi.org/10.1504/IJWGS.2018.095647).

Inovação e desenvolvimento tecnológico na fertilização de lavouras

Jayme Garcia Arnal Barbedo

Introdução

O diagnóstico confiável do estado nutricional de lavouras é parte essencial da gestão de uma fazenda, uma vez que tanto o excesso quanto a falta de nutrientes podem causar danos severos e perda de produção. Atualmente, a maneira mais comum de determinar o estado nutricional é de forma visual, por meio de gabaritos de cor que não permitem avaliações quantitativamente rigorosas (Graeff et al., 2008). Avaliações mais acuradas requerem análises laboratoriais, as quais podem ser demoradas e dependem da aplicação de métodos específicos para interpretação correta dos dados (Cunha et al., 2016; Dezordi et al., 2016). Algumas alternativas indiretas estão disponíveis para alguns nutrientes, como o medidor de clorofila SPAD para predições de nitrogênio (Balasubramaniam; Ananthi, 2016), mas esse pode ser também um processo demorado (Jia et al., 2004), e as estimativas nem sempre são confiáveis (Uddling et al., 2007; Mercado-Luna et al., 2010; Nauš et al., 2010). Por esse motivo, considerável esforço tem sido dedicado ao desenvolvimento de novos métodos para detecção e estimação de problemas nutricionais em plantas (Muñoz-Huerta et al., 2013; Ali et al., 2017).

A detecção e a classificação automática de distúrbios em plantas tem recebido atenção considerável nas duas últimas décadas (Barbedo, 2013). Muitos tipos de tecnologias têm sido usados para coletar informações necessárias para automação, incluindo espectroscopia de impedância elétrica (Jinyang et al., 2016), espec-

troscopia de refletância (Elvanidi et al., 2018), microespectroscopia de infravermelho (Butler et al., 2017) e espectroscopia de fluorescência de clorofila (Schmidt et al., 2013). Imagens digitais, as quais sempre estiveram entre as principais fontes de dados, vêm se tornando a abordagem dominante à medida que técnicas de aprendizado profundo se tornam mais disseminadas (Barbedo 2018a, 2018b; Singh et al., 2018).

Grande parte das técnicas para detecção de problemas nutricionais em plantas empregam imagens capturadas por satélites (Sims et al., 2013; Huang et al., 2015), aviões (Cilia et al., 2014; Quemada et al., 2014) ou veículos aéreos não tripulados (Vants) (Li et al., 2015; Severtson et al., 2016). Porém, em anos recentes novas técnicas que fazem uso de imagens proximais vêm sendo desenvolvidas e, com o rápido desenvolvimento de veículos robóticos (Hiremath et al., 2014; Bonadies et al., 2016; Shafiekhani et al., 2017), tais técnicas podem ter um papel importante no contexto da agricultura de precisão.

Diferentes tipos de imagens têm sido aplicadas ao monitoramento do estado nutricional, incluindo fluorescência da clorofila, termais, multiespectrais e hiperspectrais. A fluorescência da clorofila é particularmente útil na análise do nitrogênio, uma vez que a concentração de clorofila tem uma relação próxima com esse nutriente (Gorbe; Calatayud, 2012). Imagens termais são úteis para a análise da atividade estomática e de vários parâmetros fisiológicos que podem ter relação com o estado nutricional da planta (Costa et al., 2013). Imagens multiespectrais

fornecem a refletância associada a algumas bandas espectrais relevantes (vermelho, verde, azul, infravermelho próximo), as quais são capazes de fornecer pistas importantes sobre o estado nutricional da planta (Borhan et al., 2017). Imagens hiperespectrais extraem informação com uma alta resolução espectral e fornecem detalhes sobre o perfil espectral da planta, revelando diferenças entre plantas saudáveis e submetidas a algum tipo de estresse (Yu et al., 2014). Apesar de as imagens citadas anteriormente poderem fornecer mais informações do que imagens vermelho-verde-azul convencionais (Bock et al., 2010), estas são usadas mais frequentemente devido ao baixo custo, à portabilidade e à disponibilidade das respectivas câmeras. Considerando que técnicas de aprendizado profundo em geral requerem maiores quantidades de dados para treinamento, essas vantagens se tornam mais proeminentes e frequentemente superam eventuais ganhos obtidos a partir de outras bandas espectrais, além do espectro visível.

Na detecção automática de deficiências nutricionais, o objetivo é identificar sinais visuais que caracterizam o problema de interesse. Nesse contexto, três problemas podem ser atacados (Barbedo, 2013):

- a) Classificação, no qual o objetivo é identificar corretamente a origem de um sintoma.
- b) Detecção, a qual visa indicar a presença da deficiência alvo pela detecção de seus sinais ou sintomas.
- c) Quantificação, a qual visa estimar a severidade da deficiência alvo.

Todos os três problemas já foram extensivamente estudados no caso de doenças, porém, no caso de deficiências nutricionais, apenas alguns poucos estudos se dedicaram ao problema de classificação (Chen et al., 2014; Asraf et al., 2017; Culman et al., 2017; Ghosal et al., 2018). O problema de classificação não tem

despertado muita atenção porque há apenas algumas poucas deficiências nutricionais relevantes do ponto de vista econômico, sendo nitrogênio o mais importante. Assim, normalmente o objetivo de detectar e quantificar uma dessas deficiências relevantes, bem como sintomas e sinais que aparentemente não estão associados a essas desordens são simplesmente ignorados. Há alguns problemas associados com essa abordagem “não sistêmica”, uma vez que sinais de deficiências nutricionais raramente aparecem isoladamente em ambientes não controlados.

A maior parte dos estudos encontrados na literatura usa as imagens para extrair índices de vegetação, os quais são então relacionados ao conteúdo nutricional usando algum modelo de regressão (normalmente linear). Apesar de menos comum, outros tipos de variáveis vêm sendo usadas como entradas para os modelos, tais como a média do espectro de refletância (Capolupo et al., 2015), bandas espectrais selecionadas (Severtson et al., 2016; Liu et al., 2018; Zhu et al., 2018), atributos de cor (Schirrmann et al., 2016; Yakushev; Kanash, 2016) e componentes principais (Wen et al., 2018). Grande parte dessas variáveis é extraída a partir de imagens multiespectrais e hiperespectrais, com exceção dos atributos de cor, os quais são extraídos de imagens RGB. No caso específico do nitrogênio, o estado nutricional frequentemente é estimado indiretamente a partir de outras variáveis, especialmente o conteúdo de clorofila e o índice de área foliar.

A organização de imagens de alta resolução em bancos de dados geoespaciais é um tópico relevante, porém foge ao escopo deste capítulo. Mais informações sobre o assunto podem ser encontradas em diversos artigos na literatura (Bordogna et al., 2016; Karmas et al., 2016; Kamilaris et al., 2018).

Este capítulo tem como objetivo apresentar algumas técnicas para o monitoramento do

estado nutricional das plantas e para a detecção de deficiências passíveis de correção. A ênfase é dada a técnicas baseadas em imagens digitais e aprendizado de máquina, as quais têm mostrado o maior potencial para uso em tecnologias que possam ser usadas efetivamente no campo. Embora a literatura não contenha muitas tecnologias e métodos que tenham sido testados em lavouras de cana-de-açúcar, esses normalmente podem ser adaptados a diferentes tipos de culturas agrícolas. Este capítulo considera tanto técnicas que fazem uso de imagens proximais, as quais normalmente são capturadas usando câmeras convencionais, quanto imagens capturadas remotamente usando veículos aéreos não tripulados (Vants), aeronaves tripuladas e satélites.

A maioria das técnicas apresentadas neste capítulo não foi testada em lavouras de cana-de-açúcar, porém todas elas são, em princípio, extensíveis para outras culturas agrícolas além daquelas para as quais elas foram testadas.

Técnicas baseadas em imagens de satélite

Satélites são capazes de cobrir grandes áreas rapidamente, e muitos deles permitem que imagens sejam obtidas com alta resolução temporal (Huang et al., 2015). A Figura 14.1 apresenta

um exemplo de imagem obtida por satélite. Novas constelações de satélite estão sendo lançadas, e muitas oferecem resoluções espaciais melhores que 1 m e imageamentos diários de suas áreas de cobertura. Essa opção não requer infraestrutura e logística sofisticadas por parte do produtor, porém a obtenção de imagens de boa qualidade pode ser difícil em áreas muito susceptíveis à cobertura de nuvens, que muitas vezes exigem o uso conjunto de dados obtidos com radar de abertura sintética (em inglês *Synthetic Aperture Radar – SAR*) (Huang et al., 2015). Além disso, mesmo as imagens com resoluções espaciais mais elevadas ainda não permitem que plantas sejam tratadas individualmente, fazendo com que problemas nutricionais só possam ser detectados para áreas relativamente grandes.

Conforme pode ser observado na Tabela 14.1, um grande número de satélites tem sido usado em pesquisas relacionadas à nutrição vegetal, e com novos satélites de alta resolução sendo lançados com frequência, essa diversidade tende a aumentar. A maioria dos satélites carrega sensores do tipo multiespectral, em que as bandas do vermelho (R), verde (G), azul (B), infravermelho próximo (NIR) e red edge (RE) são capturadas separadamente. Alguns satélites carregam sensores hiperespectrais, em que um grande número de bandas estreitas é capturado para

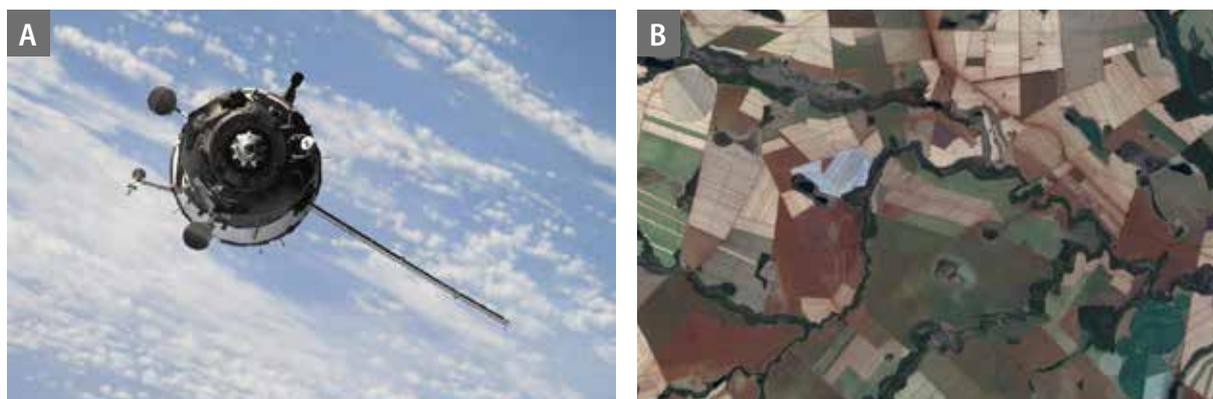


Figura 14.1. Satélite (A) e imagem obtida por satélite (B).

Tabela 14.1. Técnicas para detecção de problemas nutricionais por meio do uso de imagens de satélite.

Trabalho	Satélite	Banda	Nutriente	Cultura agrícola testada	Classificação/Regressão
Amirruddin et al. (2018)	SPOT-6	Multiespectral	Nitrogênio	Palma de óleo	Regressão linear múltipla
Amirruddin e Muharam (2018)	SPOT-6	Multiespectral	Nitrogênio	Palma de óleo	Máquinas de vetores suporte
Bausch e Khosla (2010)	QuickBird	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Regressão linear
Benincasa et al. (2018)	GeoEye-1 e WorldView-2	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear
Caturegli et al. (2015)	GeoEye-1	Multiespectral	Nitrogênio	Grama	Regressão linear
Cohen et al. (2010)	VEN μ S	Multiespectral	Nitrogênio	Batata	Regressão por mínimos quadrados parciais
Huang et al. (2015)	Formosat-2	Multiespectral	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Jia et al. (2012)	Ikonos	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear e não linear
Nutini et al. (2018)	RapidEye	Multiespectral	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Shou et al. (2017)	QuickBird	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear
Sims et al. (2013)	EO-1/Hyperion	Hiperespectral	Nitrogênio, fósforo, boro	Floresta	Regressão linear
Wu et al. (2007)	QuickBird	Multiespectral	Nitrogênio	Batata	Regressão linear e não linear

fornecer um perfil espectral detalhado da área imageada. Os trabalhos que utilizam satélites têm se concentrado quase exclusivamente no nitrogênio, provavelmente por esse nutriente ser o mais relevante economicamente e também pelo fato de seus efeitos poderem ser mais facilmente detectados (variação de clorofila). O trigo é a cultura que mais vem recebendo atenção, porém outras plantações vêm também sendo exploradas. Com poucas exceções, as imagens obtidas por satélite normalmente são usadas para gerar alguns índices de vegetação, como o índice de vegetação de diferença normalizada (em inglês *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), proposto por Rouse Junior et al. (1974), os quais em geral são combinados usando algum tipo de regressão.

Técnicas baseadas em imagens capturadas usando aeronaves tripuladas

Aeronaves tripuladas para obtenção de imagens (Figura 14.2) são, atualmente, a opção menos comum, devido aos altos custos envolvidos, ao risco de acidentes e ao fato de muitas aeronaves não serem apropriadas para a instalação de câmeras (Barbedo; Koenigkan, 2018). Por sua vez, é possível cobrir grandes áreas e, dependendo da altitude de voo, a resolução obtida pode ser muito mais elevada que no caso de satélites (Quemada et al., 2014; Severtson et al., 2016).

Os sensores multiespectrais e hiperespectrais vêm dominando os trabalhos por meio do uso

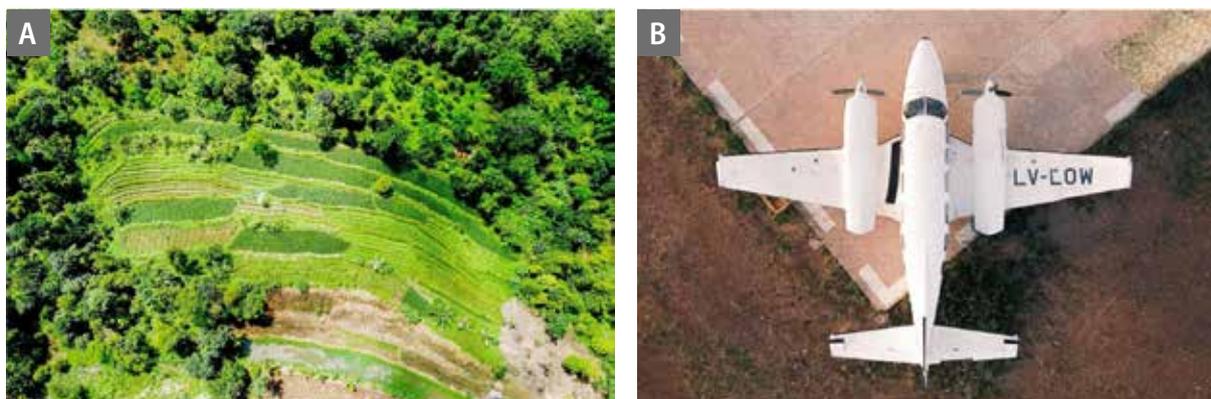


Figura 14.2. Imagem (A) obtida por aeronave tripulada (B) e sensor RGB (vermelho, verde e azul).

de aeronaves, uma vez que esses tipos de sensores tendem a capturar mais minuciosamente as mudanças espectrais causadas por alterações nutricionais (Tabela 14.2). Como no caso de imagens de satélite, o nitrogênio vem sendo o nutriente alvo na grande maioria dos estudos, e o milho é a cultura que vem recebendo a maior atenção. O único trabalho com cana-de-açúcar que se encaixa nessa categoria foi o descrito por Lebourgeois et al. (2012). Como no caso das imagens de satélite, é comum que diferentes índices sejam gerados a partir das imagens capturadas, e que regressão seja utilizada para relacionar tais índices com variáveis indicativas do estado nutricional das plantas. É interessante notar que o número de trabalhos que utilizam aeronaves tripuladas vem diminuindo rapidamente, resultado do crescimento no uso de Vants.

Técnicas baseadas em imagens capturadas usando drones

A maioria dos Vants é composta por aeronaves leves e de baixo custo, sensores e uma estação de controle em solo (Watts et al., 2012; Anderson; Gaston, 2013). Basicamente, há dois tipos de drones que podem ser utilizados em aplicações agrícolas:

- d) Drones rotativos, os quais são bastante portáteis, mas são mais vulneráveis a condições climáticas adversas e têm capacidade de carga e cobertura limitadas (Agüera et al., 2011).
- e) Drones de asa fixa, os quais tendem a ser mais rápidos, estáveis e com mais capacidade de carga, mas são frequentemente menos portáteis e mais caros (Barbedo; Koenigkan, 2018).

Uma das maiores vantagens dos Vants é o fato de possuírem uma ampla variedade de configurações e capacidades (Hogan et al., 2017), de modo que as necessidades associadas a qualquer aplicação provavelmente são atendidas por algum equipamento. Apesar de fatores extrínsecos como custos envolvidos, necessidade de treinamento, regulações estritas e riscos de quedas ainda desencorajarem o uso de Vants em muitos casos (Watts et al., 2012), os preços continuam a cair e muitas barreiras regulatórias estão sendo removidas, de modo que os níveis de adoção devem continuar a crescer (Hogan et al., 2017).

Os Vants possuem diversas vantagens em relação aos satélites, como resolução espacial mais elevada, resolução espectral adaptável (no caso de sensores multi e hiperespectrais) e flexibilidade de coleta das imagens, permitindo que os

Tabela 14.2. Técnicas para detecção de problemas nutricionais por meio do uso de imagens de aeronaves.

Trabalho	Tipo de aeronave	Tipo de imagem	Nutriente	Cultura agrícola testada	Índice de acerto
Blackmer e Schepers (1996)	Avião	RGB ⁽¹⁾	Nitrogênio	Milho	Regressão linear
Cilia et al. (2014)	Avião	Hiperespectral	Nitrogênio	Milho	Diferentes regressões
Flowers et al. (2003)	Avião	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear e quadrática
Gabriel et al. (2017)	Avião	Multiespectral e hiperespectral	Nitrogênio	Milho	Relações polinomiais
Gautam et al. (2006)	Avião	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Redes neurais
Gérard et al. (1997)	Balões e pipas	RGB e NIR ⁽²⁾	Nitrogênio	Milheto	Regressão linear
Goel et al. (2003)	Avião	Hiperespectral	Nitrogênio	Milho	Bandas espectrais
Lebourgeois et al. (2012)	Ultraleve	RGB e NIR	Nitrogênio	Cana-de-açúcar	Regressão linear
Maresma et al. (2018)	Avião	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Análise Anova ⁽³⁾
Meggio et al. (2010)	Avião	Hiperespectral	Ferro	Videira	Regressão linear
Nigon et al. (2015)	Avião	Hiperespectral	Nitrogênio	Batata	Regressão por mínimos quadrados parciais
Quemada et al. (2014)	Avião	Hiperespectral	Nitrogênio	Milho	Regressão linear
Reisig e Godfrey (2010)	Avião	Multiespectral e Hiperespectral	Nitrogênio	Algodão	Análise Anova
Scharf e Lory (2002)	Avião	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Regressão linear e não linear
Sripada et al. (2007)	Avião	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear e quadrática
Williams et al. (2010)	Avião	RGB	Nitrogênio	Milho	Regressão quadrática

⁽¹⁾ RGB = vermelho, verde, azul. ⁽²⁾ NIR = near infrared. ⁽³⁾ Anova = análise de variância.

dados sejam obtidos nos momentos mais apropriados (Severtson et al., 2016). Em comparação com aeronaves tripuladas, os Vants são uma opção mais barata, segura e flexível (Barbedo; Koenigkan, 2018).

A Tabela 14.3 revela que Vants rotativos (quadri, hexa e octocópteros, ver exemplo na Figura 14.3) são os mais utilizados, provavelmente devido ao baixo custo associado. Na maior parte dos casos, são utilizados sensores multiespec-

trais e RGB convencionais. Isso ocorre devido a esses tipos de sensores tenderem a ser mais leves e baratos que sensores hiperespectrais. O custo dos sensores é particularmente importante, porque, considerando que o risco de quedas está sempre presente, os prejuízos causados por eventuais danos têm de ser limitados tanto quanto possível. Novamente, estudos estão quase exclusivamente concentrados no nitrogênio. Uma grande variedade de culturas agrícolas vem sendo considerada, com destaque para o

Tabela 14.3. Técnicas para detecção de problemas nutricionais por meio do uso de imagens de drones.

Trabalho	Tipo de drone	Tipo de imagem	Nutriente	Cultura agrícola testada	Classificação/Regressão
Agüera et al. (2011)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Girassol	Regressão linear
Ballester et al. (2017)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Algodão	Regressão linear e quadrática
Benincasa et al. (2018)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear
Berni et al. (2009)	Rotativo	Multiespectral e termal	Nitrogênio	Pessegueiro	Regressão linear
Caturegli et al. (2016)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Gramma	Regressão linear
Corti et al. (2019)	Rotativo	RGB ⁽¹⁾ + filtro NIR ⁽²⁾	Nitrogênio	Milho	Regressão por mínimos quadrados parciais
Felderhof e Gillieson (2011)	Rotativo	RGB + NIR	Nitrogênio	Macadâmia	Regressão linear
Gabriel et al. (2017)	Rotativo	Multiespectral e hiperespectral	Nitrogênio	Milho	Funções polinomiais
Geipel et al. (2016)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear
Gracia-Romero et al. (2017)	Rotativo	RGB	Fósforo	Milho	Regressão multilinear
Hunt Junior et al. (2005)	Asa fixa	RGB	Nitrogênio	Milho	Regressão de mínimos quadrados
Hunt Junior et al. (2018)	Parapente	Multiespectral	Nitrogênio	Batata	Regressão linear
Latif et al. (2018)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio, fósforo, zinco	Trigo	Regressão linear
Lelong et al. (2008)	Parapente e asa fixa	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Funções exponenciais
Li et al. (2015)	Rotativo	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Liu et al. (2018)	Não informado	Multiespectral	Nitrogênio	Colza	Regressão linear
Maimaitijiang et al. (2017)	Rotativo	Multiespectral, termal, RGB	Nitrogênio	Soja	Aprendizado extremo
Maresma et al. (2016)	Asa fixa	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Regressão linear e quadrática
Saberioon e Gholizadeh (2016)	Asa fixa	Multiespectral	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Sankaran et al. (2018)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Feijão	Regressão linear
Severtson et al. (2016)	Rotativo	Multiespectral e hiperespectral	Potássio	Canola	Diferentes regressões
Swain et al. (2007)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Vega et al. (2015)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Girassol	Regressão linear
Wen et al. (2018)	Rotativo	Hiperespectral	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Yakushev e Kanash (2016)	Não informado	RGB	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear
Zaman-Allah et al. (2015)	Asa fixa	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Regressão linear
Zermas et al. (2015)	Rotativo	RGB	Nitrogênio	Milho	Máquinas de vetores suporte
Zheng et al. (2018a)	Rotativo	RGB, NIR, Multiespectral	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Zheng et al. (2018b)	Rotativo	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Vários
Zhu et al. (2018)	Rotativo	Hiperespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão multilinear

⁽¹⁾ RGB = vermelho, verde, azul. ⁽²⁾ NIR = near infrared.

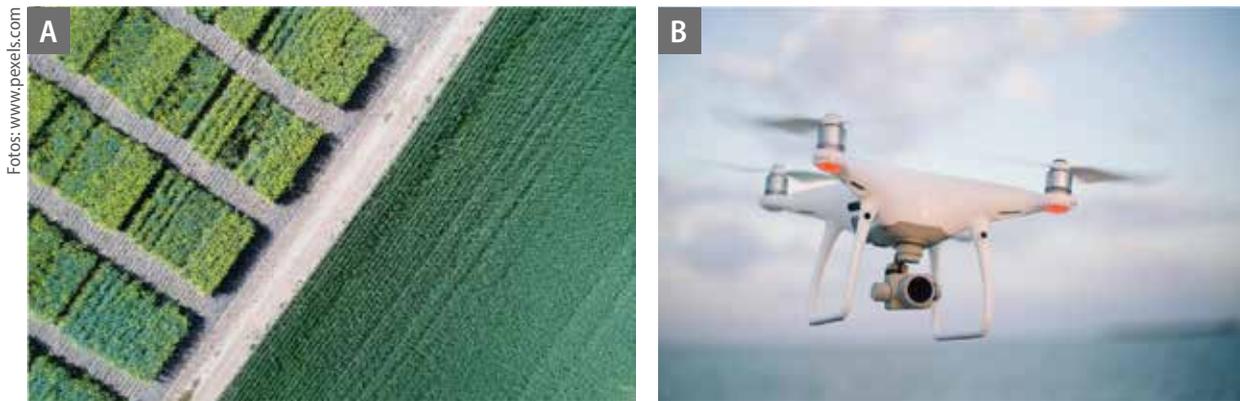


Figura 14.3. Imagem obtida por quadricóptero (A) e sensor RGB (B).

milho, o trigo e o arroz. Como no caso dos satélites e das aeronaves tripuladas, a regressão vem sendo a técnica preferida para relacionar os índices e atributos extraídos das imagens com as medidas que caracterizam o estado nutricional das plantas. Pode-se observar que o número de estudos utilizando drones vem aumentando consideravelmente, resultado da popularização deste tipo de aeronave.

Técnicas baseadas em imagens proximais

Imagens proximais podem ser obtidas em campo ou em laboratório, e o sensor normalmente é posicionado a uma curta distância do alvo (alguns centímetros a alguns metros) (Figura 14.4). Na maioria dos casos, as imagens são captura-

das manualmente, porém o uso de sensores fixos para monitoramento permanente de certas áreas vem se tornando mais comum. Além disso, com os avanços na área de robótica, a captura de imagens usando veículos autônomos, a qual já vem sendo feita há algum tempo no âmbito de pesquisas (Shafiekhani et al., 2017), em breve se tornará uma realidade também na prática.

Na comparação com imagens obtidas por satélite, imagens proximais permitem resoluções espaciais muito mais elevadas, tornando possível que plantas e até mesmo suas diferentes estruturas (folhas, flores, caule, etc.) sejam analisadas e tratadas individualmente, permitindo que problemas nutricionais sejam detectados com mais antecedência. Na comparação com drones, as vantagens residem no fato de que



Figura 14.4. Imagens obtidas por sensores proximais.

não há a necessidade de treinamentos longos, não há restrições regulatórias e intempéries têm um impacto menor. Além disso, se a captura é realizada manualmente, os sensores podem ser posicionados de maneira a gerar o máximo de informação possível a respeito das plantas que estão sendo analisadas.

O número de técnicas baseadas em imagens proximais é consideravelmente maior que aquelas baseadas em imagens obtidas remotamente (Tabela 14.4). Este fato é devido principalmente aos custos envolvidos na condução de experimentos (no caso de drones e aeronaves) e na aquisição das imagens (no caso de satélites).

Tabela 14.4. Técnicas para detecção de problemas nutricionais por meio do uso de imagens proximais.

Trabalho	Tipo de imagem	Nutriente	Cultura agrícola testada	Classificação/Regressão
Amirruddin et al. (2018)	Multiespectral	Nitrogênio	Palma de óleo	Regressão linear múltipla
Backhaus et al. (2011)	Hiperespectral	Genérico	Tabaco	SVM ⁽¹⁾ , SRNG ⁽²⁾ , GRLVQ ⁽³⁾ , RBF ⁽⁴⁾
Bai et al. (2018)	RGB ⁽⁵⁾	Ferro	Soja	DA Linear + SVM
Balasubramaniam e Ananthi (2016)	RGB	Manganês, fósforo, molibdênio, zinco, boro, potássio	Várias	Fuzzy C-Means
Borhan et al. (2004)	RGB e multiespectral	Nitrogênio	Batata	Regressão linear múltipla
Borhan et al. (2017)	Multiespectral	Nitrogênio	Batata	Regressão linear múltipla
Caturegli et al. (2015)	Multiespectral	Nitrogênio	Gramma	Regressão linear
Chen et al. (2013)	RGB	Fósforo	Arroz	SVM
Chen e Wang (2014)	RGB	Nitrogênio	Arroz	SVM
Chen et al. (2014)	RGB	Nitrogênio, fósforo, potássio	Arroz	SVFS ⁽⁶⁾ , Fisher DA ⁽⁷⁾
Chen et al. (2017)	RGB	Nitrogênio	Arroz	SVM
Chen et al. (2018)	RGB	Nitrogênio	Sândalo	Função exponencial
Condori et al. (2017)	RGB	Nitrogênio	Milho	CNN ⁽⁸⁾
Contreras-Medina et al. (2012)	RGB	Genérico	Abóbora	Contagem de pixels
Corp et al. (2003)	Fluorescência da clorofila	Nitrogênio	Milho	Regressão quadrática
Corti et al. (2017)	Hiperespectral	Nitrogênio	Espinafre	Regressão PLS ⁽⁹⁾
Culman et al. (2017)	RGB	Potássio, magnésio, nitrogênio	Palma de óleo	MLPNN ⁽¹⁰⁾
Ghosal et al. (2018)	RGB	Ferro, potássio	Soja	CNN
Giacomelli et al. (1998)	Monocromática	Genérico	Alface	(*)
Gracia-Romero et al. (2017)	RGB	Fósforo	Milho	Regressão multilinear

Continua...

Tabela 14.4. Continuação.

Trabalho	Tipo de imagem	Nutriente	Cultura agrícola testada	Classificação/ Regressão
Graeff et al. (2008)	Multiespectral	Nitrogênio	Brócolis	Regressão linear
Hu et al. (2012)	RGB	Manganês	Várias	Fuzzy C-Means
Ji-Yong et al. (2012)	Hiperespectral	Nitrogênio	Pepino	Regressão linear múltipla
Jia et al. (2004)	RGB	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear
Jia et al. (2007)	RGB	Nitrogênio	Trigo	Regressão linear
Lee e Lee (2013)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Leemans et al. (2017)	Multiespectral	Nitrogênio	Trigo	Regressão PLS
Li et al. (2010)	RGB	Nitrogênio	Trigo	Regressão logarítmica
Li et al. (2016)	RGB	Nitrogênio	Canola	DA Linear, ELM ⁽¹¹⁾ , SVM, RF ⁽¹²⁾ , kNN ⁽¹³⁾
Liu et al. (2015)	Hiperespectral	Nitrogênio, fósforo	Citros	Regressão PLS, SVM
Liu et al. (2018)	Hiperespectral	Nitrogênio	Colza	Regressão linear
Luz et al. (2018)	RGB	Boro	Milho	kNN
Mao et al. (2015)	RGB	Nitrogênio	Alface	ELM
Mercado-Luna et al. (2010)	RGB	Nitrogênio	Tomate	Regressão linear
Moshou et al. (2006)	Hiperespectral	Nitrogênio	Trigo	SOM ⁽¹⁴⁾ , DA Quadrático
Asraf et al. (2012)	RGB	Nitrogênio, potássio, magnésio	Palma de óleo	SVM
Asraf et al. (2017)	RGB	Nitrogênio, potássio, magnésio	Palma de óleo	Inferência Fuzzy
Noh et al. (2003)	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Regressão linear
Noh et al. (2005)	Multiespectral	Nitrogênio	Milho	Regressão de potência
Pagola et al. (2009)	RGB	Nitrogênio	Cevada	Regressão linear
Rangel et al. (2016)	RGB	Potássio	Videira	kNN
Romualdo et al. (2018)	RGB	Nitrogênio	Milho	Classificadores estatísticos
Rorie et al. (2011)	RGB	Nitrogênio	Milho	Regressão linear
Saberioon et al. (2013)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Sanyal et al. (2007)	RGB	Boro, manganês, ferro, nitrogênio, potássio, magnésio	Arroz	MLPNN
Schuerger et al. (2003)	Hiperespectral	Zinco	Gramma Bahia	Regressão linear e quadrática
Silva et al. (2014)	RGB	Magnésio	Milho	Naive Bayes

Continua...

Tabela 14.4. Continuação.

Trabalho	Tipo de imagem	Nutriente	Cultura agrícola testada	Classificação/ Regressão
Singh et al. (1996)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear múltipla
Story et al. (2010)	RGB	Cálcio	Alface	Regressão linear segmentada
Sulistyo et al. (2017)	RGB	Nitrogênio	Trigo	ELM
Sulistyo et al. (2018)	RGB	Nitrogênio	Trigo	Regressão MLP
Summy et al. (2003)	Multiespectral	Nitrogênio	Pepino	Agrupamento estatístico
Sun et al. (2018a)	RGB	Nitrogênio, fósforo, potássio	Arroz	Valor de impacto médio e MLPNN
Sun et al. (2018b)	RGB	Nitrogênio, fósforo, potássio	Arroz	DA por passos
Sun et al. (2018c)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Análise Anova ⁽¹⁵⁾
Tewari et al. (2013)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão quadrática
Vakilian e Massah (2012)	RGB	Nitrogênio	Pepino	Regressão linear segmentada
Vakilian e Massah (2017)	RGB	Nitrogênio		
Vigneau et al. (2011)	Hiperespectral	Pepino	Limiares	Regressão PLS
Wang et al. (2013)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão exponencial
Wang et al. (2014)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Wei et al. (2010)	Multiespectral	Nitrogênio	Pepino	Regressão linear
Wiwart et al. (2009)	RGB	Nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio	Ervilha, tremoço	^(*)
Xu et al. (2011)	RGB	Nitrogênio, potássio	Tomate	Algoritmo genético
Yao e Luo (2012)	RGB	Nitrogênio	Seringueira	Regressão linear
Yu et al. (2014)	Hiperespectral	Nitrogênio	Pimenteira	Regressão PLS
Yuan et al. (2016)	RGB	Nitrogênio	Arroz	Regressão linear
Yuzhu et al. (2011)	RGB	Nitrogênio	Pimenteira	Regressão linear

⁽¹⁾ SVM = máquinas de suporte vetorial. ⁽²⁾ SRNG = gás neural de relevância. ⁽³⁾ GRLVQ = quantização vetorial para aprendizado de relevância generalizada. ⁽⁴⁾ RBF = função de base radial. ⁽⁵⁾ RGB = vermelho, verde, azul. ⁽⁶⁾ SVFS = seleção de atributos de vetores suporte. ⁽⁷⁾ DA = análise de discriminante. ⁽⁸⁾ CNN = redes neurais convolucionais. ⁽⁹⁾ PLS = mínimos quadrados parciais. ⁽¹⁰⁾ MLPNN = rede neural perceptron multicamadas. ⁽¹¹⁾ ELM = máquina de aprendizado extremo. ⁽¹²⁾ RF = random forests. ⁽¹³⁾ kNN = k-vizinhos mais próximos. ⁽¹⁴⁾ SOM = mapas auto-organizáveis. ⁽¹⁵⁾ Anova = análise de variância.

^(*) Nota: Estes estudos compararam apenas os comportamentos de plantas saudáveis e com deficiências nutricionais, de modo que nenhum método de detecção foi proposto.

Câmeras RGB são mais baratas e possuem melhor portabilidade, por esse motivo são as preferidas. Contudo, outros tipos de sensores vêm se tornando mais comuns, especialmente os hiperespectrais. Diferentemente dos casos anteriores, outras técnicas de aprendizado de máquina além da regressão vêm sendo utilizadas com frequência no caso de imagens proximais, incluindo máquinas de suporte vetorial (em inglês *Support Vector Machine* – SVM) e redes neurais.

Problemas gerais com imagens

Como detalhado nas seções anteriores, o uso de imagens para a detecção de problemas nutricionais em plantas vem proporcionando avanços importantes com aplicação imediata em propriedades rurais. Para que todo esse potencial seja efetivamente realizado, alguns cuidados importantes devem ser observados. No caso de imagens proximais, vários desses cuidados foram explorados em detalhes em Barbedo (2016, 2018a). Os mais importantes são resumidos a seguir.

Fundo da imagem

Todos os métodos para detecção de problemas nutricionais precisam identificar, explícita ou implicitamente, os sinais característicos do estresse de interesse. Em muitos casos, elementos espúrios presentes no fundo da imagem (outras plantas, solo, outras estruturas) podem levar a erros de classificação, especialmente se as técnicas não foram treinadas para lidar com esse tipo de situação. Há três possíveis maneiras de evitar esse tipo de problema:

- a) Capturar as imagens de modo a evitar a presença de elementos problemáticos no fundo da imagem, o que exige prática e pode nem sempre ser possível.
- b) Remover o fundo da imagem, processo esse que pode ser proibitivamente demorado se

feito manualmente, e sujeito a muitos erros se feito automaticamente.

- c) Treinar o modelo para lidar com os objetos espúrios presentes na imagem. Esta última opção é, em geral, a mais confiável, porém, dependendo das condições práticas, isso pode exigir uma quantidade impraticável de dados.

Em última análise, a melhor solução dependerá das características de cada caso e do grau de dificuldade de se obter os dados/imagens necessários.

Condições de captura das imagens

Muitas das técnicas para reconhecimento de deficiências nutricionais e doenças em planta são desenvolvidas tendo como referência imagens capturadas em condições controladas, nas quais a iluminação é uniforme e a influência de fatores externos é limitada. O problema com essa estratégia é que, na prática, variações de iluminação são inevitáveis devido a condições atmosféricas e à posição do sol no momento da captura. Além disso, o ambiente em campo é inóspito, com diversos fatores como poeira, vento e outros fenômenos atmosféricos podendo ter grande impacto nas imagens. Portanto, para que qualquer técnica tenha potencial de uso prático, é essencial que todas as condições esperadas no dia a dia estejam contempladas nos seus conjuntos de treinamento. Novamente, na maioria das vezes é bastante difícil gerar dados em quantidade e variedade ideais, porém essa é uma condição essencial para a adoção prática dessa tipo de ferramenta.

Presença de múltiplos estresses simultaneamente

A geração de dados para o desenvolvimento de técnicas para detecção de problemas

nutricionais frequentemente envolve a indução da deficiência/toxicidade de interesse, e então imagens dos sinais resultantes são capturadas. Na prática, é muito comum que múltiplos estresses ocorram simultaneamente (Quemada et al., 2014), o que significa que as características visuais e espectrais da planta naquele instante são uma combinação dos diferentes problemas que estão afetando a planta.

Considerando que há uma grande quantidade de possíveis combinações de estresses bióticos e abióticos, a variedade de sintomas pode ser proibitivamente elevada. Idealmente, todas essas combinações deveriam estar contempladas nos conjuntos de treinamento utilizados, porém isso é inexequível na prática. Para evitar possíveis problemas, é importante que pelo menos as doenças e deficiências mais comuns sejam estudadas em conjunto, de modo a verificar quais tendem a dominar as características visuais e a determinar como afinar o modelo para lidar com esse tipo de situação.

Diferentes desordens com sintomas similares

A similaridade de sintomas entre diferentes desordens é uma das principais dificuldades enfrentadas por métodos para detecção automática de problemas nutricionais. Essas desordens abrangem doenças, deficiências nutricionais, pragas, fitotoxicidade, frio ou calor excessivo, bem como vários danos mecânicos. Em alguns casos, o uso de bandas como o infravermelho pode prover informação suficiente para distinguir entre essas desordens, porém isso pode aumentar os custos de captura, e a maior parte dos dispositivos móveis não é capaz de capturar imagens nessas bandas adicionais, o que pode alijar muitos usuários potenciais da tecnologia. Além disso, é importante notar que certas ambiguidades não podem ser resolvidas mesmo pelo uso de várias bandas espectrais. Esse é um

problema desafiador, e estudos específicos devem ser realizados em cada caso para identificar o que é mais problemático e determinar a melhor abordagem em cada situação.

Imagens capturadas remotamente por meio de drones, aeronaves tripuladas e satélites estão também sujeitas aos problemas causados por múltiplas desordens simultâneas e por desordens com sintomas similares, porém há também alguns desafios específicos, muitos dos quais estão ligados a fatores operacionais e ambientais (Barbedo; Koenigkan, 2018) e não serão tratados aqui. Quanto aos fatores que afetam diretamente as características das imagens, os seguintes são particularmente relevantes.

Altitude de voo

Satélites têm altitude fixa, porém as aeronaves, tripuladas ou não, podem voar a diferentes altitudes. Quanto mais alto o voo, maior a área coberta por unidade de tempo, reduzindo custos e riscos, porém reduzindo também a resolução espacial das imagens obtidas. Assim, a altitude ideal deve ser definida caso a caso considerando a resolução mínima requerida para aplicação pretendida.

Pixels misturados

A resolução da maioria das imagens capturadas remotamente não é suficiente para evitar a ocorrência de pixels resultantes da mistura de diferentes elementos (por exemplo, folhas mais solo). Dependendo da proporção de pixels misturados, a análise nutricional da área de interesse pode ficar comprometida (Williams et al., 2010). Isso reforça a necessidade de se determinar a altitude de voo com cuidado, para evitar inconsistências nos dados obtidos.

Cobertura de nuvens

A captura de nuvens é um problema que afeta imagens de satélite com mais intensidade.

Especialmente no caso de áreas com tendência a alta nebulosidade, é importante que seja possível capturar imagens com uma frequência temporal suficiente para que, no caso de haver perda de informação devido à presença de nuvens, seja possível realizar uma nova análise a tempo de detectar problemas nutricionais antes que esses causem danos sérios.

Construção de mosaicos

Cada imagem aérea é capaz de cobrir certa extensão territorial, e normalmente são necessárias várias imagens para que a área de interesse inteira seja completamente coberta. Em muitos casos, é necessário registrar essas imagens e combiná-las em um único mosaico, em um processo que é sujeito a erros. Felizmente, ferramentas recentes para construção de mosaicos são bastante eficientes, e eventuais erros normalmente têm impacto limitado na análise geral da área de interesse.

Variação da refletância devido às características do solo

A composição do solo e a quantidade de água presente afetam as refletâncias obtidas e, por conseguinte, podem prejudicar a detecção dos problemas de interesse (Shou et al., 2007). Normalmente, a melhor solução é incluir no conjunto de treinamento toda a variabilidade de solos que se pode encontrar na prática.

Presença de sombras

Dependendo do ângulo solar, as imagens obtidas podem ter grandes áreas sombreadas que necessitam de processamento específico. Em alguns casos, pode haver perda de informação relevante para a detecção de deficiências nutricionais. Assim, recomenda-se que as imagens sejam capturadas com sol a pino, a fim de minimizar a ocorrência de sombras.

Perda de dados

Se as imagens não são armazenadas na própria aeronave, falhas de comunicação podem causar perda de informação. O uso de sistemas redundantes não é adequado devido a limitações de carga e custos envolvidos. Uma maneira prática de evitar que algumas áreas fiquem sem qualquer dado associado é fazer com que todas as imagens sejam capturadas com pelo menos 50% de sobreposição, garantindo assim que todos os pontos em solo sejam imageados pelo menos duas vezes, à custa de mais dados precisarem ser processados.

Considerações finais

Este capítulo apresentou uma visão geral do uso de imagens digitais para a determinação do estado nutricional de plantas e detecção de possíveis deficiências. Embora a cana-de-açúcar ainda recebe pouca atenção nesse sentido, a maior parte das técnicas e tecnologias apresentadas aqui pode ser estendida para diferentes culturas agrícolas. Apesar dos avanços que vêm sendo alcançados, ainda são raras as tecnologias baseadas em imagens disponíveis comercialmente. Isso provavelmente se deve aos muitos desafios práticos envolvidos na tarefa, alguns dos quais foram listados neste capítulo. Assim, o grande desafio do momento é transformar os avanços científicos em ferramentas de uso prático para auxiliar os produtores na gestão de suas lavouras, o que resultará em plantas mais saudáveis e em menos desperdício.

Referências

AGÜERA, F.; CARVAJAL, F.; PÉREZ, M. Measuring sunflower nitrogen status from an unmanned aerial vehicle-based system and an on the ground device. *International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 38-1, n. C22, p. 33-37, 2011. Trabalho apresentado na International Conference on Unmanned Aerial

Vehicle in Geomatics, 2011, Zurich. DOI: [10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-33-2011](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-33-2011).

ALI, M. M.; AL-ANI, A.; EAMUS, D.; TAN, D. K. Y. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques-a review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 7, p. 928-953, 2017. DOI: [10.1080/01904167.2016.1143954](https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1143954).

AMIRRUDDIN, A. D.; MUHARAM, F. M. Evaluation of linear discriminant and support vector machine classifiers for classification of nitrogen status in mature oil palm from SPOT-6 satellite images: analysis of raw spectral bands and spectral indices. **Geocarto International**, v. 34, n. 7, p. 735-749, 2018. DOI: [10.1080/10106049.2018.1434687](https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1434687).

AMIRRUDDIN, A. D.; MUHARAM, F. M.; KARAM, D. S. Evaluation of ground-level and space-borne sensor as tools in monitoring nitrogen nutrition status in immature and mature oil palm. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 3, p. 371-383, 2018. DOI: [10.1080/01904167.2017.1385804](https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1385804).

ANDERSON, K.; GASTON, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 3, p. 138-146, Apr. 2013. DOI: [10.1890/120150](https://doi.org/10.1890/120150).

ASRAF, M. H.; DALILA, N. K. A.; FAIZ A. Z. A.; AMINAH, S. N.; NOORITAWATI, M. T. A fuzzy inference system for diagnosing oil palm nutritional deficiency symptoms. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 12, n. 10, p. 3244-3250, May 2017.

ASRAF, M. H.; NOORITAWATI, M. T.; RIZAM, M. S. B. S. A comparative study in kernel-based support vector machine of oil palm leaves nutrient disease. **Procedia Engineering**, v. 41, p. 1353-1359, 2012. DOI: [10.1016/j.proeng.2012.07.321](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.321).

BACKHAUS, A.; BOLLENBECK, F.; SEIFFERT, U. Robust classification of the nutrition state in crop plants by hyperspectral imaging and artificial neural networks. In: Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 3., 2011, Lisbon. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2011. 4 p. DOI: [10.1109/WHISPERS.2011.6080898](https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2011.6080898).

BAI, G.; JENKINS, S.; YUAN, W.; GRAEF, G. L.; GE, Y. Field-based scoring of soybean iron deficiency chlorosis using RGB imaging and statistical learning. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1-12, July 2018. DOI: [10.3389/fpls.2018.01002](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01002).

BALASUBRAMANIAM, P.; ANANTHI, V. P. Segmentation of nutrient deficiency in incomplete crop images using intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithm. **Nonlinear Dynamics**, v. 83, n. 1-2, p. 849-866, Jan. 2016. DOI: [10.1007/s11071-015-2372-y](https://doi.org/10.1007/s11071-015-2372-y).

BALLESTER, C.; HORNBUCKLE, J.; BRINKHOFF, J.; SMITH, J.; QUAYLE, W. Assessment of in-season cotton nitrogen status and lint yield prediction from unmanned aerial system imagery. **Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 1-18, Nov. 2017. DOI: [10.3390/rs9111149](https://doi.org/10.3390/rs9111149).

BARBEDO, J. G. A. A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images. **Biosystems Engineering**, v. 144, p. 52-60, Apr. 2016. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017).

BARBEDO, J. G. A. Digital image processing techniques for detecting, quantifying and classifying plant diseases. **SpringerPlus**, v. 2, p. 1-12, 2013. DOI: [10.1186/2193-1801-2-66](https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-66).

BARBEDO, J. G. A. Factors influencing the use of deep learning for plant disease recognition. **Biosystems Engineering**, v. 172, p. 84-91, Aug. 2018a. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2018.05.013](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.05.013).

BARBEDO, J. G. A. Impact of dataset size and variety on the effectiveness of deep learning and transfer learning for plant disease classification. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 46-53, Oct. 2018b. DOI: [10.1016/j.compag.2018.08.013](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.013).

BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V. Perspectives on the use of unmanned aerial systems to monitor cattle. **Outlook on Agriculture**, v. 47, n. 3, p. 214-222, Sept. 2018. DOI: [10.1177/0030727018781876](https://doi.org/10.1177/0030727018781876).

BAUSCH, W. C.; KHOSLA, R. QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 274-290, June 2010. DOI: [10.1007/s11119-009-9133-1](https://doi.org/10.1007/s11119-009-9133-1).

BENINCASA, P.; ANTOGNELLI, S.; BRUNETTI, L.; FABBRI, C. A.; NATALE, A.; SARTORETTI, V.; MODEO, G.; GUIDUCCI, M.; TEI, F.; VIZZARI, M. Reliability of NDVI derived by high resolution satellite and UAV compared to in-field methods for the evaluation of early crop N status and grain yield in wheat. **Experimental Agriculture**, v. 54, n. 4, p. 604-622, Aug. 2018. DOI: [10.1017/S0014479717000278](https://doi.org/10.1017/S0014479717000278).

BERNI, J. A. J.; ZARCO-TEJADA, P. J.; SUÁREZ, L.; FERERES, E. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial Vehicle. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 722-738, Mar. 2009. DOI: [10.1109/TGRS.2008.2010457](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457).

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Aerial Photography to Detect Nitrogen Stress in Corn. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, n. 3-4, p. 440-444, May 1996. DOI: [10.1016/S0176-1617\(96\)80277-X](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80277-X).

- BOCK, C. H.; POOLE, G. H.; PARKER, P. E.; GOTTWALD, T. R. Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 29, n. 2, p. 59-107, 2010. DOI: [10.1080/07352681003617285](https://doi.org/10.1080/07352681003617285).
- BONADIES, S.; LEFCOURT, A.; GADSDEN, S. A. A survey of unmanned ground vehicles with applications to agricultural and environmental sensing. In: AUTONOMOUS AIR AND GROUND SENSING SYSTEMS FOR AGRICULTURAL OPTIMIZATION AND PHENOTYPING, 1., 2016, Baltimore. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2016. p. 98660Q-1-98660Q-14. (Proceedings of SPIE, 9866). DOI: [10.1117/12.2224248](https://doi.org/10.1117/12.2224248).
- BORDOGNA, G.; KLIMENT, T.; FRIGERIO, L.; BRIVIO, P. A.; CREMA, A.; STROPPIANA, D.; BOSCHETTI, M.; STERLACCHINI, S. A spatial data infrastructure integrating multisource heterogeneous geospatial data and time series: a study case in agriculture. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 5, n. 5, p. 1-27, May 2016. DOI: [10.3390/ijgi5050073](https://doi.org/10.3390/ijgi5050073).
- BORHAN, M. S.; PANIGRAHI, S.; PANIGRAHI, S.; GU, H. Multispectral and color imaging techniques for nitrate and chlorophyll determination of potato leaves in a controlled environment. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 2, p. 599-608, Mar./Apr. 2004. DOI: [10.13031/2013.16023](https://doi.org/10.13031/2013.16023).
- BORHAN, M. S.; PANIGRAHI, S.; SATTER, M. A.; GU, H. Evaluation of computer imaging technique for predicting the SPAD readings in potato leaves. **Information Processing in Agriculture**, v. 4, n. 4, p. 275-282, Dec. 2017. DOI: [10.1016/j.inpa.2017.07.005](https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.07.005).
- BUTLER, H. J.; ADAMS, S.; MCAINSH, M. R.; MARTIN, F. L. Detecting nutrient deficiency in plant systems using synchrotron Fourier-transform infrared microspectroscopy. **Vibrational Spectroscopy**, v. 90, p. 46-55, May 2017. DOI: [10.1016/j.vibspec.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2017.03.004).
- CAPOLUPO, A.; KOOISTRA, L.; BERENDONK, C.; BOCCIA, L.; SUOMALAINEN, J. Estimating plant traits of grasslands from UAV-acquired hyperspectral images: a comparison of statistical approaches. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 4, p. 2792-2820, Dec. 2015. DOI: [10.3390/ijgi4042792](https://doi.org/10.3390/ijgi4042792).
- CATUREGLI, L.; CASUCCI, M.; LULLI, F.; GROSSI, N.; GAETANI, M.; MAGNI, S.; BONARI, E.; VOLTERRANI, M. GeoEye-1 satellite versus ground-based multispectral data for estimating nitrogen status of turfgrasses. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 8, p. 2238-2251, 2015. DOI: [10.1080/01431161.2015.1035409](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1035409).
- CATUREGLI, L.; CORNIGLIA, M.; GAETANI, M.; GROSSI, N.; MAGNI, S.; MIGLIAZZI, M.; ANGELINI, L.; MAZZONCINI, M.; SILVESTRI, N.; FONTANELLI, M.; RAFFAELLI, M.; PERUZZI, A.; VOLTERRANI, M. Unmanned Aerial Vehicle to estimate nitrogen status of turfgrasses. **Plos One**, v. 11, n. 6, p. 1-13, 2016. DOI: [10.1371/journal.pone.0158268](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158268).
- CHEN, L.; LIN, L.; CAI, G.; SUN, Y.; HUANG, T.; WANG, K.; DENG, J. Identification of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies in rice based on static scanning technology and hierarchical identification method. **Plos One**, v. 9, n. 11, p. 1-17, 2014. DOI: [10.1371/journal.pone.0113200](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113200).
- CHEN, L.; SUN, Y.; WANG, K. Rapid diagnosis of nitrogen nutrition status in rice based on static scanning and extraction of leaf and sheath characteristics. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 10, n. 3, p. 158-164, May 2017. DOI: [10.3965/j.ijabe.20171003.1860](https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171003.1860).
- CHEN, L. S.; WANG, K. Diagnosing of rice nitrogen stress based on static scanning technology and image information extraction. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 14, n. 2, p. 382-393, June 2014. DOI: [10.4067/S0718-95162014005000030](https://doi.org/10.4067/S0718-95162014005000030).
- CHEN, L. S.; ZHANG, S. J.; WANG, K.; SHEN, Z. Q.; DENG, J. S. Identifying of rice phosphorus stress based on machine vision technology. **Life Science Journal**, v. 10, n. 2, p. 2655-2663, 2013.
- CHEN, Z.; WANG, X.; WANG, H. Preliminary research on total nitrogen content prediction of sandalwood using the error-in-variable models based on digital image processing. **Plos One**, v. 13, n. 8, p. 1-22, 2018. DOI: [10.1371/journal.pone.0202649](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202649).
- CILIA, C.; PANIGADA, C.; ROSSINI, M.; MERONI, M.; Busetto, L.; AMADUCCI, S.; BOSCHETTI, M.; PICCHI, V.; COLOMBO, R. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6549-6565, July 2014. DOI: [10.3390/rs6076549](https://doi.org/10.3390/rs6076549).
- COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; ZUSMAN, Y.; DAR, Z.; BONFIL, D. J.; KARNIELI, A.; ZILBERMAN, A.; MOULIN, A.; OSTROVSKY, V.; LEVI, A.; BRIKMAN, R.; SHENKER, M. Leaf nitrogen estimation in potato based on spectral data and on simulated bands of the VEN μ S satellite. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 5, p. 520-537, Oct. 2010. DOI: [10.1007/s11119-009-9147-8](https://doi.org/10.1007/s11119-009-9147-8).
- CONDORI, R. H. M.; ROMUALDO, L. M.; BRUNO, O. M.; LUZ, P. H. DE C. Comparison between traditional texture methods and deep learning descriptors for detection of nitrogen deficiency in maize crops. In: Workshop of Computer Vision, 2017, Natal. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2017. p. 7-12. DOI: [10.1109/WVC.2017.00009](https://doi.org/10.1109/WVC.2017.00009).
- CONTRERAS-MEDINA, L. M.; OSORNIO-RIOS, R. A.; TORRES-PACHECO, I.; ROMERO-TRONCOSO, R. J.;

- GUEVARA-GONZÁLEZ, R. G.; MILLAN-ALMARAZ, J. R. Smart sensor for real-time quantification of common symptoms present in unhealthy plants. **Sensors**, v. 12, n. 1, p. 784-805, Jan. 2012. DOI: [10.3390/s120100784](https://doi.org/10.3390/s120100784).
- CORP, L. A.; MCMURTREY, J. E.; MIDDLETON, E. M.; MULCHI, C. L.; CHAPPELLE, E. W.; DAUGHTRY, C. S. T. Fluorescence sensing systems: In vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 4, p. 470-479, Aug. 2003. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00125-1).
- CORTI, M.; CAVALLI, D.; CABASSI, G.; VIGONI, A.; DEGANI, L.; GALLINA, P. M. Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 4, p. 675-696, Aug. 2019. DOI: [10.1007/s11119-018-9609-y](https://doi.org/10.1007/s11119-018-9609-y).
- CORTI, M.; GALLINA, P. M.; CAVALLI, D.; CABASSI, G. Hyperspectral imaging of spinach canopy under combined water and nitrogen stress to estimate biomass, water, and nitrogen content. **Biosystems Engineering**, v. 158, p. 38-50, June 2017. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2017.03.006](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.03.006).
- COSTA, J. M.; GRANT, O. M.; CHAVES, M. M. Thermography to explore plant–environment interactions. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 13, p. 3937-3949, Oct. 2013. DOI: [10.1093/jxb/ert029](https://doi.org/10.1093/jxb/ert029).
- CULMAN, M. A.; GÓMEZ, J. A.; TALAVERA, J.; QUIROZ, L. A.; TOBÓN, L. E.; ARANDA, J. M.; GARRETA, L. E.; BAYONA, C. J. A novel application for identification of nutrient deficiencies in oil palm using the Internet of Things. In: IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering, 5., 2017, San Francisco. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2017. p. 169-172.
- CUNHA, M. L. P.; AQUINO, L. A.; NOVAIS, R. F.; CLEMENTE, J. M.; AQUINO, P. M. DE; OLIVEIRA, T. F. Diagnosis of the nutritional status of garlic crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-14, 2016. DOI: [10.1590/18069657rbcs20140771](https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20140771).
- DEZORDI, L. R.; AQUINO, L. A. DE; AQUINO, R. F. B. DE; CLEMENTE, J. M.; ASSUNÇÃO, N. S. Diagnostic methods to assess the nutritional status of the carrot crop. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-16, 2016. DOI: [10.1590/18069657rbcs20140813](https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20140813).
- ELVANIDI, A.; KATSOUKAS, N.; AUGOUSTAKI, D.; LOULOU, I.; KITTAS, C. Crop reflectance measurements for nitrogen deficiency detection in a soilless tomato crop. **Biosystems Engineering**, v. 176, p. 1-11, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2018.09.019](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.019).
- FELDERHOF, L.; GILLIESON, D. Near-infrared imagery from unmanned aerial systems and satellites can be used to specify fertilizer application rates in tree crops. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 4, p. 376-386, Aug. 2011. DOI: [10.5589/m11-046](https://doi.org/10.5589/m11-046).
- FLOWERS, M.; WEISZ, R.; HEINIGER, R. Quantitative approaches for using color infrared photography for assessing in-season nitrogen status in winter wheat. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 5, p. 1189-1200, Sept./Oct. 2003. DOI: [10.2134/agronj2003.1189](https://doi.org/10.2134/agronj2003.1189).
- GABRIEL, J. L.; ZARCO-TEJADA, P. J.; LÓPEZ-HERRERA, P. J.; PÉREZ-MARTÍN, E.; ALONSO-AYUSO, M.; QUEMADA, M. Airborne and ground level sensors for monitoring nitrogen status in a maize crop. **Biosystems Engineering**, v. 160, p. 124-133, Aug. 2017. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2017.06.003](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.003).
- GAUTAM, R.; PANIGRAHI, S.; FRANZEN, D. Neural network optimisation of remotely sensed maize leaf nitrogen with a genetic algorithm and linear programming using five performance parameters. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 3, p. 359-370, Nov. 2006. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2006.07.007](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.07.007).
- GEIPEL, J.; LINK, J.; WIRWAHN, J. A.; CLAUPEIN, W. A programmable aerial multispectral camera system for in-season crop biomass and nitrogen content estimation. **Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1-19, Mar. 2016. DOI: [10.3390/agriculture6010004](https://doi.org/10.3390/agriculture6010004).
- GÉRARD, B.; BUERKERT, A.; HIERNAUX, P.; MARSCHNER, H. Non-destructive measurement of plant growth and nitrogen status of pearl millet with low-altitude aerial photography. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 43, p. 993-998, 1997. Sup1. DOI: [10.1080/00380768.1997.11863705](https://doi.org/10.1080/00380768.1997.11863705).
- GHOSAL, S.; BLYSTONE, D.; SINGH, A. K.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; SINGH, A.; SARKAR, S. An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 115, n. 18, p. 4613-4618, May 2018. DOI: [10.1073/pnas.1716999115](https://doi.org/10.1073/pnas.1716999115).
- GIACOMELLI, G. A.; LING, P. P.; KOLE, J. Determining nutrient stress in lettuce plants with machine vision technology. **HortTechnology**, v. 8, n. 3, p. 361-365, July 1998. DOI: [10.21273/HORTTECH.8.3.361](https://doi.org/10.21273/HORTTECH.8.3.361).
- GOEL, P. K.; PRASHER, S. O.; LANDRY, J. A.; PATEL, R. M.; BONNELL, R. B.; VIAU, A. A.; MILLER, J. R. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 38, n. 2, p. 99-124, Feb. 2003. DOI: [10.1016/S0168-1699\(02\)00138-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00138-2).
- GORBE, E.; CALATAYUD, A. Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research:

a review. **Scientia Horticulturae**, v. 138, p. 24-35, May 2012. DOI: [10.1016/j.scienta.2012.02.002](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.002).

GRACIA-ROMERO, A.; KEFAUVER, S. C.; VERGARA-DÍAZ, O.; ZAMAN-ALLAH, M. A.; PRASANNA, B. M.; CAIRNS, J. E.; ARAUS, J. L. Comparative performance of ground vs. aerially assessed RGB and multispectral indices for early-growth evaluation of maize performance under phosphorus fertilization. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1-13, Nov. 2017. DOI: [10.3389/fpls.2017.02004](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02004).

GRAEFF, S.; PFENNING, J.; CLAUPEIN, W.; LIEBIG, H. P. Evaluation of image analysis to determine the n-fertilizer demand of broccoli plants (*Brassica oleracea* convar. *botrytis* var. *italica*). **Advances in Optical Technologies**, v. 2008, p. 1-8, 2008. DOI: [10.1155/2008/359760](https://doi.org/10.1155/2008/359760).

HIREMATH, S. A.; VAN DER HEIJDEN, G. W. A. M.; VAN EVERT, F. K.; STEIN, A.; TER BRAAK, C. J. F. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 100, p. 41-50, Jan. 2014. DOI: [10.1016/j.compag.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.005).

HOGAN, S. D.; KELLY, M.; STARK, B.; CHEN, Y. Unmanned aerial systems for agriculture and natural resources. **California Agriculture**, v. 71, n. 1, p. 5-14, Jan./Mar. 2017. DOI: [10.3733/ca.2017a0002](https://doi.org/10.3733/ca.2017a0002).

HU, J.; LI, D.; CHEN, G.; DUAN, Q.; HAN, Y. Image segmentation method for crop nutrient deficiency based on Fuzzy C-Means clustering algorithm. **Intelligent Automation & Soft Computing**, v. 18, n. 8, p. 1145-1155, 2012. DOI: [10.1080/10798587.2008.10643318](https://doi.org/10.1080/10798587.2008.10643318).

HUANG, S.; MIAO, Y.; ZHAO, G.; YUAN, F.; MA, X.; TAN, C.; YU, W.; GNYP, M. L.; LENZ-WIEDEMANN, V. I. S.; RASCHER, U.; BARETH, G. Satellite remote sensing-based in-season diagnosis of rice nitrogen status in Northeast China. **Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 10646-10667, Aug. 2015. DOI: [10.3390/rs70810646](https://doi.org/10.3390/rs70810646).

HUNT JUNIOR, E. R.; CAVIGELLI, M.; DAUGHTRY, C. S. T.; MCMURTREY, J.; WALTHALL, C. L. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 4, p. 359-378, Aug. 2005. DOI: [10.1007/s11119-005-2324-5](https://doi.org/10.1007/s11119-005-2324-5).

HUNT JUNIOR, E. R.; HORNECK, D. A.; SPINELLI, C. B.; TURNER, R. W.; BRUCE, A. E.; GADLER, D. J.; BRUNGARDT, J. J.; HAMM, P. B. Monitoring nitrogen status of potatoes using small unmanned aerial vehicles. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 2, p. 314-333, Apr. 2018. DOI: [10.1007/s11119-017-9518-5](https://doi.org/10.1007/s11119-017-9518-5).

JI-YONG, S.; XIAO-BO, Z.; JIE-WEN, Z.; KAI-LIANG, W.; ZHENG-WEI, C.; WIAO-WEI, H.; DE-TAO, Z.; HOLMES, M. Nondestructive diagnostics of nitrogen deficiency by cucumber leaf chlorophyll distribution map based

on near infrared hyperspectral imaging. **Scientia Horticulturae**, v. 138, p. 190-197, May 2012. DOI: [10.1016/j.scienta.2012.02.024](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.024).

JIA, L.; CHEN, X.; ZHANG, F.; BUERKERT, A.; ROEMHELD, V. Optimum nitrogen fertilization of winter wheat based on color digital camera images. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 38, n. 11-12, p. 1385-1394, 2007. DOI: [10.1080/00103620701375991](https://doi.org/10.1080/00103620701375991).

JIA, L.; CHEN, X.; ZHANG, F.; BUERKERT, A.; RÖMHELD, V. Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China Plain. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 3, p. 441-450, 2004. DOI: [10.1081/PLN-120028872](https://doi.org/10.1081/PLN-120028872).

JIA L.; YU, Z.; LI, F.; GNYP, M.; KOPPE, W.; BARETH, G.; MIAO, Y.; CHEN, X.; ZHANG, F. Nitrogen status estimation of winter wheat by using an IKONOS satellite image in the North China Plain. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMPUTING TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE, 5., 2011, Beijing. **Computer and computing technologies in agriculture V: proceedings**. Heidelberg: Springer, 2012. pt. II, p. 174-184. (IFIP advances in information and communication technology, 369). DOI: [10.1007/978-3-642-27278-3_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27278-3_19).

JINYANG, L.; MEIQING, L.; HANPING, M.; WENJING, Z. Diagnosis of potassium nutrition level in *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance. **Biosystems Engineering**, v. 147, p. 130-138, July 2016. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.005).

KAMILARIS, A.; ASSUMPCIO, A.; BLASI, A. B.; TORRELLAS, M.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. Estimating the environmental impact of agriculture by means of geospatial and big data analysis: the case of Catalonia. In: OTJACQUES, B.; HITZELBERGER, P.; NAUMANN, S.; WOHLGEMUTH, V. (ed.). **From science to society: new trends in environmental informatics**. Cham: Springer, 2018. p. 39-48. Trabalho apresentado na 31st. edition of the long-standing and established international and interdisciplinary conference on environmental information and communication technologies (EnvirolInfo 2017), Luxembourg.

KARMAS, A.; TZOTSOS, A.; KARANTZALOS, K. Geospatial big data for environmental and agricultural applications. In: YU, S.; GUO, S. (ed.). **Big data concepts, theories, and applications**. Cham: Springer, 2016. p. 353-390. DOI: [10.1007/978-3-319-27763-9_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27763-9_10).

LATIF, M. A.; CHEEMA, M. J. M.; SALEEM, M. F.; MAQSOOD, M. Mapping wheat response to variations in N, P, Zn, and irrigation using an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 21, p. 7172-7188, 2018. DOI: [10.1080/01431161.2018.1515509](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1515509).

- LEBOURGEOIS, V.; BÉGUÉ, A.; LABBÉ, S.; HOULÈS, M.; MARTINÉ, J. F. A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 5, p. 525-541, Oct. 2012. DOI: [10.1007/s11119-012-9262-9](https://doi.org/10.1007/s11119-012-9262-9).
- LEE, K. J.; LEE, B. W. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 48, p. 57-65, July 2013. DOI: [10.1016/j.eja.2013.02.011](https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.011).
- LEEMANS, V.; MARLIER, G.; DESTAIN, M. F.; DUMONT, B.; MERCATORIS, B. Estimation of leaf nitrogen concentration on winter wheat by multispectral imaging. In: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY, 19., 2017, Warsaw. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2017. p. 102130I-1-102130I-10. (SPIE proceedings, v. 10213). DOI: [10.1117/12.2268398](https://doi.org/10.1117/12.2268398).
- LELONG, C. C. D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; BARET, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v. 8, n. 5, p. 3557-3585, May 2008. DOI: [10.3390/s8053557](https://doi.org/10.3390/s8053557).
- LI, J.; ZHANG, F.; QIAN, X.; ZHU, Y.; SHEN, G. Quantification of rice canopy nitrogen balance index with digital imagery from unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 3, p. 183-189, 2015. DOI: [10.1080/2150704X.2015.1021934](https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1021934).
- LI, J. H.; WANG, F.; LI, J. W.; ZOU, R. B.; LIAO, G. P. Multifractal methods for rapeseed nitrogen nutrition qualitative diagnosis modeling. **International Journal of Biomathematics**, v. 9, n. 4, p. 1650064-1-1650064-13, July 2016. DOI: [10.1142/S1793524516500649](https://doi.org/10.1142/S1793524516500649).
- LI, Y.; CHEN, D.; WALKER, C. N.; ANGUS, J. F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, v. 118, n. 3, p. 221-227, Sept. 2010. DOI: [10.1016/j.fcr.2010.05.011](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.011).
- LIU, S.; LI, L.; GAO, W.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; WANG, S.; LU, J. Diagnosis of nitrogen status in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using *in-situ* hyperspectral data and unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 151, p. 185-195, Aug. 2018. DOI: [10.1016/j.compag.2018.05.026](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.026).
- LIU, Y.; LYU, Q.; HE, S.; YI, S.; LIU, X.; XIE, R.; ZHENG, Y.; DENG, L. Prediction of nitrogen and phosphorus contents in citrus leaves based on hyperspectral imaging. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 2, p. 80-88, Apr. 2015.
- LUZ, P. H. C.; MARIN, M. A.; DEVECHIO, F. F. S.; ROMUALDO, L. M.; ZUÑIGA, A. M. G.; OLIVEIRA, M. W. S.; HERLING, V. R.; BRUNO, O. M. Boron deficiency precisely identified on growth stage V4 of maize crop using texture image analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 2, p. 159-169, 2018. DOI: [10.1080/00103624.2017.1421644](https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421644).
- MAIMAITIJIANG, M.; GHULAM, A.; SIDIKE, P.; HARTLING, S.; MAIMAITIYIMING, M.; PETERSON, K.; SHAVERS, E.; FISHMAN, J.; PETERSON, J.; KADAM, S.; BURKEN, J.; FRITSCHI, F. Unmanned Aerial System (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 134, p. 43-58, Dec. 2017. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011).
- MAO, H.; GAO, H.; ZHANG, X.; KUMI, F. Nondestructive measurement of total nitrogen in lettuce by integrating spectroscopy and computer vision. **Scientia Horticulturae**, v. 184, p. 1-7, Mar. 2015. DOI: [10.1016/j.scienta.2014.12.027](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.027).
- MARESMA, A.; ARIZA, M.; MARTÍNEZ, E.; LLOVERAS, J.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in Maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1-15, Dec. 2016. DOI: [10.3390/rs8120973](https://doi.org/10.3390/rs8120973).
- MARESMA, A.; LLOVERAS, J.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Use of multispectral airborne images to improve in-season nitrogen management, predict grain yield and estimate economic return of maize in irrigated high yielding environments. **Remote Sensing**, v. 10, n. 4, p. 1-19, Apr. 2018. DOI: [10.3390/rs10040543](https://doi.org/10.3390/rs10040543).
- MEGGIO, F.; ZARCO-TEJADA, P. J.; NÚÑEZ, L. C.; SEPULCRE-CANTÓ, G.; GONZÁLEZ, M. R.; MARTÍN, P. Grape quality assessment in vineyards affected by iron deficiency chlorosis using narrow-band physiological remote sensing indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1968-1986, Sept. 2010. DOI: [10.1016/j.rse.2010.04.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.004).
- MERCADO-LUNA, A.; RICO-GARCÍA, E.; LARA-HERRERA, A.; SOTO-ZARAZÚA, G.; OCAMPO-VELÁZQUEZ, R.; GUEVARA-GONZÁLEZ, R.; HERRERA-RUIZ, G.; TORRES-PACHECO, I. Nitrogen determination on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedlings by color image analysis (RGB). **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 33, p. 5326-5332, Aug. 2010.
- MOSHOU, D.; BRAVO, C.; WAHLEN, S.; WEST, J.; MCCARTNEY, A.; DE BAERDEMAEKER, J.; RAMON, H. Simultaneous identification of plant stresses and diseases in arable crops using proximal optical sensing and self-organising maps. **Precision Agriculture**, v. 7, n. 3, p. 149-164, July 2006. DOI: [10.1007/s11119-006-9002-0](https://doi.org/10.1007/s11119-006-9002-0).
- MUÑOZ-HUERTA, R. F.; GUEVARA-GONZALEZ, R. G.; CONTRERAS-MEDINA, L. M.; TORRES-PACHECO, I.; PRADO-OLIVAREZ, J.; OCAMPO-VELAZQUEZ, R. V. A

- review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. **Sensors**, v. 13, n. 8, p. 10823-10843, Aug. 2013. DOI: [10.3390/s130810823](https://doi.org/10.3390/s130810823).
- NAUŠ, J.; PROKOPOVÁ, J.; REBÍČEK, J.; ŠPUNDOVÁ, M. SPAD chlorophyll meter reading can be pronouncedly affected by chloroplast movement. **Photosynthesis Research**, v. 105, n. 3, p. 265-271, Dec. 2010. DOI: [10.1007/s11120-010-9587-z](https://doi.org/10.1007/s11120-010-9587-z).
- NIGON, T. J.; MULLA, D. J.; ROSEN, C. J.; COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; KNIGHT, J.; RUD, R. Hyperspectral aerial imagery for detecting nitrogen stress in two potato cultivars. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 112, p. 36-46, Mar. 2015. DOI: [10.1016/j.compag.2014.12.018](https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.018).
- NOH, H. K.; ZHANG, Q.; HAN, S.; SHIN, B.; REUM, D. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors. **Transactions of the ASAE**, v. 48, n. 1, p. 393-401, Jan./Feb. 2005. DOI: [10.13031/2013.17933](https://doi.org/10.13031/2013.17933).
- NOH, H. K.; ZHANG, Q.; SHIN, B. S.; HAN, S. **Multispectral image sensor for detection of nitrogen deficiency in corn by using an empirical line method**. [S.l.: s.n., 2003]. Trabalho apresentado na ASAE annual international meeting, 2003, Las Vegas. Article 031135. DOI: [10.13031/2013.13743](https://doi.org/10.13031/2013.13743).
- NUTINI, F.; CONFALONIERI, R.; CREMA, A.; MOVEDI, E.; PALEARI, L.; STAVRAKOUDIS, D.; BOSCHETTI, M. An operational workflow to assess rice nutritional status based on satellite imagery and smartphone apps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, p. 80-92, Nov. 2018. DOI: [10.1016/j.compag.2018.08.008](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.008).
- PAGOLA, M.; ORTIZ, R.; IRIGOYEN, I.; BUSTINCE, H.; BARRENECHEA, E.; APARICIO-TEJO, P.; LAMSFUS, C.; LASA, B. New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis: comparison with SPAD-502. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 2, p. 213-218, Mar. 2009. DOI: [10.1016/j.compag.2008.10.003](https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.10.003).
- QUEMADA, M.; GABRIEL, J. L.; ZARCO-TEJADA, P. Airborne hyperspectral images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 2940-2962, Apr. 2014. DOI: [10.3390/rs6042940](https://doi.org/10.3390/rs6042940).
- RANGEL, B. M. S.; FERNÁNDEZ, M. A. A.; MURILLO, J. C.; ORTEGA, J. C. P.; ARREGUÍN, J. M. R. KNN-based image segmentation for grapevine potassium deficiency diagnosis. In: International Conference on Electronics, Communications and Computers, 2016, Cholula Puebla. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2016. p. 48-53. DOI: [10.1109/CONIELECOMP.2016.7438551](https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2016.7438551).
- REISIG, D. D.; GODFREY, L. D. Remotely sensing arthropod and nutrient stressed plants: a case study with nitrogen and cotton aphid (*Hemiptera: Aphididae*). **Environmental Entomology**, v. 39, n. 4, p. 1255-1263, Aug. 2010. DOI: [10.1603/EN09218](https://doi.org/10.1603/EN09218).
- ROMUALDO, L. M.; LUZ, P. H. DE C.; BAESSO, M. M.; DEVECHIO, F. F. DA S.; BET, J. A. Spectral indexes for identification of nitrogen deficiency in maize. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 2, p. 183-191, Apr./June 2018. DOI: [10.5935/1806-6690.20180021](https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180021).
- RORIE, R. L.; PURCELL, L. C.; KARCHER, D. E.; KING, C. A. Assessment of leaf nitrogen in corn from digital images. **Crop Science**, v. 51, n. 5, p. 2174-2180, Sept. 2011. DOI: [10.2135/cropsci2010.12.0699](https://doi.org/10.2135/cropsci2010.12.0699).
- ROUSE JUNIOR, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC.: NASA, 1974. v. 1, p. 309-317.
- SABERIOON, M. M.; AMIN, M. S. M.; AIMRUN, W.; GHOLIZADEH, A.; ANUAR, A. A. R. Assessment of colour indices derived from conventional digital camera for determining nitrogen status in rice plants. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, n. 2, p. 655-662, 2013. DOI: [10.1234/4.2013.4391](https://doi.org/10.1234/4.2013.4391).
- SABERIOON, M. M.; GHOLIZADEH, A. Novel approach for estimating nitrogen content in paddy fields using low altitude remote sensing system. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B1, p. 1011-1015, 2016. DOI: [10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1011-2016](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1011-2016).
- SANKARAN, S.; ZHOU, J.; KHOT, L. R.; TRAPP, J. J.; MNDOLWA, E.; MIKLAS, P. N. High-throughput field phenotyping in dry bean using small unmanned aerial vehicle based multispectral imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 151, p. 84-92, Aug. 2018. DOI: [10.1016/j.compag.2018.05.034](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.034).
- SANYAL, P.; BHATTACHARYA, U.; PARUI, S. K.; BANDYOPADHYAY, S. K.; PATEL, S. Color Texture Analysis of Rice Leaves Diagnosing Deficiency in the Balance of Mineral Levels towards Improvement of Crop Productivity. In: International Conference on Information Technology, 10, 2007, Rourkela. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2007. p. 85-90. DOI: [10.1109/ICIT.2007.40](https://doi.org/10.1109/ICIT.2007.40).
- SCHARF, P. C.; LORY, J. A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict sidedress nitrogen need. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 3, p. 397-404, May 2002. DOI: [10.2134/agronj2002.3970](https://doi.org/10.2134/agronj2002.3970).
- SCHIRRMANN, M.; GIEBEL, A.; GLEINIGER, F.; PFLANZ, M.; LENTSCHKE, J.; DAMMER, K. H. Monitoring

- agronomic parameters of winter wheat crops with low-cost UAV imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 9, Sept. 2016. DOI: [10.3390/rs8090706](https://doi.org/10.3390/rs8090706).
- SCHMIDT, S. B.; PEDAS, P.; LAURSEN, K. H.; SCHJOERRING, J. K.; HUSTED, S. Latent manganese deficiency in barley can be diagnosed and remediated on the basis of chlorophyll *a* fluorescence measurements. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1-2, p. 417-429, Nov. 2013. DOI: [10.1007/s11104-013-1702-4](https://doi.org/10.1007/s11104-013-1702-4).
- SCHUERGER, A. C.; CAPELLE, G. A.; DI BENEDETTO, J. A.; MAO, C.; THAI, C. N.; EVANS, M. D.; RICHARDS, J. T.; BLANK, T. A.; STRYJEWski, E. C. Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in bahia grass (*Paspalum notatum* Flugge.). **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 4, p. 572-588, Apr. 2003. DOI: [10.1016/S0034-4257\(02\)00181-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00181-5).
- SEVERTSON, D.; CALLOW, N.; FLOWER, K.; NEUHAUS, A.; OLEJNIK, M.; NANSEN, C. Unmanned aerial vehicle canopy reflectance data detects potassium deficiency and green peach aphid susceptibility in canola. **Precision Agriculture**, v. 17, n. 6, p. 659-677, Dec. 2016. DOI: [10.1007/s11119-016-9442-0](https://doi.org/10.1007/s11119-016-9442-0).
- SHAFIEKHANI, A.; KADAM, S.; FRITSCHI, F. B.; DESOUZA, G. N. Vinobot and Vinoculer: two robotic platforms for high-throughput field phenotyping. **Sensors**, v. 17, n. 1, p. 1-16, Jan. 2017. DOI: [10.3390/s17010214](https://doi.org/10.3390/s17010214).
- SHOU, L.; JIA, L.; CUI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, F. Using high-resolution satellite imaging to evaluate nitrogen status of winter wheat. **Journal of Plant Nutrition**, v. 30, n. 10, p. 1669-1680, 2007. DOI: [10.1080/01904160701615533](https://doi.org/10.1080/01904160701615533).
- SILVA, F. DE F. DA; LUZ, P. H. C.; ROMUALDO, L. M.; MARIN, M. A.; ZÚÑIGA, A. M. G.; HERLING, V. R.; BRUNO, O. M. A diagnostic tool for magnesium nutrition in maize based on image analysis of different leaf sections. **Crop Science**, v. 54, p. 738-745, Mar./Apr. 2014. DOI: [10.2135/cropsci2013.03.0165](https://doi.org/10.2135/cropsci2013.03.0165).
- SIMS, N. C.; CULVENOR, D.; NEWNHAM, G.; COOPS, N. C.; HOPMANS, P. Towards the operational use of satellite hyperspectral image data for mapping nutrient status and fertilizer requirements in Australian plantation forests. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 2, p. 320-328, Apr. 2013. DOI: [10.1109/JSTARS.2013.2251610](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2251610).
- SINGH, A. K.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; SARKAR, S.; SINGH, A. Deep learning for plant stress phenotyping: trends and future perspectives. **Trends in Plant Science**, v. 23, n. 10, p. 883-898, Oct. 2018. DOI: [10.1016/j.tplants.2018.07.004](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.07.004).
- SINGH, N.; CASADY, W. W.; COSTELLO, T. A. Machine-vision-based nitrogen management models for rice. **Transactions of ASAE**, v. 39, n. 5, p. 1899-1904, 1996. DOI: [10.13031/2013.27668](https://doi.org/10.13031/2013.27668).
- SRIPADA, R. P.; FARRER, D. C.; WEISZ, R.; HEINIGER, R. W.; WHITE, J. G. Aerial color infrared photography to optimize in-season nitrogen fertilizer recommendations in winter wheat. **Agronomy Journal**, v. 99, p. 1424-1435, Nov. 2007. DOI: [10.2134/agronj2006.0258](https://doi.org/10.2134/agronj2006.0258).
- STORY, D.; KACIRA, M.; KUBOTA, C.; AKOGLU, A.; AN, L. Lettuce calcium deficiency detection with machine vision computed plant features in controlled environments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, v. 2, p. 238-243, Nov. 2010. DOI: [10.1016/j.compag.2010.08.010](https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.010).
- SULISTYO, S. B.; WOO, W. L.; DLAY, S. S. Regularized neural networks fusion and genetic algorithm based on-field nitrogen status estimation of wheat plants. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 1, p. 103-114, Feb. 2017. DOI: [10.1109/TII.2016.2628439](https://doi.org/10.1109/TII.2016.2628439).
- SULISTYO, S. B.; WU, D.; WOO, W. L.; DLAY, S. S.; GAO, B. Computational deep intelligence vision sensing for nutrient content estimation in agricultural automation. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 15, n. 3, p. 1243-1257, July 2018. DOI: [10.1109/TASE.2017.2770170](https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2770170).
- SUMMY, K. R.; LITTLE, C. R.; MAZARIEGOS, R. A.; EVERITT, J. H.; DAVIS, M. R.; FRENCH, J. V.; SCOTT JUNIOR, A. W. Detecting stress in glasshouse plants using color infrared imagery: a potential new application for remote sensing. **Subtropical Plant Science**, v. 55, p. 51-58, 2003.
- SUN, Y.; GAO, J.; WANG, K.; SHEN, Z.; CHEN, L. Utilization of machine vision to monitor the dynamic responses of rice leaf morphology and colour to nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies. **Journal of Spectroscopy**, v. 2018, p. 1-13, 2018a. DOI: [10.1155/2018/1469314](https://doi.org/10.1155/2018/1469314).
- SUN, Y.; TONG, C.; HE, S.; WANG, K.; CHEN, L. Identification of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies based on temporal dynamics of leaf morphology and color. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 1-15, Mar. 2018b. DOI: [10.3390/su10030762](https://doi.org/10.3390/su10030762).
- SUN, Y.; ZHU, S.; YANG, X.; WESTON, M. V.; WANG, K.; SHEN, Z.; XU, H.; CHEN, L. Nitrogen diagnosis based on dynamic characteristics of rice leaf image. **Plos One**, v. 13, n. 4, p. 1-15, 2018c. DOI: [10.1371/journal.pone.0196298](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196298).
- SWAIN, K. C.; JAYASURIYA, H. P. W.; SALOKHE, V. M. Suitability of low-altitude remote sensing images for estimating nitrogen treatment variations in rice cropping for precision agriculture adoption. **Journal of Applied**

- Remote Sensing**, v. 1, n. 1, p. 1-11, Jan. 2007. DOI: [10.1117/1.2824287](https://doi.org/10.1117/1.2824287).
- TEWARI, V. K.; ARUDRA, A. K.; KUMAR, S. P.; PANDEY, V.; CHANDEL, N. S. Estimation of plant nitrogen content using digital image processing. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 15, n. 2, p. 78-86, July 2013.
- UDDLING, J.; GELANG-ALFREDSSON, J.; PIIKKI, K.; PLEIJEL, H. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. **Photosynthesis Research**, v. 91, n. 1, p. 37-46, Jan. 2007. DOI: [10.1007/s11120-006-9077-5](https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5).
- VAKILIAN, K. A.; MASSAH, J. A farmer-assistant robot for nitrogen fertilizing management of greenhouse crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 153-163, June 2017. DOI: [10.1016/j.compag.2017.05.012](https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.012).
- VAKILIAN, K. A.; MASSAH, J. Design, Development and performance evaluation of a robot to early detection of nitrogen deficiency in greenhouse cucumber (*Cucumis sativus*) with machine vision. **International Journal of Agriculture: Research and Review**, v. 2, n. 4, p. 448-454, 2012.
- VEGA, F. A.; RAMÍREZ, F. C.; SAIZ, M. P.; ROSÚA, F. O. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. **Biosystems Engineering**, v. 132, p. 19-27, Apr. 2015. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2015.01.008](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.01.008).
- VIGNEAU, N.; ECARNOT, M.; RABATEL, G.; ROUMET, P. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in wheat. **Field Crops Research**, v. 122, n. 1, p. 25-31, Apr. 2011. DOI: [10.1016/j.fcr.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.02.003).
- WANG, Y.; WANG, D.; SHI, P.; OMASA, K. Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. **Plant Methods**, v. 10, p. 1-11, 2014. DOI: [10.1186/1746-4811-10-36](https://doi.org/10.1186/1746-4811-10-36).
- WANG, Y.; WANG, D.; ZHANG, G.; WANG, J. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method. **Field Crops Research**, v. 149, p. 33-39, Aug. 2013. DOI: [10.1016/j.fcr.2013.04.007](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.007).
- WATTS, A. C.; AMBROSIA, V. G.; HINKLEY, E. A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1671-1692, June 2012. DOI: [10.3390/rs4061671](https://doi.org/10.3390/rs4061671).
- WEI, Y.; LI, M.; SIGRIMIS, N. Estimating nitrogen content of cucumber leaves based on NIR spectroscopy. **Sensor Letters**, v. 8, n. 1, p. 145-150, Feb. 2010. DOI: [10.1166/sl.2010.1217](https://doi.org/10.1166/sl.2010.1217).
- WEN, D.; TONGYU, X.; FENGHUA, Y.; CHUNLING, C. Measurement of nitrogen content in rice by inversion of hyperspectral reflectance data from an unmanned aerial vehicle. **Ciência Rural**, v. 48, n. 6, p. 1-10, 2018. DOI: [10.1590/0103-8478cr20180008](https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180008).
- WILLIAMS, J. D.; KITCHEN, N. R.; SCHARF, P. C.; STEVENS, W. E. Within-field nitrogen response in corn related to aerial photograph color. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 291-305, June 2010. DOI: [10.1007/s11119-009-9137-x](https://doi.org/10.1007/s11119-009-9137-x).
- WIWART, M.; FORDOŃSKI, G.; ŻUK-GOŁASZEWSKA, K.; SUCHOWILSKA, E. Early diagnostics of macronutrient deficiencies in three legume species by color image analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 1, p. 125-132, Jan. 2009. DOI: [10.1016/j.compag.2008.08.003](https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.08.003).
- WU, J.; WANG, D.; ROSEN, C. J.; BAUER, M. E. Comparison of petiole nitrate concentrations, SPAD chlorophyll readings, and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies. **Field Crops Research**, v. 101, n. 1, p. 96-103, Feb. 2007. DOI: [10.1016/j.fcr.2006.09.014](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.014).
- XU, G.; ZHANG, F.; SHAH, S. G.; YE, Y.; MAO, H. Use of leaf color images to identify nitrogen and potassium deficient tomatoes. **Pattern Recognition Letters**, v. 32, n. 11, p. 1584-1590, Aug. 2011. DOI: [10.1016/j.patrec.2011.04.020](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2011.04.020).
- YAKUSHEV, V. P.; KANASH, E. V. Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images. **Journal of Agricultural Informatics**, v. 7, n. 1, p. 65-74, 2016. DOI: [10.17700/jai.2016.7.1.268](https://doi.org/10.17700/jai.2016.7.1.268).
- YAO, X.; LUO, W. Foliar image color features for rubber nitrogen deficiency status analysis. **Advanced Materials Research**, v. 488-489, p. 1674-1679, 2012. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.1674](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.1674).
- YU, K. Q.; ZHAO, Y. R.; LI, X. L.; SHAO, Y. N.; LIU, F.; HE, Y. Hyperspectral imaging for mapping of total nitrogen spatial distribution in pepper plant. **Plos One**, v. 9, n. 12, p. 1-19, 2014. DOI: [10.1371/journal.pone.0116205](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116205).
- YUAN, Y.; CHEN, L.; LI, M.; WU, N.; WAN, L.; WANG, S. Diagnosis of nitrogen nutrition of rice based on image processing of visible light. In: IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, 2016, Qingdao. [Proceedings...]. Piscataway: IEEE, 2016. p. 228-232. DOI: [10.1109/FSPMA.2016.7818311](https://doi.org/10.1109/FSPMA.2016.7818311).
- YUZHU, H.; XIAOMEI, W.; SHUYAO, S. Nitrogen determination in pepper (*Capsicum frutescens* L.) plants by color image analysis (RGB). **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 77, p. 17737-17741, Dec. 2011. DOI: [10.5897/AJB11.1974](https://doi.org/10.5897/AJB11.1974).

ZAMAN-ALLAH, M.; VERGARA, O.; ARAUS, J. L.; TAREKEGNE, A.; MAGOROKOSHO, C.; ZARCO-TEJADA, P. J.; HORNERO, A.; HERNÁNDEZ ALBÀ, A.; DAS, B.; CRAUFURD, P.; OLSEN, M.; PRASANNA, B. M.; CAIRNS, J. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. **Plant Methods**, v. 11, n. 1, p. 1-10, Dec. 2015. DOI: [10.1186/s1300701500782](https://doi.org/10.1186/s1300701500782).

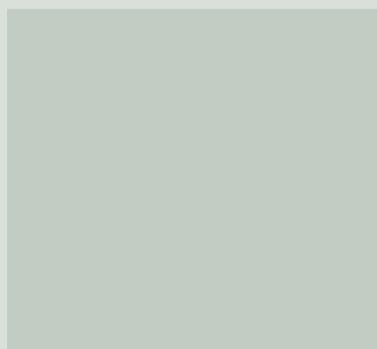
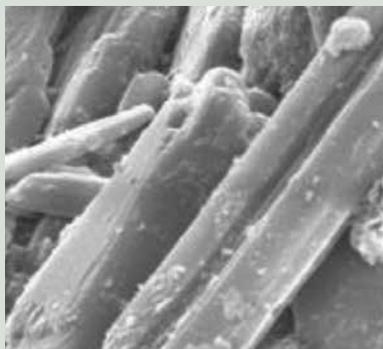
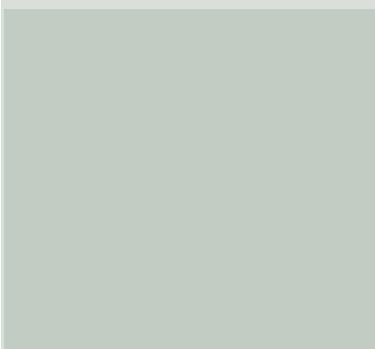
ZERMAS, D.; TENG, D.; STANITSAS, P.; BAZAKOS, M.; KAISER, D.; MORELLAS, V.; MULLA, D.; PAPANIKOLOPOULOS, N. Automation solutions for the evaluation of plant health in corn fields. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015, Hamburg. [Proceedings...]. Piscataway: IEEE, 2015. p. 6521-6527. DOI: [10.1109/IROS.2015.7354309](https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7354309).

ZHENG, H.; CHENG, T.; LI, D.; ZHOU, X.; YAO, X.; TIAN, Y.; CAO, W.; ZHU, Y. Evaluation of RGB, color-infrared and

multispectral images acquired from unmanned aerial systems for the estimation of nitrogen accumulation in rice. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 1-17, June 2018a. DOI: [10.3390/rs10060824](https://doi.org/10.3390/rs10060824).

ZHENG, H.; LI, W.; JIANG, J.; LIU, Y.; CHENG, T.; TIAN, Y.; ZHU, Y.; CAO, W.; ZHANG, Y.; YAO, X. A comparative assessment of different modeling algorithms for estimating leaf nitrogen content in winter wheat using multispectral images from an unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 1-16, Dec. 2018b. DOI: [10.3390/rs10122026](https://doi.org/10.3390/rs10122026).

ZHU, H.; LIU, H.; XU, Y.; GUIJUN, Y. UAV-based hyperspectral analysis and spectral indices constructing for quantitatively monitoring leaf nitrogen content of winter wheat. **Applied Optics**, v. 57, n. 27, p. 7722-7732, Sept. 2018. DOI: [10.1364/AO.57.007722](https://doi.org/10.1364/AO.57.007722).



A obra *Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes* aborda um assunto de fundamental importância para a agroindústria canieira, contribuindo com uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Apresenta inicialmente um cenário socioeconômico da agroindústria canieira, introduz o tema da Agricultura 4.0, convergindo para a agricultura digital. Mostra aspectos técnicos do cultivo de cana-de-açúcar, desde morfologia e fenologia da planta até o uso de microrganismos produtores de crescimento. Discute o manejo, a correção e a fertilidade de solos, o monitoramento nutricional e o uso agrícola de resíduos gerados pela própria agroindústria. Descreve aspectos da agricultura de precisão, inovações e novas tecnologias que possam incrementar a produtividade, transformando os cultivos em clusters mais eficientes.

Portanto, o livro se caracteriza pela sua grandeza de relacionar diversos aspectos do setor sucroenergético brasileiro, apresentando em seu conteúdo técnico uma linguagem que refina o conhecimento científico, mas, ao mesmo tempo, que proporciona uma leitura focada no agricultor e outros autores da produção de cana-de-açúcar.

Embrapa



CGPE 18624