

RÔMULA FERNANDES DA SILVA

**CALIBRAÇÃO DO MODELO DSSAT/CANEGRO PARA A CANA-
DE-AÇÚCAR E SEU USO PARA A AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2012

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

S586c
2012

Silva, Rômula Fernandes da, 1985-

Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para a cana-de-açúcar e seu uso para a avaliação do impacto das mudanças climáticas / Rômula Fernandes da Silva. – Viçosa, MG, 2012. ix, 56f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 48-56

1. Mudanças climáticas. 2. Calibração. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

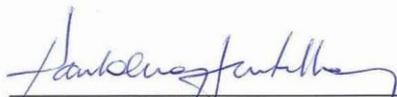
CDD 22. ed. 630.2515

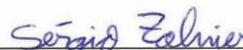
RÔMULA FERNANDES DA SILVA

**CALIBRAÇÃO DO MODELO DSSAT/CANEGRO PARA A
CANA-DE-AÇÚCAR E SEU USO PARA A AVALIAÇÃO DO IMPACTO
DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

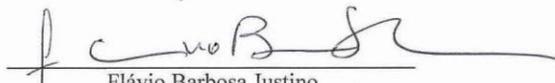
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 13 de fevereiro de 2012.


Paulo César Sentelhas


Sérgio Zolnier


Fábio Ricardo Marin
(Coorientador)


Flávio Barbosa Justino
(Orientador)

A Deus, princípio de tudo;
Aos meus pais Odília e Geraldo pelo amor e auxílio incondicional;
Ao amor da minha vida Jefferson, pelo amor, carinho, amizade e incentivo;
Aos meus irmãos pelo amor e amizade.

“O mais importante da vida não é a situação em que estamos, mas a direção para a qual nos movemos”.

(Oliver Wendell Holmes)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo amor, saúde, sabedoria concedida e presença na minha vida.

Ao professor Flávio, pela orientação, incentivo, amizade, paciência e pelo exemplo de pessoa e profissionalismo.

Ao coorientador Thieres, pela amizade, incentivo, auxílio e pela concessão dos dados experimentais utilizados no presente trabalho.

Ao pesquisador e coorientador Fábio Marin, pelo auxílio.

À minha mãe Odília, pelo amor, auxílio, amizade, compreensão e pelo incentivo, nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai Geraldo, pelo amor e carinho.

Ao querido Jefferson, pelo amor, carinho, cuidado, amizade e incentivo.

À minha irmã Rejane, pelo amor, carinho, amizade e auxílio de sempre.

À Graça, pelo auxílio, amizade e exemplo de pessoa.

Aos amigos Marine e Rafael, pela amizade, companheirismo e auxílio de sempre.

Aos demais amigos do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela amizade e companheirismo.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola/ UFV.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro.

BIOGRAFIA

RÔMULA FERNANDES DA SILVA, filha de Odília Fernandes de Souza Lima e Geraldo Nonato da Silva, nascida em 14 de Maio de 1985, na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Em Dezembro de 2003, concluiu o ensino médio pela escola Professor Oswaldo Franco, em Betim, Minas Gerais.

Em Março de 2005, iniciou o curso de graduação em Agronomia na Universidade Federal de Viçosa/UFV, localizada em Viçosa, Minas Gerais. Durante três anos participou de atividades de Iniciação Científica, na qualidade de bolsista. Graduou-se no segundo semestre de 2009.

Em Março de 2010, iniciou o mestrado na Universidade Federal de Viçosa- UFV/Departamento de Engenharia Agrícola, município de Viçosa-MG, no programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. Titulou-se em Fevereiro de 2012.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Aspectos morfológicos da cana-de-açúcar.....	3
2.2. Aspectos fisiológicos da cana-de-açúcar.....	5
2.3. Solo.....	6
2.4. Importância sócio-econômica da cana-de-açúcar.....	7
2.5. Modelo de crescimento de cultura.....	7
2.6. DSSAT.....	8
2.7. DSSAT/CANEGRO.....	9
CAPÍTULO 1 – CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DSSAT/CANEGRO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
2.1. Dados experimentais.....	13
2.1.1. Caracterização do experimento de campo.....	13
2.1.2. Material genético.....	16
2.1.3. Características do clima da área de estudo.....	16
2.2. Dados de solo.....	18
2.3. Modelo DSSAT/CANEGRO.....	21
2.4. Calibração dos coeficientes genéticos do modelo DSSAT/CANEGRO.....	23
2.5. Avaliação de modelo DSSAT/CANEGRO.....	24
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
3.1. Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO.....	25
3.1.1. Variáveis de crescimento.....	27

3.1.2. Variáveis de produção e rendimento.....	31
4. CONCLUSÕES.....	33
CAPÍTULO 2 – IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR COM BASE NO MODELO DSSAT/CANEGRO.....	
1. INTRODUÇÃO.....	34
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
2.1. Dados experimentais.....	36
2.1.1. Área de estudo.....	36
2.2. Descrição do modelo ECAHM 5/MPI-OM.....	37
2.3. Base de dados.....	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
3.1. Comparação da simulação feita no DSSAT/CANEGRO utilizando dados meteorológicos observados com dados meteorológicos do ECHAM 5/MPI-OM (2007-2008).....	41
3.2. Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana- de-açúcar com base no modelo DSSAT/CANEGRO.....	43
4. CONCLUSÕES.....	47
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

RESUMO

SILVA, Rômula Fernandes da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para a cana-de-açúcar e seu uso para a avaliação do impacto das mudanças climáticas.** Orientador: Flávio Barbosa Justino. Coorientadores: Fábio Ricardo Marin e Thieres George Freire da Silva.

O presente trabalho teve como área de estudo o município de Juazeiro, Bahia, na região semi-árida do Nordeste brasileiro (9°28'07"S; 40°22'43"O; 386m de altitude). O objetivo foi calibrar o modelo DSSAT/CANEGRO e analisar o impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana-de-açúcar irrigada para o cenário atual, (2007/2008) e para projeções futuras de mudanças climáticas, cenário A1B (2011-2037). Para o processo de calibração foi utilizada a cultivar de cana-de-açúcar RB-92579, conduzida no primeiro ciclo de cana-soca irrigada, num experimento de campo desenvolvido na área experimental da empresa Agrovale na safra de 2007/2008. Foram utilizados dados climáticos de uma série futura de 2011 a 2037 e de um período base (2007-2008), obtidos com o modelo ECHAM5/MPI-OM. O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou elevado grau de ajuste na simulação da fenologia, crescimento e produtividade da cana-de-açúcar. No entanto, apresentou limitações na estimativa do número de folhas por colmo e índice de área foliar. Foram utilizados os índices estatísticos eficiência de modelagem, índice de concordância de Wilmott, raiz quadrada do erro médio e o viés médio absoluto, como indicadores do desempenho do modelo. Ao longo da série climática futura (2011-2037), a biomassa seca do colmo variou de 48 a 54 t ha⁻¹. O incremento máximo previsto da biomassa seca do colmo foi de 12%, quando comparada com a simulação para o ciclo atual. Isto ocorreu devido ao aumento de radiação solar, temperatura média e precipitação. Já o teor de sacarose apresentou uma maior variação ao longo da série climática futura, variando de 17 a 27 t ha⁻¹ e atingindo um incremento máximo de 16%. Esses resultados mostraram que a massa seca de sacarose é mais sensível às variações climáticas do que a biomassa seca do colmo.

ABSTRACT

SILVA, Rômula Fernandes da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Calibration DSSAT/CANEGRO model for sugarcane and its use for the assessment of the impact of climate change.** Adviser: Flávio Barbosa Justino. Co-Advisers: Fábio Ricardo Marin e Thieres George Freire da Silva.

The present paper had as studied area location of the Juazeiro, Bahia, in the semi-arid region of northeast of Brazil ($9^{\circ}28' 07''S$; $40^{\circ}22' 43''O$; alt. 386m). This study aimed to calibrate the DSSAT/CANEGRO model and analyze the impact of climate change on the of irrigated sugarcane yield for the current scenario, 2007/2008 and future projections of climate change, using A1B scenario (2011-2037). For the calibration procedure it was used the sugarcane cultivate RB-92579, conducted in the first cycle of irrigated ratoon cane in a field experiment conducted in an experimental area owned by Agrovale company in the harvest of 2007/2008. Climatic data were used for a future series from 2011 to 2037 and a base period (2007-2008), obtained from the ECHAM5/MPI-OM model. The DSSAT/CANEGRO showed high degree of adjustment in the simulation of sugarcane phenology, growth and yield. However, it has limitations in estimating the number of leaves per stem and leaf area index. Were used the following statistical indexes: modeling efficiency, Willmott's concordance index, square root of the mean error, and mean absolute bias, as model performance indicators. Throughout the series of future climate (2011-2037), stem dry biomass ranged from 48 to 54 t ha⁻¹. The maximum expected increase stem dry biomass was 12% compared with the simulation for the current cycle. This occurred because the increased solar radiation, mean temperature and precipitation. The level of the sucrose showed a greater variation over the future climate series, ranging from 17 to 27 t ha⁻¹ and reaching a maximum increase of 16%. These results showed that the dry weight of sucrose is much more sensitive to climatic variations than the biomass of the stem.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O presente trabalho é composto por uma introdução que aborda resumidamente os assuntos tratados nesta dissertação, uma revisão bibliográfica que discute os aspectos morfológicos, fisiológicos e econômicos da cana-de-açúcar e uma descrição dos modelos de crescimento de culturas. Este trabalho é dividido em duas partes, o Capítulo 1 que aborda a calibração e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para a cultura da cana-de-açúcar e o Capítulo 2, que consiste na aplicação deste modelo ajustado, com o objetivo de avaliar o impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana-de-açúcar, baseado no modelo DSSAT/CANEGRO.

A cana-de-açúcar (*Saccharum sp*) possui importância social e econômica, destacando-se por ser uma importante matéria-prima para a produção de açúcar e etanol e energia elétrica. Além de poder ser utilizada para a produção de rapadura e forragem para a alimentação animal. A cana-de-açúcar possui grande potencialidade no setor energético, uma vez que consiste numa fonte de energia limpa, renovável e sustentável. O álcool da cana-de-açúcar do Brasil continuará sendo a mais promissora tecnologia de bioenergia disponível no planeta, não devendo ser superada em futuro próximo (FAPESP, 2007). A cana-de-açúcar é a segunda fonte de energia da Matriz Energética Brasileira, ficando atrás apenas do petróleo, sendo que em 2007 mais de 16% de toda energia consumida no país foi proveniente dessa fonte renovável. Essa importância no setor sucroalcooleiro tem incentivado a produção nacional, contribuindo para elevar o Brasil à posição de maior produtor mundial (BRASIL, 2008).

O aumento do consumo de energia renovável no Brasil tem contribuído para as baixas emissões de CO₂ decorrentes da produção e do uso de energias, em comparação com outros países (BRASIL, 2008). O cultivo de cana-de-açúcar tem avançado as fronteiras agrícolas de várias regiões do país (IBGE, 2009). O desenvolvimento de tecnologias de irrigação tem contribuído para a expansão do cultivo de cana-de-açúcar na região Semi-Árida do Submédio do Vale do São Francisco, especificamente no município de Juazeiro, no Norte do Estado da Bahia. A área irrigada no Nordeste é de

495.370 ha, sendo que o Estado da Bahia é responsável por 33,95% de área irrigada (HEINZE, 2002). Esta região produz cerca de 18 mil hectares de cana-de-açúcar irrigada, o que representa 16,6% da área plantada no Estado da Bahia. A produção total do município de Juazeiro-BA foi de 1,6 milhões de toneladas de colmos, responsável por uma renda de 75,5 milhões de reais (IBGE, 2009).

Sabe-se que as alterações climáticas, em particular de temperatura, influenciarão os padrões de precipitação. O balanço de energia do sistema climático é alterado pela mudança na quantidade de gases de efeito estufa e aerossóis, mudança na radiação solar e nas características da superfície da terra/uso do solo (IPCC, 2007 a). O monitoramento e a previsão do clima vêm sendo feitos na região Nordeste brasileira com o objetivo de viabilizar o estabelecimento de novas atividades produtivas no semi-árido nordestino. Estas alterações climáticas modificam a agricultura que é extremamente dependente dos fatores abióticos.

É importante lembrar que segundo o quarto relatório do IPCC (2007 b), em um clima mais quente, o semi-árido nordestino poderá se transformar em região árida, e comprometer a agricultura regional. Devido à vulnerabilidade da cultura da cana-de-açúcar às condições ambientais e de manejo que afetará diretamente a sua maturação, tem-se a necessidade de se quantificar a produtividade dessa cultura aos diferentes estímulos abióticos, o que pode propiciar um nível menor de perda de produtividade. Desta forma, os modelos de previsão dos colmos e rendimento final de açúcar tornam-se ferramentas importantes na lavoura canavieira (SCARPARI et al., 2002).

Os modelos matemáticos visam representar da melhor forma possível as situações do mundo real. As análises dos sistemas ecológicos se baseiam no fato de que qualquer sistema em qualquer momento pode ser descrito e caracterizado de forma quantitativa/qualitativa por meio de equações matemáticas (GOUDRIAAN et al., 1994). Especificamente, para a cultura da cana-de-açúcar, modelos empíricos têm sido desenvolvidos com a finalidade de simular a partição da biomassa em sacarose (SCARPARI et al., 2002).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos morfológicos da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, abrangendo várias espécies, sendo típica de climas tropicais e subtropicais (MIRANDA et al., 2008). A parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos, e a parte subterrânea por raízes e rizomas constituídos por nós, entrenós e gemas que são responsáveis pela formação de perfilhos (MOZAMBANI et al., 2006). Os perfilhos originam-se a partir do colmo primário e se comportam como uma planta independente.

Nesta cultura, são definidos quatro estádios de desenvolvimento, conhecidos por brotação, perfilhamento, máximo crescimento dos perfilhos e maturação (GASCHO et al., 1983) (Figura 1), página 17. Cada estágio de desenvolvimento da cultura requer condições climáticas específicas, sendo que algumas variedades são mais exigentes que outras (BRAY, 1980). No primeiro estágio, ocorre o estabelecimento inicial das plantas em campo (brotação, enraizamento e emergência dos brotos). A brotação das gemas é influenciada pela umidade presente no solo. Em condições de déficit hídrico no solo, a brotação dos toletes fica comprometida. O excesso de água pela irrigação, drenagem irregular e acúmulo de água pela chuva também compromete a brotação. A fase de emergência do primeiro perfilho é altamente dependente de temperatura e umidade. O segundo estágio é caracterizado pelo estabelecimento definitivo da cultura. No terceiro estágio, o início do acúmulo de sacarose nos colmos determina a futura produtividade da cultura. No quarto estágio, continua ocorrendo o acúmulo de sacarose e aqui se determina a qualidade da matéria-prima dos colmos industrializáveis. Cada estágio requer suprimentos hídricos adequados.

O colmo que fica acima do solo é caracterizado pela presença de nós e entrenós, sendo responsável pela sustentação das folhas e panículas. A fase de perfilhamento é caracterizada por grande competição por fatores ambientais. Os colmos que sobrevivem a esta fase continuam o seu crescimento e desenvolvimento culminando no acúmulo de sacarose.

O desenvolvimento desta cultura pode ser limitado por algumas condições, como valores de temperatura extrema, restrição hídrica e baixos valores de radiação solar (INMAN-BAMBER et al., 2004). De acordo com Inman-Bamber e Smith (2005), as produções de cana-de-açúcar estão diretamente relacionadas com o manejo hídrico. Desta forma, é recomendável boa disponibilidade hídrica durante o desenvolvimento vegetativo, principalmente nas fases de brotação, perfilhamento e alongamento dos colmos. A fase de maturação, todavia, requer alguma restrição hídrica para que haja enriquecimento com sacarose devido ao repouso fisiológico. O déficit hídrico é um dos principais fatores que diminuem a produção da maioria das culturas no mundo, em especial a da cana-de-açúcar (SILVA et al., 2008). Segundo Pimentel (1998), sob condição de déficit hídrico, a cana-de-açúcar sofre algumas alterações morfofisiológicas, dentre as quais citam-se: diminuição da condutância estomática, enrolamento da folha, diminuição da área foliar, diminuição da transpiração, diminuição da fotossíntese, aumento da condutividade hidráulica das raízes e modificação de atividades enzimáticas (INMAN-BAMBER E SMITH, 2005). Afim de solucionar o problema do estresse hídrico, muitos produtores desta cultura fazem uso do cultivo irrigado que muitas vezes, apresenta como maior entrave os altos custos dos equipamentos (BOYER, 1996).

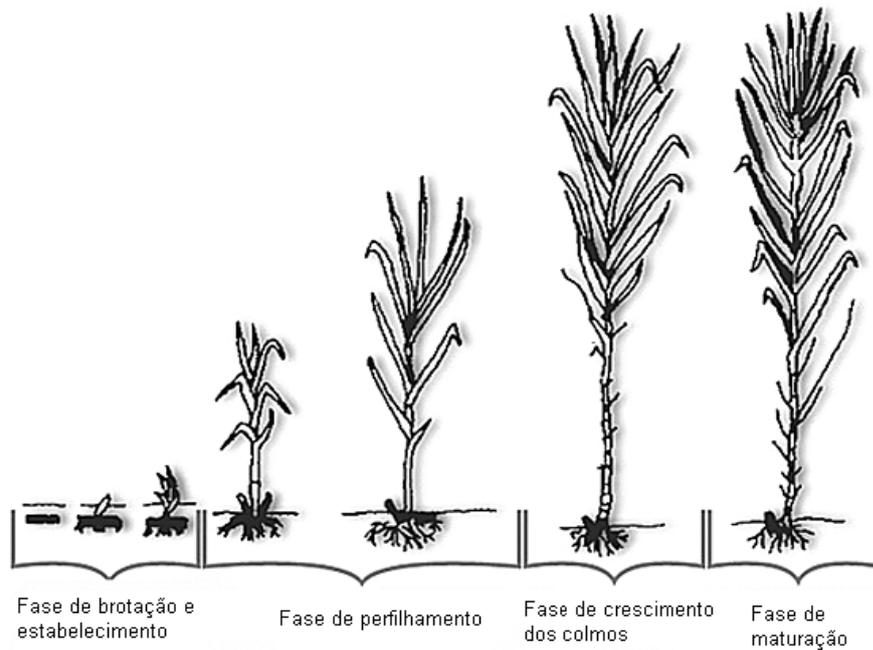


Figura 1. Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Fonte: Gasho e Shih (1983), adaptado por Marin et al., (2008).

2.2. Aspectos fisiológicos da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, por possuir uma via de fotossíntese C4, é considerada muito eficiente na conversão de energia radiante em energia química quando comparada com plantas C3. Essas plantas também são capazes de utilizar com mais eficiência a água quando comparadas com plantas C3. Isto ocorre por possuírem valores de condutância estomática cerca de 50 a 70% menores do que plantas C3 com uma mesma assimilação (Long, 1985).

Cada cultivar possui características que vão influenciar a eficiência fotossintética, além das variações climáticas que prevalecem durante o desenvolvimento da cultura. Os processos de bioconversão de energia são afetados principalmente pelas seguintes variáveis: radiação solar, concentração de CO₂, disponibilidade de água, nutrientes e temperatura. A temperatura é o fator climático mais importante para a produção de cana-de-açúcar, sendo tolerante a valores altos, em torno de 47 °C, desde que empregada a irrigação. Temperaturas inferiores a 21 °C diminuem o crescimento dos colmos, promovendo o acúmulo de sacarose (RODRIGUES,

1995). A maioria de estudos envolvendo o impacto do aumento do CO₂ na fisiologia das plantas tem sido feitos para as C₃, sendo ainda muito escassos para plantas C₄. Os estudos mais recentes baseados na tecnologia FACE (Free-Air Carbon Enrichment) mostram que as plantas C₄ respondem ao aumento da concentração de CO₂ em condição de déficit hídrico, proporcionando o fechamento estomático e a redução da transpiração (Ainsworth et al., 2008). Por outro lado, estudos realizados em casa de vegetação ou câmaras de topo aberto têm demonstrado o aumento das taxas fotossintéticas devido ao aumento na atividade da enzima Rubisco (Vu et al., 2006;) e mudanças na taxa de transpiração, no metabolismo de carboidratos e no acúmulo de proteínas (Prins et al., 2010).

2.3. Solo

O conhecimento das características físico-hídricas dos solos é de grande importância no estudo de modelos de crescimento de culturas. Os solos não-saturados de clima árido e semi-árido, como os da região Nordeste apresentam algumas dificuldades no processo de quantificação de suas propriedades (SILVA, 2002). Além disso, há uma escassez no banco de dados de solo, o que tem sido uma grande limitação no uso desses modelos. Essas limitações têm motivado o desenvolvimento de modelos de estimativa de umidade no solo.

Existem três principais metodologias para estimar a capacidade de água disponível no solo utilizando a forma de pedotransferência: método de regressão por potencial matricial; método de modelo físico e método de regressão por parâmetro.

A técnica de estimativa através de potencial matricial consiste em se determinar a umidade do solo resultante da aplicação de potenciais no mesmo. Esta técnica é muito utilizada devido à simplicidade dos métodos de regressão utilizados (GONÇALVES et al., 1994). Apresenta como desvantagem o desconhecimento da variação completa da curva de retenção, uma vez que apenas o teor de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente é conhecido. O método do modelo físico produz uma função de retenção como uma simples transformação linear da distribuição do tamanho das partículas, sendo usada apenas para solos arenosos com partículas

relativamente uniformes. No método de regressão por parâmetros, obtém-se a curva de retenção por meio de equação empírica (BARROS, 2010).

2.4. Importância sócio-econômica da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* sp) é originária da Nova Guiné e regiões da Indonésia foi introduzida no Brasil em 1533 (DOOREMBOS & KASSAM, 1979). Os árabes iniciaram a propagação da cultura no norte da África e sul da Europa, enquanto os chineses levaram esta cultura para Java e Filipinas.

Foi no continente americano que a cana-de-açúcar encontrou excelentes condições ao seu desenvolvimento. No final do século XVI, havia uma grande concentração de engenhos nos Estados de Pernambuco e Bahia de tal forma que o Brasil liderou a produção mundial de açúcar. Após 1615, a cana-de-açúcar chegou ao planalto paulista, com destaque para a região de Itu como o maior centro açucareiro do Estado de São Paulo.

O Brasil é o maior produtor mundial, seguido pela Índia, e China (FAOSTAT, 2010). As principais regiões brasileiras produtoras de cana-de-açúcar são a Centro-Sul e a Nordeste (TAVARES, 2009). Segundo a Conab (2011), a lavoura de cana-de-açúcar continua em expansão no Brasil, abrangendo uma área de 8033,6 mil hectares da planta colhida, destacando-se os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás, Alagoas, Mato Grosso do Sul e Pernambuco.

A produtividade média brasileira foi estimada em 77.798 kg ha⁻¹, sendo que da produção total (624.991,0 mil toneladas), 53,8% é destinada à produção de biocombustível (CONAB, 2011). Esta fonte de energia limpa e renovável apresenta-se como uma excelente alternativa aos tradicionais combustíveis fósseis que contribuem para a intensificação do efeito estufa (ALVES et al., 2005).

2.5. Modelo de crescimento de cultura

Atualmente, os modelos de simulação vêm sendo muito aplicados em sistemas agrícolas, uma vez que permitem monitorar diversos processos, como

o movimento da água no solo e o rendimento da cultura sob diferentes cenários de clima e condições de manejo diversificadas.

Os modelos de simulação de culturas baseados em processos são ferramentas para monitorar e realizar previsões a cerca da produtividade e rendimentos finais (MARIN et al., 2011).

Quando se trabalha com o sistema solo-planta-atmosfera são conhecidos, dentre vários, dois tipos de modelos: os empíricos ou estatísticos e os mecanísticos. Modelos empíricos determinam processos de causa e efeito, não se prendendo aos aspectos biológicos da relação entre as variáveis, embora exista uma relação entre as mesmas (REYNOLDYS et al., 1985). Já os modelos mecanísticos descrevem os mecanismos sistemáticos dos fenômenos considerados. Há três tipos de modelos mecanísticos: os estocásticos, os determinísticos e os dinâmicos (BARROS, 2010).

É importante monitorar o crescimento e desenvolvimento desta cultura e o impacto de possíveis alterações climáticas no rendimento da mesma. Neste contexto, os modelos para a cana-de-açúcar assumem papel importante, existindo vários modelos de simulação para esta cultura: CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008); Auscane (JONES et al., 1989); Qcane (LIU and KINGSTON, 1995); Apsim (KEATING et al., 1999).

2.6. DSSAT

A plataforma DSSAT (Sistema de Suporte à Decisão para Transferência em Agrotecnologia) desenvolvida pelo projeto *International Benchmark Sites Network For Agrotechnology Transfer* contém vários modelos que simulam o crescimento e o desenvolvimento de culturas, como a do milho, a da soja, a do sorgo, a da cana-de-açúcar, dentre outras. Os modelos dessa plataforma são classificados como mecanísticos (JONES et al., 1987), pois fundamentam-se nos processos chave envolvidos no sistema solo-planta-atmosfera (BARBER; CUSHMAN, 1981). As simulações dentro da plataforma DSSAT requerem a criação de um experimento X que define a gestão da cultura para um determinado experimento de campo. É necessário também a criação de um arquivo de solo S com as características do solo em questão e um arquivo W com a descrição das variáveis meteorológicas. Os modelos da plataforma DSSAT permitem também a criação de arquivos sazonais para a simulação ao

longo de uma série temporal. Esses modelos requerem como entradas dados meteorológicos, do solo, da cultivar e dados do manejo da cultura com base em experimentos de campo.

2.7. DSSAT/CANEGRO

O DSSAT/CANEGRO é um dos principais modelos para a cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS e BENZUIDENHOUT, 2002). Pertencente à plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (DSSAT versão 3.5) (TSUJI et al., 1994; INMAN BAMBER e KIKER, 1997), foi atualizado na versão 4.5 do DSSAT por Singels et al., (2008). Este modelo foi desenvolvido na África do Sul com a finalidade de otimizar o planejamento da produção açucareira daquela região (SILVA e BERGAMASCO, 2001). Desde então vem sendo utilizado em várias regiões do mundo simulando o sistema de produção de cana-de-açúcar (INMAN BAMBER et al., 2002). O modelo CANEGRO simula o desenvolvimento do dossel, radiação capturada, balanço de água usando o princípio contínuo solo-planta-atmosfera, o acúmulo de biomassa e sua partição para os diferentes componentes da planta.

O DSSAT/CANEGRO é baseado em algoritmos de crescimento e desenvolvimento de cultura, incluindo o desenvolvimento fenológico, do dossel, perfilhamento, acúmulo e partição de biomassa, crescimento radicular e estresse hídrico (MARIN et al., 2011). O modelo CANEGRO, sendo um módulo da plataforma DSSAT requer como dados de entrada parâmetros relacionados à capacidade de retenção de água no solo (capacidade de campo, ponto de murcha permanente e ponto de saturação); dados físico-químicos (teores de nutrientes, quantidade de silte, argila, areia e densidade). Este modelo também precisa ser alimentado com dados meteorológicos diários (radiação solar, temperaturas máximas e mínimas e precipitação). Os dados de velocidade do vento e umidade relativa não são essenciais, mas quando disponíveis são recomendados. Caso o cultivo tenha sido irrigado, estes dados também devem ser incluídos. Os dados biométricos ao longo do ciclo da cultura e os dados de produtividades e rendimentos finais são cruciais para a verificação da simulação.

Uma descrição mais detalhada do modelo DSSAT/CANEGRO é apresentada por (Singels et al., 2008). Este modelo simula o desenvolvimento individual de folhas; a radiação solar interceptada é calculada através da lei de Beer e o desenvolvimento dos perfilhos é baseado no tempo termal. O modelo calcula incrementos diários na biomassa total usando a radiação fotossinteticamente ativa. A partição diária de assimilados entre raízes e parte aérea é simulada como uma função não-linear da biomassa total.

No início da vida da planta, maior fração de biomassa é destinada para as raízes, mas com a idade da planta isso decresce. Na maturidade da cultura, uma fração máxima de incremento de biomassa é destinada para a parte aérea. Uma parte da biomassa seca aérea é particionada para o caule (SINGELS et al., 2005). A partição de matéria seca entre sacarose e caule é regulada pela capacidade de dreno para o crescimento estrutural do caule e a relação fonte-dreno. Essa capacidade para o crescimento estrutural e armazenamento de sacarose é ditada pelas seguintes variáveis (temperatura, disponibilidade de água, massa seca do caule e características específicas da cultivar). O componente relacionado ao acúmulo de sacarose do modelo é afetado pela temperatura e estresse hídrico.

CAPÍTULO 1- CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DSSAT-CANEGRO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

1. INTRODUÇÃO

A modelagem do crescimento e produção da cana-de-açúcar vem ganhando importância nos últimos anos por permitir o planejamento estratégico da produção. Vários estudos têm sido feitos para esta cultura, em várias regiões do mundo e também no Brasil, tendo como base o modelo DSSAT/CANEGRO (MARIN et al., 2011; NASSIF, 2010). Os modelos de crescimento de culturas consistem em excelentes ferramentas de gestão da produção. Através desta ferramenta, é possível descrever todo o processo evolutivo da planta, além de permitir simulações em cenários de mudanças climáticas.

Dentre as ferramentas utilizadas, destaca-se a plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), que contém vários modelos para diversas culturas (SILVA e BERGAMASCO, 2001). Os modelos desta plataforma permitem prever o crescimento das culturas e estimar as suas produtividades. O modelo desta plataforma utilizado para simular o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar é o DSSAT/CANEGRO (SINGELS et al., 2008). Este módulo de partição de matéria seca, desenvolvido na África do Sul, objetiva melhorar as previsões de teor de sacarose, por meio da partição diária de assimilados entre raízes e a parte aérea como uma função não linear da biomassa total (SINGELS et al., 2002).

Um trabalho desenvolvido na África do Sul, utilizando o modelo DSSAT/CANEGRO teve como objetivo testar oito diferentes modelos de balanço hídrico, comparando a taxa de absorção de água, assimilação de carbono, extensão da planta e acúmulo de sacarose simulado e obtido experimentalmente. Este trabalho alertou para a necessidade de mudanças apropriadas no modelo DSSAT/CANEGRO para em seguida revalidar as previsões de produtividade (SINGELS et al., 2010).

Um outro estudo de parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO foi desenvolvido por Marin et al., (2011), usando dados de experimentos conduzidos no Sudeste do Brasil de duas cultivares brasileiras. Dez dos vinte parâmetros analisados foram otimizados através da ferramenta

GLUE (método de estimativa de incerteza de probabilidade generalizada) (HE et al., 2009).

O uso de modelos de crescimento de plantas é de grande importância para a pesquisa agrícola, no entanto, em cada local específico, é necessário ajustar os parâmetros genéticos que controlam o crescimento e o desenvolvimento dessa cultura. Como o modelo DSSAT/CANEGRO foi desenvolvido em condições edafo-climáticas da África do Sul, os seus coeficientes genéticos precisam ser calibrados e ajustados às condições de clima e solo distintos, como, por exemplo, condições brasileiras (SILVA e BERGAMASCO, 2001).

No Brasil, a maioria dos estudos sobre modelos de crescimento de cana-de-açúcar estão sendo focados no Estado de São Paulo que é o maior produtor nacional. Atualmente, o desenvolvimento de tecnologias de irrigação no Nordeste tem contribuído para a expansão do cultivo de cana-de-açúcar até mesmo na região semi-árida. No entanto, pouco se sabe sobre o crescimento desta cultura na região semi-árida, havendo a necessidade de mais estudos. Deve-se notar ainda que o aumento da emissão dos gases de efeito estufa e as perspectivas de mudanças climáticas globais futuras têm impulsionado a realização de estudos de simulação da produtividade das culturas, com o objetivo de propor recomendações aos produtores, bem como fornecer estratégias às tomadas de decisões antes mesmo do início do plantio.

Desta forma, objetiva-se neste estudo parametrizar o modelo DSSAT/CANEGRO para a cultivar de cana-de-açúcar RB-92579.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A calibração dos coeficientes genéticos da cultivar de cana-de-açúcar, RB-92579 foi feita com base no experimento de campo descrito abaixo. Foi realizada a parametrização dos coeficientes genéticos do modelo DSSAT/CANEGRO para a cultivar de cana-de-açúcar RB-92579 (ciclo de cana soca), utilizando dados do experimento de campo conduzido na safra de 2007/2008 no município de Juazeiro, BA, no Submédio do Vale São Francisco. Neste experimento, foram realizadas análises do crescimento e do rendimento da cultura. Para a análise dos padrões de crescimento, foram realizadas medições de variáveis biométricas, de biomassa e de rendimento da cana-de-

açúcar nas subáreas de amostragem. Ao final do ciclo da cana-de-açúcar (389 DAC), foram obtidos no laboratório de Análise Química da Empresa Agro-Indústrias do Vale do São Francisco S.A.-AGROVALE, os seguintes índices tecnológicos: sólidos solúveis totais, teor de fibras, teor de sacarose do caldo, pureza, porcentagem de açúcar bruto, açúcares redutores livres, açúcares redutores totais, umidade e toneladas de colmo por hectare. Com base nesses índices tecnológicos, foram calculados os rendimentos de açúcar e álcool, bem como o conteúdo de sacarose na biomassa seca dos colmos. As simulações das variáveis de crescimento, produção e rendimento final de açúcares foram feitas dentro do modelo DSSAT/CANEGRO, atualizado na versão 4.5.

2.1 Dados experimentais

2.1.1 Caracterização do experimento de campo

O experimento de campo foi conduzido por Silva (2009), utilizando a cultivar de cana-de-açúcar RB-92579, no ciclo de cana-soca (segundo ciclo da cultura), na safra de 2007/2008. O cultivo foi realizado na direção leste-oeste. O experimento de campo foi realizado em um talhão de 12,17 ha de cana-de-açúcar, pertencente à Empresa Agrovale (Agroindústria do Vale do São Francisco), que possui cerca de 18 mil hectares de área cultivada, localizada no município de Juazeiro, Bahia, no Submédio do Vale do São Francisco, na região Semi-árida do Nordeste (Figura 2). O local do experimento possui as seguintes coordenadas geográficas: 9°28'07" S; 40°22'43" O; 386,5 m. O espaçamento entre linhas foi de 1,5 m. A adubação foi feita com base nas análises de solo e foliar, onde no início do ciclo de cana-soca foram aplicados 157,5 kg ha⁻¹ e 0,5 L ha⁻¹ de uréia e Ajipower, respectivamente. Para o controle de ervas daninhas foram aplicados 1 L ha⁻¹ dos herbicidas Aminol e Trop. A irrigação foi do tipo superficial por sulcos, por meio de um sistema de condução em tubos janelados, tendo os eventos sido realizados com base no conteúdo de água no solo obtido por meio de uma sonda FDR (Frequency Domain Reflectometer) modelo PR2/6 (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK) e a partir dos valores de evapotranspiração de referência (ET_o). Os eventos de irrigação foram realizados sempre que o conteúdo de água no solo atingisse 50% da capacidade de campo. As medidas agrometeorológicas, como radiação

solar, precipitação, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa e velocidade do vento foram feitas por uma estação meteorológica automática, instalada à 3 Km de distância em relação à área experimental. Foram realizadas também medições biométricas e de biomassa no intervalo de duas a seis semanas e de rendimento ao final do ciclo (aproximadamente 13 meses) com a finalidade de se determinar os índices morfofisiológicos.

O experimento foi conduzido entre os meses de Junho de 2007 a Junho de 2008, somados 389 dias, incluindo as quatro fases fenológicas da cultura, a saber: brotação e estabelecimento (fase I), perfilhamento (fase II), crescimento máximo dos colmos (fase III) e maturação (fase IV). O período e duração das fases da cultura podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Período e duração de cada fase do crescimento da cana-de-açúcar irrigada (cultivar RB-92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale São Francisco (SILVA, 2009)

Fase Fenológica		Período	DAC	Duração
I-	Brotação e estabelecimento	25/08/2007 a 27/06/2007	0 a 30	30
II-	Perfilhamento	28/06/2007 a 14/09/2007	31 a 109	79
III-	Crescimento máximo dos colmos	15/09/2007 a 10/05/2008	110 a 347	238
IV-	Maturação	11/05/2008 a 20/06/2008	348 a 389	42
Ciclo		28/05/2007 a 20/06/2008	0 a 389	389

DAC: Dias após o corte

A área experimental foi subdividida em três subáreas de amostragem, representativas do talhão experimental (Figura 3). Estas subáreas experimentais tinham as seguintes dimensões, 30 m x 30 m (900 m²).



Figura 2. Região Nordeste com destaque para o município de Juazeiro, situado no norte do Estado da Bahia

Fonte: IBGE(2007)



Figura 3. Subárea experimental em Juazeiro (norte da Bahia), região semi-árida

Fonte: SILVA (2009)

2.1.2. Material genético

A cultivar de cana-de-açúcar RB-92579, utilizada no contexto atual foi desenvolvida pelo Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, através do Programa de Melhoramento Genético da cana-de-açúcar (PMGCA). Essa nova cultivar foi desenvolvida em 1992 e liberada somente em 2003 para o plantio comercial. É caracterizada por apresentar baixo índice de florescimento, assunto que, atualmente, mais preocupa os plantadores de cana-de-açúcar do Estado, pois, devido ao florescimento a cultura reduz muito o seu teor de sacarose.

Além do baixo índice de florescimento, essa cultivar apresenta alta produtividade agrícola, pelo alto teor de sacarose e por apresentar fechamento das entrelinhas (um maior volume de cana-de-açúcar por metro, proporcionando assim, uma diminuição de plantas invasoras e conseqüentemente, menor uso de herbicidas). Além disso, a RB-92579 é bastante resistente a pragas como a cigarrinha da folha, já que uma de suas características é que as folhas são rentes ao colmo e por isso a cigarrinha que só ataca as folhas velhas, praticamente não causa danos econômicos à planta. Outra vantagem desta nova cultivar é a sua fácil adaptação em todos os tipos de relevo e clima. (COOPERATIVA PINDORAMA, 2004).

2.1.3 Características do clima da área de estudo

O município de Juazeiro, norte da Bahia possui clima semi-árido, situado na região submédica da bacia do rio São Francisco. É caracterizado por apresentar baixos índices pluviométricos, baixa e temperaturas elevadas, fazendo com que os cultivos agrícolas desta região sejam irrigados devido às águas do rio São Francisco.

As médias diárias das seguintes variáveis meteorológicas (Temperatura máxima, T_{max} ; Temperatura mínima, $T_{mín}$; Radiação solar global, R_g ; Velocidade do Vento, u ; Precipitação, P e irrigação, I) são apresentadas na Figura 4, no período do ciclo da cultura (2007/2008). Os valores de T_{min} variaram entre 18 e 25 °C; Enquanto os valores de T_{max} variaram entre 24 e 37 °C para o mesmo período (Figura 4.a). O maior valor de R_g , em torno de 28 MJ m⁻² dia⁻¹ ocorre no mês de Dezembro/2007 e o menor valor, 8 MJ m⁻² dia⁻¹

ocorre em Março/2008 (Figura 4.b). Os valores de velocidade do vento para o ciclo da cultura pode ser observado na Figura 4 c. Os eventos de P são muito baixos quando ocorrem, havendo desta forma, a necessidade de ser complementada pela irrigação. O valor de P acumulado para o ciclo da cultura foi de 587 mm, havendo a necessidade de um complemento de 2515 mm de Irrigação distribuído ao longo do ciclo da cultura (Figura 4 d). A eficiência de irrigação considerada no presente trabalho foi 1.

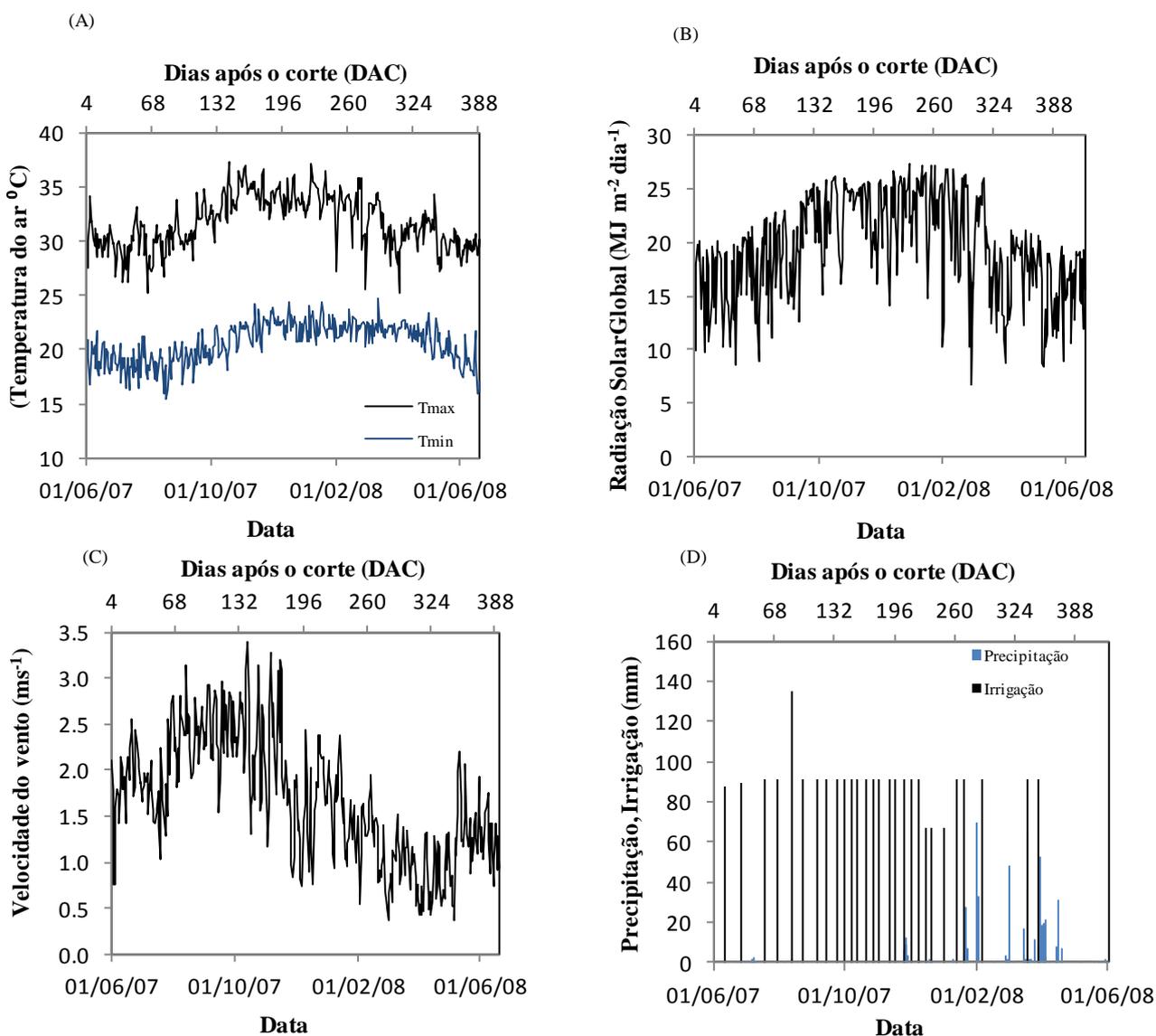


Figura 4. Valores médios diários de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação e irrigação para o período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, sob as condições do Submédio do vale são Francisco

2.2. Dados de solo

O solo da área experimental é classificado como Vertissolo, sendo caracterizado pela constituição de material mineral, horizonte vértico, pequena variação textural ao longo do perfil, baixa velocidade de infiltração de água e características de mudanças abruptas entre contração e fendilhamento, nos períodos entre eventos de irrigação (AMARAL et al., 2007). A baixa drenabilidade, em muitos casos, dependendo do manejo adotado pode conduzir à salinização e/ou sodificação. Os Vertissolos comuns na região Nordeste possuem valores elevadíssimos de saturação por bases, mas nem por isso são ideais, pois possuem más propriedades físicas e quando são salinos e sódicos são mais limitantes ainda (AMARAL et al., 2007). Logo, o correto manejo do Vertissolo é muito importante. Na Tabela 2, são apresentadas as características físico-hídricas e químicas do solo da área experimental.

Tabela 2. Características físico-hídricas e químicas do Vertissolo da área experimental da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB-92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco

Características	Unidades	Profundidades						Média
		5	10	20	30	50	90	
Argila	%	46,84	49,14	50,52	48,21	44,94	53,18	48,80
Silte	%	21,31	17,64	15,26	17,53	22,38	17,44	18,59
Areia fina	%	10,91	10,46	11,09	11,09	11,23	10,81	10,93
Areia grossa	%	20,93	22,76	23,13	23,17	21,45	18,58	21,67
Areia total	%	31,84	33,22	34,22	34,25	32,68	29,39	32,60
d_a	$g\ cm^{-3}$	1,33	1,36	1,37	1,39	1,38	1,37	1,37
d_s	$g\ cm^{-3}$	2,40	3,26	2,43	2,45	2,44	2,44	2,57
SAT	$cm^3\ cm^{-3}$	0,51	0,52	0,46	0,48	0,45	0,48	0,48
CC	$cm^3\ cm^{-3}$	0,48	0,49	0,43	0,45	0,42	0,44	0,45
PM	$cm^3\ cm^{-3}$	0,35	0,30	0,28	0,27	0,26	0,30	0,29
M.O.	g/kg	28,62	17,31	8,14	5,89	4,93	4,31	11,53
pH	-	8,53	8,77	8,83	8,90	9,00	8,97	8,83
C.E.	dS/m	2,31	0,96	1,02	0,97	0,74	0,88	1,15
P	mg/dm^3	2,00	1,33	1,00	1,00	1,00	1,67	1,33
K	$cmolc/dm^3$	2,22	2,57	0,55	0,42	0,28	0,17	1,04
Ca	$cmolc/dm^3$	29,53	31,03	33,20	34,13	35,83	37,43	33,53
Mg	$cmolc/dm^3$	4,30	3,10	3,30	3,47	2,47	2,43	3,18
Na	$cmolc/dm^3$	1,34	0,88	0,83	0,83	0,84	0,93	0,94
Al	$cmolc/dm^3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al	$cmolc/dm^3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S (bases)	$cmolc/dm^3$	37,39	37,58	37,88	38,85	39,42	40,97	38,68
CTC	$cmolc/dm^3$	37,39	37,58	37,88	38,85	39,42	40,97	38,68

Obs.: d_a = densidade aparente, d_s = densidade do solo, CC = capacidade de campo, PMP = ponto de murcha permanente.

Fonte: SILVA (2009)

A técnica de determinação de umidade do solo através de potenciais matriciais (Tabela 2) possui algumas limitações, o que implica na necessidade de avaliar esses valores de umidades obtidos em campo (capacidade de campo e ponto de murcha permanente), através de metodologias de estimativa, visto a importância da dinâmica da água no solo, influenciando diretamente a produtividade das culturas. Esta foi a motivação para a estimativa realizada abaixo.

Foi utilizada uma função de pedotransferência desenvolvida por Barros (2010) para os solos do Nordeste. O objetivo dessa função é obter os parâmetros (α , n , θ_r e θ_s) do modelo de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980) utilizado para descrever as curvas de retenção de água no solo. Foi utilizada a função de Pedotransferência desenvolvida para o solo da classe Argissolo que mais se assemelha ao solo da área experimental, o Vertissolo. Os dados de entrada requeridos para a obtenção desses parâmetros foram: densidade do solo, teor de matéria orgânica e teor de areia, silte e argila ao longo do perfil do solo (Tabela 2). Seguem abaixo os parâmetros do modelo de Van Genuchten (Tabela 3), a equação de van Genuchten (Equação 1) e a Equação 2 (MUALEM, 1976) para a realização de tal estimativa.

Tabela 3. Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para a classe Argissolo utilizados para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo

		<i>Parâmetros de Van Genuchten (1980)</i>			
		Log (α) α em cm^{-1}	n -	θ_r $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	θ_s $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Variável					
independente	Coefficientes	x1	x2	x3	x4
Intercepto	b0	1,0738	1,2928	-0,098864	1
Areia	b1	1,14739	0,6770	0	0
Silte	b2	0	0	0,163228	0
Argila	b3	-0,87655	0	0,491560	0
Matéria orgânica	b4	0	-10,6304	0	0
Densidade do solo	b5	-0,0017960	0	0,000046497	-0,00037*

*-0,00037= 1/2700

Fonte: (BARROS, 2010)

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \alpha \cdot \psi^n\right]^m} \quad (1)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

Em que θ é a umidade volumétrica, ψ_m o potencial matricial; θ_r e θ_s a umidade volumétrica residual e na saturação, respectivamente e n e α os parâmetros de ajuste. O parâmetro θ_{CC} (umidade na capacidade de campo) foi obtido considerando-se a umidade correspondente à inflexão da curva característica (FERREIRA & MARCOS, 1983).

Os valores de umidade do solo (capacidade de campo e ponto de murcha permanente) calculados pela regressão paramétrica foram contrastados com os valores de umidade obtidos experimentalmente por potenciais matriciais, como apresentados na Tabela 4. Após a comparação desses valores, optou-se por adotar no contexto atual os teores de umidade (ponto de murcha permanente e capacidade de campo) resultantes da metodologia de regressão paramétrica. Esta decisão foi tomada, visto as limitações presentes na determinação de umidade por potencial matricial que não permite conhecer o comportamento da curva de retenção inteira, além das fontes de erros devido às interpolações e ajustes utilizados nessa curva (BARROS, 2010).

Tabela 4. Teores de umidade do Vertissolo obtido na área experimental por potencial matricial e utilizando a metodologia de van Genuchten

Características	Unidades	Profundidades						Média
		5	10	20	30	50	90	
CC- experimento	cm ³ cm ⁻³	0,48	0,49	0,43	0,45	0,42	0,44	0,45
CC- van Genuchten	cm ³ cm ⁻³	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,48	0,48
PMP- experimento	cm ³ cm ⁻³	0,35	0,36	0,33	0,34	0,32	0,33	0,34
PMP- van Genuchten	cm ³ cm ⁻³	0,35	0,30	0,28	0,27	0,26	0,30	0,29

2.3. Modelo DSSAT/CANEGRO

Os parâmetros do modelo DSSAT/CANEGRO são subdivididos em: ecótipos com 31 parâmetros, cultivares com 20 parâmetros (Tabela 5) e espécies com 23 parâmetros. No presente trabalho, os parâmetros, relacionados à cultivar (principalmente à partição de biomassa, dossel perfilhamento, folhas, fases de desenvolvimento e fenologia) foram ajustados.

Segundo Singels et al. (2008), o modelo DSSAT/CANEGRO possui as seguintes características: a simulação da emergência do perfilhamento primário se dá quando ocorre acúmulo de tempo térmico em um período específico a partir do plantio (TTPLNTEM) ou do corte (TTRATNEM); o início do crescimento dos colmos é simulado quando um tempo de exigência térmica (CHUPIBASE) é atingido. O TT_POPGROWTH simula o pico do perfilhamento que ocorre após certo período de tempo térmico acumulado. A Figura 5 mostra uma representação esquemática do DSSAT/CANEGRO dentro da versão 4.5 do DSSAT.

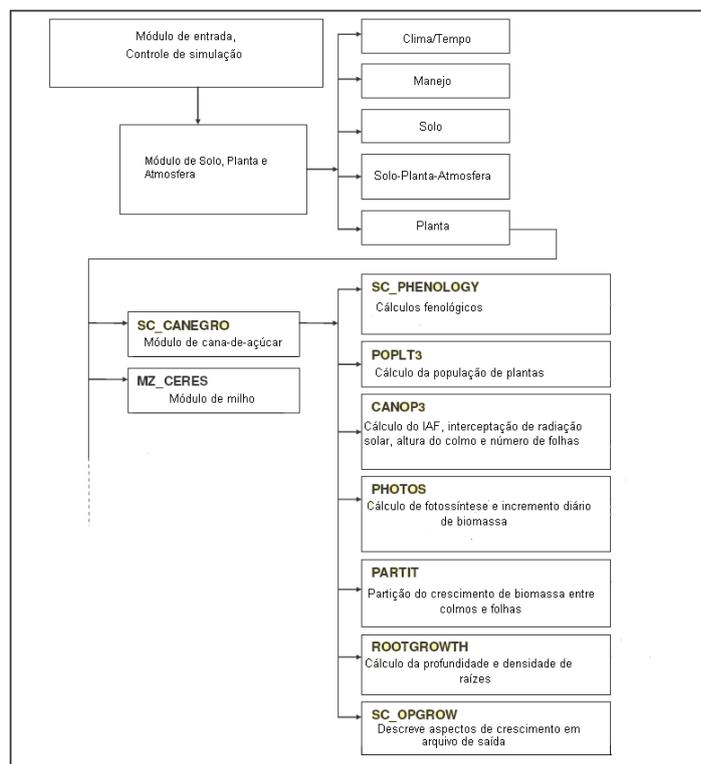


Figura 5. Diagrama esquemático do modelo DSSAT/CANEGRO

Fonte: (SINGELS et al., 2008)

Tabela 5. Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	UNIDADES
Parcemax	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração, por unidade de PAR	gMJ ⁻¹
Apfmx	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuída à massa seca da parte aérea	t t ⁻¹
Stkpfmax	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura	tt ⁻¹ base massa seca
Suca	Parâmetro de particionamento de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo	t t ⁻¹
Tbft	Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo	°C
Tthhalf	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento	°Cdia
Tbase	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel	°Cdia
Lfmax	Número máximo de folhas verdes saudáveis	Número de folhas
Mxlfarea	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o número de folhas MXLFARNO (cm ²)	cm ²
Mxlfarno	Número de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA (cm ²)	Número de folhas
PI1	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas abaixo do Pswitch)	°Cdia
PI2	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas acima do Pswitch)	°Cdia
Pswitch	Número de folhas em que há mudança no filocrono	Número de folhas
Ttplntem	Graus dias para emergência da cana-planta	°Cdia
Ttratnem	Graus dias para emergência da soqueira	°Cdia
Chupibase	Graus dias para o início do crescimento do colmo	°Cdia
Tt_Popgrowth	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento	°Cdia
Max_Pop	Máxima População de perfilhos	colmos m ⁻²
Poptt I6	População de colmos após 1600 °Cdia	colmos m ⁻²
Lg_Ambase	Massa fresca da parte aérea (colmo, folhas) onde ocorre o início do acamamento	t ha ⁻¹

Fonte: (SINGELS et al., 2008)

2.4. Calibração dos coeficientes genéticos do modelo DSSAT/CANEGRO

Os parâmetros de cultivar do modelo DSSAT/CANEGRO são relativos tanto à cana-planta quanto à cana-soca. No contexto atual, foram ajustados os

seguintes parâmetros relativos à cana-soca (Tabela 5): MaxParce, APFMX, STKPFMAX, SUCA, TBFT, Tthalf, TBase, LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO, PI1, PI2, PSWITCH, POPTT16, TTRATNEM, CHUPIBASE, TT_POPGROWTH, MAX_POP e LG_AMBASE. Esses ajustes foram feitos manualmente com base nas características apresentadas pela cultivar RB-92579 no experimento de campo que foi descrito anteriormente. Os parâmetros associados à fenologia e ao crescimento foram ajustados inicialmente (MAX_POP, TBase, LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO, PI1, PI2, PSWITCH, POPTT16, TTRATNEM, CHUPIBASE, TT_POPGROWTH). Posteriormente, foram ajustados da mesma forma os parâmetros referentes à produtividade e ao rendimento (MaxParce, APFMX, STKPFMAX, SUCA, TBFT, LG_AMBASE).

2.5. Avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO

A avaliação estatística do modelo DSSAT/CANEGRO tem o objetivo de determinar o grau de ajuste dos parâmetros estimados em relação às observações experimentais em campo e laboratório. Foram determinados os seguintes índices estatísticos: Eficiência de modelagem (EF); Índice de concordância (d), proposto por (Wilmott et al., 1985); Raiz quadrada do erro médio (RMSE); e Viés médio absoluto (MAE).

A EF avalia quanto o modelo melhorou em relação à média dos valores observados. O EF varia de $-\infty$ a 1, $-\infty$ indica que as previsões do modelo são piores do que a média observada. Por esta estatística, um ajuste perfeito resulta em EF igual a 1. Este índice é um bom indicador da qualidade de ajuste (MAYER e BUTLER, 1993). O índice d avalia a exatidão do modelo, indicando o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos valores observados. Varia de 0, pior desempenho ou desempenho nulo a 1, desempenho perfeito. A raiz quadrada do erro médio é uma estatística muito usada para comparar modelos. Quanto menor for o RMSE melhor é a capacidade do modelo em fazer previsões. O MAE é uma estatística usada para avaliar a precisão do modelo. Seu cálculo é baseado na diferença entre os valores observados e as simulações feitas pelo modelo. Este índice é dado em módulo e quanto menor o seu valor, maior será precisão do modelo.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - O| + |Y_i - O|)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}}{n} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (6)$$

Onde Y_i é o valor observado experimentalmente; \hat{Y}_i é o valor estimado pelo modelo; O é a média do valor observado e n é o número de dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO

Na Tabela 6 é possível observar a calibração dos coeficientes genéticos para a cultivar RB-92579 e compará-la com a cultivar padrão, NCo-376.

O resultado do parâmetro STKPFMAX indicou que, para a cultivar RB-92579, a fração de incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo é superior ao da variedade padrão, NCo-376. A quantidade de graus dias para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento (T_{thalf}) é maior para a variedade RB-92579 quando comparada com a variedade padrão. O resultado do parâmetro LFMAX indica que a variedade

padrão atinge um maior número máximo de folhas verdes saudáveis quando comparado com a variedade brasileira, RB-92579. O resultado apresentado para o parâmetro MXLFAREA indica que a cultivar RB-92579 apresentou área foliar máxima bem superior, mais que o dobro da área foliar da cultivar africana NCo-376, em cm². O número de folhas limitado pelo MXLFAREA (MXLFARNO) é maior para a variedade RB-92579 em comparação com a variedade padrão, NCo 376. O PI1 em graus dias foi bem superior para a variedade RB-92579, em comparação com a variedade NCo-376, em contrapartida, o PI2 foi menor para a variedade RB-92579 em comparação com a variedade padrão. Foi necessário muito mais graus dias para a emergência da soqueira (TTRATNEM) para a variedade RB- 92579 em comparação com a variedade NCo-376. Essas diferenças apresentadas por essas duas variedades ressaltam a importância do ajuste do modelo CANEGRO, de acordo com as condições de solo e clima da região de estudo.

Tabela 6. Parâmetros do modelo DSSAT/CANEGRO para a cultivar padrão, NCo 376 e para a RB-92579

PARÂMETROS	NCo 376	RB-92579	UNIDADES
Parcemax	9,90	10,80	gMJ ⁻¹
Apfmx	0,88	0,92	t t ⁻¹
Stkpfmax	0,65	0,88	tt ⁻¹ base massa seca
Suca	0,58	0,57	t t ⁻¹
Tbft	25	25	°C
Tthhalfo	250	286	°Cdia
Tbase	16	14	°Cdia
Lfmax	12	08	Número de folhas
Mxlfarea	360	796	cm ²
Mxlfarno	15	22	Número de folhas
PI1	69	109	°Cdia
PI2	169	117	°Cdia
Pswitch	18	22	Número de folhas
Ttplntem	428	428	°Cdia
Ttratnem	203	620	°Cdia
Chupibase	1050	1050	°Cdia
Tt_Popgrowth	600	628	°Cdia
Max_Pop	30	28	colmos m ⁻²
Poptt I6	13,3	12	colmos m ⁻²
Lg_Ambase	220	220	t ha ⁻¹

3.1.1. Variáveis de crescimento

Foram realizados dois tipos de monitoramento, um em campo e outro em laboratório. O número de folhas verdes por colmo (NFV) que pode ser observado na Figura 6 foi medido em campo. Foram consideradas como folhas verdes aquelas com pelo menos 50% de área foliar verde. O número de folhas verdes variou entre 6 e 8 folhas por colmo, apresentando redução ao final do ciclo. Isso ocorreu devido à diminuição da emissão de folhas pelas plantas e devido ao aumento da taxa de mortalidade. Foram calculados os seguintes índices estatísticos para determinar o grau de ajuste dos parâmetros estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO em relação às observações experimentais: eficiência de modelagem, índice de concordância de Wilmott, raiz quadrada do erro médio e viés médio absoluto. O baixo valor do índice eficiência de modelagem indicou que a estimativa feita pelo modelo para esta variável foi pior que a média dos dados observados. O baixo valor do índice de concordância d indicou que houve afastamento dos valores estimados em relação aos valores observados. A raiz quadrada do erro médio apresentou valor elevado, indicando uma possível limitação do modelo em fazer previsões para a variável em questão. O valor do viés médio absoluto indicou uma baixa precisão do modelo para a variável número de folhas. Essa mesma limitação na estimativa desta variável foi observada por outros pesquisadores trabalhando com outras cultivares utilizando o modelo DSSAT/CANEGRO (NASSIF, 2010; MARIN et al., 2011). A análise das observações indica que pode ter ocorrido erros na medição desses dados em campo, o que dificultou a estimativa desta variável pelo modelo.

Na Figura 7 é mostrado o índice de área foliar (IAF) em função dos dias após o corte (DAC)**. O IAF que foi obtido por meio de um integrador de área foliar (LAI 2000, LI-COR Inc., Lincoln, NE) variou de 1,07 m² m⁻² aos 108 DAC a 5,55 m² m⁻² aos 332 DAC. modelo representou com exatidão o índice de área foliar máximo, no entanto subestimou esta variável na maior parte do período analisado. A EF foi de 0,71, indicando que a estimativa do modelo foi razoavelmente melhor que a média dos dados observados. Essa mesma limitação na simulação do IAF foi observada por outro pesquisador, havendo a necessidade de mais estudos (MARIN et al., 2009). Os valores de RMSE e

MAE indicaram uma boa capacidade do modelo em fazer previsão para a variável em questão e a precisão do modelo, respectivamente.

(DAC)** é definido como o número de dias após o corte da cana-planta que passa a ser referência para o ciclo da primeira soca.

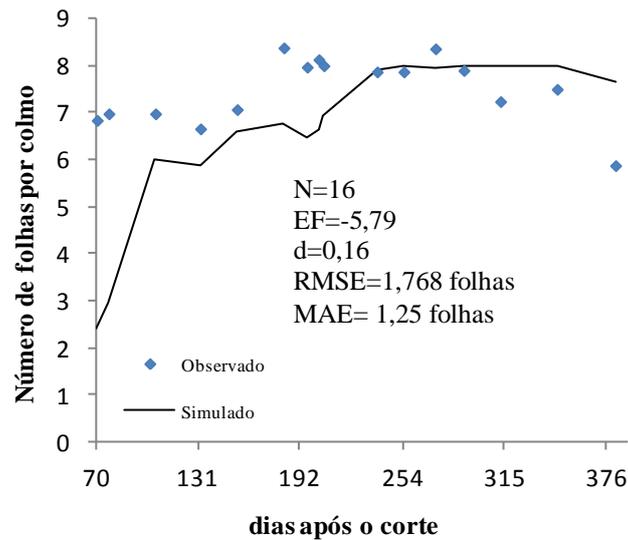


Figura 6. Variação do número de folhas por colmo observado e simulado ao longo do ciclo da cultura, em dias após o corte

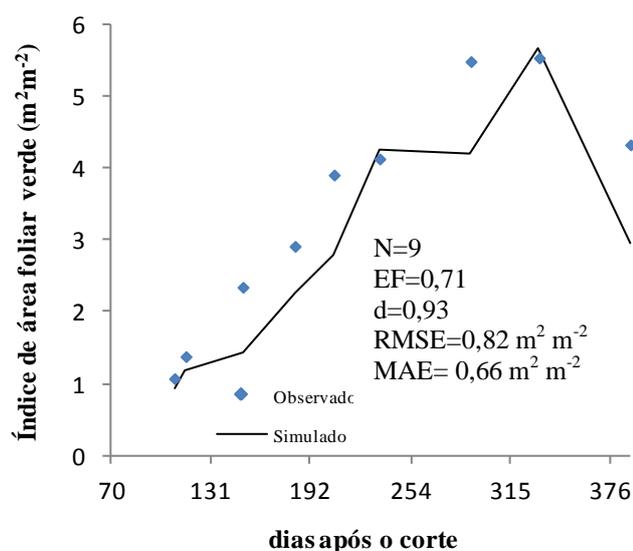


Figura 7. Variação do Índice de área foliar verde ($m^2 m^{-2}$) observado e simulado ao longo do ciclo da cultura, em dias após o corte

A parametrização do perfilhamento da cultivar RB-92579 de cana-de-açúcar pode ser observado na Figura 8. A estimativa feita pelo modelo DSSAT/CANEGRO apresentou elevado grau de ajuste aos dados observados, o que pode ser comprovado através dos altos valores para os índices estatísticos EF e d e baixos valores para os índices RMSE e MAE. O perfilhamento máximo (perfilhos m^2) observado no campo foi de 26,5. Segundo Castro (2001), o perfilhamento da cana-de-açúcar pode ocorrer até o quarto mês do seu ciclo produtivo, sendo influenciado pela temperatura do ar, umidade do solo, cultivar e ciclo da cultura. Verificou-se que o perfilhamento da cana-soca aumentou, atingindo um máximo em torno de 115 DAC, decrescendo posteriormente até se estabilizar (312 DAC). O perfilhamento assume papel importante no processo produtivo da cana-de-açúcar. Uma boa parametrização da variável perfilhamento também foi observada para as cultivares de cana-de-açúcar CTC 4, CTC 7 e CTC 20 (NASSIF, 2010).

Na Figura 9 é apresentada a altura dos colmos da cana-de-açúcar irrigada que se inicia a partir dos 70 DAC. O valor máximo observado no campo foi 4,5 m. A parametrização desta variável apresentou altos valores para os índices estatísticos EF e d e baixos valores de RMSE e MAE. Altos índices estatísticos e boa correlação entre os dados observados e estimados para esta variável, após a parametrização também foi observada para as variedades de cana-de-açúcar CTC 7 e CTC 20 (NASSIF, 2010). O conhecimento e entendimento do comportamento do crescimento dos colmos são de grande importância, uma vez que apresenta correlação positiva com a produtividade esperada (BARBOSA et al., 2002; MIOCQUE et al., 1999).

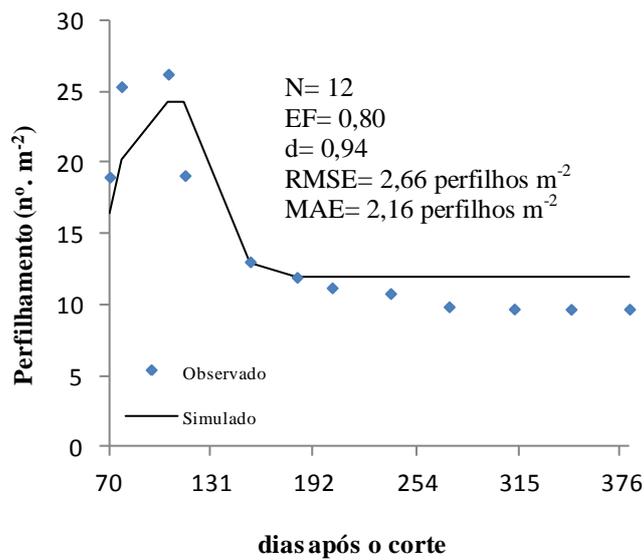


Figura 8. Duração da fase de perfilamento (nº m²) observado e simulado ao longo do ciclo da cultura

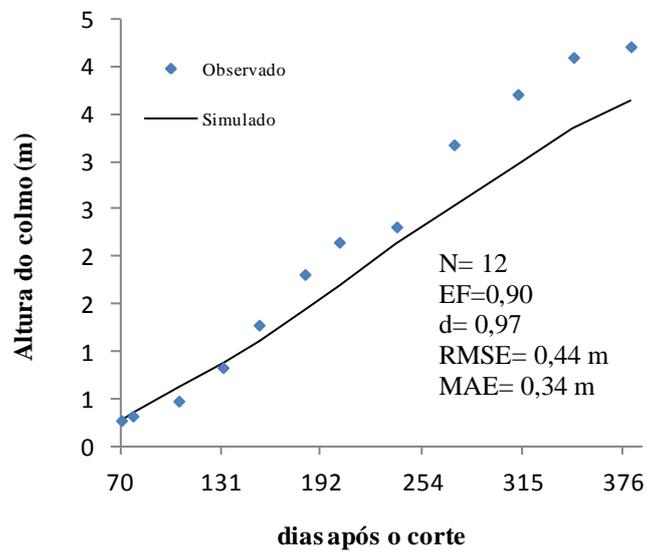


Figura 9. Altura do colmo (m) observada e simulada ao longo do ciclo da cultura

3.1.2 Variáveis de produção e rendimento

A parametrização da biomassa seca aérea e da biomassa seca do colmo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar pode ser observada na Figura 10 (a e b, respectivamente). A biomassa seca aérea é representada pelo somatório da biomassa dos colmos, pseudocolmo, da parte foliar e bainhas, desconsiderando a parte radicular. A biomassa seca aérea atingiu o valor máximo de 66 t ha⁻¹ na colheita. A parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO para esta variável resultou em elevados índices estatísticos (EF e d), indicando elevado grau de ajuste desta variável em relação aos dados observados no campo.

A maior partição de biomassa foi destinada aos colmos (Figura 10.b). O valor máximo da biomassa seca dos colmos observado em campo foi de aproximadamente 50 t ha⁻¹. O modelo DSSAT/CANEGRO também apresentou elevados valores para os índices estatísticos EF e d e baixos valores para os índices RMSE e MAE o que indicou elevado grau de ajuste. O índice d e EF determinados aqui foram superiores aos obtidos por Nassif (2010) para a variedade RB-86-7515 (d= 0,66) e por Marin (2011) para a variedade RB 72-454 (EF= 0,72), respectivamente.

A biomassa seca total da parte aérea subtraída da biomassa seca dos colmos é conhecida como palhada que consiste nas demais partes da planta. Essa palhada pode ser incorporada ao solo como matéria orgânica ou utilizada em termoelétricas para a produção de energia (OLIVEIRA et al., 2008).

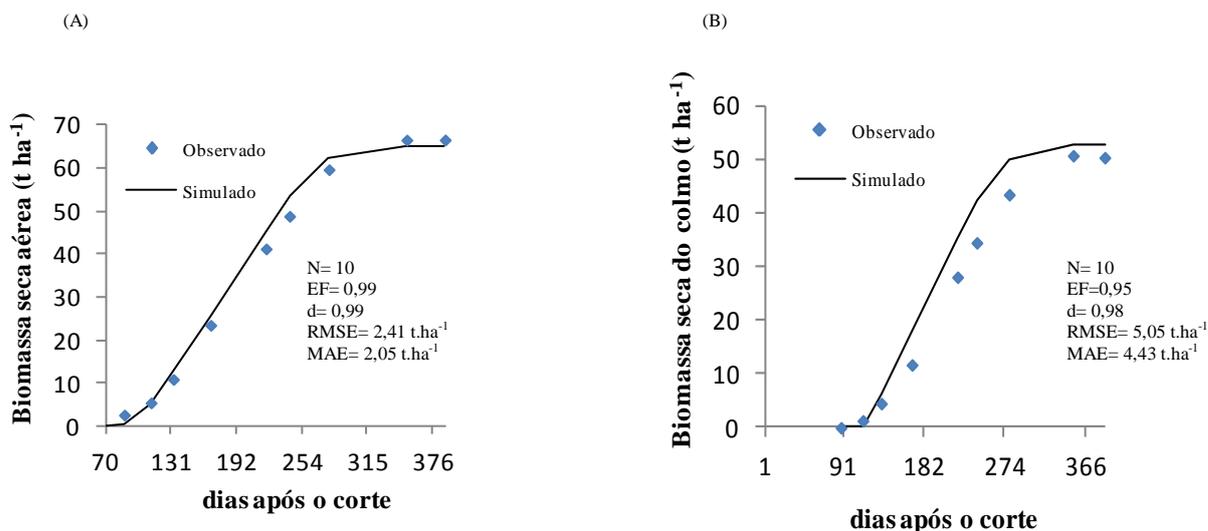


Figura 10. Biomassa seca aérea e biomassa seca do colmo ($t\ ha^{-1}$) observada e simulada ao longo do ciclo da cultura, em dias após o corte

Foi observado um rendimento bruto de açúcar (massa seca de sacarose) de $20,89\ t\ ha^{-1}$. (Tabela 7). O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou um pequeno incremento na simulação do rendimento bruto de açúcar quando comparado com o valor observado em laboratório. A superestimativa desta variável ocorre provavelmente devido ao acúmulo de erros na estimativa de variáveis como a biomassa seca aérea e biomassa seca do colmo.

Tabela 7. Massa seca de sacarose observada em laboratório na colheita e simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO ($t\ ha^{-1}$)

Teor de sacarose observado em laboratório ($t\ ha^{-1}$)	Teor de sacarose simulado pelo DSSAT/CANEGRO ($t\ ha^{-1}$)
20,89	22,73

4. CONCLUSÕES

O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou um bom desempenho para a estimativa das variáveis de crescimento, como índice de área foliar, perfilhamento e altura do colmo. Isto pode ser comprovado através dos elevados valores dos índices estatísticos (EF e d) e os baixos valores para os índices RMSE e MAE. O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou o pior desempenho na estimativa do número de folhas (EF= -5,79). Esta baixa eficiência de modelagem pode ser consequência de erros na medição dos dados experimentais em campo e consequentemente uma dificuldade do modelo em ser ajustado. As variáveis de produtividade, biomassa seca aérea e biomassa seca do colmo apresentaram elevado grau de ajuste o que pode ser evidenciado através dos altos valores de EF (0,99 e 0,95, respectivamente) e d (0,99 e 0,98) e dos baixos valores para RMSE (2,41 e 5,05, respectivamente) e MAE (2,05 e 4,43, respectivamente). O modelo DSSAT/CANEGRO superestimou a massa seca de sacarose em 9%. Apesar de apresentar algumas limitações, o modelo DSSAT/CANEGRO foi bem ajustado para a cultivar RB-92579 irrigada no município de Juazeiro, região semi-árida do Nordeste brasileiro.

CAPÍTULO 2. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR COM BASE NO MODELO DSSAT/CANEGRO

1. INTRODUÇÃO

As perspectivas de mudanças climáticas globais futuras têm incentivado os estudos do impacto dessas possíveis alterações do clima na produtividade de várias culturas agrícolas. Sabe-se que a agricultura é altamente dependente das condições ambientais, especialmente das climáticas, como temperatura e precipitação (MORAES et al., 2011). A cana-de-açúcar possui indiscutível importância econômica para o setor açucareiro e matriz energética brasileira, e certamente é importante avaliar o impacto das possíveis alterações climáticas na sua produtividade e rendimento. Neste contexto, os modelos agrometeorológicos e climáticos são ferramentas importantes, além dos cenários climáticos.

Um estudo preliminar foi feito em Swazilândia para avaliar o impacto espacial e temporal da mudança do clima sobre o requerimento de água na produtividade da cana-de-açúcar em cenário presente (1980-1997), e futuro (2050) com base no modelo HadCM3. Para isto utilizou o modelo DSSAT/CANEGRO pertencente à plataforma DSSAT. Os resultados demonstraram que para produzir uma unidade de peso de sacarose equivalente para níveis ótimos de produção do presente, foi necessário um aumento de 20-22% da irrigação futura. Ainda, com a fertilização de CO₂ devido ao aumento da queima dos combustíveis fosseis, a produtividade da cana-de-açúcar aumentará, sendo previsto também um aumento de 9% no requerimento da água de irrigação. Esse estudo mostrou que com a mudança climática, a capacidade máxima atual de irrigação existente poderia deixar de atender aos aumentos previstos em cenários futuros (KNOX et al., 2009).

No Brasil, na maior parte dos casos, estes trabalhos têm sido realizados para o Estado de São Paulo. Segundo MARIN et al. (2009), em cenários futuros para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, projeções regionalizadas de mudanças climáticas em cenários mais pessimistas de clima apresentam elevação na produtividade média com ganho de até 6% de produção total para 2040. Enquanto para o cenário otimista o efeito sobre a

produção de cana-de-açúcar seria menor. O cenário A2 descreve um mundo heterogêneo, com crescimento populacional elevado, crescimento econômico, mudança tecnológica mais lenta e altas emissões de CO₂, podendo chegar até 836 ppm no fim do século. As projeções indicam um aumento provável de temperatura média global de 4°C para o fim do século XXI, podendo variar entre 2,4 °C e 6,4 °C (IPCC 2007 a). Enquanto o cenário B2, mais otimista é caracterizado por um mundo baseado em soluções locais aos problemas globais, com crescimento populacional moderado, existindo níveis intermediários para o desenvolvimento econômico e uma mudança tecnológica mais diversa. Neste cenário, as emissões de CO₂ seriam mais baixas, podendo atingir 611 ppm até o fim do século. As projeções indicam um aumento entre 3 e 5 °C na temperatura média global até o fim do século (IPCC, 2007 a).

A melhoria na tecnologia de irrigação tem contribuído para o avanço da produção de cana-de-açúcar até mesmo na região semi-árida do Nordeste brasileiro. Isto tem contribuído atualmente para o desenvolvimento sócio-econômico da região pela produção de açúcar e álcool e com maior emprego de mão-de-obra. Não se observa interferência deste cultivo na produção de culturas de subsistência na região de Juazeiro, Bahia, uma vez que estas culturas são cultivadas na maior parte dos casos sob a condição de sequeiro. No entanto, deve-se considerar que com as mudanças climáticas e o favorecimento de condições para o crescimento e desenvolvimento de cana-de-açúcar, poderá haver um maior incentivo à produção de cana-de-açúcar na região, o que poderá comprometer à produção de culturas de subsistência local.

Estudos e pesquisas mostram que a região semi-árida do Nordeste brasileiro em cenário futuro de mudança climática poderá até mesmo se tornar árida (MARENGO, 2007). Tendo em vista este contexto, é importante quantificar a influência das possíveis alterações climáticas na produtividade da cana-de-açúcar desenvolvida nesta região semi-árida. Desta forma, objetiva-se avaliar o impacto das mudanças climáticas, utilizando séries climáticas obtidas a partir do modelo acoplado ECHAM5/MPI-OM na biomassa seca do colmo e na massa seca de sacarose da variedade de cana-de-açúcar RB-92579, em cenário atual e futuro de mudança climática A1B, com base no modelo DSSAT/CANEGRO.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, tendo como base as perspectivas de mudanças climáticas globais futuras, utilizaram-se séries do clima futuro com dados de temperatura, radiação solar, precipitação, umidade relativa e velocidade do vento. Vários centros de pesquisas têm gerado essas séries climáticas futuras que podem ser obtidas a partir de modelos globais ou regionais (IPCC, 2007).

A simulação da produtividade da cultivar RB-92579 de cana-de-açúcar em cenário futuro de mudança climática foi feita com base no arquivo sazonal criado no DSSAT/CANEGRO. Este arquivo contém informações referentes aos coeficientes genéticos calibrados de acordo com o Capítulo 1 do presente trabalho. Todas as condições de solo e experimento de campo são as mesmas mencionadas no Capítulo 1. Desta forma, avalia-se a influência da possível mudança do clima sobre a produtividade final e rendimento de sacarose da cultivar RB-92579 de cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia. Foram consideradas as séries climáticas futuras diárias de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, precipitação, umidade relativa e velocidade do vento. Essas séries foram obtidas a partir do modelo de circulação global ECHAM 5/MPI-OM (Tabela 1). As concentrações de CO₂ variaram anualmente de acordo com o previsto pelo cenário A1b do IPCC. É importante salientar que todas estas informações foram implementadas no DSSAT/ CANEGRO versão 4.5, incluindo o efeito da variação do CO₂ na produtividade.

2.1 Dados experimentais

2.1.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Juazeiro, Bahia, no Submédio do Vale São Francisco, região semi-árida do Nordeste brasileiro. As coordenadas geográficas do local de estudo são: 9°28' 07"S, 40°22' 43" O e elevação de 386,5 m (Figura 2 do capítulo 1).

2.2 Descrição do modelo ECHAM 5/MPI-OM

O modelo climático acoplado ECHAM5/MPI-OM (descrito na Tabela 1), considerado no contexto atual possui dois componentes, sendo um atmosférico e o outro oceânico, como documentado por JUNGCLAUS et al., (2006). Vem sendo utilizado no quarto relatório do IPCC para projeções em cenário futuro de mudança climática (IPCC, 2007 b). É caracterizado por possuir uma resolução horizontal de T63 e 31 níveis híbridos verticais com o topo do nível a 10 hPa. Apresenta uma resolução espacial de aproximadamente 180 x 180 Km. Este modelo considera uma série climática para o presente (1950-2000), sendo as concentrações dos gases de efeito estufa (GHG) e aerossóis especificadas em observações, enquanto para a série climática futura (2001-2100) são consideradas as características do cenário SRES A1b. O cenário A1b descreve um mundo de rápido crescimento econômico, baixo crescimento populacional e rápida introdução a novas e eficientes tecnologias. Este cenário projeta a descrição de um futuro sob a emissão dos principais gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O) e aerossóis. O cenário intermediário, A1b considera uma concentração de CO_2 de aproximadamente 700 ppmv (partes por milhão por volume) e um aumento de até 2,8 °C até o fim do século 21 (JUSTINO et al., 2009).

O uso de modelos climáticos envolve vários tipos de incertezas referentes às hipóteses sócio-econômicas, cenários de emissões, cálculos de concentração, dentre outras (GIORGI, 2005). No entanto são ferramentas importantes para avaliar o impacto dessas possíveis alterações do clima na produtividade das culturas agrícolas, em especial a cana-de-açúcar que tem uma importância sócio-econômica indiscutível.

Tabela 1. Resumo das características do modelo ECAHM5/MPI-OM

Pontos principais	Destaques
Instituição	Instituto Max Planck de Meteorologia (MPIM)
Local	Amburgo, Alemanha
Simulação	Modelo de Circulação Geral Atmosférica (MCGA)
Versão	Sexta geração
Inicialização	Reanálise do ECMWF/ERA40
Acoplado	Sim [ECHAM5M (atmosfera) e MPI-OM (oceano)]
Dióxido de carbono	A1B (IPCC 2000 e 2007)
Vulcanismo	Considerado
Registros gerados*	Pt ^(a) , Tm ^(b) , Tn ^(c) , Rg ^(d) , Wv ^(e)
Resolução	1,875° x 1,875° (~180 x 180 km na faixa equatorial)
Período simulado	150 anos (1950 a 2100)
Disponibilidade	Disponível em contrapartida científica
Cenários de concentração de CO ₂	A1B (pessimista) B2 (otimista)
Portal	http://www.mpimet.mpg.de/en/home.html
Custo operacional	Elevado
Sistema operacional	Unix e Linux
Grau de execução	Completo

Fonte: Amorim (2008)

2.3. Base de dados

As séries climáticas futuras, obtidas a partir do modelo ECHAM5/MPI-OM, compreendem ao período de 2011 a 2038. As produtividades das safras futuras foram comparadas com a produtividade da safra presente referente ao período de condução do experimento no campo, 2007-2008, também simulada com os dados meteorológicos do modelo ECHAM5/MPI-OM. O cenário A1b

prevê um pequeno aumento nos valores de temperatura mínima e máxima do ar até 2038 como pode ser observado na Figura 1 (a e b). Esse aumento de temperatura ocorre devido ao aumento anual nas concentrações de CO₂ que ocorre de acordo com o cenário A1b de projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007 b) (Figura 2).

Na Figura 3a pode ser observado o comportamento mensal do saldo de radiação solar acumulada, durante o período de cultivo da cana-de-açúcar conduzida no ciclo de cana-soca (2007-2008). Na Figura 3b observa-se valores radiação solar global média para a série climática futura (2011-2038).

Na Figura 4, observa-se os valores de precipitação acumulada por ciclo para o cultivo da variedade de cana-de-açúcar RB-92579, em condições atuais (2007-2008) e com base no cenário futuro de mudanças climáticas (2011-2037). Nota-se um aumento nos valores de precipitação para a maioria dos anos da série climática futura em comparação com o ciclo atual.

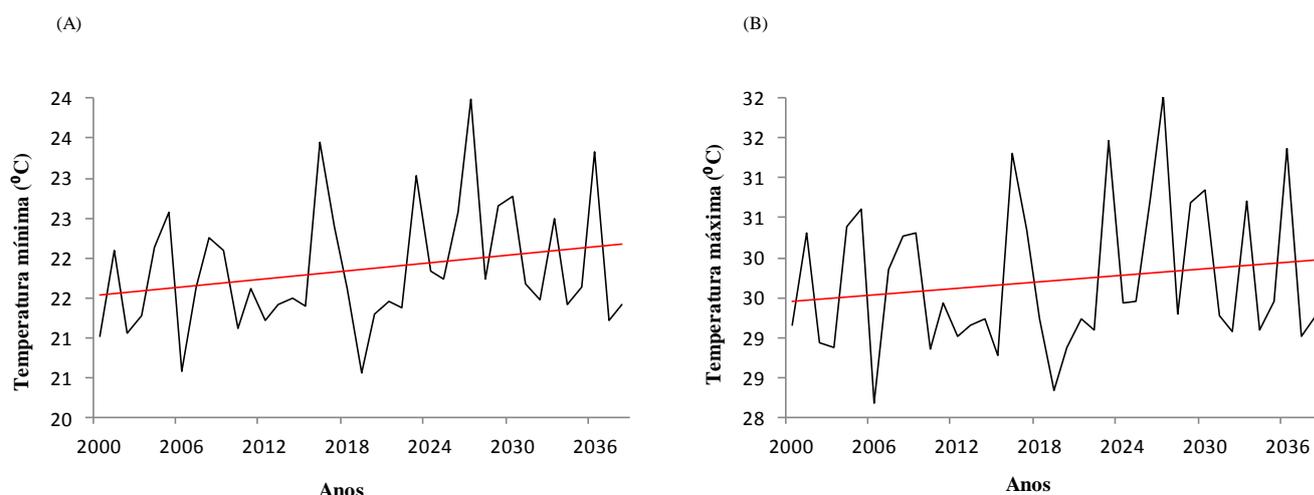


Figura 1. Variação da temperatura mínima e máxima do ar (°C) para o os anos de 2000 a 2038 (cenário A1B), obtida a partir do modelo ECHAM5/MPI-OM

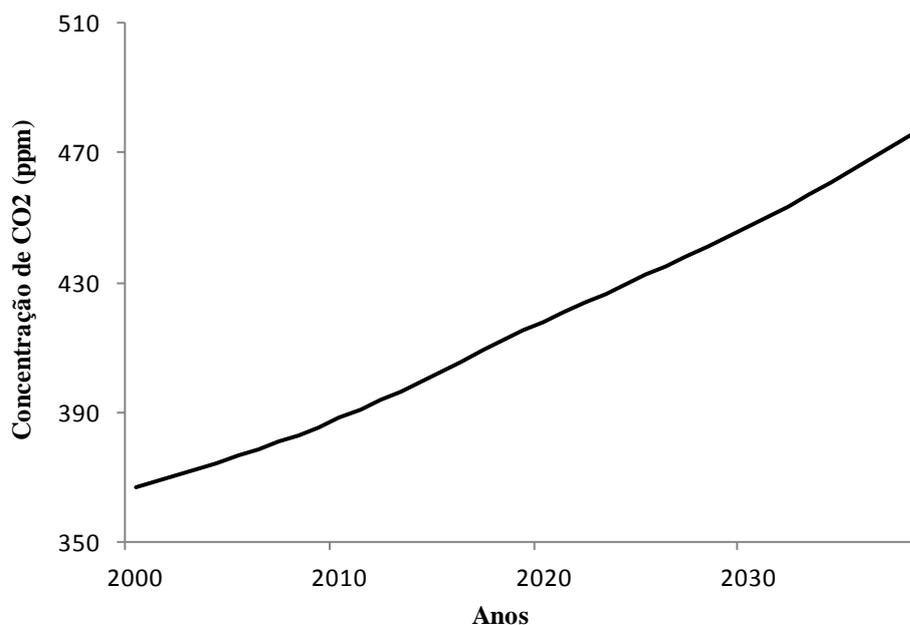


Figura 2. Aumento nas concentrações anuais de CO₂ (ppmv) para o período de 2000 a 2038 (cenário A1B), obtido a partir do modelo ECHAM5/MPI-OM

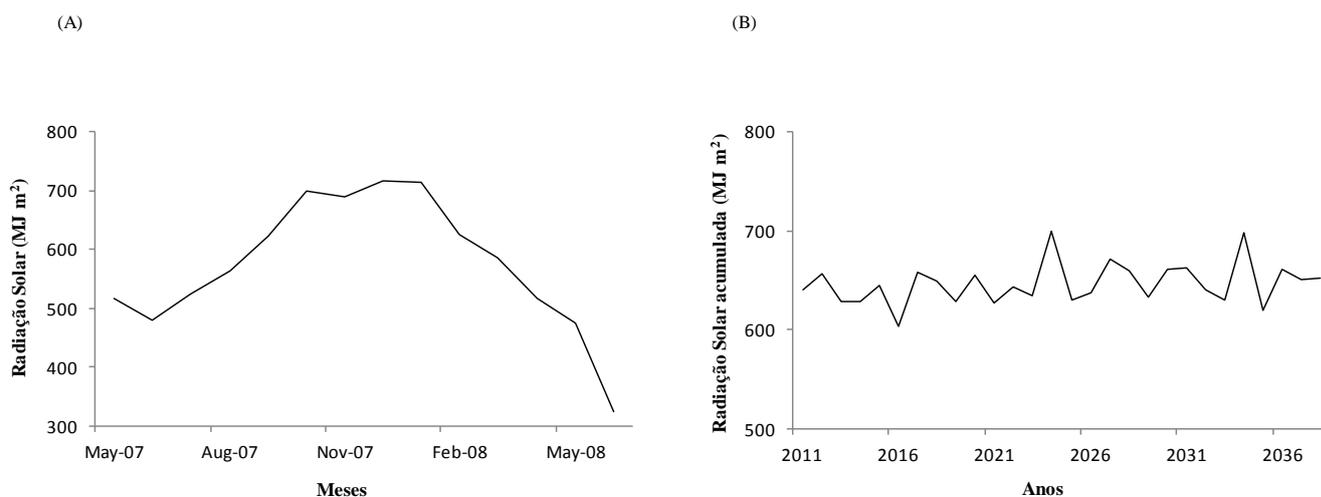


Figura 3. Variação da radiação solar para o ciclo da cana-de-açúcar conduzida na safra de 2007-2008 (a) e a média acumulada para as séries climáticas futuras para o período de 2011 a 2037 (b) obtida a partir do modelo ECHAM5/MPI-OM

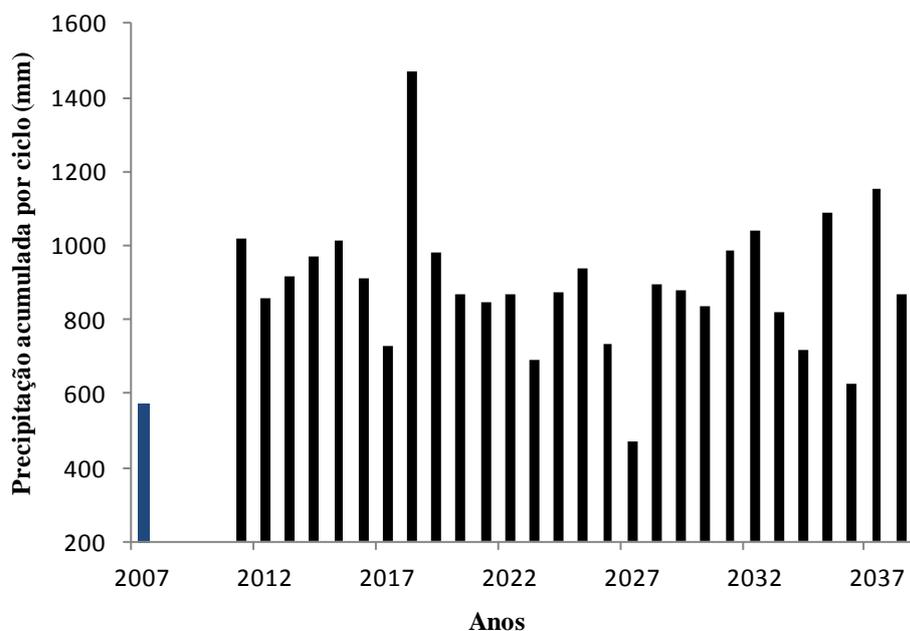


Figura 4. Precipitação acumulada (mm) para o ciclo atual (2007-2008) e futuro (2011-2037) obtida a partir do modelo ECHAM5/MPI-OM em Juazeiro, Bahia

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Comparação da simulação feita no DSSAT/CANEGRO utilizando dados meteorológicos observados com dados meteorológicos do modelo ECHAM 5/MPI-OM (2007-2008)

Para aplicação do modelo DSSAT/CANEGRO em cenário futuro de mudança climática, é necessário analisar a representatividade deste modelo para simulações no cenário atual utilizando dados meteorológicos do modelo climático global ECHAM5/MPI-OM. Para esta análise, foi feita uma comparação da simulação da variável de crescimento perfilhamento da variedade de cana-de-açúcar RB-92579 para a safra de 2007-2008 utilizando os dados meteorológicos observados na estação automática com os dados meteorológicos obtidos a partir do modelo climático global, o ECHAM5/MPI-OM (Figura 5). Observa-se que há uma correlação entre o número de perfilhos simulado utilizando os dados meteorológicos observados com número de perfilhos simulado utilizando os dados meteorológicos do ECHAM5/MPI-OM, apresentando R^2 de 0,9871.

Comparação semelhante foi feita para a simulação da variável biomassa seca do colmo utilizando os dados meteorológicos observados e os dados meteorológicos provenientes do modelo ECHAM5/MPI-OM (Figura 6). Essa comparação resultou num R^2 igual a 0,9845, indicando alta correlação entre a biomassa seca do colmo simulada utilizando dados meteorológicos observados com a simulação utilizando dados meteorológicos obtidos do modelo ECHAM5/MPI-OM. A partir desta correlação para a safra atual, pode-se fazer a simulação da produtividade e rendimento final para as séries climáticas futuras.

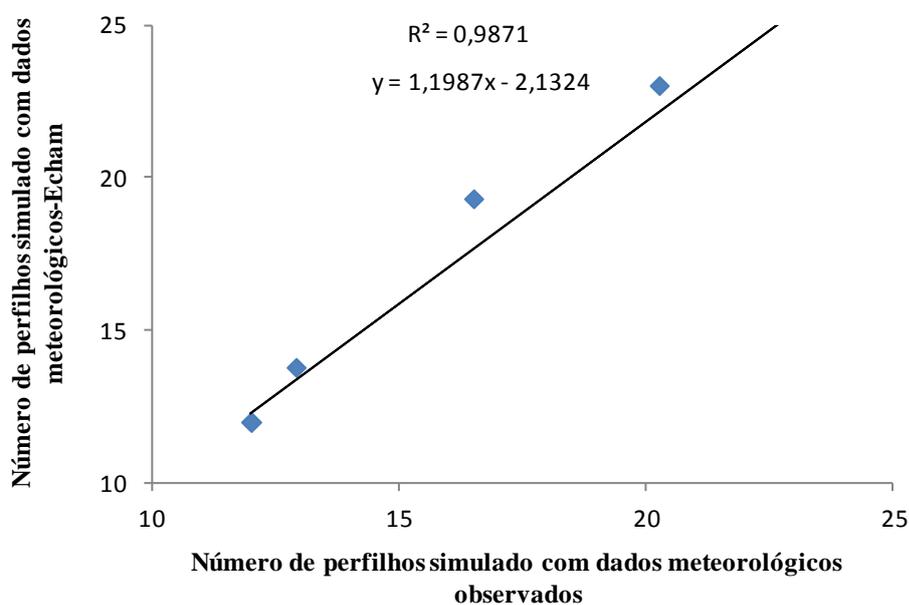


Figura 5. Comparação entre o número de perfilhos simulado com os dados meteorológicos observados com o número de perfilhos simulado os dados meteorológicos do modelo ECHAM5/MPI-OM

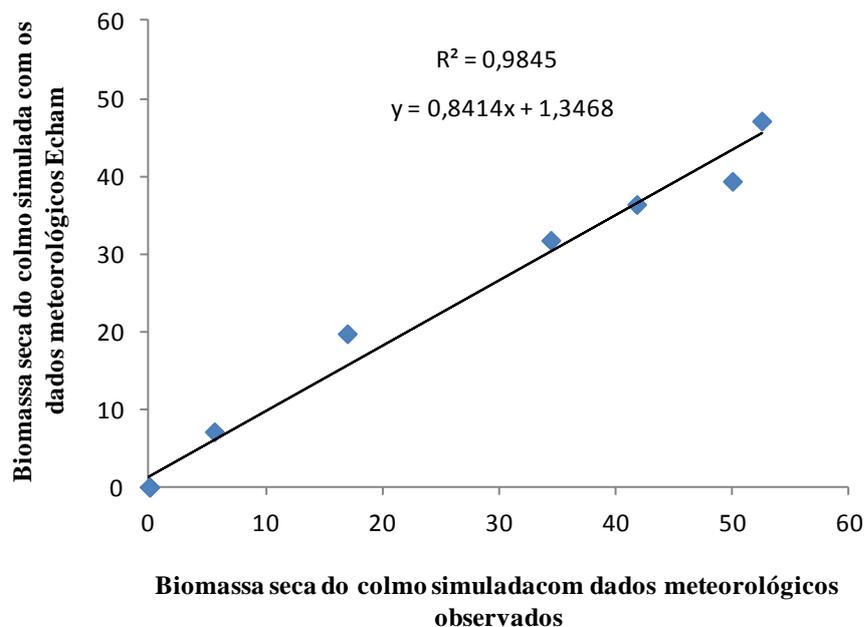


Figura 6. Comparação entre a biomassa seca do colmo simulada com os dados meteorológicos observados com a biomassa seca dos colmos simulada com os dados meteorológicos do modelo ECHAM5/MPI-OM

3.2. Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana-de-açúcar com base no modelo DSSAT/CANEGRO

As projeções da variabilidade da produtividade e rendimento de açúcar da cultivar RB-92579 de cana-de-açúcar são observadas nas Figuras 7 e 8. As séries climáticas para tal simulação foram obtidas a partir do modelo ECHAM5/MPI-OM, em cenário atual e futuro de mudança climática, A1b.

A simulação da biomassa seca do colmo (Figura 7) para a safra atual (2007-2008) apresentou um valor de 48,21 t ha⁻¹, cerca de 4% inferior à biomassa seca do colmo observada em experimento de campo. Em cenário futuro de mudança climática, observa-se pouca variação da biomassa seca do colmo para o período de 2011-2037. O menor valor de produtividade (47,91 t ha⁻¹) está previsto para ocorrer na safra de 2026-2027, enquanto o maior valor (54,19 t ha⁻¹) está previsto para ocorrer na safra de 2017-2018. O pequeno incremento de biomassa seca do colmo para os ciclos futuros em relação ao ciclo atual (2007-2008) pode ser explicado devido à projeção de maior temperatura média, radiação solar, além de suprimento hídrico e fertilização de CO₂ adequados. No ciclo de 2017-2018, onde se observa um incremento de 12% da produtividade em relação ao simulado para o ciclo atual (2007-2008),

nota-se também valores altos de radiação solar média acumulada ao longo do ciclo em torno de 658 Mj m^{-2} associado com suprimento hídrico adequado e pequena elevação nos valores de temperatura média. Já o menor valor de biomassa seca do colmo (2026-2027) está associado com um valor de 638 MJ m^{-2} de radiação solar média acumulada durante o respectivo ciclo.

A cana-de-açúcar é uma cultura que responde muito bem a valores elevados de radiação solar. Mas para o seu crescimento dois fatores precisam estar associados: temperatura e chuva. A temperatura média ideal deve ser em torno de 30 a 34 °C, sendo que a necessidade hídrica depende do clima e da radiação. Estudo do impacto das mudanças climáticas e avanços tecnológicos na produtividade da cana-de-açúcar na região Centro-Sul, com base no cenário A1 mostrou que o aumento previsto nos valores de temperatura acarretará aumento da produtividade potencial e real da cana-de-açúcar (GOUVÊA et al., (2009).

Resultados apresentados por Knox et al. (2009), em trabalho desenvolvido na África do Sul, projetam também um incremento da produtividade da cana-de-açúcar em cenário futuro de mudança climática.

Segundo Marin et al., (2009), projeções climáticas regionais para a cultivar RB-72454 de cana-de-açúcar, apresentaram um incremento na produtividade desta cultura para o cenário com máxima emissão de CO_2 , enquanto para o cenário com emissões mais brandas de GEE, o efeito sobre a produtividade da cultura foi bem menor.

A simulação da massa seca de sacarose (Figura 8) para a safra atual (2007-2008) apresentou um incremento de 5% em relação à observação em laboratório. Ao longo da série climática futura (2011-2037), foi observada uma variação acentuada nas previsões dos valores de rendimento de açúcar, atingindo um incremento máximo de 16%, em relação à massa de sacarose para a safra atual. O menor valor previsto foi de $17,33 \text{ t ha}^{-1}$ previsto para a safra de 2026-2027 e o maior valor foi previsto para a safra de 2017-2018 ($26,96 \text{ t ha}^{-1}$). Analisando o comportamento diário da precipitação no final dos ciclos, verifica-se uma projeção de maior precipitação ao final do ciclo 2026-2027, o que provavelmente reduziu a concentração de sacarose. Enquanto é previsto uma menor precipitação no final do ciclo 2017-2018 o que justifica o maior incremento na projeção da massa seca de sacarose para este ciclo. A maior variação da massa seca de sacarose ao longo dos ciclos futuros mostra

a sua maior sensibilidade às variações climáticas (principalmente precipitação), quando comparada com a biomassa seca do colmo.

A partir do final da fase de perfilhamento, os colmos mais desenvolvidos continuam a crescer em altura e em espessura, sendo que em seguida inicia-se o processo de acúmulo de sacarose nos entrenós basais mais velhos. Isto deve-se à produção excedente de fotoassimilados. À medida que o amadurecimento dos colmos sobreviventes ao perfilhamento ocorre, continua também o seu crescimento e desenvolvimento, acumulando cada vez mais sacarose em seus internódios. A intensidade de acúmulo de sacarose é influenciada por fatores ambientais (temperaturas mais baixas, períodos de seca moderados e carência de nitrogênio) (SEGATO et al., 2006). A quantidade e a distribuição de chuvas nos canaviais influenciam diretamente à massa seca de sacarose na cultura da cana-de-açúcar.

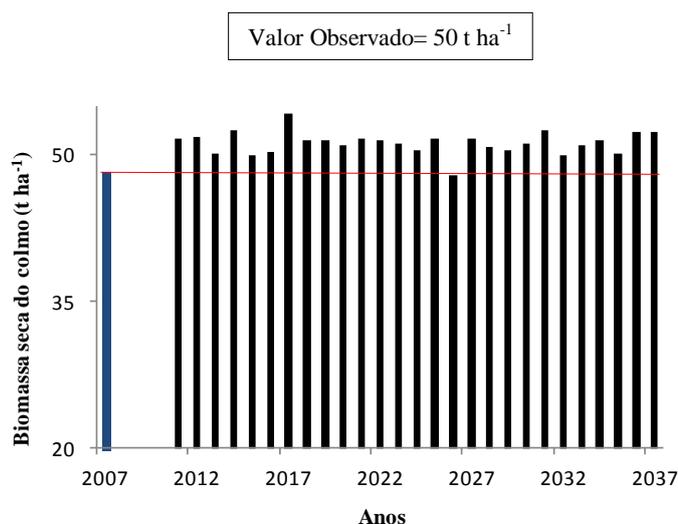


Figura 7. Projeção da biomassa seca do colmo para a variedade de cana-de-açúcar RB-92579 em cenário atual e futuro de mudança climática, A1B para Juazeiro, Bahia

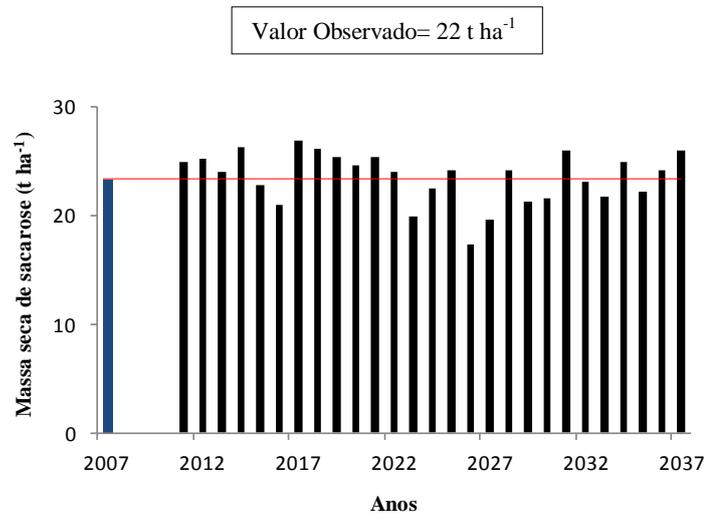


Figura 8. Projeção da massa seca de sacarose para a variedade RB-92579 de cana-de-açúcar em cenário atual e futuro de mudança climática, A1B para Juazeiro, Bahia

4. CONCLUSÕES

A aplicação deste modelo ajustado para a cultivar RB-92579, em cenário futuro de mudança climática, A1B indicou um pequeno incremento da biomassa seca do colmo para a série climática futura (2011-2037) quando comparada com a simulação para a safra de 2007-2008. Este resultado demonstrou uma pequena variação ao longo da série climática futura, com incremento máximo de 12% para a safra de 2017-2018. Enquanto a simulação da massa seca de sacarose apresentou uma variação mais pronunciada ao longo da série climática futura, com incremento máximo de 16% para a safra de 2017-2018, se mostrando bem mais sensível às variações climáticas quando comparada com a biomassa seca do colmo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINSWORTH, E. A.; LEAKEY, A. D. B.; ORT, D. R.; LONG, S. P. FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. **New Phytologist** 179: 5-9. 2008.

ALMEIDA, A.C.S.; Souza, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S. B.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIO, R. A. F. R. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. In: **Ciência e Agrotecnologia**, n. 5, 1441-1448. 2008.

ALVES, J.R.B., URQUIAGA.; M. R. BOODEY. Produção de Biocombustíveis: a questão do balanço energético. In: **Revista Política Agrícola**, N. 1. 2005.

AMARAL, F.C.S.DO., L. A. C. FERNANDES,. A. A. ARAÚJO FILHO., V. J. DE S. VIEIRA., W. G. FARIA JÚNIOR. Influência da irrigação na condutividade hidráulica de um vertissolo. In: **Embrapa Solos, Boletim de Pesquisas**, No 113, 1-35. 2007.

AMORIM, M.C. **Impacto e projeção de séries meteorológicas na safra de milho em Minas Gerais**. 219 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2008.

BARBER, S. A.; CUSHMAN, J. H. Nitrogen up take model for agronomic crops. In: Modeling Waste Water renovation – In: **Land Treatment**. 1. ed. New York: K. Iskardr. Wiley – interscience, p. 382-409. 1981.

BARBOSA, M. H. P.; BASTOS, I. T.; SILVEIRA, L. C. I.; OLIVEIRA, M. W. **Análise de causa e efeito para produção de colmos e seus componentes na seleção de famílias de cana-de-açúcar**. In: Congresso nacional da sociedade dos técnicos açucareiros e alcooleiros do Brasil, 8., Recife. Anais, Recife: STAB, p. 366-370. 2002.

BARROS, AH. C. **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico**. 2010. 148 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 2010.

BOYER, J. S. Advances in drought tolerance in plants. In: **Advances in Agronomy**, v. 56,. p. 187-218. 1996.

BRASIL. Empresa de pesquisa energética. **Balço energético nacional: ano base 2008: ano base 2007**. Rio de Janeiro: EPE, 244 p. 2008.

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.

CASTRO, P. R. C. **Fisiologia vegetal aplicada à cana-de-açúcar**. Maceió, 7p. 2001.

COLLINS, W. D., P. FRIEDLINGSTEIN,, A. T. GAYE,, J. M. GREGORY,, A. KITO, H., R. KNUTTI,, J. M. MURPHY,, A. NODA,, S. C. B. RAPER,, LAN G. WATTERSON,, A. J. WEAVER AND Z. C. ZHAO. IPCC. **Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima**. Disponível em <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm>. Acesso em Fevereiro. 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar safra de 2010/2011**. Terceiro levantamento. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_03_10_09_03_02_bol_etim_marco-11%5B1%5D..pdf> Acesso em 10 de Março. 2011.

COOPERATIVA PINDORAMA, 2004. Disponível em: <<http://www.cooperativapindorama.com.br/noticiasTexto.asp?id=1686>> Acesso em Novembro. 2011.

DOREMBOS, J.; KASSAM, A. H.; Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**, n 33, FAO Rome. 193 p. 1979.

FAO/STAT. **Food and Agricultural commodities production**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em 28 de Junho de 2010.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. In: **Ciência e Prática**, v.7, p.96-101, 1983.

FILHO, M. B. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, **A visão atualizada da questão etanol**. Disponível em: www.fiesp.com.br. Acesso em Outubro. 2011.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP), 2007. **Biodiesel em ascensão**. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/?art=3200&bd=1&pg=1> Acesso em Novembro. 2011.

GASCHO, G. J., SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE I. D; PEET. M. M. (ed.) **Crop Water Relations**. New York: John Wiley & Sons, p.445-479, 1983.

GONÇALVES, M. C. P. B. **Características hidrodinâmicas dos solos: sua determinação e funções de pedotransferência**. 212 p. Tese (Doutorado em Ciência do solo) – Instituto superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1994.

GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H. H. **Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises**. Amsterdam: Kluwer Academic Press, 238 p. 1994.

GOUVÊA, J. R. F., SENTELHAS, P. C., GAZZOLA, S. T., SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, Brazil, v. 66, n.5, p. 593-605, September/October 2009.

HE, J., J. W. JONES., W.D.GRAHAM., AND M,D.DUKES. Influences of different likelihood functions on parameter estimation with the generalized likelihood uncertainty estimation method. In: **American Society of Agricultural and Biological Engineers** ISSN 2151-0032 Agric. Systems. No52, 1907-1921. 2009.

HEINZE, BC. L. B. **A importância da agricultura irrigada para o desenvolvimento da região Nordeste do Brasil**. 2002. 70 p. Monografia (MBA em Gestão sustentável da agricultura irrigada) – Ecobusiness School/ FGV, Distrito Federal, Brasília, 2002.

Hermann, E.R. & G.M.S. Câmara. **Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar**. Revista da STAB, 17: 32-34. 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA 2007. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/ibgeteen/mapas>. Acesso em Janeiro. 2012.
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola 2007: culturas perenes**. Disponível em www.ibge.gov.br. Acesso em Novembro. 2011.

INMAN-BAMBER, N.G. AND KIKER, G.A. **DSSAT/CANEGRO 3.1**. DSSAT version 3.1 1998 distribution software. IBSNAT, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA. 1997.

INMAN-MAMBER, 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-MAMBER, N. G., SMITH, D. M. Water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, n.1, p. 1007-122. 2004.

INMAN-MAMBER, N. G., SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, p. 185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. S. Afr.J. In: **Plant Soil** 8 (2): 93-99. 1991.

INMAN-BAMBER, N.G and D. M. SMITH,. Water relations in sugarcane and response to water deficits. In: **Field Crops Research**, v.92,185-202. 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Paris, 21 p. 2007a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment**. 2007b.

JONES, C.A., M.K. WEGENER, J.S. RUSSEL, I.M MCLEOD, AND J.R. WILLIAMS. AUSCANE, Simulation of Australian sugarcane with EPIC. In: **tech. Paper** 29. Div. Of Tropical Crops and Pastures. CSIRO, Canberra, Austrália. 1989.

JONES, M.; SINGELS, A. **DSSAT v.4.5 DSSAT-CANEGRO: Sugarcane Plant Module: Scientific documentation.** South African Sugarcane Research Institute Mount Edgecombe, South African, International Consortium for Sugarcane Modeling, 2008. Disponível em <<http://sasri.sasa.org.za/misc/icsm.html>>. Acesso em: 10 de Junho. 2011.

JONES, J. W.; MISHOE, W. K; BOOTE, L. *Introduction to simulation and modeling.* In: **The Seminar/Workshop on Computer Crop Simulation and Data Base management for Agrotecnology Transfer, coord.** Food & Fertilizer Thecnology Center, national Chung Hsing University and IBSNAT/USAID. Taaiwan, 21 p. (FFTC. Technical Bulletin, 100). 1987.

JUNGCLAUS, J.H, et al. **Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, Journal of Climate**, v. 19, p. 3952-3972, 2006.

JUSTINO, F.B., MÉLO, A.S., SETZER, A., SISMANOGLU, R., SEDYYAMA, G. C., RIBEIRO, G. A., MACHADO, J. P., STERL, A. **Grrenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. Climate Change**, 106:285-302, 2011.

Keating, B.A., M.J. Robertson, R.C. Muchow, and N.I. Hurth. Modeling sugarcane production system I. development and performance of the sugarcane module. In: **Field Crops res.** 61 (3): 253-271. 1999.

KNOX, J. W., RODRÍGUEZ DIAS, J. A., NIXON, D. J., MKHWANAZI, M. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. **Agricultural Systems** 103, 63-72. 2010.

Leme, E.J.A., M.A. Maniero & J.C. Guidolin. **Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar e sua relação com a produtividade.** Planalsucar, 2: 3-22. 1984.

LIU, D.L.; G, KINGSTON and BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phonological development in sugarcane, including sub optimum and supra-optimum temperature regimes. In: **Agricultural and Forest Meteorology**, v.90,119-139. 1998.

LIU, D. L., AND G. KINGSTON. QCANE: A simulation model of sugarcane grot growth and sugar accumulation: QCANE. In: **M.J. Robertson (ed.) Research and modeling approaches to asses sugarcane produtcion opportunities and constraints.** Workshop Proc., Univ. of Queensland, St. Lucia, Brisbane. 10-11 Nov. 1994. Univ. of Queensland, St. Lucia, Brisbane, 25-29. 1995.

LONG, S. P. Leaf gas exchange. In: Photosynthetic Mechanisms and the Environment. Elsevier, Amsterdam, 453-500. 1985.

MARENGO, J.A., NOBRE, CARLOS. A., SALATI, ENEAS., AMBRIZZI, TERCIO. **Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Sumário Técnico, Sub Projeto Ministério do Meio Ambiente-MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas-SBF e Diretoria de conservação da biodiversidade-Dcbio Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade. 2007.

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. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. In: **Agronomy Journal**. Volume 103, Issue 1, 1-12. 2011.

MARIN, FR.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; NASSIF, D. S. P.; VIANA, M. S.; SOARES, F. A. S.; CABRAL, L. L.; GUIATO, D. **Cenários futuros para cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseados em projeções regionalizadas de mudanças climáticas**. In: XVI Congresso brasileiro de Agrometeorologia- 22 a 25 de Setembro de 2009- Belo Horizonte-MG.

MAYER, D.G, BUTLER, D.G. **Statistical validation. Ecological Modelling 68** : 21-32. 1993.

MEDINA, E., SAN JOSÉ, J.J. & SEQUEIRA, P.E. **Análisis de la productividad en caña de azúcar: III. Respiración en la oscuridade de hojas y tallos de cinco variedades de caña de azúcar y pérdidas nocturnas de matéria seca**. Turrialba, 20: 302-306. 1970.

MEINZER, F.C. & J. ZHU. Nitrogen stress reduces the efficiency of the C4CO₂ concentrating system, and therefore quantum yield, in *Saccharum* (sugarcane) species. **Journal of Experimental Botany**, 49: 1227-1234. 1998.

MIOCQUE, J. Avaliação do crescimento e de produtividade de matéria verde da cana-de-açúcar na região de Araraquara – SP. **Revista STAB**. Piracicaba, v. 17, n. 4, p. 45-47, 1999.

MIRANDA, D.; LUCI, L.; VASCONCELOS, AC. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC,. 882 p. 2008.

MORAES, W. B., JESUS JUNIOR, WC.; MORAES, W. B.; CECÍLIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Tropicall – Ciências Agrárias e Biológicas**. V. 5, N. 2, pág. 3, 2011.

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.

NASSIF, D. S. P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**, 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Física do ambiente agrícola) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2010.

OLIVEIRA, R. I. de.; OLIVEIRA, E. C. A. de.; FREIRE, J. F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de.; COSTA, S. A. da.; RODRIGUES, A. do N. **Avaliação do crescimento de diferentes variedades de cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção**. In: Congresso nacional da sociedade dos técnicos açucareiros e alcooleiros do Brasil, 9, Maceió: STAB, p. 715-719. 2008.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS3, E.; ZAMBON, JL. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; BESPALHOK, JC.; RIBAS, KC. Z.; DA SILVA, DK. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia-GO, Brasil, 37(2): 71-76, jun. 2007.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: EDUR, 150p. 1998.

PRINS, A. et al. Acclimation to high CO₂ in maize is related to water status and dependent on leave rank. **Plant, Cell & Environment** 34: 314-331. 2010.

REYNOLDS, J. F.; ACOCK, B. Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: a critique of plant growth models. **Ecological Modelling**. Amsterdam, n. 29 p. 107-129, 1985.

REVISTA RURAL, SÃO PAULO-SP, **Abril 2005 REVISTA Rural**86, Abril 2005. Disponível em: <http://www.revistarural.com.br/Edicoes/2005/artigos/rev86_agua.htm#top>. Acesso em: Novembro. 2011.

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

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

SEGATO, S. V., PINTO, A. DE S., JENDIROBA, E., NÓBREGA, J.C. M. 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, P. 19-36, 2006.

SILVA, M. A.; DA SILVA, J. A. G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 620-627, 2008.

SILVA, F. B.; BERGAMASCO, AF. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. **Revista biociências**, Taubaté, n.1, p. 7-14, 2001.

SILVA, T. G. F. **Análise do crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência no uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Sub médio do vale São Francisco**. 2009. 176 p. Tese (doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2009.

SILVA, A. B. da. **Resposta da cana-de-açúcar irrigada sob diferentes níveis de adubação**. 61f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. 2002.

SINGELS, A.; BEZIDENHOUT, 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.; VAN DEN BERG, M.; SMIT, M. A.; JONES, M. R.; VAN ANTWERPEN, R. Modelling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. *South African Sugarcane Research Institute, Field Crops Research* 117, 59-69. 2010.

Singels, A., M. Jones and M. Van der Berg. **DSSAT v.4.5 DSSAT-CANEGRO: Sugarcane Plant Module: Scientific documentation**. South African Sugarcane Research Institute Mount Edgecombe, South African, International Consortium for Sugarcane Modeling, 2008. Disponível em <<http://sasri.sasa.org.za/misc/icsm.html>>. Acesso em: 10 de Maio. 2011.

SINGELS, A., SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R.A. **The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field Crops Research*, v.92, p.249-260, 2005.**

TAVARES, A. C. S. **Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao excesso de água no solo.** 2009. 220 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 2009.

TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. *DSSAT version 3.* University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 163p. 1994.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, **adison**, v. 44, P. 892-898, 1980.

VU, J. C. V.; ALLEN, L. H.; GESCH, R. W. Up regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO₂. **Plant Science**. 171: 123-131. 2006.

WAHID, A. Analysis of toxic and osmotic effects of sodium chloride on leaf growth and economic yield of sugarcane. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, 45: 133-141. 2004.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, N.S.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M.; AND KLINK, D.R. Statistics for the evaluation and comparison of models. In: **Journal of Geophysical Research**, Ottawa. 1985.