

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para
variedades brasileiras de cana-de-açúcar**

Daniel Silveira Pinto Nassif

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

**Piracicaba
2010**

Daniel Silveira Pinto Nassif
Engenheiro Agrônomo

**Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades
brasileiras de cana-de-açúcar**

Orientador:
Prof. Dr. **FABIO RICARDO MARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

Piracicaba
2010

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Nassif, Daniel Silveira Pinto

Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar / Daniel Silveira Pinto Nassif. - - Piracicaba, 2010.
92 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
Bibliografia.

1. Biometria 2. Cana-de-açúcar 3. Modelagem de dados 4. Modelos matemáticos
Validação de modelos 6. Variedades vegetais I. Título

CDD 633.61
N268p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais José Alberto e Evani,
Aos meus irmãos Guilherme e Silvia,
À minha amada Daniela Prado.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia de Biossistemas e ao PPG em Física do Ambiente Agrícola pela oportunidade da realização do mestrado.

Ao amigo e orientador Dr. Fábio R. Marin pela orientação, paciência, ensinamentos e amizade.

Aos professores Dr. Luiz R. Angelocci, Dr. Paulo C. Sentelhas, Dr. Quirijn de Jon Van Lier, Dr. Sérgio O. Moraes e Dra. Sônia M. S. Piedade, pelos ensinamentos durante o curso.

À EMBRAPA/CNPTIA e CEPAGRI/UNICAMP pela oportunidade de realização da pesquisa e ensinamentos, principalmente ao Dr. Eduardo Delgado Assad e Dr. Hilton Silveira Pinto pelo apoio e auxílio durante o curso.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) pela oportunidade de pesquisa em sua área, apoio e auxílio, especialmente ao Jorge Luis Donzelli e Wander José Pallone Filho.

Ao Dr. Ronaldo Resende pelo fornecimento e autorização de utilização dos dados experimentais da EMBRAPA Tabuleiros Costeiros.

Aos amigos de cúpula, pelo companheirismo, amizade, ensinamentos e pela “bagunça”, sempre importantes para distração.

Aos amigos da EMBRAPA e CEPAGRI pelo auxílio, amizade e companheirismo.

À Ângela e Fernando pela ajuda sempre que precisei.

A todos que de alguma forma auxiliaram neste projeto.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 A cultura da cana-de-açúcar.....	17
3.1.1 Origem.....	17
3.1.2 Importância sócio-econômica.....	17
3.1.3 Morfologia.....	18
3.1.3.1 Sistema radicular.....	18
3.1.3.2 Colmo.....	19
3.1.3.3 Folha.....	20
3.1.3.4 Inflorescência.....	21
3.1.4 Fenologia e exigências climáticas.....	21
3.2 Modelagem na agricultura.....	25
3.2.1 Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia-DSSAT.....	28
3.2.2 Modelos de simulação de crescimento de cana-de-açúcar.....	31
3.2.2.1 DSSAT/CANEGRO.....	34
3.2.3 Parametrização de modelos.....	43
3.2.4 Análise de sensibilidade.....	44
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
4.1 Dados utilizados.....	47
4.1.1 Campo experimental de Pradópolis/SP.....	47
4.1.2 Campo experimental de Piracicaba/SP.....	49
4.1.3 Coleta de dados biométricos dos campos experimentais de Pradópolis e Piracicaba.....	51
4.1.4 Avaliações tecnológicas dos campos experimentais de Pradópolis e Piracicaba.....	52
4.1.5 Dados bibliográficos de Pellegrino (2001).....	53
4.1.6 Dados bibliográficos de da Silva (2007).....	53
4.1.7 Dados bibliográficos de Costa et al. (2007).....	53

4.2	Análise de sensibilidade do modelo.....	54
4.3	Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO.....	55
4.4	Avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
5.1	Descrição dos dados experimentais de Pradópolis e Piracicaba.....	59
5.2	Análise de sensibilidade do modelo DSSAT/CANEGRO.....	62
5.3	Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO.....	67
5.4	Avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO.....	72
5.4.1	Massa fresca do colmo.....	72
5.4.2	Índice de área foliar de folhas verdes.....	74
5.4.3	Altura de colmo.....	75
5.4.4	Perfilhamento.....	77
5.4.5	Teor de sacarose em massa fresca – POL%.....	78
5.4.6	Número de folhas verdes.....	80
5.4.7	Massa seca do colmo.....	81
6	CONCLUSÕES.....	83
	REFERENCIAS	85

RESUMO

Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar

O aumento da importância da cultura da cana-de-açúcar nos últimos anos atraiu de investimentos ao setor sucro-alcooleiro, tornando o planejamento estratégico uma ferramenta essencial na orientação para expansão da cultura em novas áreas e otimização da produção nas áreas tradicionais de cultivo. A modelagem agrícola, por isso, ganhou importância por contribuir neste sentido. Existem diversos modelos de simulação de cana-de-açúcar sendo utilizados em todo o mundo, sendo o DSSAT/CANEGRO um dos mais utilizados. O modelo DSSAT/CANEGRO foi baseado no modelo CERES-MAIZE e desenvolvido na África do Sul. Incluído no conjunto de modelos Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT versão 3.1), e atualizado na versão 4.5 do DSSAT, vem sendo aplicado em diversas regiões do mundo para análise e avanço no conhecimento dos sistemas de produção de cana-de-açúcar. O objetivo do trabalho foi a parametrização e avaliação do modelo calibrado para 5 variedades brasileiras de cana-de-açúcar: CTC 4, CTC 7, CTC 20, RB 86 7515 e RB 83 5486. Foram realizadas medidas em campo experimental em duas localidades para as variedades CTC 4, CTC 7, CTC 20 e obtenção de dados bibliográficos para as variedades RB 86-7515 e RB 83-5486. Uma análise de sensibilidade local, utilizando dados climáticos e pedológicos de Piracicaba foi realizada para determinar a dependência das variáveis simuladas em relação às variações nos parâmetros do modelo. Em seguida, realizou-se a parametrização do modelo utilizando a técnica GLUE (do inglês, *generalized likelihood uncertainty estimation*). A avaliação das cinco variedades estudadas foi feita utilizando o R^2 ; índice D de Willmott e quadrado médio dos desvios como indicadores estatísticos. Para a variável de índice de área foliar, as variedades CTC 4, CTC 7, CTC 20 apresentaram índice D variando entre 0,870 e 0,944, sendo com indicadores estatísticos similares para as variáveis altura de colmo ($D=0,80$), perfilhamento ($D=0,90$) e teor de sacarose ($D=0,50$). A variedade RB 83-5486 apresentou resultados próximos aos observados para as variáveis de teor de sacarose e massa fresca do colmo. Os piores resultados foram obtidos para a variedade RB 86-7515, com $D=0,743$ para massa fresca do colmo, $D=0,821$ para altura de colmo, $D=0,873$ para perfilhamento e $D=0,665$ para massa seca de colmo. O modelo teve melhor desempenho para as condições de Piracicaba, Pradópolis, Guariba e Porto Feliz, no Estado de São Paulo, em comparação com as condições de solo e clima de Couripe, Estado de Alagoas.

Palavras-chave: Modelagem; Calibração; Validação; Biometria; GLUE

ABSTRACT

Parameterization and evaluation of DSSAT/CANEGRO model for Brazilian sugarcane varieties

The importance of sugarcane crop has increasing during the last years, attracting more investments to the sugarcane sector. Thus, the strategic planning has becoming an essential tool to guide the sugarcane expansion to new areas, as well as to help optimize the traditional production systems. To do so, crop modelling has a great usefulness. There are several models for sugarcane crop simulation around the world, and DSSAT/CANEGRO is one of the most used. DSSAT/CANEGRO model was based in the CERES-MAIZE model and developed in South Africa. It was included in Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT 3.1), and updated in DSSAT 4.5 version. It has been applied in many sites around the world to analyze sugarcane productions systems and advance the knowledge regarding the crop. This research aimed to parameterize and evaluation DSSAT/CANEGRO for 5 Brazilian sugarcane varieties: CTC 4, CTC 7, CTC 20, RB 86 7515 e RB 83 5486. CTC 4, CTC 7 and CTC 20 experimental data came from two experimental fields in the State of Sao Paulo and RB 86-7515 and RB 83-5486 varieties data came from bibliographic references. A local sensibility analysis was performed using weather and soil data from Piracicaba to determine the dependency of simulated variables on changes in key parameters. The model was parameterized using the GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation) method. The evaluation of five varieties was done using R^2 , Willmott's index (D) and root mean square error as statistical indicators. D index ranged from 0,870 and 0,944 for green leaf area index for CTC 4, CTC 7 and CTC 20 varieties. The model evaluation was also conducted for the following variables: stalk height (D=0,80), tillering (D=0,90) and sucrose content (D=0,50). The same was done for RB 83-5486 variety using the following variables: sucrose content and stalk fresh mass. The worst results were obtained for variety RB 86-7515, with the following statistics in the validation procedure: (stalk fresh mass D=0,743; stalk height, D=0,821; tillering, D=0,873; stalk dry mass, D=0,665). DSSAT/CANEGRO performed better for Piracicaba, Pradópolis, Guariba and Porto Feliz (State of Sao Paulo) in comparison to the weather and soil conditions of Couripe (State of Alagoas).

Keywords: Modelling; Calibration; Validation; Biometrics; GLUE

1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar tem ganhado importância nos últimos anos em decorrência de fatores econômicos, sociais e ambientais. A discussão em torno das mudanças climáticas globais, alta nos preços do petróleo e a chegada dos veículos bicompostíveis ao mercado, estão entre os principais fatores que impulsionaram a expansão da cultura nesta década.

A safra 2009/2010 de cana-de-açúcar foi de aproximadamente 612 milhões de toneladas, com produtividade média estimada em 81,2 toneladas por hectare, sendo o Estado de São Paulo o principal produtor com 54% da produção. De toda produção, 45% foram destinados à fabricação de açúcar e 55% à fabricação de álcool anidro e hidratado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2009).

O álcool hidratado, também denominado etanol, vem sendo reconhecido como combustível renovável com grande potencial para o setor sucro-alcooleiro do Brasil. O Brasil, por sua vez, tem sido reconhecido mundialmente pelo seu programa de energia renovável baseado na cana-de-açúcar e isto tem atraído investimentos internos e externos para o país.

A aplicação construtiva destes investimentos, sob o ponto de vista público e privado, contudo, exige planejamento estratégico da expansão da cultura da cana-de-açúcar no país e a pesquisa em modelagem pode contribuir neste sentido. Os modelos agrícolas no setor canavieiro também são úteis para a previsão de produtividade, quantificação de danos causados por eventos naturais e biológicos, e para a avaliação de diferentes estratégias produtivas.

A modelagem agrícola também contribuir para o avanço no conhecimento da interação entre as plantas e o ambiente. Modelos de simulação de crescimento de plantas são ferramentas de elevado potencial, permitindo melhorar o entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos da interação.

Modelos de simulação de cultura são um conjunto de algoritmos organizados, descrevendo processos físicos e fisiológicos, e utilizadas para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura. A aplicação de modelos de simulação na agricultura é relativamente mais difundida em países como Austrália, África do Sul e

Estados Unidos. No Brasil, porém, o uso de modelos de simulação de crescimento de cana-de-açúcar ainda não é rotina, a despeito da importância sócio-econômica da cultura.

Existem diversos modelos de simulação de cana-de-açúcar em uso em todo o mundo, porém os principais são o modelo australiano, APSIM-Sugarcane e o modelo sul-africano DSSAT/CANEGRO. Outros modelos como os australianos QCANE e AUSCANE, e o norte-americano CASUPRO também são utilizados.

O modelo DSSAT/CANEGRO foi baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES; KINIRY, 1986) e desenvolvido na África do Sul com o intuito de modelar os processos fisiológicos mais relevantes da indústria açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991). Incluído no conjunto de modelos Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT versão 3.1) (INMAN-BAMBER; KIKER, 1997), e atualizado na versão 4.5 do DSSAT (SINGELS et al., 2008). O DSSAT/CANEGRO vem sendo aplicado em diversas regiões do mundo para análise e avanço no conhecimento dos sistemas de produção de cana-de-açúcar. Quando parametrizado e validado adequadamente, também pode ser empregado como referência, indicando inconsistências em modelos empíricos.

A utilização de modelos de crescimento de plantas em condições diferentes do local onde o mesmo foi desenvolvido requer adaptações considerando as diferenças de solo, clima e características genéticas das culturas. O modelo DSSAT/CANEGRO, por ter sido desenvolvido para as variedades sul-africanas, foi inicialmente calibrado com duas variedades para os sistemas de produção de cana-de-açúcar brasileiros (MARIN et al., 2011). Porém é necessário expandir a parametrização e avaliar o modelo para um maior número de variedades brasileiras em diferentes condições, sendo estes os objetivos gerais do presente trabalho.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é a parametrização e avaliar o modelo DSSAT/CANEGRO de crescimento da cultura da cana-de-açúcar para utilização em sistemas de produção canavieira com as variedades brasileiras, em diferentes localidades do Brasil.

Os objetivos específicos do trabalho são: 1) Coleta de dados e caracterização de cinco variedades brasileiras de cana de açúcar; 2) Avaliação dos parâmetros de entrada do modelo DSSAT/CANEGRO através da análise de sensibilidade local; 3) Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO para cinco variedades brasileiras de cana-de-açúcar (CTC 4, CTC 7, CTC 20, RB 83-5486, RB 86-7515) utilizando um método objetivo; 4) Validação do modelo DSSAT/CANEGRO utilizando dados independentes das variedades parametrizadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Cultura da cana-de-açúcar

3.1.1 Origem

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é originária do sudeste Asiático, na região centrada em Nova Guiné e Indonésia (MOZAMBANI et al., 2006; JAMES, 2004). O açúcar, produto da cana-de-açúcar, teve como início da produção a China, onde foram encontrados registros com mais de 8.000 anos, atingindo posteriormente a Europa, a África e as Américas, incluindo o Brasil (JAMES, 2004).

3.1.2 Importância sócio-econômica

A cultura tem ganhado importância em decorrência de diversos fatores econômicos, sociais e ambientais, sendo o aquecimento global e a alta nos preços do petróleo os principais. Segundo a CONAB (2010) a safra 2009/2010 de cana-de-açúcar foi de aproximadamente 612 milhões de toneladas, com produtividade média estimada em 81,2 toneladas por hectare, sendo o Estado de São Paulo o principal produtor com 54% da produção.

Do total de colmo industrializado, 45% foram destinados à produção de açúcar, com produção aproximada de 38 milhões de toneladas e, 55% da produção foram destinados à fabricação de álcool, sendo aproximadamente 28% do montante para produção de álcool anidro e o restante para álcool hidratado (etanol). Como meio de comparação, no mesmo período, foram comercializados mais de 2,5 milhões de veículos movidos a etanol ou bicombustíveis (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA, 2010) demonstrando a importância da cultura da cana-de-açúcar no Brasil.

O etanol, reconhecido como combustível renovável representa um grande potencial para o setor sucro-alcooleiro do Brasil, atraindo investimentos internos e externos, sendo considerado como exemplo de programa de energia renovável entre os países emergentes (GOLDEMBERG, 2007). A ampliação destes investimentos exige

um planejamento estratégico da expansão da cultura da cana-de-açúcar no país, baseada em modelos que estimem a produtividade da cultura.

3.1.3 Morfologia

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical perene, que se desenvolve em forma de touceira com perfilhos em sua base com mais de 2 m de altura e diâmetro com cerca de 5 cm (JAMES, 2004). A parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos, e a subterrânea por raízes e rizomas que são formados por nós, entrenós e gemas, as quais são responsáveis pela formação dos perfilhos da touceira (MOZAMBANI et al., 2006).

A cana-de-açúcar é uma planta que perfilha, com perfilhos originando-se a partir do colmo primário e comportando-se como uma planta independente e autônoma. Os perfilhos tem raízes, colmos e folhas próprios, havendo, porém troca de nutrientes entre os perfilhos da mesma touceira (RIPOLI et al., 2006). O sistema de perfilhamento é simples, descrito como perfilhos primários, secundários, terciários, e assim por diante (JAMES, 2004; RIPOLI, 2006).

3.1.3.1 Sistema Radicular

O sistema radicular é altamente ramificado do tipo fasciculado, melhor observado em sua parte superficial onde 85% se encontra nos 50 primeiros centímetros e 60% nos primeiros 20-30 centímetros de forma orientada para baixo em sentido vertical (SEGATO et al., 2006). A distribuição das raízes declina de forma exponencial à medida que ela vai se aprofundando com valor máximo de densidade de aproximadamente 5 cm cm^{-3} .

O desenvolvimento inicia-se com as raízes primárias, ou de fixação em seguida pela formação das raízes dos perfilhos, sendo que as raízes primárias morrem após cerca de 90 dias de sua emergência (RIPOLI et al., 2006). Segundo James (2004) o desenvolvimento das mesmas é contínuo, com uma taxa de renovação radicular regida pelo perfilhamento, o que é importante para se ajustar a mudanças nas condições ambientais. O crescimento e a distribuição das raízes da cana-de-açúcar variam acentuadamente com a idade da planta e cada perfilho desenvolve seu próprio sistema

radicular (JAMES, 2004). De um modo geral até o 6º mês o crescimento é lento aumentando rapidamente até o desenvolvimento máximo, que está em torno do 12º mês (PARANHOS, 1987).

As raízes da cana-de-açúcar podem ser divididas em três categorias diferentes: raízes superficiais, responsáveis pela absorção de água e nutrientes; raízes de suporte, que dão sustentabilidade às plantas; e raízes profundas, que podem chegar a 6 metros de profundidade e são importantes para absorção de água em épocas de seca, demonstrando a capacidade de sobrevivência da cultura a condições de escassez de água (JAMES, 2004; SMITH, 2005). Em solo argiloso, Thompson (1976) encontrou para uma cultura irrigada de cana que as raízes absorvem água até 90 cm, enquanto que em solos arenosos a profundidade atingiu 1,2m. Já em condições sem irrigação, foi constatado que as raízes atingiram mais de 4m de profundidade, com absorção significativa de água em até 1,8m de profundidade. Laclau e Laclau (2009) reportam crescimento radicular atingindo de 4,25m e 4,70m em solos irrigados e não irrigados respectivamente.

3.1.3.2 Colmo

O colmo representa a parte econômica no cultivo da cana-de-açúcar. Ele constitui-se num reservatório onde, em condições favoráveis a maturação, ocorre o acúmulo de grande quantidade de sacarose. O colmo da cana-de-açúcar é uma haste sem ramificações, com secção transversal aproximadamente circular, diferenciadas em segmentos compostos por um nó, que consiste em uma gema lateral situada junto à inserção foliar contendo primórdios radiculares e anel de crescimento, e um entrenó, que chegam de 15 a 25 cm, dependendo das condições meteorológicas experimentadas pela planta, onde ocorre o acúmulo de sacarose da planta (MARIN et al., 2009). Em cultivo comercial, o colmo da cana-de-açúcar é também utilizado como forma de propagação.

Os entrenós imaturos localizados na região do colmo com folhas verdes são fibrosos com altas concentrações de hexoses e baixa concentração de sacarose e durante o crescimento, o teor de sacarose é maior nos entrenós basais e menor conforme se aproxima do ápice da planta. Os entrenós possuem um teor de fibra mais

elevado na periferia e em menos teor no centro, assim sendo a estrutura mecânica do colmo é fundamentalmente como um “tubo” e os mesmos apresentam diversas formas que são utilizadas como parte da diferenciação entre as variedades (JAMES, 2004).

Segundo Inman-Bamber et al. (2002) a fração da biomassa pertencente ao colmo aumenta conforme ocorre o aumento da biomassa total, sendo que esta fração é nula antes do início do crescimento do colmo atingindo seu valor máximo quando ocorre a maturação da cultura. Esta fração é afetada diretamente por estresse hídrico, temperatura e cultivar. Keating et al. (1999) considera como constante o valor de 70% para fração do colmo na planta colhida, já em literatura podem-se encontrar valores entre 59% a 73%.

A taxa de acúmulo de sacarose é maior durante a última fase do ciclo da cana, quando a planta tem pequena taxa de crescimento, coincidindo com o período de restrição climática, o que induz a maturação (MACHADO, 1987). O teor de sacarose varia de acordo com a época de colheita, idade da cultura, estresse hídrico e cultivar. O teor de sacarose regulado pela idade da planta, temperatura, estresse hídrico e nitrogênio (SINGELS et al., 2005), elevando-se durante o inverno, quando também ocorre a redução na taxa de crescimento vegetativo da cultura (INMAN-BAMBER et al., 2010).

Durante o ciclo da cultura, ocorre um período de produção intensa de colmos, com pico entre 3º e 5º meses após o plantio de cana-de-açúcar de “ano e meio”, mas em seguida 50% destes morrem e a população se estabiliza perto dos 9 meses de idade (BULL, 1975). Ao serem descartados durante o processo de competição, não constituem mais a matéria viva e, portanto, não consomem mais energia pelo processo respiratório (BARBIERI, 1993).

3.1.3.3 Folha

A folha da cana-de-açúcar é constituída de duas partes: bainha que liga a folha ao colmo da planta na base dos nós e a lâmina foliar que faz o processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese, sendo a coletora de energia do meio externo, podendo chegar a 150 cm de comprimento e 10 cm de largura sendo uma das partes que diferem as variedades de cana-de-açúcar, sendo que outras variações entre

podem ocorrer em alguns elementos da bainha como a lígula, a aurícula e o “dewlap” (JAMES, 2004).

O ciclo de morte e substituição das folhas ocorre durante todo o período de desenvolvimento da cultura, porém o número médio de folhas permanece constante em torno de 9 a 13 folhas vivas por colmo (VAN DILLEWIJN, 1952, INMAN-BAMBER, 1991).

3.1.3.4 Inflorescência

Apesar de não apresentar benefício para o cultivo comercial por causar um processo chamado de isoporização do colmo, as plantas de cana-de-açúcar emitem inflorescência quando estimuladas. Berding et al. (2005) consideram que as condições para a ocorrência do florescimento são temperatura noturna acima de 21°C e tendência de redução do fotoperíodo. Além do fotoperíodo e da temperatura do ar, a boa disponibilidade de água no solo também é favorável ao florescimento (ALFONSI et al., 1987).

3.1.4 Fenologia e exigências agrometeorológicas

A cana-de-açúcar é uma planta C₄, assim chamada por formar compostos orgânicos com quatro carbonos como produto primário do processo fotossintético. Apresenta maior taxa fotossintética e de eficiência na utilização e resgate de CO₂ da atmosfera (SEGATO et al., 2006).

Durante o ciclo vegetativo existem fases em que a planta apresenta alterações em função da ação do ambiente. As principais fases de desenvolvimento são: brotação, perfilhamento, crescimento e maturação, representados na Figura 1. Para cada uma destas fases a cana apresenta diferentes exigências climáticas, sendo que alguns cultivares são mais exigentes do que outros (BRAY, 1980).

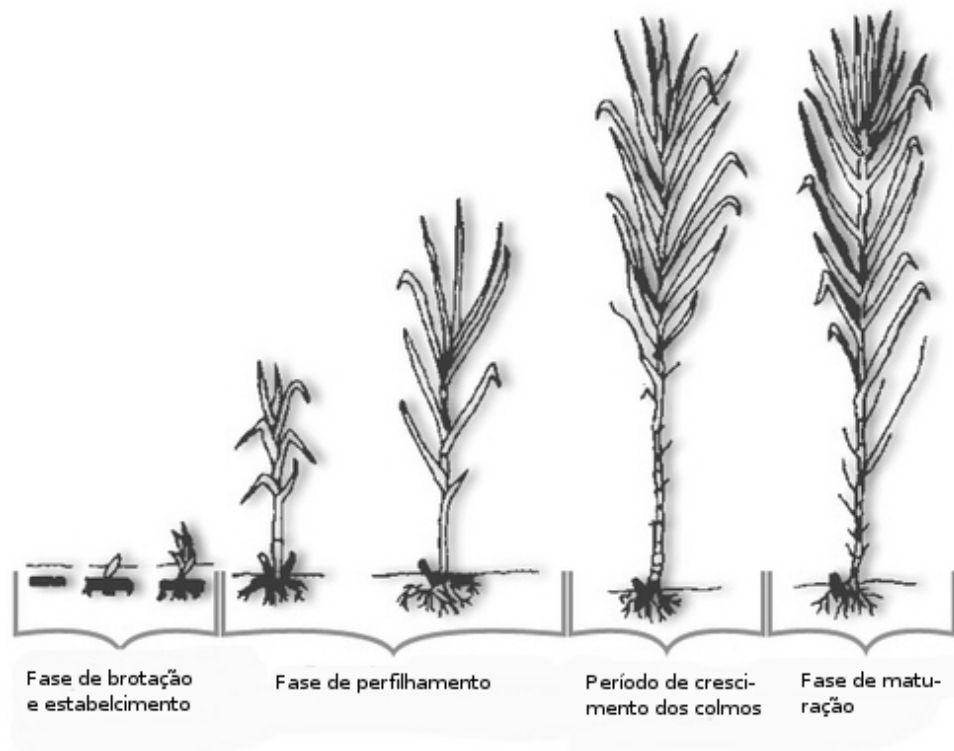


Figura 1 - Fases do desenvolvimento da cana de açúcar. (GASHO; SHIH, 1983, apud MARIN et al., 2008)

A temperatura é um dos fatores mais importantes na produção da cana-de-açúcar, com o ótimo para seu desenvolvimento entre 20°C e 30°C (MARIN et al., 2009) e seu crescimento é nulo com temperaturas inferiores a 16°C e superiores a 38°C. Para o crescimento das raízes, James (2004) considera que o mesmo é afetado diretamente pela umidade e temperatura do solo, sendo que temperaturas abaixo de 18°C retardam o desenvolvimento radicular e seu crescimento é incrementado progressivamente até temperaturas em torno de 35°C, onde acima desta o crescimento é prejudicado.

A brotação é um processo que consome energia, que vem da degradação das substâncias de reserva do tolete. Conforme a equação $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + \text{ENERGIA}$, a planta utiliza-se de O_2 para a quebra dos carboidratos, lipídeos e proteínas para produzir a energia necessária a biossíntese (SEGATO et al., 2006). A mesma começa de 7 a 10 dias após o plantio e geralmente perdura por 30 a 35 dias conforme Figura 1, sendo esta fase influenciada pela qualidade da muda, ambiente de

produção, época e manejo do plantio (RIPOLI et al., 2006). A temperatura base para a emergência é de 21°C, sendo 32°C considerada ótima nesta fase (BARBIERI et al., 1979). A emergência é uma característica genética, no entanto, dentro da mesma variedade, a brotação varia de acordo com a idade da muda, diferença da idade da gema, grau de umidade do tolete, concentração de açúcares e nutrientes minerais, sendo que algumas variedades apresentam baixa brotação a partir do tolete, mas mostram ótimos resultados na brotação da soqueira (SEGATO et al., 2006), sendo influenciada por fatores ambientais externos e internos (gema saudável) (PARANHOS, 1987).

As soqueiras da cana-de-açúcar têm um desenvolvimento semelhante ao observado na cana plantada, com diferenças específicas no processo de enraizamento e brotação da soca e principalmente com queda de produtividade em relação à cana-plantada devido à compactação do solo, queda de fertilidade do solo sob uso contínuo de cana-de-açúcar e a utilização ineficiente de fertilizantes (MARIN et al., 2009).

Já o perfilhamento começa após 20 a 30 dias após a brotação inicial do colmo primário (SEGATO et al., 2006) e pode chegar a até 120 dias, sendo um processo de emissão de colmos ou hastes por uma mesma planta, os quais recebem a denominação de perfilhos. Nesta fase, Suguitani (2006) afirma que a temperatura ideal está entre 27°C e 32°C, sendo que temperaturas abaixo de 5°C e acima de 45°C paralisam o processo.

O perfilhamento é lento nos primeiros meses após o plantio, sendo mais intenso à medida que as condições climáticas tornam-se favoráveis (SUGUITANI; MATSUOKA, 2001) chegando ao pico e início da queda no número de perfilhos após 500 graus-dia (GD) e a estabilização ocorre após 1200 GD, devido à competição entre os perfilhos pelos fatores de crescimento, considerando uma temperatura base de 16°C (INMAN-BAMBER, 1994). Segundo Segato et al. (2006), na fase de máximo perfilhamento, algumas variedades de cana-de-açúcar podem ter 25 ou mais colmos por touceira (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002).

O desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar, em relação à matéria seca pode ser dividido em três etapas, conforme Machado et al. (1982), onde a fase inicial, em que o crescimento é lento, que vai de março a outubro (até 200 dias após o

plantio), a fase de crescimento rápido, de outubro a maio (de 200 até 400 dias após o plantio), quando 75% da fitomassa total é acumulada, e fase final de crescimento lento, de maio a agosto (de 400 a 500 dias após o plantio), que corresponde a 11% da fitomassa total. Gava et al. (2001), também dividiram o ciclo da cana-de-açúcar em três fases sendo a primeira fase de 0 a 60 dias após a colheita (DAC) onde ocorre o acúmulo de aproximadamente 6% da matéria seca total da parte aérea, a segunda fase de 60 a 210 DAC, onde a taxa de crescimento é mais elevada, com acúmulo de aproximadamente 81% da matéria seca total, e a terceira fase, que vai de 210 a 299 DAC, onde o acúmulo de matéria seca é em torno de 13 % e é a fase onde ocorre a maturação da cana-de-açúcar.

Durante o desenvolvimento vegetativo, não ocorre o acúmulo de sacarose, sendo que a planta utiliza os fotoassimilados disponíveis. De forma geral, conclui-se que em condições favoráveis ao rápido crescimento, o acúmulo de sacarose é muito pequeno, mesmo nos internódios maduros, mas em condições que restringem o crescimento, acaba por estimular o acúmulo de sacarose, dando início a maturação da planta (MARIN et al., 2009).

O acúmulo máximo de sacarose só ocorre quando a planta encontra condições restritivas ao seu crescimento, chegando ao estágio de maturação, onde temperaturas mais baixas auxiliam no processo de concentração de sacarose do colmo, podendo substituir a deficiência hídrica como fator determinante do início do processo (MARIN et al., 2009). Quando não ocorre a redução da temperatura, necessariamente deve ocorrer uma seca moderada para ocasionar a redução da alongação do internódio, resultando no aumento do teor de sacarose nos colmos (SCARPARI, 2007). O comprimento e a largura dos internos da planta são afetados por diversos fatores, sendo a umidade do solo, estado nutricional e temperatura do ar os principais (JAMES, 2004).

A cana-de-açúcar poderá estar com alto teor de açúcar com apenas alguns meses de idade, bastando para isso ausência de água, nutrientes e outros fatores necessários ao seu desenvolvimento, não significando este fato que ele estará fisiologicamente madura, demonstrando que apenas idade adulta não significa maturação total (RODRIGUES, 1995). Para aumentar o teor de sacarose, a cana-de-açúcar necessita de uma época mais fria ou mais seca, sendo que quando não ocorre a

deficiência hídrica, a temperatura média deve ser inferior a 21°C pelo período de três meses para a ocorrência de repouso vegetativo e maturação. A queda na temperatura não é relatada como fator que influencia a maturação, mas é observado que a amplitude térmica pode favorecer a mesma (SCARPARI, 2002).

3.2 Modelagem na Agricultura

Com a finalidade de se obter um melhor conhecimento da interação entre as plantas e o ambiente, modelos de simulação são ferramentas de elevado potencial, permitindo o estudo e entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos da interação, e estimando a performance da cultura em diferentes situações (SOLER, 2004). Thornley e Johnson (2000) afirmaram que modelos matemáticos podem contribuir com o aumento do conhecimento e auxílio a aplicações práticas na agricultura.

O'Leary (2000) salientou que devido à complexidade da natureza, os estudos acadêmicos são centrados a pequenas áreas de interesse, no qual gradualmente acumulam-se conhecimentos. Para uma investigação do sistema real, a complexidade do processo torna a mesma muito limitada, por envolver altos custos operacionais, equipe especializada, entre outros. Portanto uma opção seria a descrição do sistema real, para tal faz-se necessário conhecimento técnico de alto nível, que possam facilitar as descrições dos processos envolvidos, sendo necessária a proposição de modelos matemáticos.

Modelo pode ser definido como uma série de algoritmos que descrevem um sistema (JAME; CUTFORTH, 1996). Segundo Soler (2004) um modelo simula uma cultura pela estimativa do crescimento de seus componentes como folhas, raízes e caule. Assim, um modelo de crescimento de cultura não somente estima a biomassa total, mas também inclui mais informações quantitativas sobre a maioria dos processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento vegetal.

Monteith (1996) definiu que modelos de simulação de cultura são como um conjunto de equações para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura a partir de coeficientes genéticos e variáveis ambientais, permitindo analisar diversos componentes da produção. A aplicação de modelos de simulação na

agricultura é muito difundida entre as diferentes indústrias para diferentes usos (O'LEARY, 2000).

Muitos modelos de culturas têm sido desenvolvidos para ajudar os pesquisadores a compreender o funcionamento de vários processos dentro do sistema de cultivo agrônômico. Por exemplo, fluxo de água no solo, fotossíntese e crescimento de plantas e balanço de nutrientes são processos normalmente modelados (JAME; CUTFORTH, 1996).

Os modelos de simulação de culturas são considerados ferramentas que contribuem para a melhoria da previsão de safras e monitoramento das culturas, como ocorreu no caso de Liu e Bull (2001), que utilizaram o modelo QCANE para a simulação de biomassa e acúmulo de sacarose em cana-de-açúcar.

Segundo Thornley e Johnson (2000) existem diversos tipos de modelos, sendo didaticamente divididos em modelos empíricos e mecanísticos. Modelos empíricos são fundamentalmente descrições diretas de dados observados, porém, podem ser extremamente úteis. Em um modelo empírico, todas as relações matemáticas descritas a partir da observação do sistema, por informações biológicas ou por qualquer conhecimento da estrutura do sistema estudado. Em geral, considera-se que os modelos empíricos sejam mais convenientes para o produtor rural, por não necessitar de aquisição de novas informações e serem normalmente mais simples.

Os modelos mecanísticos são relativamente mais complexos que os modelos empíricos. Entretanto, seu conteúdo normalmente aplica-se a uma maior gama de fenômenos. Baseiam-se na física e nos processos fisiológicos envolvidos no crescimento da cultura e, por este motivo, oferecem mais possibilidades para manipulação e melhoria do sistema. Wallach et al. (2001) afirmaram, os modelos mecanísticos tornaram-se cada vez mais importantes nos últimos anos como ferramentas de ensino e pesquisa, bem como ferramentas de auxílio a tomada de decisão sobre o manejo de culturas.

Conforme apresentado na Figura 2, o modelo empírico procede diretamente para as variáveis de interesse sobre a cultura, conectando as variáveis de entrada e saída em qualquer caminho que apresente um bom ajuste dos dados. O modelo mecanístico, no entanto, tem uma rota relativamente mais tortuosa, já que em seus componentes

precisam respeitar a ordem dos processos e suas respectivas propriedades, introduzindo variáveis extras no nível de órgãos, tecidos e agregados bioquímicos onde dados de observações adicionais geralmente também são disponíveis. Pela síntese e integração do conjunto de equações que definem o sistema, chega-se então às variáveis de interesse da cultura, como massa de colmos e teor de sacarose, por exemplo.

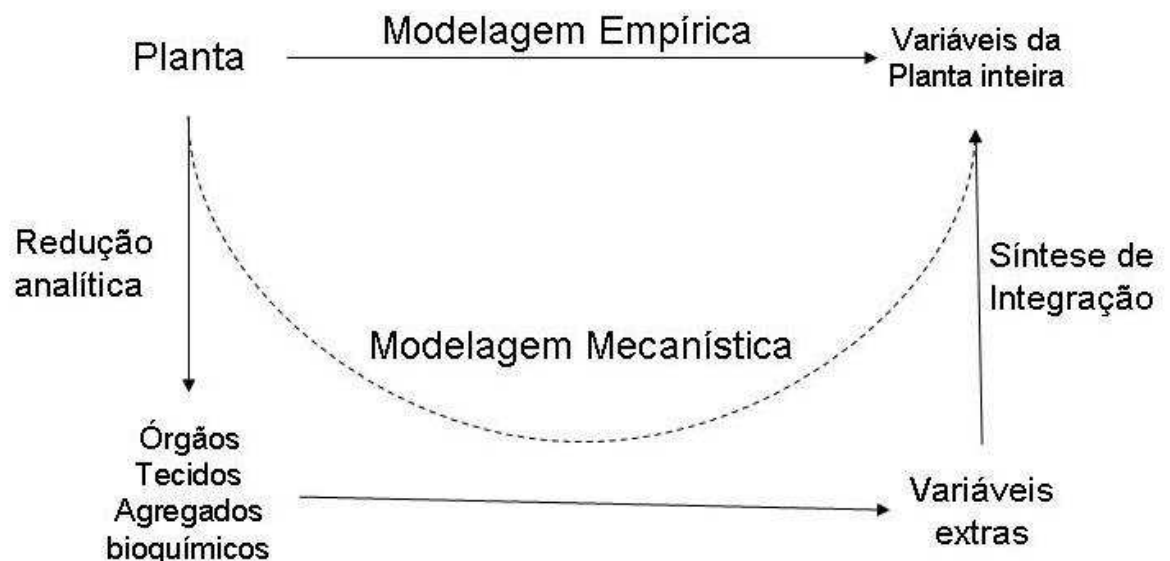


Figura 2 - Representação esquemática da relação entre modelagem empírica e mecânica (Adaptado de THORNLEY; JOHNSON, 2000)

Boote et al. (1996) consideraram que existem três níveis de uso dos modelos de simulação de culturas: utilizados em pesquisas, em tecnologia de manejo de cultivos e com uso em políticas de planejamento agrícola. Thornley e Johnson (2000), porém separaram os modelos em dois tipos, sendo os de aplicação em pesquisas e modelos de aplicação prática (Tabela 1). Os modelos aplicados em pesquisa, por serem mais detalhados, baseados em processos, e possuírem um maior número de parâmetros, tendem a apresentar respostas mais próximas da realidade. Já os modelos de aplicação prática, por serem mais simples e baseados em equações empíricas,

resultam em aproximações mais superficiais, não sendo ideais para aplicações em pesquisas.

Tabela 1 - Modelos de pesquisa e modelos aplicados: comparação das principais diferenças (Adaptado de THORNLEY; JOHNSON, 2000)

	Pesquisa	Aplicações Práticas
Hipóteses	Especulativa	Bem aceito
Conexões com dados observados	Tênue (geralmente)	Bom
Precisão das previsões	Variável	Bom
Escopo / Alcance	Amplo	Limitado
Complexidade	Complexo	Simple
Modelo	Mecanístico	Empírico

A modelagem agrícola baseada em processos, isto é, realizada por modelos mecanísticos, apresenta diversas aplicações, sendo algumas delas descritas por Lisson et al. (2005) como: a) impacto do plantio e da colheita sobre a produtividade da cana-de-açúcar, onde os dados podem ser analisados para tomada da melhor decisão sobre melhor época de plantio e colheita; b) benchmarking dos limites de produção, potenciais e atingíveis, onde o conhecimento dos limites de produção permite o estudo da produtividade potencial em diferentes regiões; c) melhoria da eficiência do uso da água; D) previsão de produtividade. Em Liu e Bull (2001), por exemplo, tem-se um bom exemplo sobre a descrição do processo de simulação mecanística da acumulação de biomassa e sacarose na cana-de-açúcar.

3.2.1 Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia - DSSAT

O Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia (DSSAT do ingles *Decision Suport System Agrotechnology Transfer*) simula o crescimento e desenvolvimento de 16 culturas ao longo do tempo, levando em conta o clima, o solo, o manejo e aspectos genéticos da cultura e vem sendo utilizado nos últimos 15 anos por pesquisadores de todo mundo. O DSSAT contem também uma coleção de programas independentes (Figura 3) para organização dos dados clima, solo, observações de campo, condições experimentais e informações genotípicas (JONES et al., 2003).

Este sistema incorpora diferentes modelos em um software que facilita a avaliação e aplicação dos modelos de culturas para diferentes propósitos (JONES et al.,

2003). Jame e Cutforth (1996) descrevem o DSSAT como um conjunto de programas de computador projetados para acomodar modelos padronizados de culturas, permitindo ao usuário inserir, organizar e armazenar dados de cultura, solo e climáticos, permite a calibração e validação de modelos de crescimento de culturas e também permite a avaliação de diferentes sistemas de manejo em um local.

Cada modelo é estruturado utilizando abordagem modular, como descrito por Jones et al. (2001) Suas características mais importantes são: a separação dos módulos por linhas disciplinares; definição clara das interfaces para cada módulo; permite que componentes individuais possam ser inseridos ou retirados com pouco impacto no programa principal; facilitação na documentação e manutenção dos códigos; permite que programações em diferentes linguagens possam ser ligados; permite uma fácil integração de diferentes tipos de aplicações; aceita para evolução do programa a integração de outros componentes como pecuária e consórcio de culturas; facilita a cooperação entre diferentes grupos de modelos onde cada um pode ser concentrado em módulos específicos.

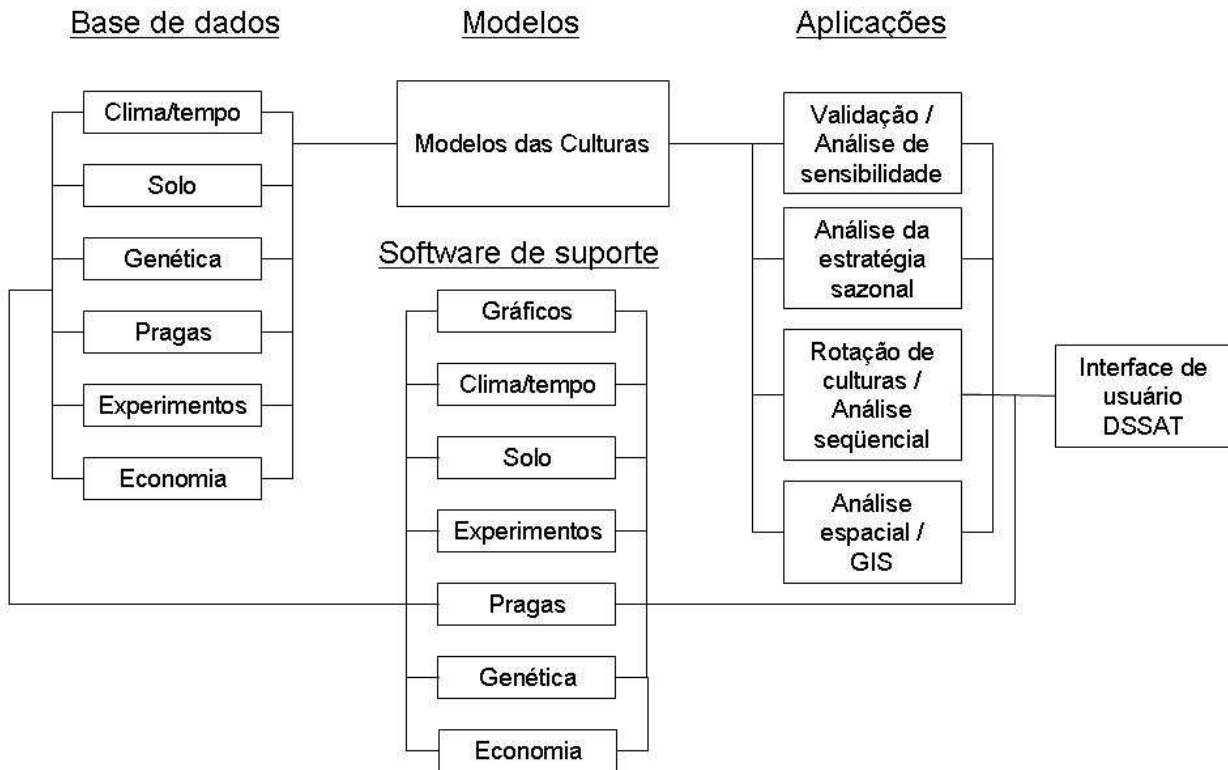


Figura 3 - Diagrama da base de dados, aplicação, e componentes de software e seus usos com modelos de culturas para aplicações no DSSAT (adaptado de JONES et al., 2003)

Na modelagem, o DSSAT trabalha com alguns módulos específicos nas simulações como o módulo de clima/tempo, o qual faz a leitura ou geração de dados diários, principalmente de temperatura máxima ou mínima, radiação solar e precipitação. No módulo de solo, o perfil é unidimensional (horizontalmente homogêneo) e constituído por diferentes camadas verticais (JONES et al., 2003). Ele integra informações de quatro submódulos: água no solo, temperatura do solo, carbono e nitrogênio no solo e dinâmica do solo. Para estimativa de evapotranspiração, o DSSAT possui o módulo solo-planta-atmosfera, reunindo dados de entrada de solo, planta e atmosfera, computando a interceptação da radiação pela cultura e a evapotranspiração potencial ou de referência. No cálculo de evapotranspiração, o

modelo pode utilizar uma ou duas opções. O padrão é o cálculo pelo método de Priestley e Taylor (1972), onde é necessário somente dado de radiação solar e temperatura, descrito por Jones e Ritchie (1991). O método de Penman-FAO (DOORENBOS; PRUITT, 1977) para o cálculo da evapotranspiração potencial pode ser utilizado opcionalmente para melhor representação em condições áridas e de muito vento, sendo necessário dados de umidade e vento na entrada do DSSAT.

A interface do módulo de cultura individual tem a mesma função do modelo padrão CROPGRO na medida em que tem quase a mesma interface de variáveis, ligando a dinâmica de crescimento de plantas com os outros módulos do DSSAT. No entanto, o módulo de cultura individual é projetado para a ligação de módulos que descrevem o crescimento, desenvolvimento e produtividade para as culturas individuais. O sistema DSSAT possui módulos individuais para diversas culturas como: milho, sorgo, milheto, trigo, cevada, arroz, soja, feijão, entre outros, sendo possível adicionar novas culturas de interesse (HOOGENBOOM et al., 2003).

Para o sistema de produção da cana-de-açúcar, o DSSAT utiliza o modelo DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008), sendo baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES; KINIRY, 1986) e desenvolvido na África do Sul com o intuito de modelar os processos fisiológicos mais relevantes da indústria açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991). O DSSAT contém também um segundo modelo de cana-de-açúcar (CASUPRO), mas que ainda requer desenvolvimento adicionais para aplicações práticas.

3.2.2 Modelos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar

Para a indústria sucro-alcooleira, os modelos de simulação têm aplicações para diversas questões sobre a produção de cana-de-açúcar no que diz respeito a sua bioquímica, agronomia, fisiologia e manejo de pragas, processos de moagem e danos ambientais (O'LEARY, 2000). Estudos em escala nacional e internacional vêm sendo desenvolvidos na última década para desenvolver e avaliar modelos que reduzam a necessidade de experimentos em campo (INMAN-BAMBER, 1991).

Modelos de simulação do crescimento da cana-de-açúcar poderiam simular diferentes cenários e otimizar recursos financeiros e humanos, através do

direcionamento de pesquisas do setor, além de aumentar o entendimento dos processos envolvidos no crescimento e produtividade. No Brasil, o uso de modelos de simulação de crescimento ainda não é rotina. São muitas as pesquisas relevantes com a cultura da cana-de-açúcar, mas os experimentos que interrelacionam fatores como solo, clima e variedades com a fenologia da cana-de-açúcar ainda são poucos (SUGUITANI, 2006). Dentre alguns modelos brasileiros, pode-se citar o SIMCANA proposto por Ometto (1974), sendo um modelo matemático-fisiológico do crescimento da cultura, tendo como variáveis de entrada a radiação solar global, temperatura máxima e mínima e umidade relativa do ar. Machado (1981) também apresentou um modelo matemático-fisiológico para simulação do acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar a partir de informações meteorológicas.

Os principais modelos de simulação de cana-de-açúcar em uso em todo o mundo são o modelo australiano, APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999) e o modelo sul-africano DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991). Estes dois modelos, embora desenvolvidos independentemente, tem origens e abordagens semelhantes para simular a fenologia, expansão do dossel, interceptação da radiação, divisão da biomassa acima do solo e relações planta-nitrogênio (LISSON et al., 2005).

O APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) inclui uma coleção de modelos denominados módulos, que podem ser montados de forma específica pelo usuário. Foi desenvolvido para simular processos biofísicos em sistemas de cultivo, em particular onde existe um interesse em resultados econômicos e ecológicos de práticas de gerenciamento em face aos riscos climáticos (KEATING et al., 2003). O APSIM-Sugarcane representa um modelo de cana que segue o modelo de outras culturas do módulo APSIM, mas as suas características específicas da cana-de-açúcar são definidas em uma tabela de variáveis de entrada (O'LEARY, 2000). Este modelo foi concebido para simular a produção de cana, produção de sacarose, biomassa vegetal, uso da água, captação de nitrogênio pela cultura e para partição de carbono e nitrogênio para um campo de cana-de-açúcar uniforme sendo o único modelo que simula as diferenças da cana-planta e cana-soca e teor de água do colmo (LISSON et al., 2005).

Outro modelo desenvolvido na Austrália foi o QCANE (LIU; KINGSTON, 1995). É um tipo de modelo que evoluiu de forma mecanicista com ênfase na fotossíntese, respiração e partição dos fotoassimilados. Nele todo fotoassimilado produzido diariamente é dividido em biomassa estrutural ou sacarose nas diferentes partes da planta. Este modelo tem por característica a simulação do uso da sacarose pela planta podendo ser utilizada como carbono estrutural ou na respiração de manutenção. A fotossíntese diária total é determinada pela radiação fotossinteticamente ativa e a temperatura, calibrada pelos dados experimentais locais. A respiração é dividida em porções para manutenção e crescimento sendo que a taxa da constante da mesma é determinada utilizando uma função de acúmulo de biomassa e temperatura (SCARPARI, 2007). Segundo O'Leary (2000), um conceito interessante do modelo QCANE é que a área foliar é determinada a partir dos fotoassimilados particionados.

Liu e Kingston (1995) avaliaram o desempenho dos modelos QCANE, APSIM e DSSAT/CANEGRO, demonstrando que o primeiro apresentou os menores erros na simulação da biomassa. Em algumas situações, o erro de QCANE era menor que a metade do erro do APSIM-Sugarcane na biomassa. As mudanças sazonais na biomassa seguiram muito próximas aos dados observados em outros estudos da validação com os dados australianos e havaianos (O'LEARY, 2000).

O primeiro modelo amplamente distribuído foi o modelo australiano AUSCANE (JONES et al., 1989), que foi concebido a partir do sistema EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) para resolver problemas de erosão do solo, produtividade da cultura e a economia. O AUSCANE, porém, foi considerado fraco nos aspectos biológicos da cana-de-açúcar e composto por códigos desestruturados, sendo que após a partir deste modelo, surgiu o APSIM (O'LEARY, 2000).

Villegas et al. (2005) desenvolveram o CASUPRO, com o objetivo de obter um modelo dinâmico, mecanístico (baseado em processos simplificados do solo e da planta), com estrutura modular, simulação de processos de balanço de carbono – água – nitrogênio, aplicáveis a diferentes condições e inserido no DSSAT. A principal ênfase do modelo é a simulação da massa de colmos e teor de sacarose. A simulação da produtividade econômica consistiu em incorporar a radiação solar, temperatura e fotoperíodo como os fatores que determinam a produção. Ainda, o modelo CASUPRO

inclui características das variedades de cana-de-açúcar, como a estrutura do caule e folhas, a população de colmos, a capacidade de produção de biomassa e sacarose e estádios fenológicos como a floração e maturação.

Em 1995, o CIRAD desenvolveu o modelo de simulação de cana-de-açúcar MOSICAS (MARTINE, 2003), o qual permite a partir de parâmetros de entrada, como dados meteorológicos, de solo, da planta e variedades, da cultura e seu manejo, calcular diariamente variáveis ambientais e de crescimento da cultura. Segundo Suguitani (2006) o modelo é denominado modelo explanatório, que analisam o sistema como um todo, além dos processos separadamente, descrevendo-os quantitativamente.

3.2.2.1 DSSAT/CANEGRO

O modelo DSSAT/CANEGRO foi desenvolvido na África do Sul com o intuito de modelar os processos fisiológicos mais relevantes da indústria açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991). Incluído no conjunto de modelos Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT versão 3.1) (KIKER; INMAN-BAMBER, 1997), e atualizado na versão 4.5 do DSSAT por Singels et al. (2008), o modelo DSSAT/CANEGRO vem sendo aplicado em diversas regiões do mundo para análise e avanço no conhecimento dos sistemas de produção de cana-de-açúcar (O'LEARY, 2000; INMAN-BAMBER et al., 2002; THORBURN et al., 2005). Na Figura 4 observa-se um resumo esquemático de como o DSSAT/CANEGRO se encaixa no quadro do DSSAT.

Um dos primeiros processos do modelo teve por objetivo definir a melhor época de colheita para a África do Sul e simular o efeito do estresse hídrico e da irrigação na cultura, pois grande parte do cultivo de cana na África do Sul tem a água como fator limitante (INMAN-BAMBER, 2000).

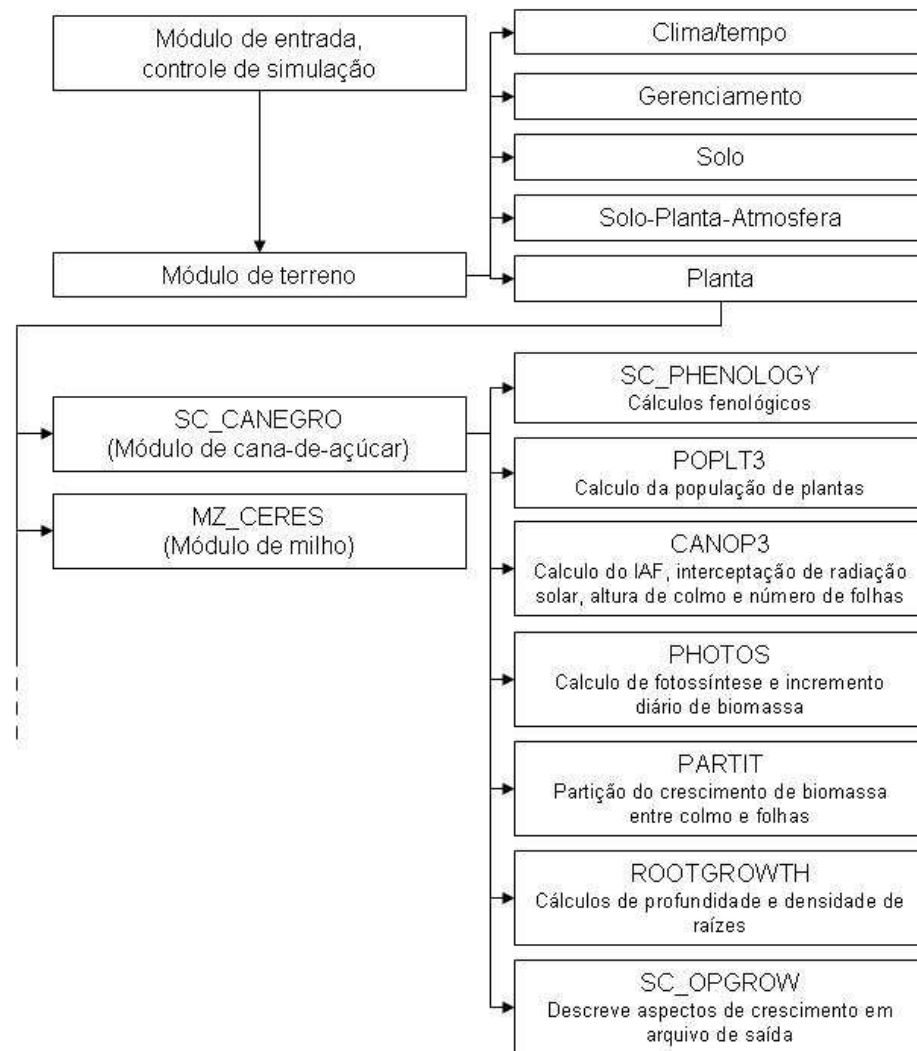


Figura 4 - Representação esquemática do DSSAT/CANEGRO, como um módulo inserido no DSSAT (adaptado de SINGELS et al., 2008)

O modelo DSSAT/CANEGRO pode também ser empregado como referência, indicando inconsistências nos modelos empíricos (O'LEARY, 2000). Este aspecto é especialmente importante, pois em grande escala, onde as lavouras apresentam grande heterogeneidade edafo-climática e biótica, a dificuldade de obtenção dos parâmetros de entrada exigidos por modelos mais complexos como o DSSAT/CANEGRO tornam sua utilização mais restrita. Atualmente, contudo, a disponibilidade de dados de clima e solo tem aumentado, permitindo o uso de ferramentas mais robustas em escalas mais amplas de aplicação.

Este tipo de modelo, por basear-se na modelagem de processos, além de permitir a estimativa da produtividade, também permite conhecer como se deu o desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo de cultivo, pois considera desde variáveis biométricas até aspectos envolvendo o consumo de água, o balanço hídrico no solo e a ciclagem de nutrientes, notadamente o nitrogênio (JONES et al., 2007). Singels et al. (2008) apresentam as principais características do DSSAT/CANEGRO, baseando-se em descrições fisiológicas do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar incluindo a fenologia, desenvolvimento do dossel, perfilhamento, acúmulo e particionamento de biomassa, crescimento de raízes, estresse hídrico e acamamento da cultura.

O modelo requer como dados de entrada, parâmetros de solo (capacidade de campo, ponto de murcha e profundidade do solo) e também parâmetros meteorológicos (radiação solar, temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação). Dados de umidade relativa e velocidade do vento podem ser inseridos, porém não se apresentam como essenciais (JONES et al., 2003). Esses conjuntos de parâmetros são subdivididos em três tipos: ecótipos com 31 parâmetros (Tabela 2), 20 parâmetros de cultivares (Tabela 3) e 23 de espécie (Tabela 4), porém somente os parâmetros de ecótipo e cultivares devem ser ajustados pelo usuário do modelo (SINGELS et al., 2008).

Tabela 2 - Parâmetros de ecótipos do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições. (SINGELS et al., 2008)

(continua)

Parâmetro	Unidade	Descrição
DELTTMAX	t ⁻¹	Varição máxima do teor de sacarose por unidade de variação da massa do colmo na seção imatura do caule
SWDF2AMP		Sensibilidade de particionamento da sacarose ao estresse hídrico
CS_CNREDUC		Redução máxima da fração do dossel devido ao estresse hídrico
CS_CNPERIOD	dias	Período de estresse hídrico requerido para ter o maior efeito na redução do dossel
Tthalfa	GD m ⁻¹	Graus-dia necessário para o dossel ajustar-se à metade da largura da linha
dPERdT	mm h ⁻¹ °C ⁻¹	Mudança na taxa de crescimento da planta por unidade de temperatura efetiva
EXTCFN		Máximo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
EXTCFST		Mínimo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
LFNMEXT	nº folhas	Numero de folhas (incluindo folhas mortas ainda fixadas) onde ocorre a máxima extinção da radiação
AREAMX_CF(1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar ($y=cf_1+cf_2*x+cf_3*x^2$)
AREAMX_CF(2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
AREAMX_CF(3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
WIDCOR		Parâmetro que influencia a largura das folhas
WMAX_CF(1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por numero de folhas
WMAX_CF(2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por numero de folhas
WMAX_CF(3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por numero de folhas
LMAX_CF(1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por numero de folhas
LMAX_CF(2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por numero de folhas
LMAX_CF(3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por numero de folhas
MAXLLENGTH	cm	Maximo comprimento absoluto de folha
MAXLFWIDTH	cm	Máxima largura absoluta de folha
POPCF(1)		Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPCF(2)		Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPDECAY		Fração de perfilhos sobre a população madura (com 1600 °Cd), que senescem por unidade de graus dia
TTBASEEM	°C	Temperatura base para emergência e inicio da alongação do colmo
TTBASELFEX	°C	Temperatura base para fenologia de folha

Tabela 2 - Parâmetros de ecótipos do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições.
(SINGELS et al, 2008)

(conclusão)

TTBASEPOP	°C	Temperatura base para fenologia de colmos
TBASEPER	°C	Temperatura base para extensão da planta
LG_AMRANGE	t ha ⁻¹	Variação na massa da parte aérea do início ao final do acamamento
LG_GP_REDUC		Redução na fotossíntese bruta devido ao acamamento total, como fração
LG_FI_REDUC		Redução na fração de interceptação do dossel devido ao acamamento completo

Tabela 3: Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições.
(SINGELS et al, 2008)

Parâmetro	Unidade	Descrição
PARCEmax	g MJ ⁻¹	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração, por unidade de PAR
APFMX	t t ⁻¹	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuído a massa seca da parte aérea
STKPFMAX	t t ⁻¹ base massa seca	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura
SUCA	t t ⁻¹	Parâmetro de particionamento de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo
TBFT	°C	Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo
Tthalfo	GD	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento
Tbase	GD	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel
LFMAX	nº folhas	Numero máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este numero.
MXLFAREA	cm ²	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o numero de folhas MXLFARNO (cm ²)
MXLFARNO	nº folhas	Numero de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA
PI1	GD	Intervalo de filocrono 1 (para numero de folhas abaixo do Pswitch)
PI2	GD	Intervalo de filocrono 1 (para numero de folhas acima do Pswitch)
PSWITCH		Numero da folha em que há mudança no filocrono
MAX_POP	colmos m ⁻²	População de perfilhos máxima
POPTT16	colmos m ⁻²	População de colmos após 1600 graus-dia
TTPLNTEM	GD	Graus-dia para emergência da cana-planta
TTRATNEM	GD	Graus-dia para emergência da soqueira
CHUIBASE	GD	Graus-dia para o início do crescimento do colmo
TT_POPGROWTH	GD	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento
LG_AMBASE	t ha ⁻¹	Massa da parte aérea (colmo, folhas e água) onde ocorre o início do acamamento

Tabela 4 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições. (SINGELS et al., 2008)

Parâmetro	Unidade	Descrição
Tbasephotos	°C	Temperatura base para fotossíntese
Critsw		Limiar de estresse hídrico para impacto prolongado de estresse na fotossíntese
HuRecover	GD	Graus-dia requerido para total recuperação da fotossíntese após estresse hídrico severo
RespQ10		Aumento da fração na taxa de respiração por 10°C de aumento na temperatura (coeficiente Q10)
RespGcf		Fração da fotossíntese bruta perdida na respiração para o crescimento
PCB		Coeficiente de partição: coeficiente de extinção da fração de incremento de massa seca, alocada para a biomassa acima do solo
Max_rootpf		Fração da partição máxima do incremento da massa diária às raízes
FTCON		Resposta à temperatura do parâmetro de forma
SURCON		Parâmetro de particionamento de sacarose que determina o tempo de resposta de mudanças na partição entre sacarose e fibra devido a mudanças ambientais
RTcmpg	cm g ⁻¹	Comprimento radicular por massa de raiz
Wrk		Coeficiente de densidade de comprimento radicular por profundidade
RLVmin	cm cm ⁻³	Densidade de comprimento radicular mínimo nas camadas do solo
SenesF	Nº folhas	Número de folhas senescentes por broto por 100 dias de estresse
Reset	mm	Chuva requerida para recompor o contador de dias de estresse
Percoeff		Fração do crescimento da planta atribuído ao alongamento do colmo
CHTCoeff	cm cm ⁻¹	Coeficiente de determinação da altura do dossel em função da altura do colmo e número de folhas
Hillpar1		Função empírica do parâmetro de forma
EORATIO		Relação da evapotranspiração de um dossel completamente formado e sem restrições hídricas de cana-de-açúcar comparado com a evapotranspiração de referência da grama (Kc da FAO-56)
RWUEP1		Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual a evaporação e fotossíntese são limitadas
RWUEP2		Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual o crescimento é limitado
RWUMX	cm ³ água cm ⁻¹ raiz	Absorção máxima de água por unidade de comprimento da raiz
LG_RATING		Pontuação de acamamento quando a cultura está totalmente acamada
LG_CRIT_WIND	km dia ⁻¹	Limite do vento para o acamamento

Os parâmetros de cultivares, ecótipos e espécies pretendem juntos representar as características genéticas da cultura da cultura em diferentes níveis de especificidade. Os dados de cultivares são considerados como as características de cada variedade de cana-de-açúcar, enquanto que os parâmetros de ecótipos, também representando estas características, apresentam-se mais estáveis. Os parâmetros de espécie representam as características da própria espécie da cultura, descrevendo características como fotossíntese, respiração, particionamento, crescimento de raízes e resposta da cultura ao acamamento e estresse hídrico (SINGELS et al., 2008).

Singels et al. (2008) descreveram as principais características do modelo DSSAT/CANEGRO, que seguem: a emergência do perfilhamento primário é simulada quando um período específico de tempo térmico foi acumulado a partir do plantio (TTPLNTEM) ou do corte (TTRATNEM), o início do crescimento de colmos é simulado quando um período específico de exigência térmica (CHUPIBASE) é atingido a partir do perfilhamento primário. O pico de perfilhamento ocorre após um período de tempo térmico acumulado desde a emergência, através do parâmetro TT_POPGROWTH. Na modelagem, a fase de perfilhamento dura desde a emergência dos primeiros perfilhos até o pico de perfilhamento, enquanto que o crescimento dos colmos ocorre desde o início do crescimento até a colheita. A fase de senescência de perfilhos é modelada após o pico de perfilhamento até a colheita. No DSSAT/CANEGRO o florescimento não é modelado.

No desenvolvimento da cultura, o DSSAT/CANEGRO utiliza um método de índice de área foliar derivado do desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos baseado no tempo térmico. Este método simula o desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos, onde a área foliar de cada perfilho é extrapolado para o nível de dossel pela multiplicação da área foliar individual pelo número de perfilhos por unidade de área.

A expansão foliar é calculada através da taxa de expansão da planta (PER, cm dia^{-1}), que pode ser calculada pelos parâmetros de ecótipos através da equação 1. Os valores aumentam para as folhas subseqüentes até o número específico de folhas (MXLARNO) e a máxima área da lâmina foliar é estipulada pelo parâmetro MXLFAREA.

$$PER = SWDF2 * dPERdT * MAX(0., TMEAN - TBASEPER) * \frac{24}{10} \quad (1)$$

em que: PER é a taxa de expansão da planta (cm dia⁻¹), SWDF2 é o fator de estresse hídrico para expansão da planta (adimensional), dPERdT é a taxa de extensão da planta sem estresse hídrico (mm °C⁻¹ h⁻¹), TMEAN é a temperatura média diária (°C) e TBASEPER é a temperatura base para extensão da planta (°C).

A interceptação de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é calculada de acordo com a lei de Beer, que utiliza valores de índice de área foliar total (TLAI) e índice de área foliar de folhas verdes (GLAI) para cálculo da evapotranspiração, utilizando o modelo de Penman-Monteith seguindo a parametrização FAO 56 (ALLEN et al., 1998). A densidade de população é simulada utilizando alguns parâmetros de ecótipos (POPCF1, POPCF2 e POPDECAY), que determinam a taxa de perfilhamento sem déficit hídrico e a senescência em função de tempo térmico, e alguns parâmetros de cultivares (MAX_POP e POPTT16) que determinam o pico de população e sua estabilização. Estas simulações são diretamente afetadas pelo espaçamento de plantio e por estresse hídrico ocorrido na cultura (SINGELS et al., 2008).

Já o crescimento de colmo (SHGT) e dossel (CANHEIGHT) são simulados através das equações 2 e 3, respectivamente, descritas por Singels et al. (2008) onde são utilizados parâmetros de espécies para seu cálculo.

$$SHGT = SHGT + (PER * PERcoeff) \quad (2)$$

em que: SHGT é a altura do colmo (cm), PER é a taxa de expansão da planta (cm dia⁻¹) e PERcoeff é a fração do crescimento da planta atribuído ao alongamento do colmo (adimensional).

$$CANHEIGHT = \frac{(SHGT + LMAX(LFN(1)) * CHTCoeff)}{100} \quad (3)$$

em que: CANHEIGHT é altura do dossel (cm), SHGT é a altura do colmo (cm), LMAX(LFN(1)) é comprimento da maior folha do primeiro grupo de perfilhos (cm) e CHTcoeff é o coeficiente de determinação da altura do dossel em função da altura do colmo e número de folhas (cm cm^{-1}).

O modelo DSSAT/CANEGRO também simula o acúmulo de biomassa e particionamento de fotoassimilados, descritos por Singels e Bezuidenhout (2002) em que o modelo calcula o incremento diário na biomassa total utilizando a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e eficiência de conversão (PARCE, g MJ^{-1}) de acordo com a equação 4, onde R_m é a taxa de respiração de manutenção. A eficiência de conversão da PAR e a respiração de manutenção são dependentes da temperatura.

$$\frac{dTOT}{dt} = (1 - Re_{spGcf}) * (PARCE * 10^{-6} * IPAR - R_m * TOT) * SWDF1 \quad (4)$$

em que: $dTOT/dt$ é o incremento diário na biomassa total ($\text{t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), Re_{spGcf} é o coeficiente de respiração para o crescimento (t t^{-1}), PARCE é a eficiência da conversão da radiação fotossinteticamente ativa (g MJ^{-1}), IPAR é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ ha^{-1}), R_m é a taxa de respiração de manutenção (adimensional), TOT é o tamanho da cultura (t ha^{-1}) e SWDF1 é o nível de estresse hídrico da cultura (adimensional).

A partição dos fotoassimilados entre raízes e parte aérea é simulada por função não-linear da biomassa total, onde a máxima fração de incremento diário da biomassa particionada para a parte aérea é especificada no parâmetro de cultivar APFMX (SINGELS et al., 2008). O crescimento radicular tem um algoritmo expresso em termos de extensão da profundidade de raízes, bem como o aumento da massa radicular e do comprimento das raízes por camada de solo.

A simulação de estresse hídrico é realizada através do impacto da deficiência de água na regulação dos diferentes processos da planta (assimilação de carbono, crescimento) por diferentes fatores de estresse hídrico (SWDF_i) (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002).

3.2.3 Parametrização de Modelos

Modelos mecanísticos normalmente contêm um grande número de parâmetros, sendo cada parâmetro identificado pelo fato de ter um valor fixo para todas as localidades e/ou anos, gerando acúmulo de erros por parte dos mesmos. O acúmulo de erros nos diferentes parâmetros, além dos erros nas equações do modelo, pode levar a resultados muito diferentes em relação aos dados medidos em campo. Uma solução para este problema é a calibração do modelo, que consiste na estimativa de alguns ou de todos os parâmetros do modelo para melhoria do ajuste entre os dados modelados e medidos em campo (WALLACH et al., 2001).

Conforme Jame e Cutforth (1996) a calibração é um ajuste de parâmetros do sistema de modo que os resultados simulados cheguem a um nível pré-determinado, geralmente baseado em observações de campo, em que a calibração deve ser conduzida utilizando-se um experimento definido onde o solo e condições agrometeorológicas são monitoradas e o crescimento da cultura acompanhado detalhadamente.

A parametrização apresenta algumas indefinições e dificuldades como saber quais parâmetros devem ser ajustados com os dados de campo. Wallach et al. (2001) propuseram que uma abordagem poderia ser feita escolhendo-se a priori um pequeno número de parâmetros para serem ajustados e em seguida realizar o ajuste dos demais, e uma outra teoria seria a de ajustar os parâmetros mais sensíveis do modelo, selecionando-os através da análise de sensibilidade. Adicionalmente, os parâmetros mais sensíveis do modelo têm uma maior influência sobre a variável de estado, identificando quais fatores devem ser medidos mais cuidadosamente e quais fatores devem ser conduzidos preferencialmente (DRECHSLER, 1998).

Na parametrização de modelos, são utilizados também ferramentas otimizadoras de parâmetros como o GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation) (MERTENS et al., 2004), a qual é um método de estimativa Bayesiana que utiliza amostragem de Monte Carlo de distribuição prévia, e a função de probabilidade Gaussiana para a determinação do melhor definição do coeficiente baseada nos dados utilizados no processo de estimativa (MARIN et al., 2011).

Lisson et al. (2000) avaliaram a performance de sistemas de modelagem de cana-de-açúcar concluindo que as dificuldades na parametrização de modelos muitas vezes surgem devido a deficiências na qualidade e extensão dos dados medidos e salientaram que as variáveis de saída do modelo utilizado diferiram significativamente conforme houve mudanças em determinados parâmetros. Neste caso, pode-se observar a importância da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo em questão para a sua parametrização.

3.2.4 Análise de Sensibilidade

Segundo Saltelli (2002), a análise de sensibilidade é o estudo de como a incerteza no resultado de um modelo pode ser dividida pelas diferentes fontes de incerteza nos parâmetros de entrada desse modelo. A análise de sensibilidade é considerada por alguns autores (DRECHSLER, 1998; EVANGELISTA; FERREIRA, 2006; LAMBONI et al., 2009; RIVERA et al., 2008; GONÇALVES et al., 2006) como um pré-requisito para a construção de um modelo em qualquer ambiente, seja ele de diagnóstico ou prognóstico, e em qualquer campo onde os modelos são utilizados.

Conforme Ooi (2008) existem dois tipos de análise de sensibilidade: local e global. A primeira é realizada modificando-se o valor de cada parâmetro, um de cada vez, mantendo os outros fixos em um valor padrão e verificando os resultados em diferentes variáveis de saída do modelo. Já a sensibilidade global analisa todos os parâmetros potenciais de modo conjunto, tendo como objetivo apresentar uma indicação geral de como o resultado de saída varia em resposta às variações de entrada dentro da faixa de incerteza dos parâmetros.

A análise de sensibilidade não avalia a qualidade de um modelo, mas acrescenta nossa compreensão sobre seu comportamento (HUSSON et al., 1998). Contudo, a comparação de coeficientes de sensibilidade entre diferentes cenários permitem identificar a maneira pela qual a ordem de classificação da sensibilidade dos parâmetros depende dos valores dos parâmetros do modelo (DRECHSLER, 1998).

Como exemplo, Rivera et al. (2008) realizaram a análise de sensibilidade em modelo aplicado à dinâmica da água e potássio no solo com o objetivo de avaliar os parâmetros de entrada do modelo e suas respectivas respostas nas variáveis de saída.

Encontraram diferenças de resultados conforme o parâmetro estudado, sendo que o modelo apresentou-se bastante sensível para o parâmetro de distribuição da água no solo e pouco sensível às variações do parâmetro referente à dispersividade do solo. Segundo Gonçalves et al. (2006) a análise de sensibilidade é um processo essencial para entender como um modelo responde a mudanças nos dados ou parâmetros de entrada e para identificar o impacto que os mesmos causam nos resultados do modelo. Evangelista e Ferreira (2006) demonstraram que pela análise de sensibilidade foi possível verificar o efeito dos parâmetros de entrada sobre os resultados obtidos pela aplicação do modelo SDA, utilizado em dimensionamento e manejo de sistema de drenagem agrícola, sendo que os resultados possibilitaram a verificação dos parâmetros com maior necessidade de precisão ao serem determinados como precipitação diária, profundidade de instalação de drenos, condutividade hidráulica do solo e a evapotranspiração de referência.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar utilizando dados coletados em experimentos de campo em Piracicaba e Pradópolis, especificamente para o presente trabalho, e quatro conjuntos de dados coletadas por Pellegrino (2001), Da Silva (2007), Costa et al. (2007) e Rezende (2008)¹, como descrito a seguir.

4.1 Dados utilizados na parametrização e avaliação

4.1.1 Campo experimental de Pradópolis/SP

O experimento foi conduzido em Pradópolis/SP, em área pertencente à Usina São Martinho, em campo experimental conduzido pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), localizada em latitude 21° 18' 24" Sul e a longitude 48° 05' 31" Oeste com altitude de 608 metros. O clima é classificado como Cwa (classificação de Koeppen), sendo considerado temperado, com chuvas concentradas no verão e período seco no inverno, apresentando temperatura de verão média acima dos 22°C e o solo da localidade do experimento foi caracterizado como latossolo roxo de textura argilosa, eupieutrófico. Durante o ciclo não foi observado qualquer sinal de deficiência nutricional ou de pragas ou doenças.

Os dados meteorológicos diários foram coletados através de uma estação meteorológica instalada pelo CTC e localizada a aproximadamente 1 km em linha reta da área experimental. Os dados coletados foram de temperatura máxima (°C) (marca Vaisala), temperatura mínima (°C) (marca Vaisala), precipitação (mm) (marca Hidrological) e de radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{D}^{-1}$) (marca Apogeem). Como a presente estação não media a radiação solar global, os dados faltantes foram estimados pelo método de Bristow e Campbell (1984) como parametrização descrita por Conceição e Marin (2007) usando a equação 5.

¹ Dr Ronaldo Rezende, informação pessoal. Dados coletados no âmbito do projeto Produção Sustentável da Cultura da Cana-de-açúcar para Bioenergia em Regiões Tradicionais e de Expansão no Nordeste e Norte do Brasil, financiado pelo Macroprograma 1 da Embrapa.

$$Q_g = A \left[1 - \exp(-B(T_{\max} - T_{\min})^C) \right] \quad (5)$$

em que: Q_g é a radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{D}^{-1}$), A é o coeficiente empírico de valor 0,7 (adimensional), B é o coeficiente empírico de valor 0,005 (adimensional), C é o coeficiente empírico de valor 2,4 (adimensional), T_{\max} é a temperatura máxima do dia ($^{\circ}\text{C}$) e T_{\min} é a temperatura mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$).

No modelo DSSAT/CANEGRO são inseridos os dados do solo utilizado no local do experimento na ferramenta SBUILD. Os dados exigidos são: coloração do solo, drenagem profunda, escoamento superficial, declividade. Também devem ser inseridos dados do perfil do solo conforme a profundidade: horizonte principal, argila, silte, rocha, teor de carbono, pH em água, capacidade de troca catiônica e teor total de nitrogênio.

As variedades utilizadas foram CTC 4, CTC 7 e CTC 20, cujas principais características estão descritas na Tabela 5. Em Pradópolis, estas variedades foram utilizadas para a calibração do modelo DSSAT/CANEGRO.

Tabela 5 - Principais características das variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20

	CTC 4	CTC 7	CTC 20
Produtividade	Muito alta	Alta	Muito alta
Ciclo	Médio	Precoce	Toda Safra
Perfilhamento	Bom	Bom	Bom
Tombamento	Médio	Alto	Médio

A área experimental foi distribuída em 4 repetições de cada cultivar com 6 linhas de plantio de 15 metros de comprimento em cada repetição, onde as medidas foram realizadas na 3ª, 4ª e 5ª linha, nos 5 metros centrais da mesma, totalizando 15 metros lineares de plantio. O plantio foi realizado em 5 de março de 2009 com espaçamento de 1,5m e a adubação e tratos culturais adequados, conforme área padrão de cultivo comercial. Foram marcadas 10 plantas por parcela para acompanhamento das medidas biométricas. A colheita foi realizada no dia 02 de julho de 2010.

O período de coleta dos dados meteorológicos e biométricos foi entre fevereiro de 2009 e julho de 2010. Os dados meteorológicos foram coletados diariamente no

período estudado, e as análises biométricas e tecnológicas foram realizadas em algumas datas de medições e amostragem (Tabela 6), descritas no item 4.1.3.

Tabela 6 - Datas de amostragem de biometria (B), análise tecnológica (T) e colheita (C) em Pradópolis

Data da amostragem	Pradópolis
08-Jul-09	B
12-Ago-09	B
15-Set-09	B
30-Out-09	B
15-Dez-09	B
26-Abr-10	T
26-Mai-10	T
02-Jul-10	T/C

4.1.2 Campo experimental de Piracicaba/SP

Outro campo experimental foi conduzido em Piracicaba/SP, em área pertencente ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), sito à latitude 22° 42' 30" Sul, longitude 47° 38' 00" Oeste, a 546 metros de altitude. O clima é classificado como Cwa (classificação de Koeppen), sendo considerado temperado, com chuvas concentradas no verão e período seco no inverno, apresentando temperatura de verão média acima dos 22°C e o solo da localidade do experimento foi caracterizado como latossolo vermelho escuro.

Os dados meteorológicos necessários para a modelagem do crescimento da cultura no DSSAT/CANEGRO foram coletados de estação meteorológica automática situada no CTC, aproximadamente a 1 km de distância em linha reta da área experimental. Os dados coletados foram de temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), precipitação (mm) e radiação solar global ($W m^{-2} D^{-1}$). Foram plantadas 15 gemas por metro. Durante o ciclo não foi observado qualquer sinal de deficiência nutricional ou de pragas ou doenças.

Na área experimental de Piracicaba, foram utilizadas as mesmas variedades de Pradópolis. Nessa área foram plantadas as mesmas variedades cultivadas em

Pradópolis com o intuito de validar o modelo parametrizado com os dados obtidos no campo de Pradópolis.

Em Piracicaba, a área experimental é constituída por uma parcela de cada variedade de cana-de-açúcar, entre 15 variedades diferentes, as quais continham as variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20. Cada parcela foi subdividida em 3 repetições, sendo que cada repetição foi constituída de uma linha de plantio com 8 metros lineares, utilizando-se somente os 5 metros centrais, sendo o restante da linha desprezado como bordadura. O plantio foi realizado em 15 de abril de 2009, e os tratos culturais foram adequados a de um plantio comercial. Em cada linha foram marcadas 5 plantas ao acaso para acompanhamento das medidas biométricas. A colheita foi realizada no dia 24 de agosto de 2010. Em 13 de agosto de 2008 deu-se a operação de “quebra lombo”, operação esta comumente realizada em áreas de plantio de cana-de-açúcar.

O período de coleta dos dados meteorológicos e biométricos foi entre abril de 2009 e julho de 2010 em Piracicaba. Os dados meteorológicos foram coletados diariamente ao longo do período estudado. As análises biométricas e tecnológicas foram realizadas em algumas datas de medições e amostragem, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Datas de amostragem de biometria (B), análise tecnológica (T) e colheita (C) em Piracicaba

Data da amostragem	Piracicaba
05-Abr-09	B
20-Mai-09	B
29-Mai-09	B
15-Jun-09	B
07-Jul-09	B
23-Jul-09	B
13-Ago-09	B
11-Set-09	B
24-Nov-09	B
19-Abr-10	T
24-Mai-10	T
22-Jun-10	T
21-Jul-10	T
23-Ago-10	T/C

4.1.3 Coleta de dados biométricos dos campos experimentais de Pradópolis e Piracicaba

As medições biométricas nas áreas experimentais de Pradópolis e Piracicaba foram realizadas como segue:

- **Número de perfilhos por metro linear:** foram contados o numero de perfilhos por metro linear e posteriormente foi calculado o número de perfilhos por m² com a equação 6 para Pradópolis que possui espaçamento de 1,5m e equação 7 para Piracicaba em que o espaçamento é de 1,4m. O cálculo de perfilhos por m² é a variável de saída do DSSAT/CANEGRO. Estas medidas foram feitas em toda área demarcada para a coleta de dados.

$$\frac{\frac{10000m^2}{1,5m} * \frac{P5}{5m}}{10000m^2} = \frac{10000m^2}{1,5m} * \frac{P5}{5m} * \frac{1}{10000m^2} = \frac{P5}{7,5} = \text{perfilhos} / m^2 \quad (6)$$

$$\frac{\frac{10000m^2}{1,4m} * \frac{P5}{5m}}{10000m^2} = \frac{10000m^2}{1,4m} * \frac{P5}{5m} * \frac{1}{10000m^2} = \frac{P5}{7} = \text{perfilhos} / m^2 \quad (7)$$

em que: 10000m² é a área em m² de um hectare, 1,5m ou 1,4 m são espaçamentos de plantio da cana-de-açúcar em Pradópolis e Piracicaba respectivamente (m), P5 é o número de perfilhos em 5 metros lineares (nº 5m⁻¹) e 5m é a distância utilizada na contagem de perfilhos (m).

- **Altura de colmo:** para a medida de altura do colmo, foram utilizadas as plantas demarcadas para tais medidas, sendo 10 por parcela em Pradópolis e 5 por repetição em Piracicaba. A medida constitui em, com uma fita métrica, medir a distância do solo até a inserção da folha +1 (DA SILVA, 2007) como padrão de altura de colmo das plantas.

- **Número de folhas verdes:** Nas plantas marcadas foram feitas contagens do número de folhas verdes totalmente abertas capazes de realizar fotossíntese.

- **Índice de área foliar (IAF):** o índice de área foliar foi medido através do equipamento LAI 2000 (Licor). O sistema de medidas constitui-se em 8 pontos diferentes realizando-se a seqüência de uma medida padrão fora da parcela, 4 medidas dentro da parcela em localizações diferentes (na linha de plantio, $\frac{1}{4}$ distante da linha de plantio, na entrelinha, $\frac{3}{4}$ da linha de plantio, distantes de um passo aproximado em 1 metro cada medida), após é feita mais uma medida padrão fora da parcela e em outra linha de plantio na mesma parcela realizada mais 4 medidas conforme descrito. Esse método de medições com o equipamento LAI 2000 segue manual do equipamento para culturas em linha. As medições de IAF foram realizadas nas parcelas estudadas dentro da área demarcada para as medidas.

- **Diâmetro do colmo:** foram realizadas medidas de diâmetro da base do colmo e diâmetro do colmo na altura da folha +1, para estimativa de massa de colmo. O modelo DSSAT/CANEGRO não possui entrada para dados de diâmetro de colmo, porém alguns outros modelos têm o diâmetro como variável de saída.

4.1.4 Avaliações Tecnológicas dos campos experimentais de Pradópolis e Piracicaba

As avaliações tecnológicas foram realizadas pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) conforme datas descritas nas Tabelas 6 e 7, sendo coletados 10 colmos consecutivos de cana-de-açúcar, em linhas aleatórias, e realizadas análises de massa fresca, massa seca e pol (teor de sacarose no caldo) conforme determinado por Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do estado de São Paulo – Conselho dos Produtores de Cana-De-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo - CONSECANA-SP (2006). As amostras foram homogeneizadas uma massa de 500 g foi utilizada nas análises. As massas fresca e seca foram obtidas através de pesagem em balança analítica de precisão de 0,1g. A extração do caldo foi realizada com prensa hidráulica, com pressão constante de 24,5 Mpa por 1 minuto.

4.1.5 Dados bibliográficos de Pellegrino (2001)

Foram utilizados dados de Pellegrino (2001), os quais foram coletados em área da Usina São Martinho, em Guariba/SP, latitude 21°24'07" Sul, longitude 48°08'26,5" Oeste, no período entre 30 de outubro de 1996 e 26 de agosto de 1999, perfazendo no total três ciclos completos da cultura, sendo cada ciclo considerado como uma repetição. As medições foram realizadas em 14 datas diferentes, e os dados coletados foram: índice de área foliar, massa verde e massa seca do colmo. Na região da área experimental, o solo foi caracterizado como latossolo vermelho-escuro com manchas de latossolo roxo, e a variedade utilizada foi a RB 83-5486. Seguindo o mesmo procedimento de Pellegrino (2001), devido a indisponibilidade de dados meteorológicos de Guariba, utilizou-se dados meteorológicos de estação localizada no município de Ribeirão Preto, situada a aproximadamente 35 km da área de medida obtidos em Agritempo.

4.1.6 Dados bibliográficos de da Silva (2007)

Os dados utilizados de Silva (2007) foram coletados em área pertencente à Usina Coruripe, no município de Coruripe/Al na safra 2005/2006. Foram coletados dados da variedade RB 86-7515 em 7 datas diferentes, espaçadas de 60 dias cada uma, a partir do 30º dia após o plantio. O solo da área foi classificado como argissolo amarelo distrófico fragipânico, textura arenosa/argilosa. Foi realizada adubação conforme análise de solo, sendo a mesma com 84 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 144 kg ha⁻¹ de K₂O. Os dados climáticos utilizados foram de estação meteorológica localizada no município de Coruripe, e não houve registro de irrigação na área. Os dados utilizados foram: altura de colmo, perfilhamento, diâmetro de colmo, índice de área foliar, fitomassa da parte aérea e análises tecnológicas do caldo.

4.1.7 Dados bibliográficos de Costa et al. (2007)

Costa et al. (2007) realizaram a coleta de dados de produtividade em Porto Feliz – SP com a variedade RB 83-5486, cujas amostragens foram realizadas entre a terceira e quinta soca, nas safras 2002/2003 e 2003/2004. O solo foi classificado como latossolo vermelho amarelo distrófico psamítico. As variáveis utilizadas foram a produtividade e

teor de sacarose realizada somente na colheita. A cultura recebeu 500 kg ha⁻¹ da formulação 18-00-27 e não houve registro de irrigação. Os dados climáticos utilizados foram do município de Sorocaba/SP.

4.2 Análise de sensibilidade do modelo DSSAT/CANEGRO

A análise de sensibilidade local foi realizada alterando-se o valor de uma variável e mantendo-se as demais restantes inalteradas e comparando-se o resultado em relação a uma condição padrão. Com isso, foi possível avaliar variação nas variáveis de saída do modelo decorrentes de alterações nos dados de entrada. Como condição padrão, utilizou-se a variedade NCo 376 por se tratar da variedade sobre a qual o modelo DSSAT/CANEGRO foi inicialmente desenvolvido. Foram utilizados dados meteorológicos de Piracicaba/SP, da estação automática da ESALQ/USP. O tipo de solo utilizado nas simulações foi caracterizado como latossolo vermelho amarelo.

Os parâmetros de entrada analisados foram os de cultivares (PARCEmax, APFMX, STKPFMAX, Tthalf, Tbase, LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO, PI1, PI2, PSWITCH, MAX_POP, POPTT16, TTPLNTEM, TTRATNEM, CHUPIBASE e TT_POPGROWTH) e ecótipos (DELTTMAX, SWDF2AMP, CS_CNREDUC, CS_CNPERIOD, Tthalfa, dPERdT, EXTCFN, EXTCFST, LFNMXEXT, POPCF(1), POPCF(2), POPDECAY, TTBASESEEM, TTBASELFEF, TTBASEPOP e TBASEPER).

Os efeitos das variações dos parâmetros foram avaliados pelos resultados de quatro variáveis de saída, sendo elas: índice de área foliar máximo, massa fresca de colmo (t ha⁻¹), massa seca da parte aérea (t ha⁻¹) e altura do colmo (m). Os parâmetros de entrada, quando conveniente, sofreram variações individuais de -10%, +10%, e os efeitos foram analisados calculando-se o índice de sensibilidade absoluta (equação 8) e posteriormente o índice de sensibilidade relativa (equação 9) (SALTELLI, 2002).

$$\sigma(y/k) = \frac{\delta y}{\delta k} \quad (8)$$

em que: $\sigma(y/k)$ é a sensibilidade absoluta, δy é a diferença entre dados da variável de saída do modelo e δk é a diferença entre as variações do parâmetro de entrada.

$$\sigma_r(y/k) = \sigma(y/k) \frac{k}{y} \quad (9)$$

em que: $\sigma_r(y/k)$ é a sensibilidade relativa, (y/k) é a sensibilidade absoluta, k é o valor do parâmetro padrão e y é o valor de saída da variável padrão.

Os valores dos índices de sensibilidade relativa foram organizados em ordem decrescente, com a finalidade de sequenciamento dos parâmetros mais importantes para os menos importantes.

4.3 Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO

A parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO foi baseada nos dados experimentais de Pradópolis para as variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20; dados bibliográficos de Pellegrino (2001) para a variedade RB 83-5486; e dados experimentais da EMBRAPA com a variedade RB 86-7515.

Para a determinação de quais parâmetros foram calibrados, utilizaram-se os resultados da análise de sensibilidade para determinação da dependência das variáveis simuladas com a variação em cada parâmetro. Conforme Marin et al. (2011) nem todos os parâmetros foram calibrados, e os mesmos devem seguir uma taxa de variação que foi definida baseada em dados de campo, literatura referente à cana-de-açúcar e ao manual do modelo (SINGELS et al., 2008).

O cálculo da maior área de uma folha foi realizado através da equação 10 onde com os dados de IAF, número de perfilhos por m^2 e número de folhas verdes por perfilho, obtemos a máxima área em cm^2 de uma folha, dado correspondente ao parâmetro supra. A otimização do parâmetro MXLFAREA foi baseada em uma faixa de valores, entre 360 a 560, respeitando-se os valores encontrados com o cálculo descrito (em torno de $390 cm^2$ para as três variedades CTC), utilizando a ferramenta GLUE.

$$MXLFAREA = \frac{(IAF * 10.000)}{(n^\circ perf / m^2) * (n^\circ FV / perf)} \quad (10)$$

em que: *MXLFAREA* é a máxima área foliar em cm^2 de uma folha, 10.000 é a conversão de m^2 em cm^2 , $n^\circ\text{perfilhos m}^{-2}$ é o número de perfilhos por m^{-2} e $n^\circ\text{FV perfilhos}^{-1}$ é o número de folhas verdes por perfilho.

Como método de parametrização, utilizou-se um método objetivo com o intuito de evitar o procedimento subjetivo de tentativa e erro por análise visual. O método objetivo utilizado foi um programa otimizador de parâmetros baseado na técnica GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation) (MERTENS et al., 2004). Nela, a melhor combinação de parâmetros é selecionada comparando as estimativas do modelo com dados de observados em condições de campo. O algoritmo contendo o GLUE utilizado neste trabalho valia-se apenas dos dados finais do ciclo da cultura, desprezando os dados coletados durante o crescimento da cultura. O procedimento de ajuste utilizando o GLUE foi feito em aproximações sucessivas, restringindo-se a faixa de ajuste dos parâmetros a cada aproximação. Cada rodada de parametrização utilizando o GLUE foi feita utilizando-se 5 mil iterações por cada variedade analisada. O melhor ajuste do modelo para cada variedade foi definido com base no R^2 e índice D de Willmott (1982).

Os parâmetros TTPLNTEM e CHUPIBASE foram ajustados através de tentativas até se chegar na melhor modelagem das variedades. Após o ajuste os mesmos foram fixados para a utilização da ferramenta GLUE.

4.4 Avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO

A avaliação do modelo parametrizado foi realizada com dados dos campos experimentais de Piracicaba com as variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20; dados bibliográficos de Costa et al. (2007) para a variedade RB 83-5486; e dados de Da Silva (2007) com a variedade RB 86-7515.

O modelo foi validado avaliando-se as seguintes dados de saída: variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20, índice de área foliar, número de perfilhos por m^{-2} , número de folhas verdes por planta, altura de colmo, teor de sacarose em massa fresca e produtividade; variedade RB 86-7515, massa fresca do colmo, índice de área foliar, altura de colmo, número de perfilhos por m^{-2} e massa seca do colmo; variedade RB 83-5486, massa fresca do colmo e teor de sacarose base massa fresca. Para verificação

da qualidade da parametrização, foi utilizada a análise de regressão linear e índices R^2 e D de Wilmott (1982), como também a raiz quadrada do erro médio (RMSE).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Descrição dos dados experimentais de Pradópolis e Piracicaba

Por se tratarem de variedades relativamente recentes no mercado brasileiro, faz-se uma breve descrição dos dados biométricos das variedades CTC coletadas neste estudo. De modo geral, as cultivares CTC 4, CTC 7 e CTC 20 apresentaram um padrão de desenvolvimento similar ao longo do período de coleta de dados no experimento de Pradópolis. A variedade CTC 7 apresentou um menor IAF máximo (2,7) e menor número de perfilhos durante o ciclo, com pico de perfilhamento de 16,6 perfilhos m^{-2} e estabilização em 8,4 perfilhos m^{-2} (Tabela 8). A variedade CTC 7, contudo, apresentou maior altura de colmo desde o início do crescimento até o final do ciclo (Figura 5). As variedades CTC 4 e CTC 20 apresentaram IAF, perfilhamento e altura de colmos semelhantes, chegando a valores máximos em torno de 3,3. A CTC 4 teve menor número de folhas verdes, com uma média de 7,2 folhas verdes por planta, enquanto a CTC7 e CTC 20 tiveram em torno de 9 folhas ao longo do ciclo.

A produtividade média do experimento de Pradópolis foi de 140,3 $ton\ ha^{-1}$ (Tabela 8) sendo a CTC 20 a mais produtiva, com 146 $ton\ ha^{-1}$ e com maior teor de sacarose (16%). As variedades CTC 4 e CTC 7 tiveram um teor de sacarose aproximados em 15,5%. A produtividade mais elevada da variedade CTC 20 pode estar relacionada com um IAF mais elevado e também ao maior número de perfilhos. Aparentemente, a CTC 4 apresentou menor produtividade por causa do menor valor de IAF e menor capacidade de perfilhamento. Extrapolando-se este resultado para a produção de sacarose por unidade de área, é fácil notar que a variedade CTC 20 foi a mais produtiva neste campo experimental com produtividade de aproximadamente 23.5 $ton\ ha^{-1}$ de sacarose.

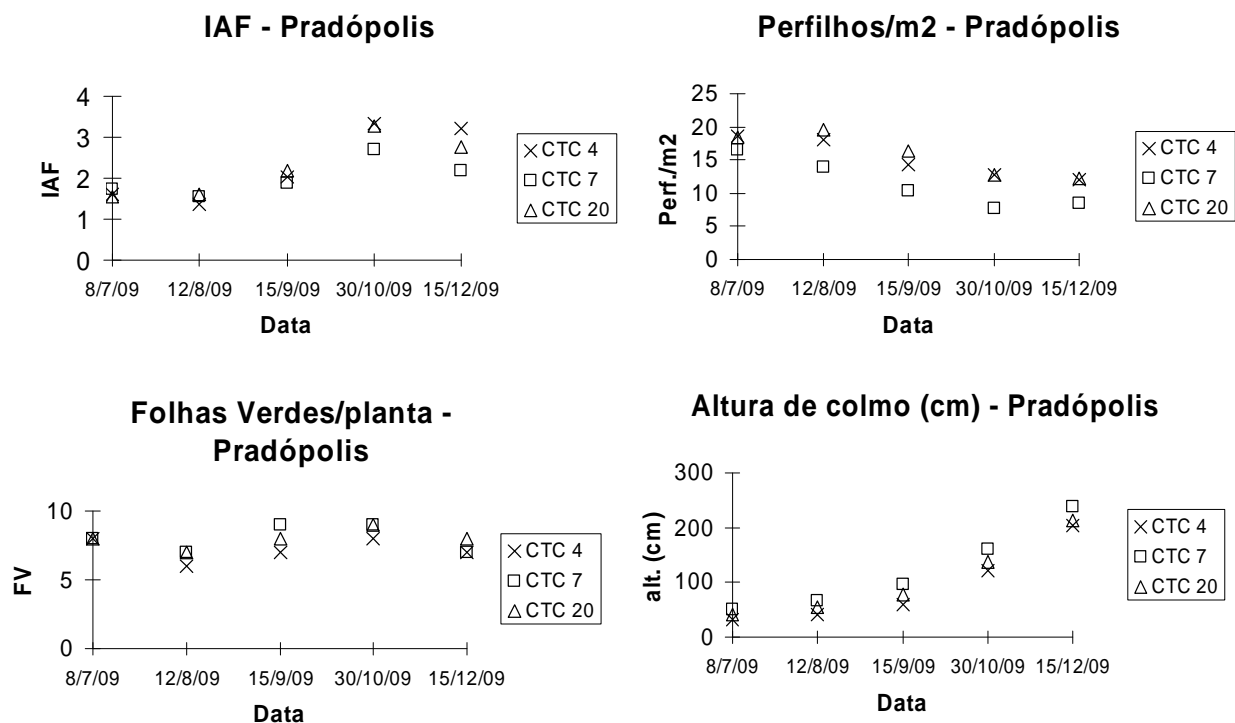


Figura 5 - Variação do índice de área foliar (IAF), perfilhamento (perfilhos m⁻²), número de folhas verdes por planta (FV) e altura de colmo (alt. cm) do campo experimental de Pradópolis

Tabela 8 - Valores médios do índice de área foliar máximo (folhas verdes), massa fresca de colmos, pico de perfilhamento, perfilhamento na maturidade, número de folhas verdes por planta, altura de colmo e teor de sacarose das variedades CTC analisadas no município de Pradópolis/SP

Variedades	IAF FV máx. (m ² m ⁻²)	Massa Fresca de Colmos (ton ha ⁻¹)	Pico de Perf. (perf m ⁻²)	Perf. na maturidade (perf m ⁻²)	FV médio (FV pl ⁻¹)	Altura colmo máx. (m)	POL (%)
CTC 4	3.33	140	18.7	12	7.2	2.02	15.3
CTC 7	2.7	135	16.6	8.4	8	2.39	15.5
CTC 20	3.26	146	19.5	12.2	8	2.13	16

No campo experimental de Piracicaba, também observou-se padrões de desenvolvimento similares entre as variedades CTC (Figura 6), mas neste experimento a CTC 4 apresentou menor IAF máximo (2,41) e menor perfilhamento. Já a variedade CTC 20 apresentou um maior IAF (3,68) e maior pico de perfilhamento (19,1 perf m⁻²)

(Tabela 9), o que parece explicar a maior produtividade obtida para esta variedade (148 ton ha⁻¹). A CTC 7 teve um comportamento semelhante a CTC 20, porém com perfilhamento menos intenso (9 perf m⁻²) na maturidade, o que parece estar relacionada com a menor produtividade (136 ton ha⁻¹). O número de folhas verdes por planta praticamente não demonstrou diferença entre as três variedades, ficando em torno de 5,5 FV pl⁻¹ em média com pico e estabilização em 7 FV pl⁻¹. A queda nas variáveis de IAF e perfilhamento ocorrida no período de 13 de agosto de 2008 deu-se pela operação de “quebra lombo” realizada na área experimental.

O teor de sacarose das três variedades foi praticamente o mesmo na colheita, ficando em torno de 17%, demonstrando que a diferença das variáveis biométricas pouco influenciou o acúmulo de sacarose das variedades. No entanto, extrapolando-se este resultado para a produção de sacarose por unidade de área, também verifica-se que a variedade CTC 20 foi a mais produtiva neste campo experimental com produtividade de aproximadamente 25 ton ha⁻¹ de açúcar.

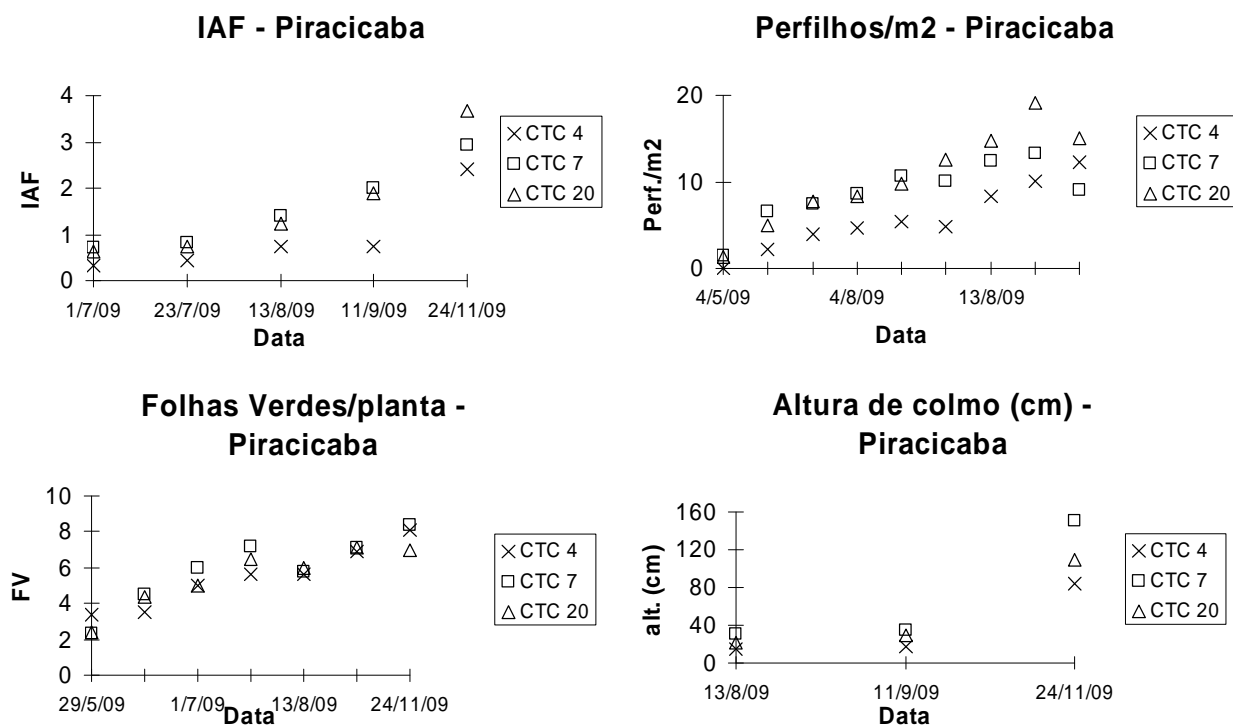


Figura 6 - Variação do índice de área foliar (IAF), perfilhamento (perf. m⁻²), número e folhas verdes por planta (FV) e altura de colmo (alt. cm) do campo experimental de Piracicaba

Tabela 9 - Valores médios do índice de área foliar de folhas verdes máximo, massa fresca de colmos, pico de perfilhamento e perfilhamento na maturidade, número de folhas verdes por planta, altura de colmo e teor de sacarose das variedades CTC analisadas no município de Piracicaba/SP

Variedades	IAF FV máx. (m ² m ⁻²)	Massa Fresca de Colmos (ton ha ⁻¹)	Pico de Perf. (perf m ⁻²)	Perf. na maturidade (perf m ⁻²)	FV médio (FV pl ⁻¹)	Altura colmo máx. (m)	POL (%)
CTC 4	2.41	131	12.3	12.3	5.4	0.83	17.1
CTC 7	2.94	136	13.2	9.0	5.9	1.5	17.2
CTC 20	3.68	148	19.1	15.0	5.5	1.1	17.0

5.2 Análise de sensibilidade relativa do DSSAT/CANEGRO

Com base na análise de sensibilidade local realizada para os parâmetros de cultivares (Tabela 10) observa-se que o parâmetro PARCEmax apresenta a maior sensibilidade relativa para as variáveis de massa fresca do colmo (0,97) e massa seca

da parte aérea (1,11). Esse resultado parece muito coerente, já que este parâmetro é diz respeito à eficiência na conversão de radiação em fotoassimilados, tendo uma relação direta com o acúmulo de massa pela cultura.

Referente às variáveis de índice de área foliar máximo (folhas verdes) (IAF FV máximo) e altura de colmo, o mesmo parâmetro apresenta-se com valores de sensibilidade relativa (SR) baixos, oscilando entre 0,01 e 0,16, respectivamente. Provavelmente, isso ocorre porque ambas as variáveis estão relacionadas mais a temperatura do que com a radiação solar, já que ambas são determinadas com base no conceito de filocrono.

Para a variável de IAF FV máximo, os parâmetros mais importantes são Tbase (SR=1,57), APFMX (SR=1,28) e LFMAX (SR=1,04), parâmetros relacionados diretamente com formação da parte aérea da cultura e com a temperatura do ar. Como já bem conhecido, a temperatura base para desenvolvimento do dossel (Tbase) controla o acúmulo de graus-dia, enquanto a fração de incremento de massa seca da parte aérea (APFMX) diz respeito ao montante de fotoassimilados sendo direcionados para a parte aérea. O número máximo de folhas verdes informa sobre o potencial de manutenção de folhas fotossintéticas, antes do início da senescência das mesmas (LFMAX). Quatro parâmetros não apresentaram valores de sensibilidade relativa para esta variável, sendo eles STKPFMAX, Tthalf, TTRATNEM e CHUPIBASE.

O parâmetro CHUPIBASE foi o mais importante para a variável de massa fresca do colmo (SR=1,12), o que não é fácil de explicar, já que não se trata de parâmetro diretamente relacionada ao acúmulo de massa. O parâmetro CHUPIBASE, ao contrário, está relacionado com a exigência térmica para o início do crescimento do colmo. Assim, o resultado aqui obtido parece ser decorrente mais de uma limitação na seleção da faixa de variação do parâmetro durante a análise de sensibilidade do que à relação real entre o parâmetro e a variável de saída.

O parâmetro APFMX, por sua vez, apresentou relativa importância nas quatro variáveis de saída estudadas, sendo que para a altura de colmo, o mesmo é considerado o mais importante, com SR=1,21.

Nos parâmetros de ecótipos (Tabela 11), verificamos que a variável de massa seca da parte aérea é pouco influenciada por este conjunto de parâmetros, destacando-

se o parâmetro TTBASEEM, com $SR=0,15$. Esse resultado demonstra que a variável é afetada principalmente pelos parâmetros de cultivares.

Quando analisada a variável massa fresca da parte aérea, o mesmo parâmetro apresentou $SR=1,27$, o que também parece estar relacionado a uma limitação da análise de sensibilidade, a despeito de ter sido considerado o mais importante para esta variável.

O parâmetro TTBASEEM também mostrou-se importante para a variável de IAF FV máximo ($SR=0,55$), já que está relacionada com a temperatura base para a emergência e início da elongação do colmo, sendo importante em variáveis de parte aérea.

Tabela 10 - Análise de sensibilidade relativa dos parâmetros de cultivares para as variáveis de índice de área foliar máximo (GLAI máximo), massa fresca do colmo (Stalk FM), massa seca da parte aérea (Aerial DM) e altura do colmo (Stalk H) em ordem decrescente. Valores apresentados em módulo

IAF FV máximo		Massa Fresca Colmo	
Tbase	1,57	CHUIBASE	1,12
APFMX	1,28	PARCEmax	0,97
LFMAX	1,04	TTPLNTEM	0,37
MXLFAREA	0,88	APFMX	0,27
TTPLNTEM	0,55	PI1	0,09
TT_POPGROWTH	0,47	STKPFMAX	0,07
MAX_POP	0,46	LFMAX	0,03
POPTT16	0,37	MAX_POP	0,03
PI2	0,34	MXLFARNO	0,02
PI1	0,18	POPTT16	0,02
PSWITCH	0,12	Tbase	0,01
MXLFARNO	0,02	MXLFAREA	0,01
PARCEmax	0,01	PSWITCH	0,01
STKPFMAX	0,00	Tthalfo	0,00
Tthalfo	0,00	TTRATNEM	0,00
TTRATNEM	0,00	TT_POPGROWTH	0,00
CHUIBASE	0,00	PI2	0,00
Massa Seca Aérea		Altura de colmo	
PARCEmax	1,11	APFMX	1,21
APFMX	0,38	PARCEmax	0,16
PI1	0,15	PI1	0,16
TTPLNTEM	0,14	LFMAX	0,06
LFMAX	0,04	Tbase	0,05
MXLFARNO	0,04	TTPLNTEM	0,05
MAX_POP	0,03	MXLFAREA	0,04
Tbase	0,02	MAX_POP	0,04
MXLFAREA	0,01	MXLFARNO	0,02
POPTT16	0,01	PSWITCH	0,02
PSWITCH	0,01	PI2	0,02
PI2	0,00	POPTT16	0,02
STKPFMAX	0,00	TT_POPGROWTH	0,02
Tthalfo	0,00	STKPFMAX	0,00
TTRATNEM	0,00	Tthalfo	0,00
CHUIBASE	0,00	TTRATNEM	0,00
TT_POPGROWTH	0,00	CHUIBASE	0,00

Tabela 11 - Análise de sensibilidade relativa dos parâmetros de ecótipos para as variáveis de índice de área foliar máximo (GLAI máximo), massa fresca do colmo (Stalk FM), massa seca da parte aérea (Aerial DM) e altura do colmo (Stalk H) em ordem decrescente. Valores em módulo

IAF FV máximo		Massa Fresca Colmo	
TTBASEPOP	0,84	TTBASEEM *	1,27
TTBASEEM *	0,55	DELTTMAX	0,11
POPCF (1)*	0,41	TTBASELFEX	0,08
POPDECAY**	0,26	TTBASEPOP	0,04
POPCF (2)*	0,18	EXTCFST	0,04
dPERdT	0,15	POPCF (1)*	0,04
TTBASELFEX	0,04	dPERdT	0,03
EXTCFN	0,02	EXTCFN	0,02
EXTCFST	0,01	LFNMXEXT	0,02
LFNMXEXT	0,01	POPCF (2)*	0,00
DELTTMAX	0,00	POPDECAY**	0,00
SWDF2AMP	0,00	SWDF2AMP	0,00
CS_CNREDUC	0,00	CS_CNREDUC	0,00
CS_CNPERIOD	0,00	CS_CNPERIOD	0,00
Tthalfa	0,00	Tthalfa	0,00
TBASEPER	0,00	TBASEPER	0,00
Massa Seca Aérea		Altura de colmo	
TTBASEEM *	0,15	dPERdT	0,96
TTBASELFEX	0,10	TTBASELFEX	0,11
EXTCFN	0,10	TTBASEPOP	0,11
TTBASEPOP	0,07	POPCF (1)*	0,09
EXTCFST	0,05	TTBASEEM *	0,05
POPCF (1)*	0,05	EXTCFST	0,02
LFNMXEXT	0,02	EXTCFN	0,02
dPERdT	0,02	LFNMXEXT	0,02
POPDECAY**	0,00	POPDECAY**	0,01
DELTTMAX	0,00	DELTTMAX	0,00
SWDF2AMP	0,00	SWDF2AMP	0,00
CS_CNREDUC	0,00	CS_CNREDUC	0,00
CS_CNPERIOD	0,00	CS_CNPERIOD	0,00
Tthalfa	0,00	Tthalfa	0,00
TBASEPER	0,00	POPCF (2)*	0,00
POPCF (2)*	0,00	TBASEPER	0,00

5.3 Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO

Os valores utilizados na parametrização (Tabela 12), gerados pela ferramenta de otimização GLUE diferem em grande parte dos valores padrão do DSSAT/CANEGRO com a variedade NCo 376. Podemos observar com o parâmetro MXLFAREA, onde o parâmetro aumentou em aproximadamente 30% em relação ao padrão, dado que corrobora com Marin et al. (2011) que também encontraram valores para este parâmetro em torno de 50% maior que o padrão. Também verificou-se um decréscimo nos parâmetros MAX_POP e POPTT16, que controlam a população de perfilhos, o mesmo ocorrido com as cinco variedades estudadas, onde o máximo número de perfilhos ficou em torno de 19 perf m^{-2} , quase 40% menor do que o padrão, e o número de perfilhos na maturidade em torno de 9 perf m^{-2} , cerca de 30% menor.

No parâmetro de acúmulo de sacarose (SUCA), verifica-se um aumento em todas as variedades brasileiras quando comparadas com a NCo 376 padrão, o que foi demonstrado quando realizou-se a simulação com valores padrão, o teor de sacarose ficou subestimado para as cinco variedades brasileiras.

Tabela 12 - Valores de parâmetros de cultivares utilizados na parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO para as variedades estudadas CTC 4, CTC 7, CTC 20, RB 86-7515, RB 83-5486 e para a variedade padrão NCo 376

Parâmetro	CTC 4	CTC 7	CTC 20	RB 86-7515	RB 83-5486	NCo 376
MaxPARCE	11,99	11,78	12,5	12,86	13,52	9,9
APFMX	0,884	0,883	0,889	0,843	0,865	0,88
STKPFMAX	0,7	0,699	0,7	0,699	0,76	0,65
SUCA	0,689	0,69	0,695	0,68	0,695	0,58
TBFT	25	26	26	25	26	25
Tthlfo	230,4	229,6	225,6	250,8	275,8	250
Tbase	14,49	15	15,62	15,71	15,62	16
LFMAX	9,924	9,969	10,88	9,96	9,518	12
MXLFAREA	500,2	515,6	520,9	500,2	500,9	360
MXLFARNO	14,99	14,8	15	17,19	15,35	15
PI1	89,34	91,2	90,9	89	90,1	69
PI2	120,1	125,5	120,9	150	149,4	169
PSWITCH	15,9	15,02	15,02	16,14	16,33	18
TTPLNTEM	500,6	200,9	200,9	300,4	509,4	428
TTRATNEM	200,5	205,9	265,3	290,9	211,4	203
CHUPIBASE	850,2	890,6	850,2	855	547,6	1050
TT_POPGROWTH	559,8	620,7	610,1	650,4	530,2	600
MAX_POP	18,57	16,75	19,5	20,35	19,62	30
POPTT16	9,446	8,995	9,952	8,19	9,556	13,3
LG_AMBASE	220	220	220	220	220	220

As variedades CTC 7 e CTC 20 e a RB 83-5486 apresentaram os melhores resultados no processo de parametrização para a variável de índice de área foliar (folhas verdes), tendo sido obtidos R^2 de 0,71, 0,63 e 0,76 e D de 0,75, 0,85 e 0,85, respectivamente (Tabela 13). Já a variedade CTC 4 apresentou baixa correlação dos dados ($R^2=0,21$) mas com índice de concordância $D=0,68$. O RMSE para as variedades CTC ficou abaixo de $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, enquanto que para a RB 83-5486 o RMSE foi de $1,43 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Tabela 13 - Média, desvio padrão, R², raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável de índice de área foliar de folhas verdes

IAF FV (m ² m ⁻²)	Média (m ² m ⁻²)		Desvio Padrão (m ² m ⁻²)		R ²	RMSE (m ² m ⁻²)	D
	Observado	Simulado	Observado	Simulado			
CTC 4	2,31	2,12	0,82	0,75	0,21	0,84	0,68
CTC 7	2,01	2,08	0,40	0,96	0,71	0,66	0,75
CTC 20	2,27	1,94	0,66	0,74	0,63	0,56	0,85
RB 83-5486	2,96	3,11	1,50	2,26	0,76	1,43	0,85
RB 86-7515	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND – dados não disponíveis

Para a variável de perfilhamento (Tabela 14), as três variedades CTC apresentaram uma boa parametrização, sendo a CTC 20 com valores de R² e D maiores (0,88 e 0,94 respectivamente) e a CTC 7 com os índices mais baixos (R² 0,63 e D=0,77).

Tabela 14 - Média, desvio padrão, R², raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável de número de perfilhos por m⁻²

Perfilhos m ⁻²	Média (m ⁻²)		Desvio Padrão (m ⁻²)		R ²	RMSE (m ⁻²)	D
	Observado	Simulado	Observado	Simulado			
CTC 4	15,16	16,07	2,76	4,32	0,70	2,67	0,86
CTC 7	11,42	14,09	3,35	3,28	0,63	3,41	0,77
CTC 20	15,88	16,06	2,94	4,24	0,88	1,79	0,94
RB 83-5486	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB 86-7515	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND – dados não disponíveis

A variável de número de folhas verdes por planta foi a que apresentou os piores índices estatísticos para as três variedades CTC estudadas (Tabela 15). Esse resultado é similar ao observado por Marin et al. (2011) e parece estar relacionado a relativa estabilidade temporal da variável ao longo do ciclo do que por uma deficiência do modelo em predizê-la. Na parametrização, obteve-se valores de R² variando de 0,01 (para CTC 4 e 7) a 0,1 (para CTC 20), enquanto o índice D variou entre 0,21 e 0,49.

Tabela 15 - Média, desvio padrão, R², raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável de número de folhas verdes por planta

Número FV	Média (FV)		Desvio Padrão (FV)		R ²	RMSE (FV)	D
	Observado	Simulado	Observado	Simulado			
CTC 4	7,20	6,72	0,75	0,51	0,01	0,98	0,49
CTC 7	8,00	7,40	0,89	0,71	0,01	1,35	0,21
CTC 20	8,00	6,56	0,63	0,47	0,10	1,58	0,33
RB 83-5486	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB 86-7515	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND – dados não disponíveis

Com índices estatísticos de R² entre 0,89 e 0,97 (Tabela 16), e D entre 0,75 e 0,88, a variável de altura de colmo apresentou a melhor parametrização para as variedades CTC e para a RB 86-7515, indicando a boa habilidade do modelo DSSAT/CANEGRO em prever esta variável.

Tabela 16 - Média, desvio padrão, R², raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável de altura de colmo

Altura de colmo (m)	Média (m)		Desvio Padrão (m)		R ²	RMSE (m)	D
	Observado	Simulado	Observado	Simulado			
CTC 4	0,92	1,66	0,64	0,61	0,89	0,77	0,75
CTC 7	1,22	1,67	0,69	0,62	0,94	0,48	0,88
CTC 20	1,04	1,64	0,63	0,61	0,92	0,63	0,81
RB 83-5486	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB 86 7515	2,32	2,90	0,83	0,73	0,97	0,61	0,87

ND – dados não disponíveis

Para as variedades CTC 7 e 20 houve boa correlação entre os dados observados e estimados após a parametrização (Tabela 17), com R² de 0,75 e 0,81, respectivamente. Porém, o índice D que ficou entre 0,43 e 0,5 para as três variedades, indicando baixa acurácia. Na CTC 4 além de baixa acurácia, os valores apresentaram baixa correlação (R² 0,36).

Tabela 17 - Média, desvio padrão, R², raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável de teor de sacarose

Sacarose MF (%)	Média (%)		Desvio Padrão (%)		R ²	RMSE (%)	D
	Observado	Simulado	Observado	Simulado			
CTC 4	13,87	16,17	1,02	0,19	0,36	2,48	0,43
CTC 7	14,30	15,11	0,98	0,10	0,75	1,20	0,49
CTC 20	14,57	15,88	1,14	0,13	0,81	1,66	0,50
RB 83-5486	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB 86-7515	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND – dados não disponíveis

Para as variáveis de massa fresca e massa seca do colmo (Tabelas 18 e 19), somente a variedade RB 83-5486 foi avaliada na parametrização por possuir dados observados durante todo o ciclo. Os índices estatísticos demonstram que houve uma boa correlação e concordância em ambas variáveis, com R² e D acima de 0,9.

Tabela 18 - Média, desvio padrão, R², raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável de massa fresca do colmo

Massa fresca (ton ha ⁻¹)	Média (ton ha ⁻¹)		Desvio Padrão (ton ha ⁻¹)		R ²	RMSE (ton ha ⁻¹)	D
	Observado	Simulado	Observado	Simulado			
RB 83-5486	87,64	67,10	65,80	53,26	0,93	29,51	0,94
CTC 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CTC 7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CTC 20	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB 86-7515	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND – dados não disponíveis

Tabela 19 - Média, desvio padrão, R², raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável de massa seca do colmo

Massa seca (ton ha ⁻¹)	Média (ton ha ⁻¹)		Desvio Padrão (ton ha ⁻¹)		R ²	RMSE (ton ha ⁻¹)	D
	Observado	Simulado	Observado	Simulado			
RB 83-5486	23,97	17,75	20,57	14,37	0,92	10,27	0,91
CTC 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CTC 7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CTC 20	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB 86-7515	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND – dados não disponíveis

5.4 Avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO

Após a parametrização do modelo para as cinco variedades, foi realizada uma avaliação do modelo parametrizado com a finalidade de validá-lo utilizando dados independentes.

5.4.1 Massa fresca do colmo

A variedade RB 86-7515 apresentou uma superestimativa no acúmulo de massa fresca durante todo o ciclo (Figura 7), porém o valor final de produção de massa fresca apresentou-se compatível com os dados observados, o que ocorreu com as três variedades CTC e também com a RB 83-5486. Para a RB 86-7515, obteve-se R²=0,507 e D=0,743, com RMSE=30,364 ton ha⁻¹ (Tabela 20) observado é mais alto do que comparado com o encontrado por O’Leary (2000) para a variedade NCo 376 um valor de R²=0,73 e RMSE=11,11 ton ha⁻¹). As variedades CTC 4, 7 e 20 e RB 83-5486 apresentaram um resultado de produtividade final próximo ao dado observado em campo.

Considerando a distribuição geográfica dos dados utilizados na Figura 7, pode-se também inferir que o modelo DSSAT/CANEGRO apresenta melhor habilidade preditiva na simulação nas condições de Piracicaba, Pradópolis, Guariba e Porto Feliz (SP), em comparação com as condições de solo e clima observadas em Coruripe (AL).

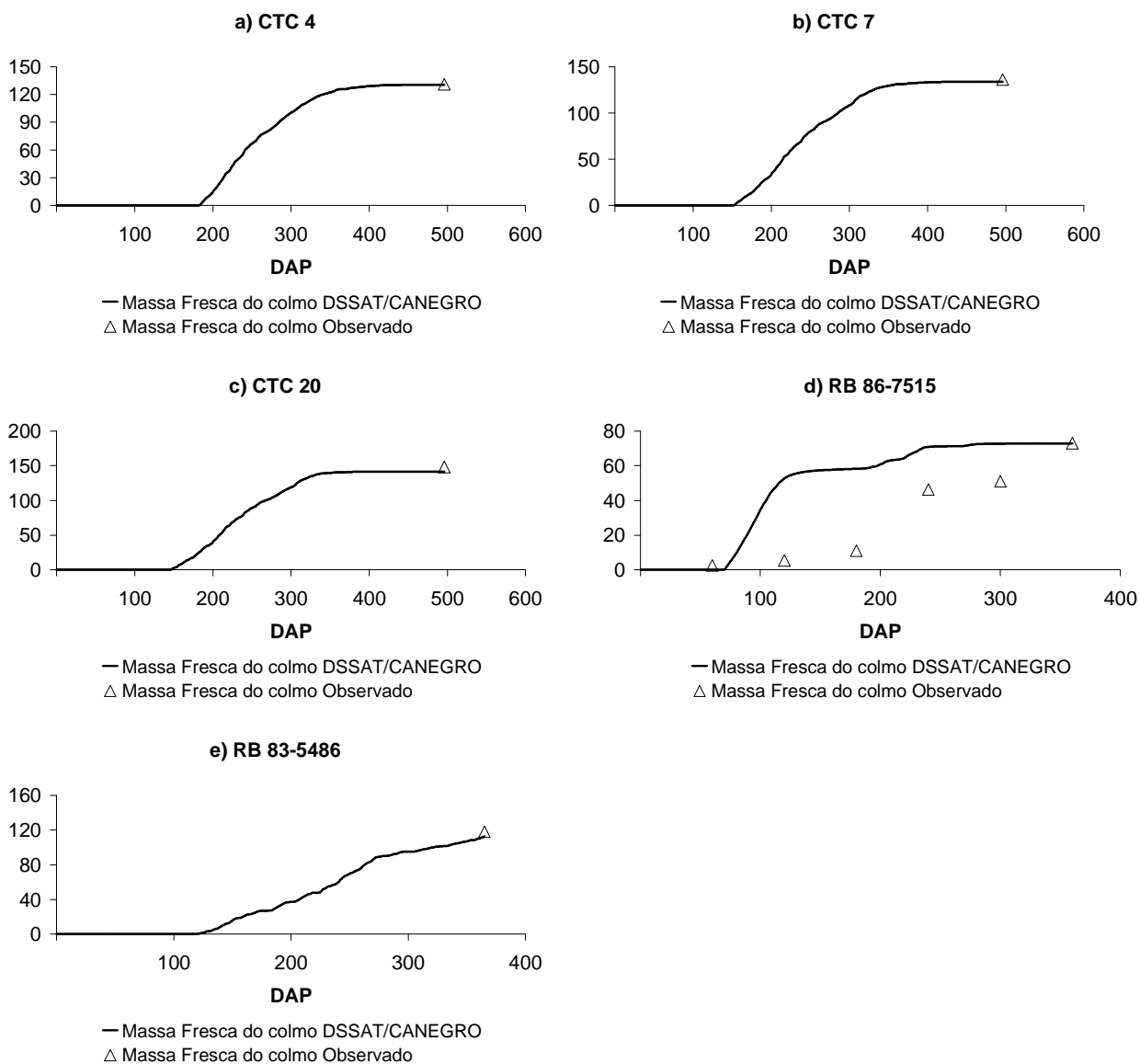


Figura 7 - Variação de massa fresca do colmo (ton ha^{-1}) estimado (linha contínua) e observado em condições de campo (pontos) das variedades CTC 4 (a), CTC 7 (b), CTC 20 (c), RB 86-7515 (d) e RB 83-5486 (e)

Tabela 20 - Índices estatísticos R^2 , D e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para a variedade RB 86-7515 para massa fresca de colmo

Variedade	R^2	D	RMSE (ton ha ⁻¹)
RB 86-7515	0,507	0,743	30,364

5.4.2 Índice de área foliar de folhas verdes

Para as quatro variedades avaliadas (Figura 8), a estimativa do índice de área foliar de folhas verdes apresenta um atraso em seu início, comparado com os dados observados, atingindo um pico em torno de 3,5, aos 250 dias após plantio (DAP) mantendo-se estável durante o ciclo da cultura e decaindo ao final. Suguitani (2006) obteve RMSE=0,59 (m² m⁻²) e os valores de R^2 sempre acima de 0,92 para quatro variedades estimadas com o modelo MOSICAS.

As variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20 apresentaram uma boa correlação com os dados validados (Tabela 21), gerando valores de R^2 (0,976; 0,919 e 0,990, respectivamente) próximos a 1, e com D também elevado (0,944; 0,870 e 0,926, respectivamente). Tais resultados foram melhores que os obtidos por Inman-Bamber (1991), utilizando uma versão preliminar do CANEGRO, com $R^2=0,43$ e $D=0,80$. Porém, ficaram próximos aos obtidos por Suguitani (2006) com o modelo MOSICAS, com R^2 acima de 0,92 para quatro variedades analisadas.

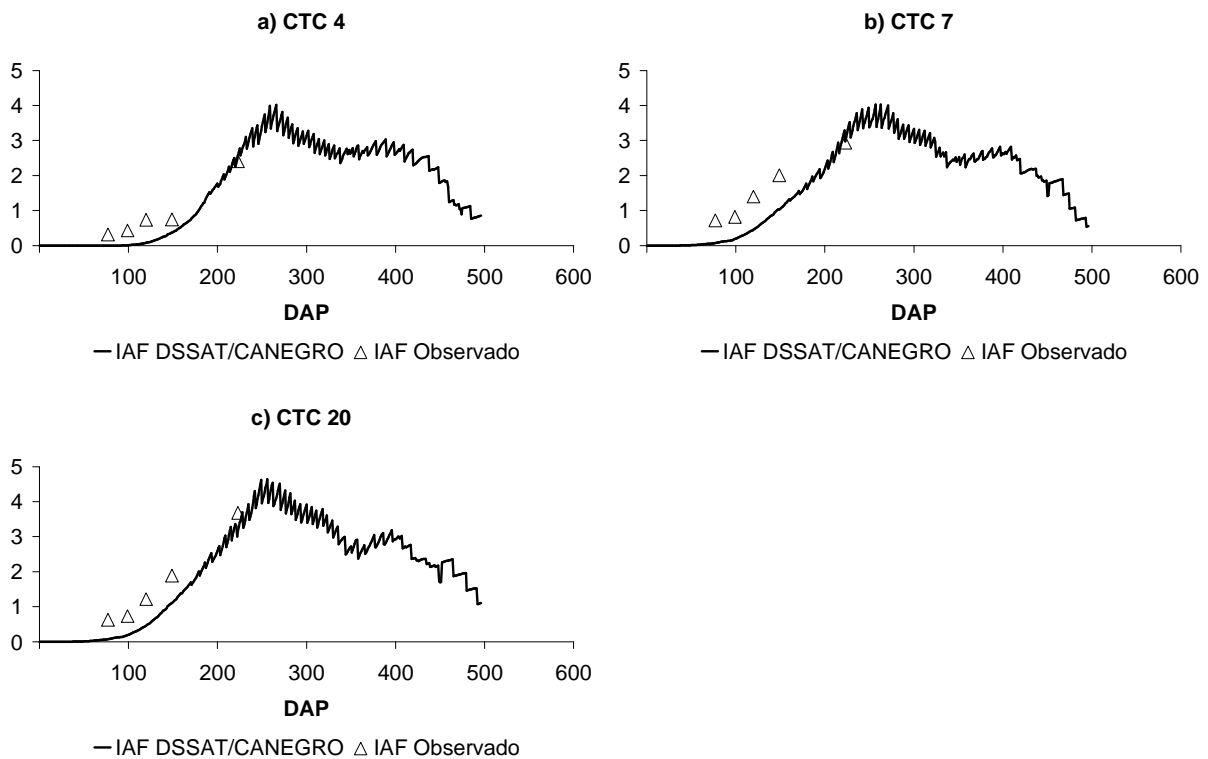


Figura 8 - Variação do índice de área foliar de folhas verdes estimado (linha contínua) e observado em condições de campo (pontos) das variedades CTC 4 (a), CTC 7 (b), e CTC 20 (c)

Tabela 21 - Índices estatísticos R^2 , D e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para as variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20 para o índice de área foliar (folhas verdes)

Variedade	R^2	D	RMSE (IAF)
CTC 4	0,976	0,944	0,420
CTC 7	0,919	0,870	0,730
CTC 20	0,990	0,926	0,643

5.4.3 Altura de colmo

Para a variável de altura de colmo houve uma correlação boa entre os dados observados e estimados (Figura 9), com o início do crescimento do colmo das três variedades CTC ocorrendo próximo dos 50 DAP, e em torno de 25 DAP na variedade RB 86-7515. Nesta, houve uma superestimativa inicial do crescimento do colmo, o que se inverte, aos 300 DAP, quando o modelo passa a subestimar os dados observados.

De acordo com a Tabela 22, verifica-se que houve boa correlação entre os dados observados e estimados, com R^2 entre 0,701 e 0,821 e D entre 0,720 e 0,853. Esses resultados são comparáveis aos obtidos por Suguitani (2006) com o modelo MOSICAS, que obteve com $R^2 > 0,9$ para as variedades RB 72-454, R 570, NCo 376 e SP 83-2847. No estudo de Suguitani (2006), entretanto, o RMSE ficou acima de 7,47 m, chegando a 17,1 m na RB 72-454, o que representa mais de 10 vezes o RMSE obtido para as variedades CTC analisadas no presente trabalho.

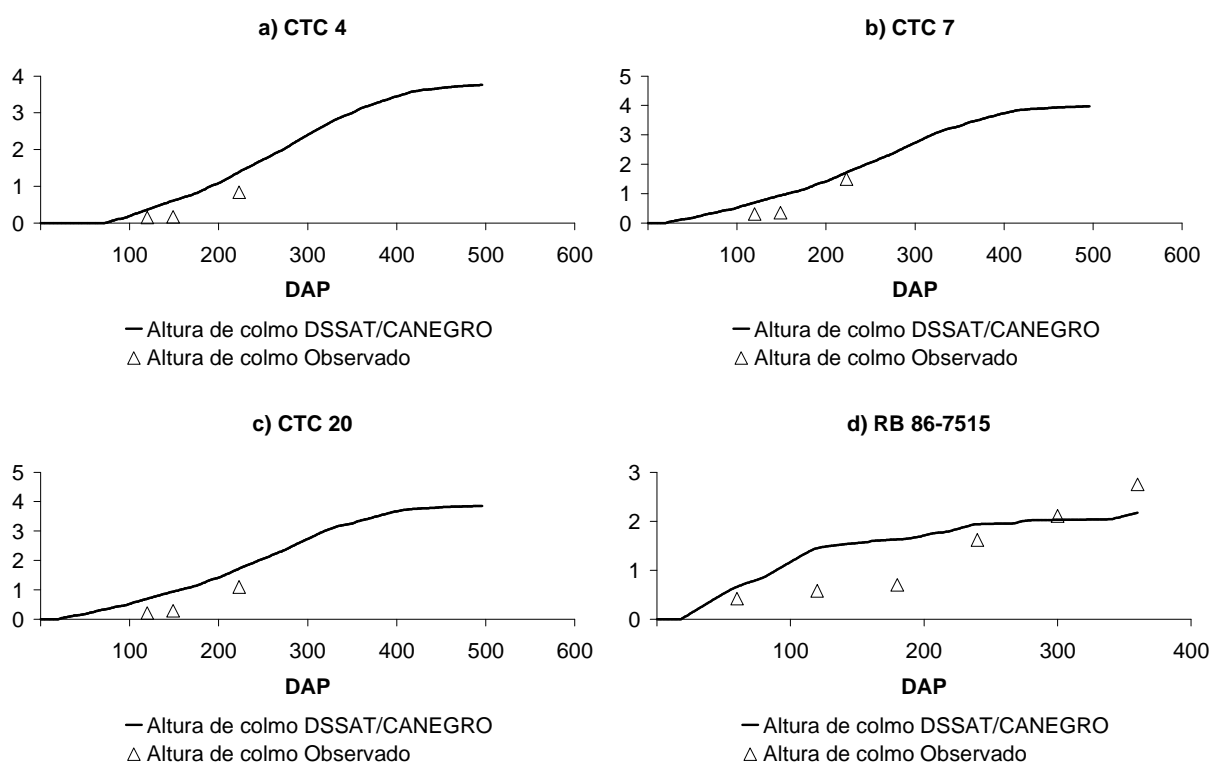


Figura 9 - Variação da altura de colmo estimado (linha contínua) e observado em condições de campo (pontos) das variedades CTC 4 (a), CTC 7 (b), CTC 20 (c) e RB 86-7515 (d)

Tabela 22 - Índices estatísticos R^2 , D e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para as variedades CTC 4, CTC 7, CTC 20 e RB 86-7515 para altura de colmo

Variedade	R^2	D	RMSE (m)
CTC 4	0,959	0,772	0,425
CTC 7	0,960	0,853	0,427
CTC 20	0,978	0,720	0,591
RB 86-7515	0,701	0,821	0,594

5.4.4 Perfilhamento

A parametrização utilizada para a variedade CTC 4 acarretou em atraso na simulação do início do perfilhamento, com pico de perfilhamento ocorrendo aos 120 DAP e estabilizando-se aos 250 DAP, em torno de 9 perfilhos m^{-2} (Figura 10 e Tabela 23) coincidindo com dados de Inman-Bamber (1994) e Benzuidenhout et al. (2003), mas difere do observado por Suguitani (2006) e Marin et al. (2011) com dados coletados no Estado de São Paulo e no Mato Grosso do Sul, onde as variedades estudadas não apresentaram pico de perfilhamento tão evidente. Apesar disso, houve boa correlação e concordância no ajuste entre dados simulados e observados, com $R^2=0,892$ e $D=0,800$. Na variedade CTC 7, o pico de perfilhamento foi superestimado pelo modelo (Figura 10 e Tabela 23), porém com ajuste relativamente melhor na fase final de maturação, quando o número de perfilhos estabilizou-se em torno de 8 perfilhos m^{-2} . Os índices estatísticos demonstram boa correlação entre os dados observados e estimados, com $R^2=0,721$ e $D=0,827$.

A variedade CTC 20 apresentou a melhor correlação ($R^2 0,916$) e concordância ($D=0,951$) (Figura 10), mas com pequeno atraso em relação aos dados observados. O pico de perfilhamento ficou em torno dos 120 DAP com aproximadamente 18 perfilhos m^{-2} , com estabilização em torno de 9 plantas m^{-2} . Já a variedade RB 86-7515 apresentou um pico em torno de 20 plantas por m^{-2} , próximo ao dado observado, com rápido decréscimo até a estabilização em 9 perfilhos m^{-2} . Houve leve superestimativa em relação aos dados observados, que estabilizaram-se em torno de 7 perfilhos m^{-2} . Os índices estatísticos ficaram em $R^2=0,576$ e $D=0,873$.

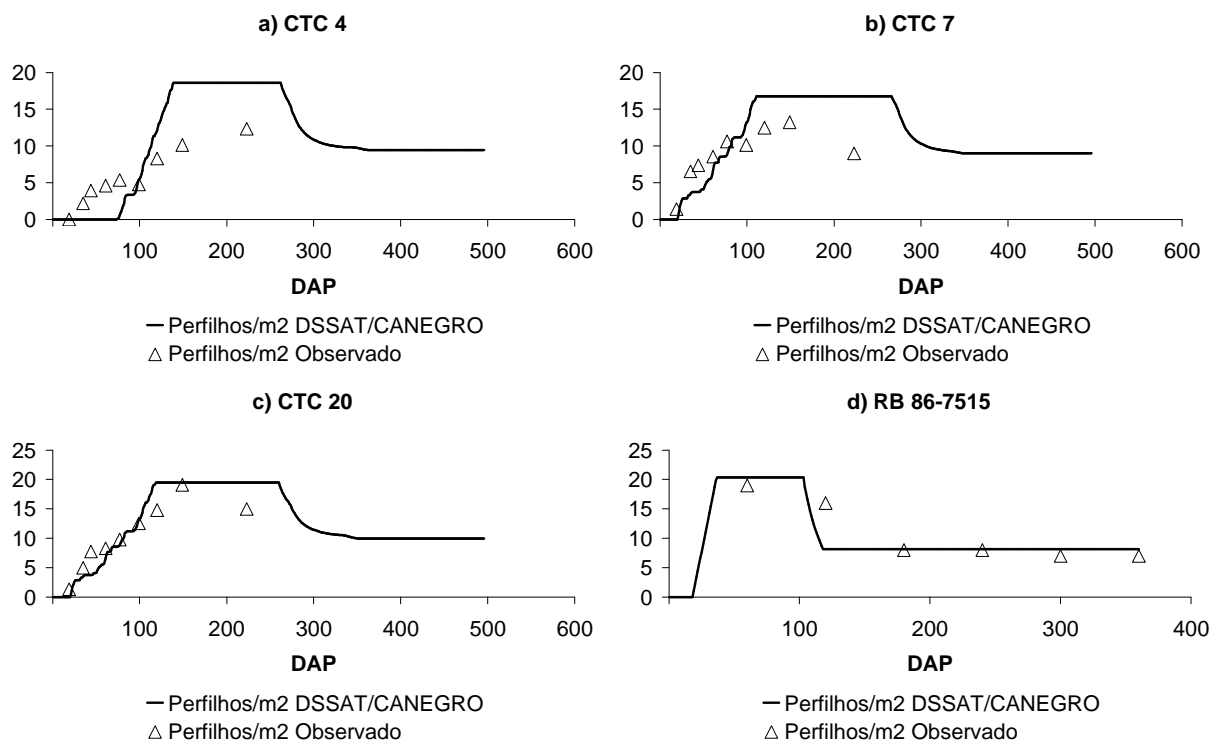


Figura 10 - Variação do número de perfilhos estimado pelo DSSAT/CANEGRO (linha contínua) e observado em condições de campo (pontos) das variedades CTC 4 (a), CTC 7 (b), CTC 20 (c) e RB 86-7515 (d)

Tabela 23 - Índices estatísticos R², D e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para as variedades CTC 4, CTC 7, CTC 20 e RB 86-7515 para número de perfilhos

Variedade	R ²	D	RMSE (perf. m ⁻²)
CTC 4	0,892	0,800	4,876
CTC 7	0,721	0,827	3,815
CTC 20	0,916	0,951	2,720
RB 86-7515	0,576	0,873	3,310

5.4.5 Teor de sacarose em massa fresca – POL%

As quatro variedades analisadas para a variável de teor de sacarose em massa fresca (Pol %) (Figura 11) tiveram valores finais aproximando-se dos observados, mas com superestimativa para valores observados no meio do ciclo. A Tabela 24 apresenta os valores de R² entre 0,506 e 0,807 e RMSE entre 1,437 e 2,611 para as variedades CTC, aproximando-se dos valores encontrados por O'Leary (2000) (R²=0,66 e RMSE=6,07 %) para variedade sul africana NCo 376 utilizando uma versão anterior do CANEGRO.

O acúmulo de sacarose nas variedades CTC ocorre no segundo terço do ciclo, em torno de 150 DAP até aproximadamente 350 DAP, a partir de quando ele permanece estável. Isso pode ser uma consequência parcial do tombamento da cultura ocorrido neste período. Diferentemente, a simulação para a variedade RB 83-5486 apresentou um acúmulo contínuo de sacarose até a data da colheita. Singels et al. (2010) encontraram para a variedade NCo 376 na África do Sul uma estabilização no acúmulo de sacarose em torno de 190 DAP.

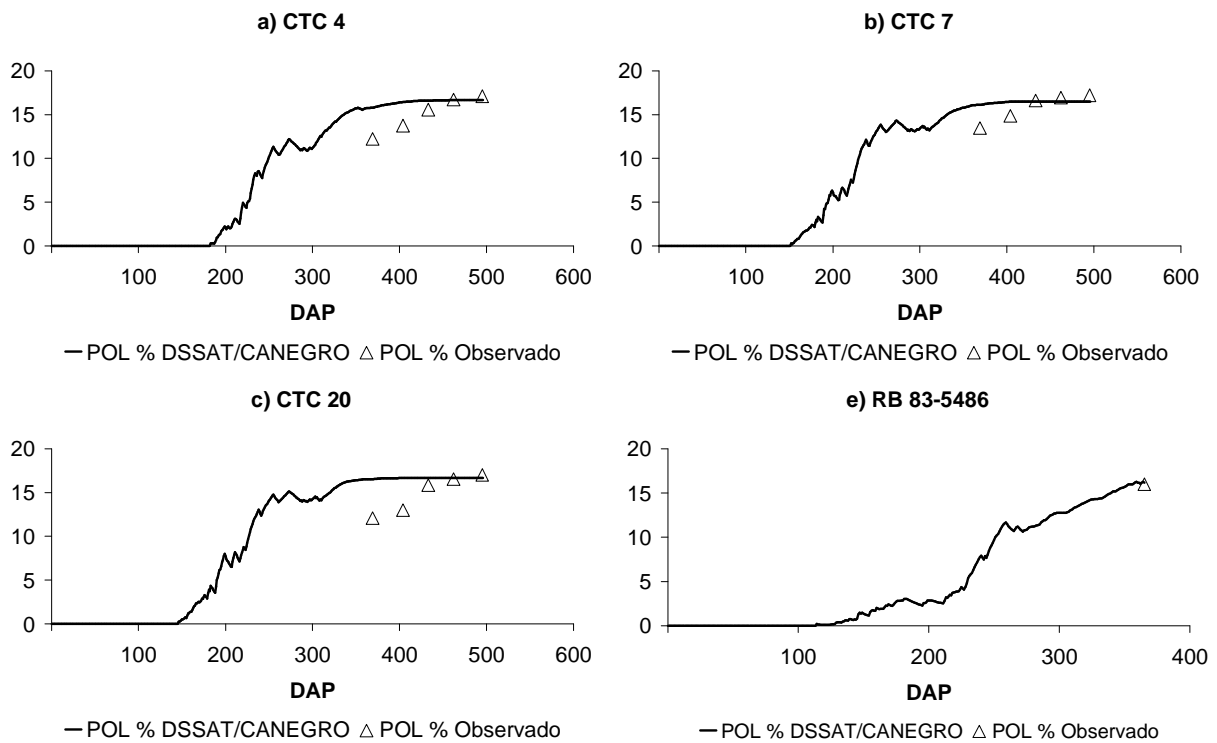


Figura 11 - Variação do teor de sacarose base massa fresca estimado (linha contínua) e observado em condições de campo (pontos) das variedades CTC 4 (a), CTC 7 (b), CTC 20 (c) e RB 83-5486 (d)

Tabela 24 - Índices estatísticos R^2 , D e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para as variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20 para teor de sacarose base massa fresca

Variedade	R^2	D	RMSE (%)
CTC 4	0,807	0,553	2,055
CTC 7	0,750	0,469	1,437
CTC 20	0,506	0,493	2,611

5.4.6 Número de folhas verdes

As variedades CTC apresentaram número de folhas verdes variando de 7 a 8 em seu pico ao redor de 150 DAP (Figura 12) coincidindo com o encontrado por Suguitani (2006), onde as variedades apresentaram no máximo 9 folhas verdes durante todo o ciclo. Porém a estimativa da variável pelo DSSAT/CANEGRO apresenta um atraso no surgimento de folhas comparado com os dados observados e isso parece ser decorrente de deficiência no ajuste dos parâmetros TTPLTNEM (graus-dia para emergência da cana-planta) e TTRATNEM (graus-dia para emergência de cana soca). A Tabela 25 demonstra que a variedade CTC 4 apresentou boa correlação entre os dados ($R^2=0,944$) porém uma concordância razoável ($D=0,613$). A variedade CTC 20 apresentou correlação regular ($R^2=0,740$) e também boa concordância ($D=0,802$).

A variedade CTC 7 apresentou baixa correlação e concordância (R^2 0,480; D 0,586), o que também foi verificado por Marin et al. (2011) para as variedades RB 72-454 e SP 83-2847, onde os autores encontraram valores de R^2 de 0,15 e 0,35 respectivamente e índice D de 0,45 e 0,53 respectivamente. Como já mencionado, essa baixa correlação pode ser consequência dos dados medidos, concentrados no meio do ciclo da cultura e temporalmente estáveis.

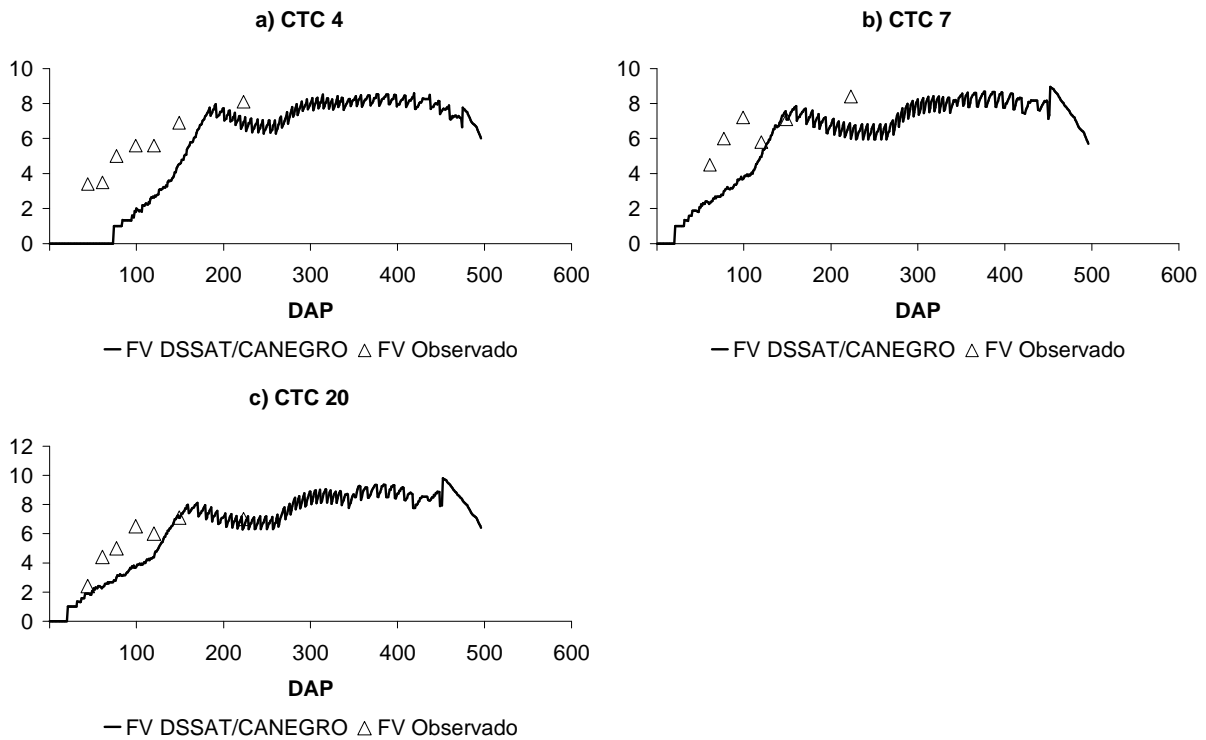


Figura 12 - Variação do número de folhas verde (FV) estimado (linha contínua) e observado em condições de campo (pontos) das variedades CTC 4 (a), CTC 7 (b) e CTC 20 (c)

Tabela 25 - Índices estatísticos R^2 , D e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para as variedades CTC 4, CTC 7 e CTC 20 para número de folhas verdes

Variedade	R^2	D	RMSE (FV)
CTC 4	0,944	0,613	3,159
CTC 7	0,480	0,586	2,331
CTC 20	0,740	0,802	1,667

5.4.7 Massa seca do colmo

Somente a variedade RB 86-7515 apresentou dados observados para massa seca do colmo, verificando-se que houve superestimativa da mesma durante todo o ciclo, com estabilização dos dados estimados no final do ciclo (Figura 13). Os índices estatísticos obtidos foram $R^2=0,534$, $D=0,665$ e $RMSE=9,51 \text{ ton ha}^{-1}$ (Tabela 26), estes sendo maiores que obtidos por Singels e Bezuidenhout (2002) ($RMSE=5,48 \text{ ton ha}^{-1}$) em simulação para a variedade NCo 376 na África do Sul. Esses resultados são similares aos encontrados por Marin et al. (2011) para as variedades RB 72-454 e SP 83-2847 ($RMSE=9,8$ e $9,6 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente).

O padrão de superestimativa observado na Figura 13 pode estar relacionado com os dados de solo utilizados na simulação. O sistema DSSAT utiliza equações de pedotransferência desenvolvidas para solos americanos e que muitas vezes não se adequam aos solos brasileiros. A simulação do estresse hídrico é muito dependente da configuração do solo utilizada. A este respeito Marin et al. (2011) utilizaram as equações de pedotransferência de Tomasella et al. (2000) para minimizar este problema e esse parece ser um procedimento especialmente importante para simulações em solos típicos do nordeste brasileiro. Outra inferência que se pode fazer baseado na Figura 13 é que, apesar de não relatada, a cultura possa ter tido algum outro tipo de estresse não simulado pelo modelo, explicando a consistente tendência de superestimativa durante boa parte do ciclo da cultura.

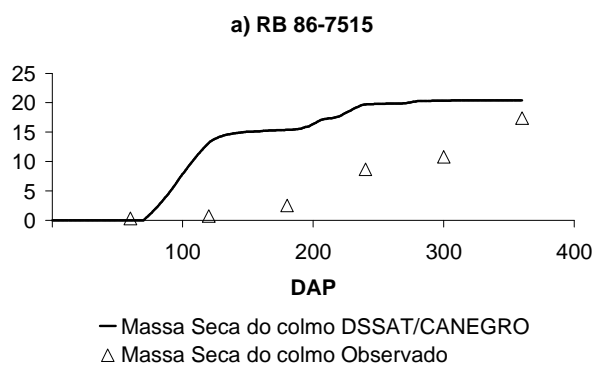


Figura 13 - Variação da massa seca do colmo estimado (linha contínua) e observado em condições de campo (pontos) da variedade RB 86-7515

Tabela 26 - Índices estatísticos R^2 , D e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para a variedade RB 86-7515 para massa seca do colmo

Variedade	R^2	D	RMSE (ton ha ⁻¹)
RB 86-7515	0,534	0,665	9,510

6 CONCLUSÕES

O método GLUE mostrou-se uma eficiente ferramenta para a parametrização de variedades de cana-de-açúcar. Após a parametrização, o modelo DSSAT/CANEGRO apresentou melhor desempenho para a simulação da massa fresca do colmo, índice de área foliar de folhas verdes e altura de colmo.

O modelo apresentou capacidade preditiva relativamente inferior para as variáveis de perfilhamento, teor de sacarose em base massa fresca, número de folhas verdes e massa seca do colmo.

O modelo apresentou desempenho melhor para as condições produtivas de Piracicaba, Pradópolis, Guariba e Porto Feliz, do Estado de São Paulo, em comparação com as condições de solo e clima de Couripe, situada em Alagoas.

O modelo DSSAT/CANEGRO demonstra ser promissora ferramenta para a simulação dos sistemas produtivos brasileiros quando adequadamente parametrizado para as variedades brasileiras de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

ALFONSI, R.R.; PEDRO JR., M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Irrigation and drainage**. Rome: FAO, 1998. 22 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da indústria automobilística brasileira**. 2010. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 25 set. 2010.

BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais...** Mossoró: SBA, 1979. v. 1, p. 6-8

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BERDING, N.; HURNEY, A.P.; SALTER, B.; BONNETT, G.D. Agronomic impact of sucker development in sugarcane under different environmental conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1, p. 203-217, 2005.

BEZUIDENHOUT, C.N.; O’LEARY, G.J.; SINGELS, A.; BAJIC, V.B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 76, p. 589-599, 2003.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704-716, 1996.

BRAY, S.C. **A cultura da cana-de-açúcar no Vale do Paranapanema**. 1980. 170 p. Tese (Doutorado em História) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. Sugarcane. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology some case histories**. Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 51-72.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar: safra 2009/2010 terceiro levantamento**. Brasília, 2009. 16 p. (Relatório de Acompanhamento da Safra Brasileira).

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MARIN, F.R.; Avaliação de modelos para a estimativa de valores diários da radiação solar global com base na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v.15, n.1, p. 103-108, 2007.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba, 2006. 111 p.

COSTA, M.C.G.; MAZZA, J.A.; VITTI, G.C.; JORGE, L.A.C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1503-1514, 2007.

DRECHSLER, M. Sensitivity analysis of complex models. **Biological Conservation**, Barking, v. 86, p. 401-412. 1998.

EVANGELISTA, A.W.P.; FERREIRA, P.A. Análise de sensibilidade do sistema de drenagem agrícola-DAS mediante variação dos parâmetros de entrada. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, p. 133-139. 2006.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, Washington, v. 315, p. 808-810, 2007.

GONÇALVES, A.D.M.A.; MIRANDA, J.H. de; DUARTE, S.N.; MINGOTI, R. Análise de sensibilidade do modelo Terradim para o dimensionamento de terraços em nível. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 18, n. 2, p. 1-5, 2006.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; PORTER, C.H.; WILKENS, K.J.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; ANTHONY HUNT, L.; TSUJI, Y.G. (Ed.). 2003. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0: overview**. Honolulu: University of Hawaii; ICASA, 2003. v.1, 60 p.

HUSSON, F.; WALLACH, D.; VANDEPUTTE, B. Evaluation of CECOL, a model of winter rape (*Brassica napus* L.). **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, n. 8, p. 205-214, 1998.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant Soil**, Mount Edgecombe, v. 8 n. 2, p. 93-99, Feb. 1991.

_____. DSSAT/CANEGRO: its history, conceptual basis, present and future uses. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane productions opportunities and constrains**. Brisbane: University of Queensland, 1994. p. 31-34.

_____. History of the DSSAT/CANEGRO model. In: INTERNATIONAL DSSAT/CANEGRO WORKSHOP, 2000, Mount Edgecombe. **Proceedings...** Mount Edgecombe: CSIRO, 2000. p. 4-7.

INMAN-BAMBER, N.G.; KIKER, G. **DSSAT/CANEGRO 3.10: DSSAT version 3.1 1998 Distribution Software DSSAT/CANEGRO 3.10**. DSSAT version 3.1. Honolulu: University of Hawaii, Honolulu, 1998.

INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, M.; ROBERTSON, J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 71-84, 2002.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.; HEWIT, M.H.; GLASSOP, D. Sucrose accumulation in sugarcane is influenced by temperature and genotype through the carbon source–sink balance. **Crop & Pasture Science**, Melbourne, v. 61, p. 111-121, 2010.

JAME, Y.W.; CURTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 76, p. 9-19, 1996.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2nd ed. Oxford: Blackwell, 2004. 216 p.

JONES, C.A.; KINIRT, J.R. Ceres-Maize: A simulation model of maize growth and development. College Station, Texas A & M University Press, 1986.

JONES, C.A.; WEGENER, M.K.; RUSSEL, J.S.; McLEOD, I.M.; WILLIAMS, J.R. **AUSCANE**: simulation of Australian sugarcane with EPIC. Brisbane: CSIRO, Division of Tropical Crops & Pastures, 1989. v. 29, 194 p.

JONES, J.W.; RITCHIE, J.T. Crop growth models. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: American Society for Agricultural Engineering, 1991. p. 66-89.

JONES, J.W.; KEATING, B.A.; PORTER, C.H. Approaches to modular model development. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 70, p. 421-443. 2001.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 235-265, 2003

JONES, M.; SINGELS, A. **DSSAT v 4.5 - DSSAT/CANEGRO sugarcane plant module**: user documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modelling, 2008. 57 p.

JONES, M.; PORTER, C.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; SINGELS, A.; SHINE, J.; NAYAMUTH, R.; KINGSTON, G.; CHINORUMBA, S.; VAN DEN BERG, M. Incorporating the DSSAT/CANEGRO sugarcane model into the DSSAT V4 crop modelling system. **Proceedings International Society Sugar Cane Technology**, Mont Edgecombe, v. 26, p. 438-443, 2007.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KEATING, B.A.; CARBERRY, P.S.; HAMMER, G.L.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; McLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; McCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 267-288, 2003.

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351-360, 2009.

LAMBONI, M.; MAKOWSKI, D.; LEHUGER, S.; GABRIELLE, B.; MONOD, H. Multivariate global sensitivity analysis for dynamic crop models. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 113, p. 312-320, 2009.

LISSON, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 321-335. 2005

LISSON, S.N.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A.; MUCHOW, R.C. Modelling sugarcane production systems. II: Analysis of system performance and methodology issues. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 31-48, 2000.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 144, p. 181-211, 2001.

LIU, D.L.; KINGSTON, G. QCANE: A simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constrains**. Brisbane: University of Queensland, 1995. p. 25-29.

MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar**. 1981. 123 p. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1981.

_____. Fisiologia da produção da cana-de-açúcar: crescimento. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 56–87.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, J.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.

MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M.L.; ASSAD, E.D. ; VIAN, C.E.; SANTOS, M.C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1449-1455, 2008.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Cana de açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. p.111-130.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, p. 100-110, 2011.

MERTENS, J.; MADSEN, H.; FEYEN, L.; JACQUES, D.; FEYES, J. Including prior information in the estimation of effective soil parameters in unsaturated zone modelling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 194, p. 251-269, 2004.

MONTEITH, J. The quest balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 695-697, 1996.

MOZAMBANI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar, In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p.11-18

O'LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000

OMETTO, J.C. **Uma equação para a estimativa de evapotranspiração potencial: sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 1974. 129 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

OOI, H.B. **Global Sensitivity analysis of fault location algorithms**. 2008. 87 p. Thesis (M.S.) – Universidade de Adelaide, Adelaide, 2008.

PELLEGRINO, G.Q. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. 2001. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Barros & Marques Editoração Eletrônica, 2006. 216 p.

RIVERA, R.N.C.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; BOTREL, T.A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento – análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 448-459. 2008.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 75 p.

SALTELLI, A. Sensitivity analysis for importance assessment. **Risk Analysis**, New York, v. 22, n. 3, p. 579-590, 2002.

SCARPARI, M.S. **Modelos de previsão para a produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

_____. **PREDPOL: um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007, 120 p.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar, In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 19-36.

SILVA, L.C. da. **Crescimento e acúmulo de nutrientes em sete cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Coruripe-AL**. 2007. 104 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2007.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the DSSAT/CANEGRO sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 291-303, 2005.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO: Sugarcane Plant Module**; scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34 p.

SINGELS, A.; VAN DER BERG, M.; SMIT, M.A.; JONES, M.R.; VAN ANTWERPEN, R. Modelling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 117, p. 59-69, 2010.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. **Growth and function of the sugarcane root system**. Amsterdam: Elsevier, 2005. 18 p.

SOLER, C.M.T **Uso do modelo CERES-MAIZE para previsão de safra do milho “safrinha”**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004, 146 p.

SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Ciência do solo: fator de produtividade competitiva com sustentabilidade; resumos...** Londrina: SBCS, 2001. p. 119.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

THOMPSON, W. The city as a distorted price system, In: HOCHMAN, H.M. (Ed.) **The urban economy**. New York: Norton & Company, 1976. 524 p.

THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; PROBERT, M.E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: Recent advances and applications. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 337-351, 2005.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling** – A mathematical approach to plant and crop physiology. 1 ed. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669 p.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 1, p. 327, 2000.

VAN DILLEWIJIN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371 p.

VILLEGAS, F.D.; DAZA, O.H.; JONES, J.W.; ROYCE, F.S. CASUPRO: An industry-driven sugarcane model. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2005, Tampa. **Proceedings...** Tampa, 2005. p. 22.

WALLACH, D.; GOFFINET, B.; BERGES, J.E.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, D.; AUBERTOT, J.N. Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 757-766, 2001.

WILLMOTT, C.J.; Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of American Meteorology Society**, Albuquerque, v. 63, p. 1309-1313, 1982.