

**Dinâmica da água e distribuição radicular
em solo de Tabuleiros Costeiros sob
integração milho–*Urochloa* spp.**



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Tabuleiros Costeiros
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
179**

**Dinâmica da água e distribuição radicular
em solo de Tabuleiros Costeiros sob
integração milho—*Urochloa* spp.**

*Marcelo Ferreira Fernandes
Ronaldo Souza Resende
Edson Patto Pacheco
Luan Wamberg dos Santos*

***Embrapa Tabuleiros Costeiros
Aracaju, SE
2022***

Embrapa Tabuleiros Costeiros
Av.Gov. Paulo Barreto de Menezes, nº 3250, CEP
49025-040, Aracaju, SE
Fone: (79) 4009-1300
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e edição:

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Viviane Talamini

Secretário-Executivo
Ubiratan Piovezan

Membros
Aldomário Santo Negrisoli Júnior
Ana da Silva Lédo
Angela Puchnick Legat
Elio Cesar Guzzo
Fabio Enrique Torresan
Josué Francisco da Silva Junior
Julio Roberto Araujo de Amorim
Emiliano Fernandes Nassau Costa
Renata da Silva Bomfim Gomes

Supervisão editorial
Aline Gonçalves Moura

Normalização bibliográfica
Josete Cunha Melo

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Beatriz Ferreira da Cruz

Foto da capa
Edson Patto Pacheco

1ª edição
Publicação digital - PDF (2022)

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 Tabuleiros Costeiros

Dinâmica da água e distribuição radicular em solo de Tabuleiros Costeiros sob integração
milho-*Urochloa* spp / Marcelo Ferreira Fernandes... [et al.]. – Aracaju : Embrapa
Tabuleiros Costeiros, 2022.

36 p.: il. (Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1961; 179).

1. Dinâmica da água. 2. Retenção da água no solo. 3. Milho. 4. Absorção radicular.
5. Integração de culturas. 6. Sealba. 7. Solo. 8. Raíz. I. Fernandes, Marcelo Ferreira. II.
Resende, Ronaldo Souza. III. Pacheco, Edson Patto. IV. Santos, Luan Wamberg dos. V.
Série.

CDD (21. ed.)631.43

Sumário

Resumo6

Abstract8

Introdução.....9

Material e Métodos12

Resultados e Discussão19

Conclusões.....34

Agradecimentos.....35

Referências35

Dinâmica da água e distribuição radicular em solo de Tabuleiros Costeiros sob integração milho–*Urochloa* spp.

Marcelo Ferreira Fernandes¹

Ronaldo Souza Resende²

Edson Patto Pacheco³

Luan Wamberg dos Santos⁴

Resumo – Para expressar seu potencial como fronteira agrícola, o Sealba requer a proposição de sistemas de produção de grãos eficientes, sobretudo durante anos de veranicos, que são responsáveis por quebras expressivas na produção. A integração de milho–braquiárias tem-se mostrado eficiente na formação de cobertura morta e na redução dos efeitos dos veranicos na produtividade de milho e soja na região. Este estudo objetivou avaliar o efeito de sistemas integrados de milho e braquiárias sobre a água disponível e o aprofundamento radicular no solo. As variações temporais e em profundidade no solo dessas duas variáveis e da resistência do solo à penetração (Rp) foram monitoradas em sistemas integrados de milho com *Urochloa* spp., sob períodos crescentes de manutenção do pasto, e em rotação com soja. Diferenças na Rp entre os sistemas de produção manifestam-se ao fim do período chuvoso, com valores restritivos ao crescimento radicular observados apenas nos sistemas com rotação com soja. A integração entre milho+*U. decumbens*, introduzida anualmente ou a sua extensão temporal como pasto, promove armazenamento de água e aprofundamento de raízes no solo. A escolha entre *U. decumbens* ou *U. ruziziensis* não impacta a Rp ou o armazenamento de água no perfil do solo no Sealba.

¹ Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE.

² Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE.

³ Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE.

⁴ Engenheiro-agrônomo, doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

Termos para indexação: Integração Lavoura-Pecuária, resistência do solo à penetração, Seabra, *Glycine max*, *Zea mays*.

Water dynamics and root distribution in a coastal tableland soil under maize–*Urochloa* spp. integration.

Abstract – To express its potential as an agricultural frontier, Sealba requires the proposition of efficient grain production systems, especially during dry spells, which are responsible for significant yield losses. The integration of *Urochloa* sp. with maize has been shown to be efficient in the formation of mulch and in reducing the effects of dry spells on maize and soybean yield in the region. The objective of this study was to evaluate the effect of integrated maize and *Urochloa* systems on available soil water and root deepening. Time and soil depth variations of these two variables and soil penetration resistance (Pr) were monitored in maize+*Urochloa* integrated systems under increasing periods of pasture maintenance, and in rotation with soybean. Differences in Pr between production systems were manifested at the end of the rainy season, with values restricting root growth observed only in systems with soybean rotation. The integration between maize+*U. decumbens*, either introduced annually or with its temporal extension as pasture, promotes water storage and root deepening in the soil profile. The choice between *U. decumbens* or *U. ruziziensis* does not affect Pr and water storage in a soil profile in Sealba.

Index terms: Crop-livestock integration, soil resistance to penetration, Sealba, *Glycine max*, *Zea mays*.

Introdução

Uma região agrícola com alto potencial de produção foi delimitada no Nordeste e denominada Sealba, acrônimo para as siglas de Sergipe, Alagoas e Bahia (Procópio et al., 2019). A ocorrência de precipitações pluviais iguais ou superiores a 450 mm, entre abril e setembro, foi o principal critério para definir os limites dessa região (Procópio et al., 2019). Embora em anos climaticamente normais esse volume de chuvas seja suficiente para atender à demanda hídrica das culturas de grãos em sequeiro, a ocorrência

frequente de veranicos tem resultado em quebras expressivas de safras na região. A partir de análises do Índice de precipitação padronizado para monitoramento de secas (McKee et al., 1993; Instituto..., 2022), observou-se que em 2016 e 2018 mais de 80% da área do Sealba foram impactadas por secas extemporâneas severas, extremas ou excepcionais em julho e agosto, meses com elevadas precipitações em anos climaticamente normais. Em 2011, 2012 e 2015, secas extemporâneas moderadas a extremas atingiram cerca de 25% a 40% da área do Sealba entre junho e agosto (Instituto..., 2022).

Cerca de 50% da área do Sealba situa-se na unidade de paisagem dos Tabuleiros Costeiros, onde predominam os Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos desenvolvidos sobre os sedimentos da formação Barreiras. Via de regra, esses solos apresentam, na camada arável, teores muito baixos de matéria orgânica e de argila, com predomínio amplo da mineralogia de argila caulinitica. Também é típica desses solos a ocorrência de camadas subsuperficiais coesas, de origem pedogenética, que limitam a infiltração da água e o crescimento radicular em profundidade no perfil (Jacomine, 1996; Lima Neto et al., 2009), impondo uma restrição hídrica adicional, de natureza edáfica, nesta porção do Sealba. Esse estado de coesão manifesta-se quando o solo está seco, mas desaparece ou torna-se bem menos expressivo quando o solo está úmido (Jacomine, 1996). Em solos cultivados, as camadas coesas podem aparecer após os primeiros 10 a 20 cm da superfície, em decorrência da erosão (Rezende et al., 2002), embora, sob floresta, situam-se a profundidades variáveis, normalmente coincidindo com os horizontes AB e, ou BA, entre cerca de 30 cm a 70 cm de profundidade (Ribeiro, 2001).

O Sealba apresenta potencial como mercado regional para a comercialização de milho e soja para a fabricação de rações, destinadas a atender às demandas da avicultura e de importantes bacias leiteiras do Nordeste, como as de Nossa Senhora da Glória (SE), Batalha (AL) e Garanhuns (PE). O polo tradicional produtor de milho da região encontra-se no semiárido (agreste e sertão) do sudoeste de Sergipe e nordeste da Bahia e apresenta precipitação média entre 450 a 700 mm de abril a setembro. Em função do curto período chuvoso na região, sistemas baseados no consórcio entre culturas anuais e pastagens, como o Barreirão (Oliveira et al., 1996) e o Santa Fé (Kluthcouski et al., 2000), são alternativas para a produção de cobertura morta e para o estabelecimento de culturas condicionadoras

do solo no Sealba. Essas estratégias, que requerem avaliação e adaptação local, podem contribuir ainda para a solução da escassez de alimentos para a pecuária na entressafra.

Nessa condição, uma alternativa viável é a inclusão de gramíneas forrageiras em consórcio com o milho, com o duplo propósito de produzir palha para cobertura morta do solo e massa verde suplementar para a alimentação animal. Esse consórcio pode ser estabelecido por meio da semeadura simultânea da cultura anual e da forrageira, como no caso do milho e braquiárias, uma vez que a pastagem apresenta complementariedade temporal de crescimento em relação ao milho, exercendo pouca ou nenhuma competição com a cultura (Ikeda, 2010). Após a colheita do milho, tem-se a pastagem formada para o pastejo direto e, ou, para cobertura morta para o ciclo seguinte.

Resultados obtidos após oito anos de implantação de um experimento em Nossa Senhora das Dores, SE, indicaram um efeito benéfico da cobertura morta de braquiária, semeada simultaneamente com o milho no ano anterior, sobre os rendimentos de milho e de soja cultivados em anos subsequentes nos quais ocorreram veranicos (Pacheco et al., 2020). Em 2018, ano que apresentou déficit hídrico acentuado em pelo menos uma fase de desenvolvimento das lavouras, os rendimentos de milho nas parcelas com formação prévia de cobertura morta de braquiárias foram de 7.221 kg/ha contra 5.435 kg/ha das parcelas sem cobertura. O rendimento médio do milho com e sem consórcio com braquiária, considerados os oito anos de experimento, foram respectivamente de 6.825 kg/ha e 6.796 kg/ha.

Avaliações de produção de cobertura morta sobre o solo (Pacheco; Barros, 2014) realizadas após 105 dias da colheita do milho indicaram que 100% da superfície do solo permaneceu coberta com resíduos vegetais em sistemas de consórcio entre milho e braquiária. Embora a introdução anual de braquiárias em semeadura simultânea com o milho tenha resultado em elevada produção de cobertura morta e economia de água para as culturas sucessoras, ela mostra-se pouco eficiente em alterar a estrutura do solo na região. Resultados obtidos em solo com camada coesa no agreste de Sergipe indicaram que este manejo não diferiu do cultivo não consorciado do milho em termos de teor de C orgânico, diâmetro médio (DMA) e estabilidade de agregados (EA) do solo, após sete anos de implantação dos sistemas (Thimothée, 2019).

Em contraste, mudanças expressivas foram observadas em variáveis físicas de um solo de tabuleiros costeiros sob parcelas experimentais estabelecidas com *B. decumbens* e mantidas, sem manejo adicional dessa pastagem, por três anos consecutivos. Em relação aos tratamentos sob monocultivo de milho, as áreas com braquiária apresentaram incrementos de 26% na água disponível no solo, 16% no DMA, 12% na EA e de 68% na condutividade hidráulica saturada (Fernandes et al., 2010; Fernandes et al., 2011).

No sistema de introdução e dessecamento com herbicida anuais da braquiária, esta dispõe de um tempo reduzido de disponibilidade concomitante de água e luminosidade para permitir o crescimento profundo de suas raízes. Ao contrário, a permanência da braquiária não consorciada, por um ou mais anos após sua implantação com o milho, encontraria, durante os períodos chuvosos, a combinação entre disponibilidade de água e de luz e de friabilidade da camada coesa, quando esta apresenta menor resistência física à penetração de raízes (Jacomine, 1996). Nessa condição, o crescimento radicular das braquiárias através da camada coesa poderá resultar na formação de bioporos, que se constituem em rotas preferenciais de percolação de água e aprofundamento de raízes das culturas (Galdos et al., 2019), contribuindo para o aumento do volume de água disponível no solo e para a mitigação dos efeitos dos veranicos sobre o rendimento dos grãos.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes sistemas de produção de grãos, os quais incluem componentes de integração entre milho e *Urochloa* spp. e rotação com soja, sobre a resistência do solo à penetração (R_p), a umidade do solo e a distribuição de raízes em um perfil de solo com camada coesa dos tabuleiros costeiros do Sealba. Especificamente, avaliaram-se os efeitos (i) da manutenção estendida de pasto de *U. decumbens* após sua introdução com o milho sobre as três variáveis, (ii) da introdução da soja em rotação com a integração de milho e *U. decumbens* e (iii) da escolha da espécie de *Urochloa* para integração milho-pasto sobre a R_p e a umidade do solo.

Material e Métodos

As análises foram realizadas em ensaio conduzido no Campo Experimental Jorge do Prado Sobral da Embrapa Tabuleiros Costeiros, localizado no município de Nossa Senhora das Dores, SE, localizado nas coordenadas geográficas 10°27'S e 37°11'O, a 209 m de altitude. O solo da área experimental é um Latossolo Amarelo distrocoeso, textura média/argilosa, sob relevo plano, e o clima classificado como tropical com inverno chuvoso, do tipo As, de acordo com Köppen, com precipitação média anual de 1.150 mm e temperatura média anual de 26 °C.

O experimento foi implantado em 2012 em delineamento de blocos casualizados (DBC), com 14 tratamentos e quatro repetições, em parcelas de 10 m x 40 m. Para o alcance do objetivo do presente estudo, apenas seis tratamentos foram analisados, conforme apresentado na Tabela 1. Os tratamentos de milho em monocultivo (M), consórcio entre milho e *Urochloa decumbens*, introduzido anualmente (M+Ud), e consórcio entre milho e *U. decumbens* em rotação com soja (M+Ud/S) foram estabelecidos em 2012 e mantidos sem alterações até o presente. Os tratamentos com as sucessões de milho integrado com *U. decumbens*, com manutenção do pasto formado por um ou dois anos consecutivos, e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente) foram estabelecidos em 2018. Um tratamento equivalente a M+Ud/Ud/Ud/S, porém com *Urochloa ruziziensis* (M+Ur/Ur/Ur/S), também foi iniciado em 2018 e incluído nas análises, para comparação das duas espécies no sistema de pasto estendido por dois anos. Previamente a 2018, as parcelas atuais com M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S foram conduzidas com as rotações M/M/M+Ud/Ud/S e M/M/M+Ur/Ur/S, respectivamente, entre 2012 e 2016, e com integração entre milho e as pastagens de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás ou *Panicum maximum* cv. BRS Tamani, respectivamente, em 2017. As parcelas atuais sob M+Ud/Ud/S foram cultivadas com a rotação M/M+Ud/M/M+Ud/M, entre 2012 e 2016, e com integração entre milho e *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás, em 2017. Pelo fato de as rotações empregadas antes de 2018 e as estabelecidas nos tratamentos atuais serem similares, bem como de as análises deste estudo terem sido realizadas no terceiro ano após a implantação do formato atual do experimento, eventuais efeitos devidos ao histórico anterior das rotações foram considerados desprezíveis.

A semeadura das culturas nas parcelas avaliadas foi feita pelo sistema plantio direto, cerca de duas semanas após a dessecação das plantas infestantes e das braquiárias com glifosato. Os plantios do milho ocorreram sempre entre a última semana de maio a segunda semana de junho, e a colheita, cerca de 150 dias após o plantio, entre outubro e novembro. Nas semeaduras do milho foram utilizados, ao longo dos anos, diferentes híbridos comerciais, com transgenia RR e Bt, na densidade de 70.000 sementes por hectare. Nas parcelas de consórcio com *U. decumbens*, o milho e a pastagem foram semeados concomitantemente e na mesma linha, sendo as sementes da pastagem misturadas com o fertilizante fosfatado e depositadas no sulco abaixo das sementes de milho. No manejo da adubação foram aplicados, em média, 200, 100 e 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. A adubação nitrogenada foi realizada em cobertura no estágio fenológico V4 do milho. Todas as operações desde a semeadura até a colheita foram realizadas de forma mecanizada.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos utilizados para avaliação.

Tratamento (Plantio Direto)	Identificação dos tratamentos	Sequência (2018/19/20/21/22) ^{1/}
Milho em monocultivo	M	M/M/M/M/M
Milho + <i>U. decumbens</i>	M+Ud	M+Ud/M+Ud/ M+Ud /M+Ud/M+Ud
Milho + <i>U. decumbens</i> / Soja	M+Ud/S	S/M+Ud/ S /M+Ud/S
Milho + <i>U. decumbens</i> / <i>U. decumbens</i> / Soja	M+Ud/Ud/S	M+Ud/Ud/ S /M+Ud/Ud
Milho + <i>U. decumbens</i> / <i>U. decumbens</i> / <i>U. decumbens</i> / Soja	M+Ud/Ud/Ud/S	M+Ud/Ud/ Ud /S/M+Ud
Milho + <i>U. ruziziensis</i> / <i>U. ruziziensis</i> / <i>U. ruziziensis</i> / Soja	M+Ur/Ur/Ur/S	M+Ur/Ur/ Ur /S/M+Ur

^{1/} As siglas de tratamentos em negrito correspondem a fase das culturas em que foram realizadas as análises de resistência do solo à penetração e umidade do solo em 2020.

A Figura 1 apresenta fotografias, obtidas em 6 de junho de 2019, com detalhes da cobertura morta e uma visão geral dos cultivos de milho sob os tratamentos M, M+Ud e M+Ud/S. As fotografias de tratamento de monocultivo de milho em plantio convencional, não incluído neste estudo que contemplou apenas cultivos sob sistema de plantio direto (SPD), foram apresentadas para ilustrar o efeito deletério da incorporação dos resíduos ao solo pelo plantio convencional sobre a tolerância do milho a estiagens durante o cultivo.





Figura 1. Cobertura morta do solo pelos resíduos culturais nos sistemas de monocultura de milho (A), milho + *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (B), milho + *U. decumbens* em rotação com soja (C), todos sob sistema plantio direto (SPD), e monocultura do milho (D) sob plantio convencional (PC), e respectivas visões gerais dos cultivos de milho (E-H). As fotos foram obtidas em 6 de junho de 2019. O tratamento de milho em monocultivo em PC não foi incluído neste estudo, que contemplou apenas cultivos sob SPD. As fotografias D e H foram inseridas para ilustrar o efeito deletério da incorporação dos resíduos no PC sobre a tolerância à ocorrência de estiagens.

Avaliações de resistência do solo à penetração (R_p) e umidade no solo foram feitas em 2020, conforme detalhamento a seguir, nos tratamentos M, M+Ud, M+Ud/S, M+Ud/Ud/S, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S. Embora os esquemas rotacionais dos dois últimos tratamentos incluam a soja, as avaliações de R_p e umidade foram realizadas antes da introdução da cultura, portanto, sem sua influência nesses sistemas de produção.

O monitoramento da resistência do solo à penetração foi realizado em 23 de julho, 6 de agosto e 25 de agosto, período correspondente ao início da transição entre os períodos chuvoso e seco (Figura 2). As leituras foram realizadas por meio de penetrógrafo eletrônico entre as profundidades de 0 cm e 60 cm, com registro dos valores de resistência a cada centímetro. As médias de leituras em quadruplicatas, por parcela e data, foram utilizadas nas análises estatísticas. Leituras em datas posteriores foram impossibilitadas em função da elevada resistência do solo à penetração do equipamento utilizado.

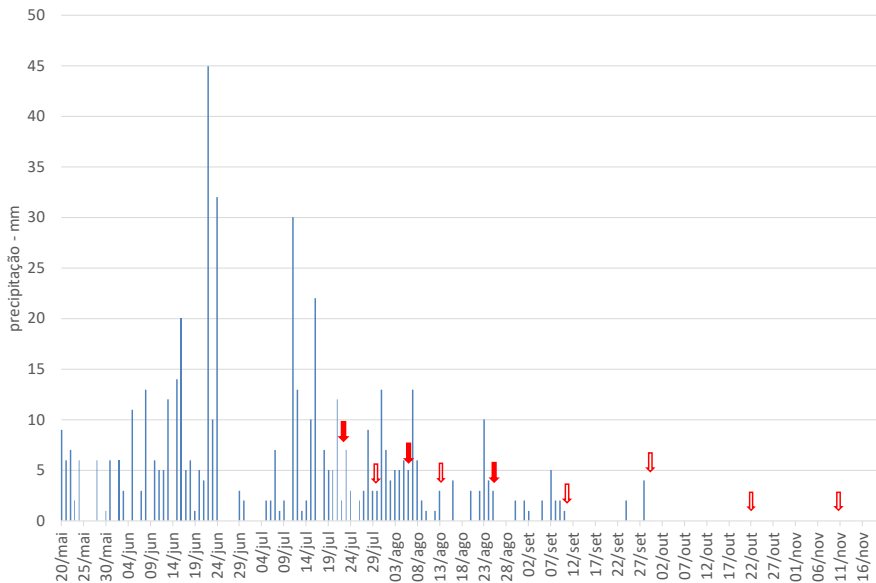


Figura 2. Precipitação pluvial no período de condução dos cultivos em 2022 no Campo Experimental Jorge Sobral, em Nossa Senhora das Dores, SE. As setas indicam as nove datas de avaliação de umidade do solo, ao passo que as setas cheias indicam as três datas em que medições de resistência do solo à penetração (R_p) foram realizadas concomitantemente com as de umidade do solo.

Os teores de umidade do solo foram determinados pela técnica da reflectometria no domínio da frequência (FDR), por meio de leitura de sonda PR2. Dois tubos de acesso para a sonda FDR foram instalados por parcela, sendo os valores médios entre os dois pontos de leituras utilizados para representar a umidade em cada parcela. As leituras foram obtidas nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm e 100 cm, nas datas de 23 e 30 julho, 6, 13 e 25 de agosto, 10 e 28 de setembro, 22 de outubro e 11 de novembro, exceto para as parcelas com os tratamentos M+Ud/S e M+Ud/Ud/S, cuja última leitura foi realizada em 28 de setembro (Figura 2). Nestas parcelas, foi necessária a remoção dos tubos de acesso previamente à colheita mecanizada da soja realizada em 6 de outubro.

A determinação da distribuição radicular em profundidade no perfil do solo foi realizada nos tratamentos M, M+Ud, M+Ud/S e M+Ud/Ud/Ud/S, em 8 de maio de 2022, antecipadamente aos plantios da safra deste ano, quando as vegetações dominantes foram constituídas por plantas espontâneas para M, e pasto de *U. decumbens* para os demais tratamentos. Para essa avaliação, utilizou-se uma sonda de amostragem de solo, com diâmetro interno de 1,7 cm, para a coleta de oito amostras de solo por parcela e em cada uma das seguintes profundidades do perfil: 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Para a separação das raízes, os oito cilindros de solo de cada amostra foram dispersados em 2L de solução de NaOH 0,1N, durante a noite, após agitação manual inicial. A suspensão de solo disperso e raízes foi vertida em peneira com tela de nylon com abertura de 1 mm, após fragmentação manual dos agregados ainda remanescentes, para a coleta das raízes e da fração de areia grossa. A separação das raízes foi realizada por flutuação em água e coleta complementar com pinça na fração areia. As raízes foram secadas a 65 °C por 72 h e pesadas em balança analítica. Os resultados foram expressos em t ha⁻¹ de massa seca de raízes, utilizando-se a conversão entre os volumes das amostras coletadas e o de um hectare, para cada uma das camadas amostradas.

Modelos de regressão multivariada em árvore (Breiman et al., 1984) foram utilizados para identificar padrões distintos de variação temporal e em profundidade da resistência do solo à penetração e da umidade do perfil do solo em função dos tratamentos. Para resistência do solo à penetração (Rp), as 60 profundidades medidas foram analisadas conjuntamente como uma multivariável resposta e as datas de avaliação e os tratamentos, como

variáveis explanatórias do modelo. O mesmo procedimento foi utilizado para a análise multivariada dos dados de umidade, considerando-se as seis profundidades conjuntamente. Essas análises foram executadas utilizando-se a biblioteca *TreeSplus*, implementada no *software* estatístico S-Plus 2000. Esse processo analítico seleciona, sequencialmente, cada um dos fatores que melhor explica a variabilidade dos dados da multivariável resposta, gerando a cada seleção, uma bifurcação contendo dois subconjuntos de amostras, os quais apresentam a maior diferença entre-grupos e a maior homogeneidade intra-grupos, dentre todos os fatores e combinações de suas respectivas classes. O fator associado a esta bifurcação e suas respectivas classes de separação são indicados a cada bifurcação. Cada novo subgrupo é avaliado sequencial e individualmente quanto aos fatores associados à variabilidade na multivariável resposta entre as amostras existente em cada um deles. Para a seleção do tamanho da árvore (número de nós terminais) a ser analisada, utilizou-se a árvore modal com o erro mínimo de predição, de acordo com o procedimento de validações cruzadas. Para as análises de ambas as multivariáveis respostas, os ajustes dos parâmetros da biblioteca *TreeSplus* foram realizados conforme a seguir: “*Split measure: squared deviation*”, “*cross-validation criteria: multiple CVs: 20*”, “*CV groups: 10-fold*”, “*min group size: 3*” e “*select CP: 0,001*”.

Tratamentos e datas com padrões indistinguíveis de variação temporal e em profundidade quanto à Rp e à umidade do solo, de acordo com a análise de regressão multivariada em árvore, foram agrupados e suas médias representadas graficamente em função das profundidades avaliadas. Mapas de contorno bidimensionais foram elaborados para representação das variações de Rp e de umidade do solo em função da profundidade (eixo vertical) e data de avaliação (eixo horizontal).

A análise dos dados de distribuição de raízes em profundidade foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA), em modelo de parcelas subdivididas, considerando-se os tratamentos como parcelas e as profundidades como subparcelas. Quando a interação entre esses fatores foi significativa ($p < 0,05$), compararam-se as médias de tratamentos dentro de cada profundidade por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados de Discussão

Resistência mecânica à penetração no perfil do solo

Seis padrões distintos de resistência do solo à penetração (R_p) foram observados, de acordo com o modelo multivariado de regressão em árvore empregado (Figura 3). Esse modelo explicou 42% da variabilidade dos dados de R_p obtidos no período, sendo a maior parte dessa variabilidade explicada associada à data de amostragem (54%) e o remanescente aos tratamentos (46%).

De acordo com o modelo, dois padrões bastante contrastantes estão associados à diferenciação entre as duas primeiras datas (23 de julho e 6 de agosto) e a última (25 de agosto), a qual representou 46% da variabilidade explicada. Adicionalmente, as duas primeiras datas (23 de julho e 6 de agosto) diferiram entre si quanto ao padrão de variação de R_p , sendo essa diferenciação associada a 8% da variabilidade explicada. De acordo com a Figura 4, os padrões de R_p entre as duas primeiras datas diferenciam-se entre cerca de 10 cm a 40 cm de profundidade, com a segunda data apresentando menores valores em toda essa faixa do perfil. A ocorrência de chuvas entre as duas primeiras datas resultou em maior umedecimento da parte superior do perfil, podendo ter contribuído para a redução da R_p nessa camada na segunda data (6 de agosto) (Figura 2). As duas primeiras datas apresentaram valores crescentes com a profundidade, com máximos de R_p variando de 1.500 kPa a 1.750 kPa, entre as profundidades de 50 cm a 60 cm. Embora a R_p tenha aumentado com a profundidade, em nenhuma das duas primeiras datas os valores atingiram o limite crítico de 2.000 kPa de resistência (Figura 4), considerado limitante ao crescimento radicular (Ehlers et al., 1983). Nenhuma outra diferenciação de padrões de R_p foi observada para as duas primeiras datas, indicando que todos os tratamentos comportaram-se de modo semelhante no período mais úmido (Figuras 3 e 5).

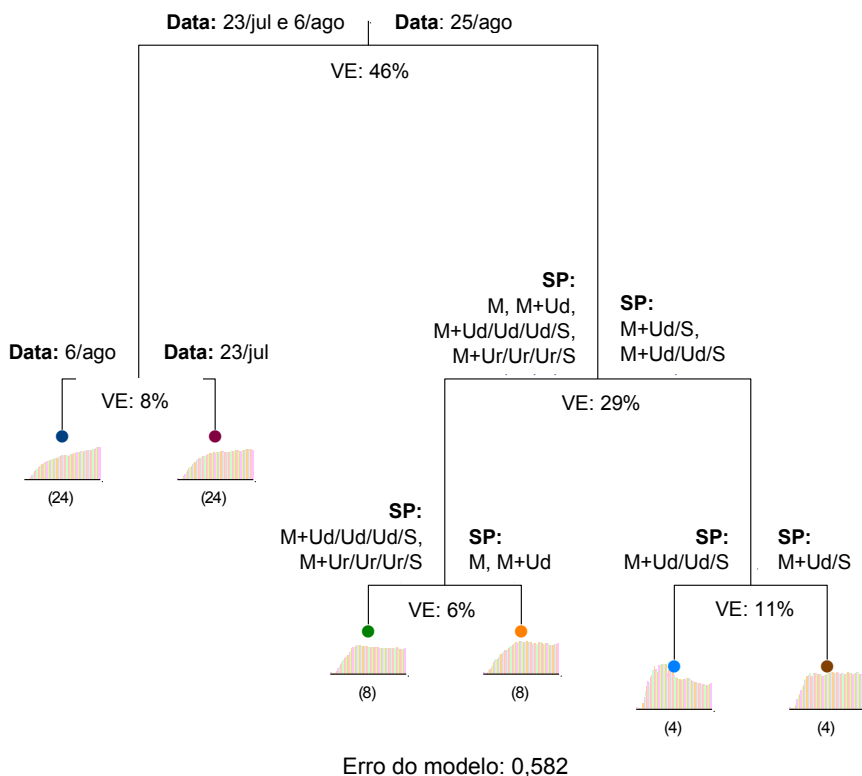


Figura 3. Padrões de resistência do solo à penetração (R_p), entre as profundidades do perfil de 0 cm e 60 cm, de acordo com as variáveis explanatórias data de avaliação (Data) e sistemas de produção (SP), segundo um modelo de regressão multivariada em árvore. As datas de amostragem foram 23/jul, 6/ago e 25/ago, e os sistemas de produção avaliados são listados a seguir: milho em monocultivo (M), milho integrado a *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (M+Ud), milho integrado a *U. decumbens* com sucessão com os pastos formados por mais um ou dois anos e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente), M+Ud em rotação com soja (M+Ud/S) e M+Ur/Ur/Ur/S, onde Ur designa *Urochloa ruziziensis*. Note-se que as análises foram conduzidas de julho a agosto de 2020, quando os tratamentos M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S ainda não haviam sido submetidos ao plantio de soja previsto no esquema rotacional. As variáveis explanatórias e suas respectivas classes selecionadas pelo modelo como as de maior contribuição para explicar a variabilidade dos dados são apresentadas de ambos os lados de cada bifurcação. Abaixo de cada bifurcação, apresentam-se as percentagens da variabilidade explicada (VE) a cada partição. A altura das barras nos gráficos abaixo dos seis nós terminais indicam a variação dos valores de R_p em profundidade. Números entre parênteses abaixo dos nós terminais denotam o número de observações contidas em cada nó.

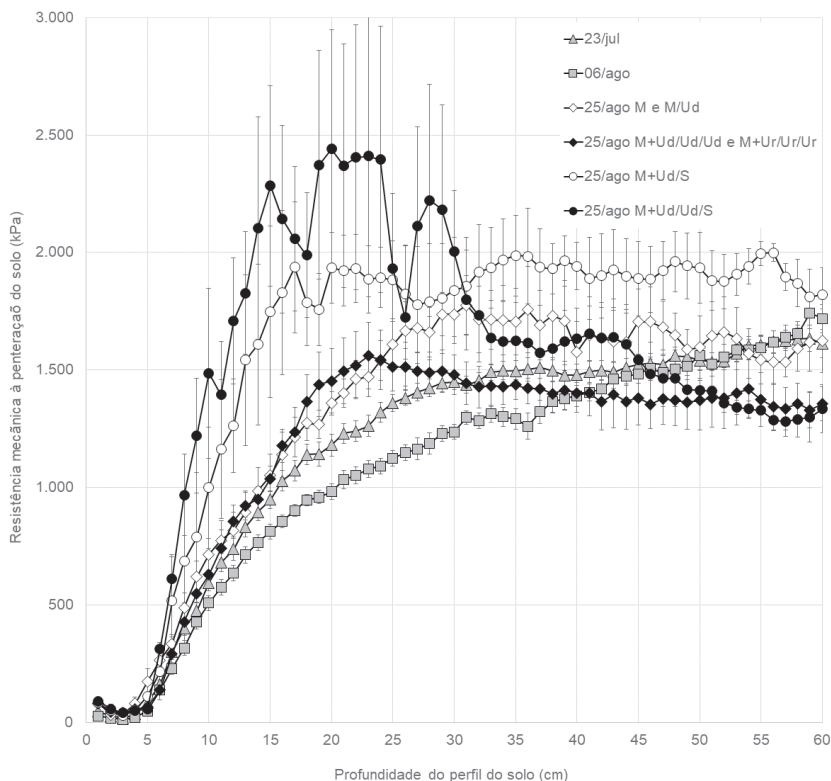


Figura 4. Padrões de resistência do solo à penetração (R_p), entre as profundidades do perfil de 0 cm e 60 cm, em função de datas de amostragem (23/jul, 6/ago e 25/ago) e dos seguintes sistemas de produção de grãos: milho em monocultivo (M), milho integrado a *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (M+Ud), milho integrado a *U. decumbens* com sucessão com os pastos formados por mais um ou dois anos e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente), M+Ud em rotação com soja (M+Ud/S) e M+Ur/Ur/Ur/S, onde Ur designa *Urochloa ruziziensis*. Note-se que as análises foram conduzidas de julho a agosto de 2020, quando os tratamentos M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S ainda não haviam sido submetidos ao plantio de soja previsto no esquema rotacional. Os seis padrões de variação apresentados foram definidos pela análise multivariada de regressão/classificação em árvore (Figura 3). Barras de erro expressam ± 1 Erro Padrão.

Já na data de 25 de agosto (Figura 3), uma forte diferenciação, representando 29% da variabilidade explicada dos dados, foi observada nos padrões de R_p em função da introdução (M+Ud/S e M+Ud/Ud/S) ou não (M, M+Ud, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S) da soja em rotação nos sistemas de produção. Note-se que, embora a introdução da soja estivesse prevista no esquema rotacional dos tratamentos M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S, as análises de R_p , conduzidas em 2020, antecederam esta introdução. Em comum, na última data avaliada, os dois tratamentos de rotação com soja apresentaram um aumento mais abrupto de R_p que os demais em superfície, entre cerca de 7 cm a 26 cm de profundidade (Figuras 4 e 5). Adicionalmente, uma diferenciação foi observada entre os padrões desses dois tratamentos, com representação de 11% da variabilidade explicada. Essa diferenciação pode ser caracterizada por maiores valores em M+Ud/Ud/S em quase todos os pontos da faixa entre cerca de 10 cm e 30 cm de profundidade. Entre 30 cm e 60 cm de profundidade observou-se uma inversão desse padrão, com queda abrupta da R_p em M+Ud/Ud/S próximo aos 30 cm, seguida de estabilização e nova queda, mais lenta, entre os 40 cm e 60 cm de profundidade, ao passo que em M+Ud/S há uma tendência de estabilização da R_p logo abaixo de 30 cm de profundidade, com valores médios de 1.900 kPa. Uma comparação direta entre os tratamentos M+Ud e M+Ud/S permite avaliar o efeito da introdução da soja em rotação com o sistema de integração anual do milho com o pasto. Neste caso, observou-se que a introdução da soja resultou em um incremento da R_p em todas as profundidades, com exceção de uma estreita faixa de 25 cm a 30 cm, bem como um incremento mais abrupto dessa variável em superfície (Figura 5). Esse incremento da R_p deve ser de pouco impacto para a produtividade de soja na safra corrente, uma vez que é expresso apenas na fase final do ciclo da cultura na região. No entanto, o impacto deste sistema sobre a produtividade das culturas em rotação, no médio e longo prazo, necessita ser determinado.

Por fim, os padrões de R_p dos sistemas M e M+Ud diferem dos sistemas com maior extensão continuada sob pastos de *U. decumbens* ou *U. ruziziensis*, sem introdução da soja. Essa diferenciação representou 6% da variabilidade explicada pelo modelo e foi restrita à faixa dos 25 cm aos 60 cm de profundidade, na qual M e M+Ud apresentaram maiores valores médios de R_p (1.650 kPa) do que M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S (1.400 kPa). Deste modo, observou-se que após nove anos de diferenciação

entre os tratamentos, a introdução anual de *U. decumbens* em integração com o milho não promoveu melhorias na Rp em relação ao monocultivo do milho. No entanto, a manutenção dessa gramínea como pasto nos dois anos seguintes à introdução com o milho, promoveu, na época de início de secamento do solo, uma melhoria na Rp ao longo de todo o perfil do solo (Figura 5). É interessante notar que a manutenção de menores valores de Rp em profundidade sob o pasto estendido poderá contribuir para melhorias adicionais promovidas pelas raízes no perfil, uma vez que propicia maior tempo de friabilidade das camadas mais profundas e, conseqüentemente, maior favorabilidade ao crescimento continuado das raízes até a substituição do pasto por novo ciclo de cultivo de grãos. Nenhuma diferenciação adicional nos padrões de Rp foi observada entre os tratamentos na terceira data, indicando que essa variável apresenta comportamento similar entre M e M+Ud e também entre *U. decumbens* e *U. ruziziensis* no manejo com extensão de pasto por dois anos após introdução em integração com o milho.

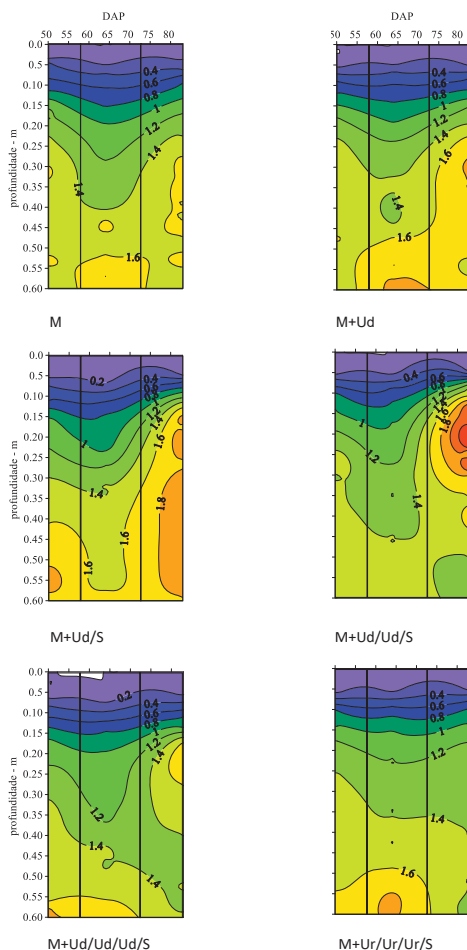


Figura 5. Variação da resistência do solo à penetração (R_p) em profundidade no perfil (eixo vertical) e em relação ao número de dias após plantio (DAP) (eixo horizontal), sob os diferentes sistemas de produção avaliados: milho em monocultivo (M), milho integrado a *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (M+Ud), M+Ud em rotação com soja (M+Ud/S), M+Ud sucedido pelos pastos formados por mais um ou dois anos e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente), e M+Ur/Ur/Ur/S, onde Ur designa *Urochloa ruziziensis*. As análises foram conduzidas de julho a agosto de 2020, quando os tratamentos M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S ainda não haviam sido submetidos ao plantio de soja previsto no esquema rotacional. Os valores de R_p são apresentados nas isolíneas, em unidade de kPa. As linhas verticais sobrepondo as figuras correspondem às datas contrastantes em termos de padrão de variação da R_p no perfil, determinados pela análise de regressão multivariada em árvore (Figura 3).

Variação da umidade no perfil do solo

O modelo com nove nós terminais, selecionado pela análise de regressão multivariada em árvore, representou 45% da variabilidade dos dados de umidade medidos nos diferentes sistemas de produção, em seis profundidades e nove datas de avaliação (Figura 6). Os fatores data e sistemas de produção contribuíram com 62% e 38%, respectivamente, da porção explicada da variabilidade dos dados. De acordo com o modelo, uma primeira bifurcação, representando 53% da porção explicada da variabilidade, indicou dois padrões temporais distintos de variação de umidade em profundidade no perfil, um incluindo as observações das cinco primeiras avaliações e outro as das quatro últimas, em consonância com o padrão esperado de secamento do perfil no período analisado, especialmente em suas camadas mais superficiais (Figura 6). Considerando-se as cinco primeiras datas, de 23 de julho a 25 de agosto, dois padrões distintos de variação de umidade foram observados entre sistemas de produção, representando 12,5% da variabilidade explicada: um constituído apenas pelo sistema de M+Ud e outro pelo conjunto dos demais sistemas (Figura 6). O padrão de M+Ud distinguiu-se expressivamente daquele dos demais sistemas de produção por apresentar maior umidade em todas as profundidades, exceto a 100 cm, e alta homogeneidade de distribuição de água em todo o perfil, com umidades variando entre 27% e 33% v/v (Figura 7). Nessas cinco primeiras datas, os demais sistemas foram adicionalmente separados, sendo que essa separação foi associada a 9,3% da variabilidade explicada dos dados de umidade e indicou um padrão de variação para os sistemas de produção M+Ud/S, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S distinto do observado para M e M+Ud/Ud/S. O primeiro padrão caracterizou-se por uma distribuição homogênea de água nos primeiros 60 cm do perfil do solo, com valores de umidade variando entre 20,7% e 23,3%, e por um aumento expressivo de umidade entre 60 cm e 100 cm, onde alcançou 32,1% (Figura 7). Diferentemente deste padrão, M e M+Ud/Ud/S apresentaram redução da umidade em profundidades intermediárias do perfil, com recuperação a valores próximos aos observados na superfície com o incremento da profundidade. Apesar dessa similaridade no padrão geral de variação da umidade entre M e M+Ud/Ud/S no período, o modelo indicou uma diferenciação entre eles, a qual representou 3,2% da variabilidade dos dados. Embora menos expressiva, essa diferenciação foi caracterizada pelo fato de M+Ud/Ud/S ter apresentado menor profundidade de início de secamento

(20 cm), menor amplitude de secamento (20 cm a 40 cm), menor decréscimo da umidade (26,2% a 22,1% v/v) e maior umidade a 100 cm (25,4% v/v) do que o sistema M, cujos valores respectivos foram de 30 cm, 30 cm a 60 cm, 25,0% a 17,8% e 23,3%. É interessante observar que a extensão de pasto por mais um ano previamente ao plantio da soja (M+Ud/Ud/S), comparativamente à rotação anual com milho e *U. decumbens* (M+Ud/S), embora tenha reduzido a água em profundidade (>60 cm), resultou em maiores umidades na superfície. Por exemplo, aos 80 DAP, correspondente ao final do primeiro período (23 de julho a 25 de agosto), a umidade na camada de 0 cm a 10 cm de solo em M+Ud/S foi de 17%, ao passo que essa mesma umidade só foi atingida aos 100 DAP em M+Ud/Ud/S, o que pode ser relevante para a redução de frustração de safras da cultura em anos com veranico (Pacheco et al., 2020).

Em resumo, nesse período de maior umidade, ao contrário do monocultivo de milho, a introdução de *Urochloa* spp. no sistema de produção desta cultura, quer seja anualmente ou em pasto estendido por dois anos, apresentou-se eficiente em promover a distribuição de água até camadas mais profundas do perfil do solo. No entanto, ao contrário de M+Ud, os tratamentos com pasto estendido apresentam menor umidade em superfície, o que pode estar associado à maior transpiração das braquiárias, em uma condição de pasto renovado há dois anos e já bem estabelecido. Conforme resultados obtidos na mesma área em 2022, discutidos adiante, o aumento de raízes na profundidade de 20-40 cm em M+Ud/Ud/Ud/S, comparativamente a M+Ud, também corrobora com a maior velocidade de secamento nessa camada no sistema de pasto estendido. Adicionalmente, a melhor conservação de água em superfície no sistema M+Ud também pode dever-se à cobertura morta proveniente do dessecamento do pasto formado no ano anterior e palhada de milho remanescente da última safra.

Com relação aos períodos mais secos, correspondentes às últimas quatro datas de avaliação, uma diferenciação nos padrões de umidade no perfil do solo foi observada entre as datas intermediárias de 10 e 28 de setembro e as finais de 22 de outubro e 11 de novembro, a qual correspondeu a 9,3% da variabilidade explicada e esteve em consonância com a expectativa de secamento associada ao avançar do período de seca na região (Figura 6). Nas datas intermediárias, o padrão apresentado pelos sistemas M+Ud/S, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S diferiu do observado para M, M/Ud e M+Ud/

Ud/S, sendo essa diferenciação associada a 5,6% da variabilidade explicada dos dados. Observa-se que o conjunto dos sistemas M+Ud/S, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S apresentou uma situação intermediária aos demais sistemas nos primeiros 40 cm de profundidade, sendo a diferenciação entre este conjunto de tratamentos e os demais caracterizada especialmente pelo forte e contínuo incremento de umidade entre os 40 cm e os 100 cm de profundidade, alcançando um valor de 33,4%, similar aos observados sob alguns sistemas no período mais úmido analisado (Figura 7). Adicionalmente, os padrões de distribuição de umidade no perfil nas datas intermediárias foram diferenciados entre M e os sistemas M+Ud e M+Ud/Ud/S, sendo essa diferenciação correspondente a 3,7% da variabilidade explicada pelo modelo. Em toda a faixa de profundidades analisadas, M apresenta menores valores que M/Ud e M+Ud/Ud/S, sendo estas mais expressivas dos 40 cm aos 100 cm. O sistema M apresenta também, nos mesmos moldes observados nas épocas mais úmidas, um secamento contínuo e expressivo na região entre 30 cm e 60 cm, com aumento dos valores abaixo dessa camada do solo. Diferentemente, M+Ud e M+Ud/Ud/S apresentaram uma variação crescente de umidade em profundidade, sobretudo entre 60 cm e 100 cm. Em resumo, no período de transição entre as chuvas e o período seco, do mesmo modo que observado para o período anterior, M+Ud apresentou-se superior em termos de conservação de água em todo o perfil do solo, comparativamente a M. Essa maior conservação de água do solo no sistema integrado de milho e *Urochloa* spp. contribui para as menores frustrações de safra observados neste sistema, comparativamente ao monocultivo de milho, em anos com veranicos (Pacheco et al., 2020). Além disto, nesse período intermediário, M+Ud e os tratamentos com pasto estendido por dois anos continuaram a se destacar em termos de volumes de água em profundidade (60–100 cm). A extensão do pasto de *U. decumbens* por mais um ano previamente ao cultivo da soja (M+Ud/Ud/S) também contribuiu para maior conservação de umidade nos primeiros 60 cm, comparativamente a M+Ud/S, conforme já observado, de 0-30 cm, para o período mais chuvoso analisado neste estudo.

Nas duas datas finais (22 de outubro e 11 de novembro), correspondentes ao período mais seco, dois padrões de variação de umidade são observados, sendo um para M e outro para os demais sistemas (M+Ud, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S). M diferiu dos demais sistemas especialmente por apresentar valor menor de umidade a 20 cm (12,7% v/v comparativamente a 16% v/v

nos demais sistemas) e uma região de secamento entre 30 cm e 60 cm de profundidade. Esse secamento não foi observado no padrão dos sistemas M+Ud, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S, que apresentaram incremento contínuo dos teores de umidade em profundidade, exceto entre 30 cm e 40 cm, onde observou-se uma estabilidade dos valores. Nenhuma diferenciação adicional foi observada entre M+Ud/S, M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S, nas duas últimas datas.

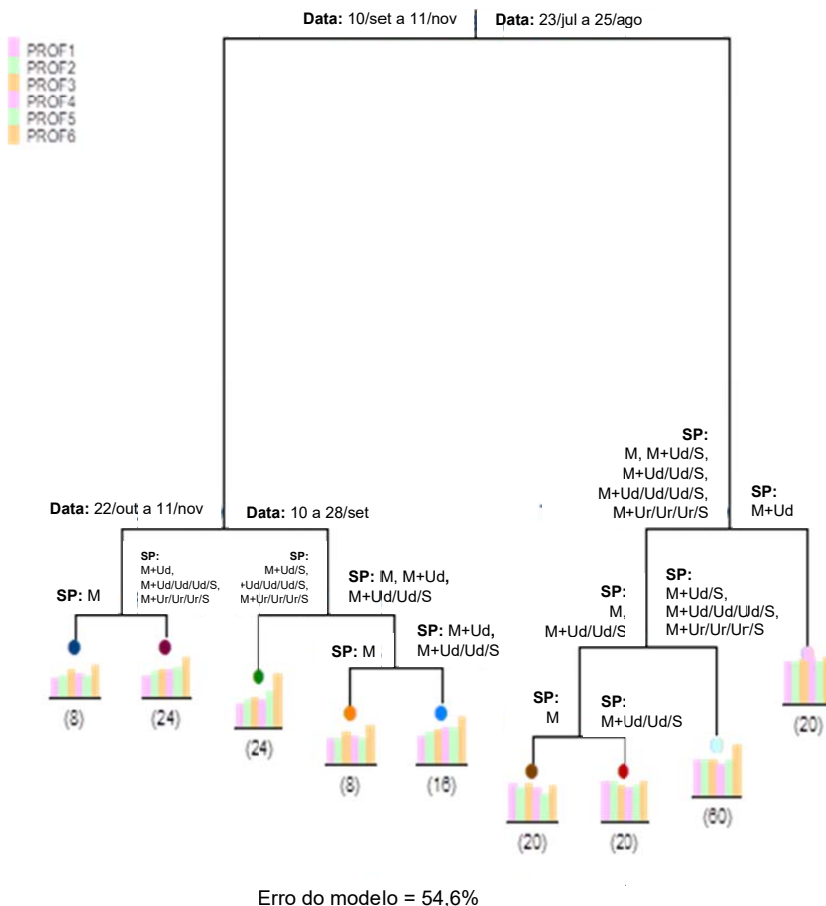


Figura 6. Padrões de umidade no perfil do solo (0 cm a 100 cm de profundidade) de acordo com as variáveis explanatórias data de avaliação (Data) e sistemas de produção (SP), segundo um modelo de regressão multivariada em árvore. As datas de amostragem foram 23 e 30/jul; 6, 13 e 25/ago; 10 e 28/set; 22/out e 11/nov, e os sistemas de produção avaliados são listados a seguir: milho em monocultivo (M), milho integrado a *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (M+Ud), milho integrado a *U. decumbens* com sucessão com os pastos formados por mais um ou dois anos e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente), M+Ud em rotação com soja (M+Ud/S) e M+Ur/Ur/Ur/S, onde Ur designa *Urochloa ruziziensis*. Note-se que as análises foram conduzidas de julho a novembro de 2020, quando os tratamentos M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S ainda não haviam sido submetidos ao plantio de soja previsto no esquema rotacional. As variáveis explanatórias e suas respectivas classes selecionadas pelo modelo como as de maior contribuição para explicar a variabilidade dos dados são apresentadas de ambos os lados de cada bifurcação. Abaixo de cada bifurcação, apresentam-se as percentagens da variabilidade explicada (VE) a cada partição. A altura das barras nos gráficos abaixo dos nós terminais indicam a variação dos valores de umidade em profundidade. Números entre parênteses abaixo dos nós terminais denotam o número de observações contidas em cada nó. Prof. 1 a 6, correspondem a 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm e 100 cm, respectivamente.

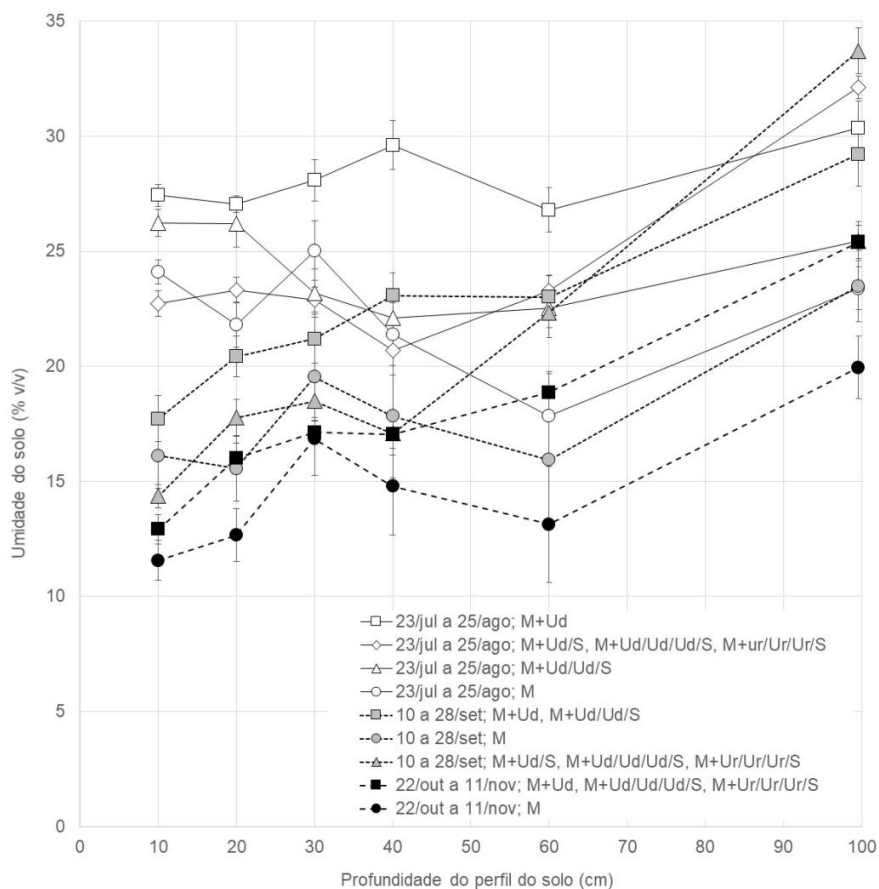


Figura 7. Padrões de variação da umidade no perfil do solo em função de datas de amostragem (23 e 30/jul; 6, 13 e 25/ago; 10 e 28/set; 22/out; 11/nov) e dos seguintes sistemas de produção de grãos: milho em monocultivo (M), milho integrado a *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (M+Ud), milho integrado a *U. decumbens* com sucessão com os pastos formados por mais um ou dois anos e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente), M+Ud em rotação com soja (M+Ud/S) e M+Ur/Ur/Ur/S, onde Ur designa *Urochloa ruziziensis*. Note-se que as análises foram conduzidas de julho a novembro de 2020, quando os tratamentos M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S ainda não haviam sido submetidos ao plantio de soja previsto no esquema rotacional. Os nove padrões de variação apresentados foram definidos pela análise multivariada de regressão/classificação em árvore (Figura 6). Barras de erro expressam ± 1 Erro Padrão.

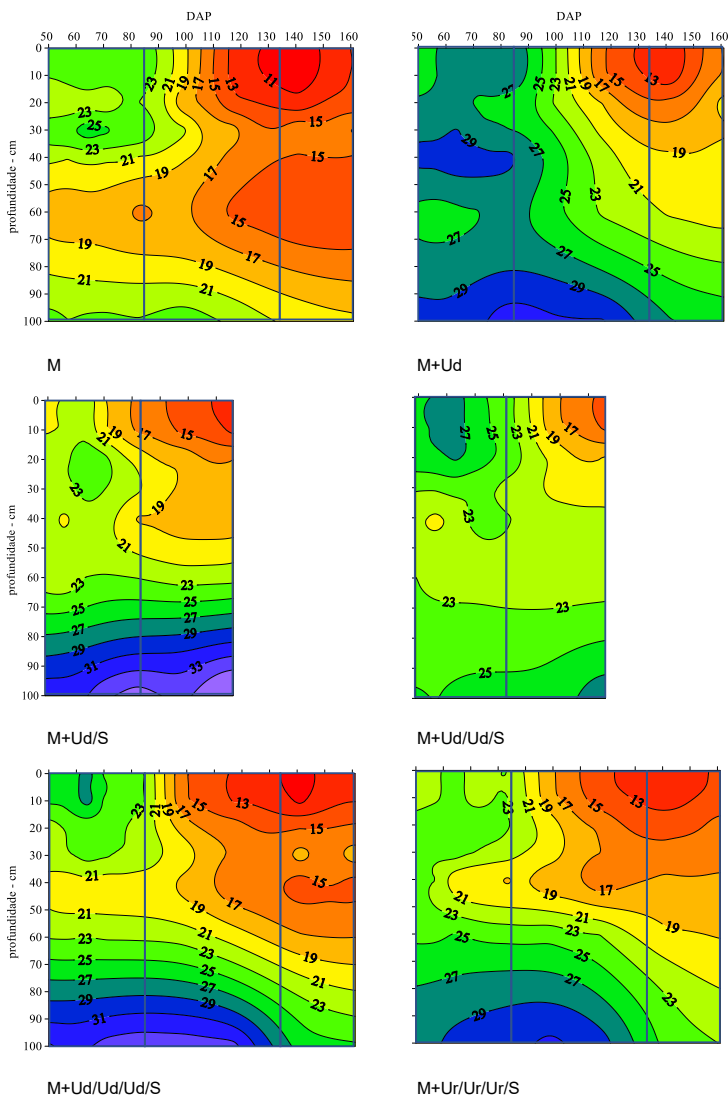


Figura 8. Variação da umidade do solo em profundidade no perfil (eixo vertical) e em relação ao número de dias após plantio (DAP) (eixo horizontal), sob os diferentes sistemas de produção avaliados: milho em monocultivo (M), milho integrado a *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (M+Ud), M+Ud em rotação com soja (M+Ud/S), M+Ud sucedido pelos pastos formados por mais um ou dois anos e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente), e M+Ur/Ur/Ur/S, onde Ur designa *Urochloa ruziziensis*. As análises foram conduzidas de julho a novembro de 2020, quando os tratamentos M+Ud/Ud/Ud/S e M+Ur/Ur/Ur/S ainda não haviam sido submetidos ao plantio de soja previsto no esquema rotacional. Os valores de umidade são apresentados nas isolíneas. As linhas verticais sobrepondo as figuras correspondem aos períodos contrastantes em termos de padrão de variação da umidade no perfil, determinados pela análise de regressão multivariada em árvore (Figura 6).

Distribuição de raízes em profundidade no perfil

Os resultados da quantificação em três profundidades sob os sistemas M, M+Ud, M+Ud/Ud/S e M+Ud/Ud/Ud/S, realizadas no início de maio de 2022, são apresentados na Figura 9. Na data de amostragem, a vegetação existente nas parcelas de M foi dominada pelas plantas espontâneas crescidas após a colheita do milho no ano anterior, ao passo que, nas dos demais sistemas, foi composta quase exclusivamente de pasto de *U. decumbens*. De acordo com o modelo de ANOVA utilizado, houve efeito significativo das fontes de variação Sistemas de produção ($p<0,001$), Profundidades ($p<0,001$) e da interação entre elas ($p<0,001$).

Em nenhuma das três profundidades analisadas, observaram-se diferenças entre as quantidades de raízes entre os sistemas com permanência estendida do pasto por um (M+Ud/Ud/S) e dois (M+Ud/Ud/Ud/S) anos após sua introdução com o milho (Figura 9). Embora o sistema M+Ud tenha promovido aumento de raízes na camada de 0–20 cm de profundidade, comparativamente a M, os dois sistemas não diferiram quanto a esta variável nas camadas de 20–40 cm e 40–60 cm. Comparativamente a M, apenas M+Ud/Ud/Ud/S foi superior em termos de produção de raízes nas camadas de 20–40 cm e 40–60 cm (Figura 9). Independentemente da profundidade avaliada, a extensão do pasto de *U. decumbens* por dois anos após a introdução em integração com milho promoveu um incremento de cerca de 150% na massa de raízes, comparado ao monocultivo de milho. Em relação ao sistema de introdução anual do milho e pasto em integração, esse aumento foi de 90% na camada de 0–20 cm e de 60% nas demais. Os maiores crescimentos de raízes em profundidade, observados nos tratamentos com *U. decumbens*, devem provavelmente estar associados à maior capacidade de distribuição e armazenamento de água em maiores profundidades observadas nesses sistemas (Figura 8). O crescimento radicular em profundidade pode promover a distribuição de água para camadas mais profundas do solo por meio de bioporos contínuos, formados após a decomposição das raízes (Galdos et al., 2019; Stolze et al., 2022). Esses bioporos podem alcançar vários metros de profundidade e são considerados rotas preferenciais de distribuição de água em profundidade no perfil dos solos (Kautz, 2015).

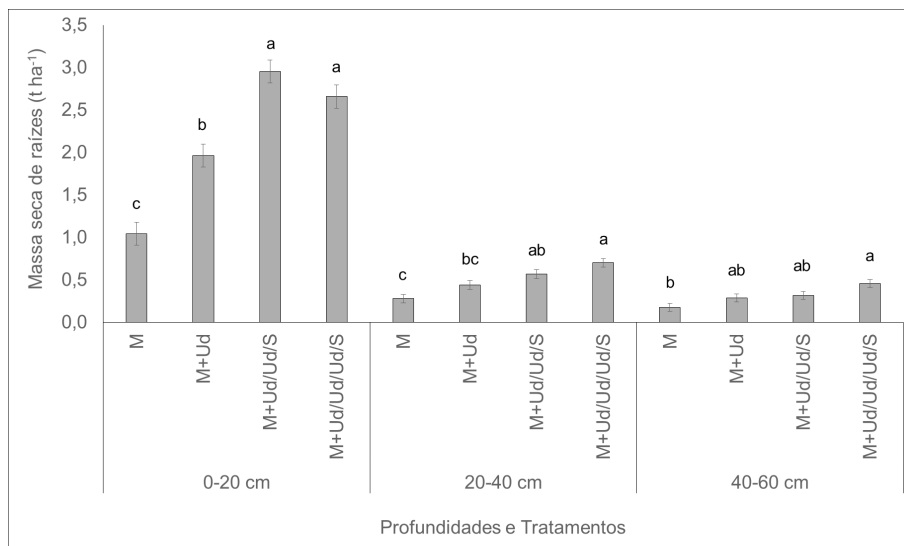


Figura 9. Quantidade de raízes sob diferentes sistemas de produção de milho (tratamentos) nas profundidades de 0–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm. Os sistemas avaliados corresponderam a milho em monocultivo (M), milho integrado a *Urochloa decumbens* introduzidos anualmente (M+Ud), milho integrado a *U. decumbens* com sucessão com os pastos formados por mais um ou dois anos e soja (M+Ud/Ud/S ou M+Ud/Ud/Ud/S, respectivamente). Médias sobrepostas por uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparações dentro de uma mesma profundidade.

Conclusões

A extensão do período de pasto de *Urochloa decumbens* após introdução em integração com o milho promove maior distribuição de água em profundidade (>60 cm) e maior biomassa de raízes em todas as camadas (0–60 cm) do perfil do solo. Esses efeitos benéficos são, de modo geral, maiores quanto maior for o período desta extensão, considerando-se dois anos como o período mais extenso avaliado.

O sistema de integração entre milho e *U. decumbens*, introduzida anualmente, apresenta maior capacidade de armazenamento e maior disponibilidade de água no perfil do solo.

A extensão do período sob pasto de *U. decumbens* por um ano após sua introdução em integração com o milho, previamente à rotação com soja, promove aumento do armazenamento e disponibilidade de água na superfície do solo; embora seja menos efetivo quanto à distribuição de água em profundidade que a sucessão entre M+Ud e soja.

A escolha entre as espécies de pastagem *U. decumbens* e *U. ruziziensis* não impacta os padrões temporais e em profundidade no perfil de resistência à penetração e umidade do solo.

Diferenças na resistência mecânica do solo à penetração entre sistemas de produção de milho, com componentes de integração com *Urochloa* spp. e rotação com soja, são perceptíveis apenas ao final da transição do período de chuvas para o período seco na região do Sealba. Esses efeitos se aproximam de valores críticos de restrição ao crescimento radicular (2.000 kPa) apenas nos sistemas com rotação com soja. Os efeitos dos diferentes sistemas de produção quanto à expressão da resistência mecânica do solo à penetração sobre a produtividade das culturas, no médio e longo prazo, requerem avaliação.

A extensão do período de pasto por um ano, previamente ao plantio de soja em sucessão, reduz a expressão da resistência do solo à penetração na transição entre os períodos chuvosos e secos.

Agradecimentos

Ao Supervisor do Campo Experimental Jorge do Prado Sobral, Pablo de Oliveira Melo, pelo suporte na coordenação da implantação e condução do experimento e da coleta de dados.

Ao técnico Gênisson Oliveira Trindade e ao assistente José Batista de Oliveira pelo suporte em todas as etapas de implantação, condução e colheita do experimento, bem como na coleta de amostras e tomadas de dados.

Ao assistente Ricardo Santana de Andrade pela condução dos ajustes dos implementos e das operações mecanizadas para plantio, controle fitossanitário e colheita do experimento.

Referências

- BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J. H.; OLSHEN, R.H.; STONE, C. J. **Classification and Regression Trees**, Belmont, CA: Wadsworth, 1984. 368 p.
- EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, v. 3, n. 3, p. 261-275, jul. 1983.
- FERNANDES, M. F.; BARRETO, A. C.; CHAER, G. M. Impact of tillage and maize cropping system on the physical properties of a kaolinitic soil in the Brazilian coastal tablelands. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., 2010 Brisbane, Austrália. **Proceedings...** Victoria, Austrália: Australian Society of Soil Science, 2010. p. 2563-2566.
- FERNANDES, M. F.; BARRETO, A. C.; MENDES, I. C.; DICK, R. P. Short-term response of physical and chemical aspects of soil quality of a kaolinitic Kandudalfs to agricultural practices and its association with microbiological variables. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 142, n. 3-4, p. 419-427, ago. 2011.
- GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, H. V.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray computed tomography. **Geoderma**, v. 337, p. 1126-1135, mar. 2019.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Índice de precipitação padronizada**. Disponível em: <http://clima1.cptec.inpe.br/spi/pt>. Acesso em: 14 ago. 2022.
- IKEDA, F. S. **Interação entre as culturas de soja e milho com cultivares do gênero *Urochloa* P. Beauv. em consórcio e interferência de plantas daninhas nos sistemas**. 2010. 162 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.
- JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, característica e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Aracaju: EMBRAPA-CPATC; EMBRAPA CNPMF; EAUFGA; IGUFBA, 1996. p.13-26.

KAUTZ, T. Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: a review. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 30, n. 4, p. 318-327, ago. 2015.

KLUTHCOUSKI, J.; COBUCCI, T.; AIDAR, H.; YOKOYAMA, L. P.; OLIVEIRA, I. P.; COSTA, J. L. S.; DA SILVA, J. G.; VILELA, L.; BARCELLOS, A. O.; MAGNABOSCO, C. U. **Integração lavoura**: pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas plantio direto e convencional. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 38).

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos amarelos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1001-1011, ago. 2009.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim, California. **Proceedings...** Boston, Massachusetts: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.

OLIVEIRA, I. P.; KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P.; DUTRA, L. G.; PORTES, T. A.; SILVA, A. E.; PINHEIRO, B. S.; FERREIRA, E.; CASTRO, E. M.; GUIMARÃES, C. M.; GOMIDE, J. C.; BALBINO, L. C. **Sistema Barreirão**: recuperação/renovação de pastagens degradadas em consórcio com culturas anuais. Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão-APA, 1996. 90 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 64).

PACHECO, E. P.; DE BARROS, I.; FERNANDES, M. F.; RANGEL, J. H. A.; TEIXEIRA, A. H. C. **Viabilidade econômica de sistemas de produção de milho, soja e pasto para o agreste do Seabra**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2020. 28 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 151).

PACHECO, E. P.; DE BARROS, I. Uso de imagens aéreas para avaliação da cobertura do solo em sistemas de produção de grãos no estado de Sergipe. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, CIÊNCIA, INOVAÇÃO E MERCADO, 2014, São Carlos. **Anais...** São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2014. 165-168 p.

PROCÓPIO, S. O.; CRUZ, M. A. S.; DE ALMEIDA, M. R. M.; DE JESUS JÚNIOR, L. A.; NOGUEIRA JÚNIOR, L. R.; CARVALHO, H. W. L. **Seabra**: região de alto potencial agrícola no Nordeste brasileiro. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. 62 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 221).

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 4. ed. Viçosa: Neput, 2002. 338 p.

RIBEIRO, M. R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos dos Tabuleiros Costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 161-168.

STOLZE, K.; BARNES, A. D.; EISENHauer, N.; TOTSCHE, K. U. Depth-differentiated, multivariate control of biopore number under different land-use practices. **Geoderma**, v. 418, 115852, jul. 2022.

THIMOTHEE, J. A. **Impacto de práticas agrícolas sobre a produtividade de grãos e propriedades físicas e químicas de solos cauliniticos dos tabuleiros costeiros de Sergipe**. 2019. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Biodiversidade) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

WHITELEY, G. M.; DEXTER, A. R. Behaviour of roots in cracks between soil peds. **Plant and Soil**, v. 74, n. 2, p.153-162, jun. 1983.



Tabuleiros Costeiros

