

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**LEANDRO GARCIA DA COSTA**

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DE PALHADA E ADUBAÇÃO  
NITROGENADA NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**ARARAS**

**Dezembro de 2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**LEANDRO GARCIA DA COSTA**

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DE PALHADA E ADUBAÇÃO  
NITROGENADA NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agricultura e Ambiente como requisito para obtenção do título de **Mestre em Agricultura e Ambiente**.

**Orientadora:** Prof<sup>fa</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad

**Coorientador:** Dr. Fábio Ricardo Marin

**ARARAS**

**Dezembro de 2012**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

C837se

Costa, Leandro Garcia da.

Simulação do efeito de palhada e adubação nitrogenada na produtividade de cana-de-açúcar / Leandro Garcia da Costa. -- São Carlos : UFSCar, 2013.  
92 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

1. Agricultura. 2. Modelagem computacional e simulação.  
3. APSIM. 4. Matéria orgânica. 5. Solo - uso – planejamento.  
6. Setor sucroenergético. I. Título.

CDD: 630 (20<sup>a</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
DE  
**LEANDRO GARCIA DA COSTA**  
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA  
E AMBIENTE, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, **EM 17 DE  
DEZEMBRO DE 2012.**

BANCA EXAMINADORA:

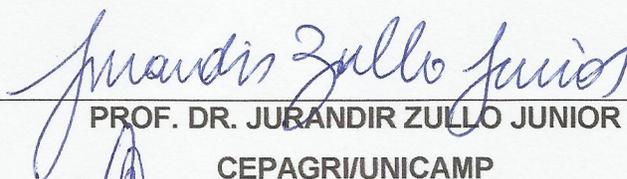


---

PROFA. DRA. MARIA LEONOR R. C. LOPES ASSAD

ORIENTADOR (A)

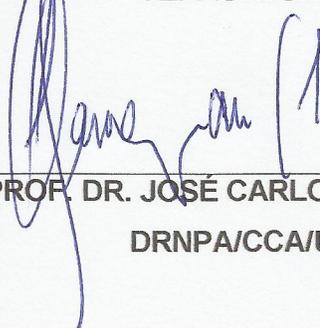
DRNPA/CCA/UFSCAR



---

PROF. DR. JURANDIR ZULLO JUNIOR

CEPAGRI/UNICAMP



---

PROF. DR. JOSÉ CARLOS CASAGRANDE

DRNPA/CCA/UFSCar

*Aos meus pais José Fernandes e Luzia Helena,  
Ao meu irmão e amigo Augusto,  
À minha namorada Elisa,*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, professora Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad e Dr. Fábio Ricardo Marin, pela confiança em mim depositada, pelos ensinamentos, sugestões, orientações e por incentivar constantemente o meu progresso na área acadêmica.

Aos colegas do Laboratório de Modelagem Agroambiental da EMBRAPA Informática Agropecuária e do Programa de Pós Graduação em Agricultura e Ambiente do CCA/UFSCar, pelo convívio harmonioso e por me ajudarem durante todo o período de Mestrado, em especial para os meus amigos Otávio Lopes, Daniel Nassif, Sérgio Medeiros e Helena Soares.

À Coordenação do Programa de Pós Graduação em Agricultura e Ambiente, pela oportunidade oferecida e a todos os meus professores, pelos ensinamentos, conselhos e sugestões.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior, CAPES, assim como, à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, pelo suporte financeiro durante a pesquisa.

A Elisa, por seu amor, carinho, companheirismo e paciência durante os momentos mais difíceis.

Aos meus pais, José Fernandes e Luzia Helena, pelo amor, carinho e paciência todos esses anos, pela formação e pelo suporte que proporcionaram as minhas realizações.

Às outras pessoas da minha família, principalmente, meu irmão Augusto e minhas avós, Maria Lúcia e Clarice, pelo carinho demonstrado e por sempre torcerem por mim.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

A Deus, por tudo ser possível.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVO GERAL .....	14
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
3.1. A cultura da cana-de-açúcar.....	15
3.1.1. Origem e trajetória.....	15
3.1.2. Diferenças na produtividade do canavial.....	16
3.2. Fatores controladores da produtividade agrícola simulados pelo modelo APSIM.....	18
3.2.1. Fenologia e fisiologia .....	18
3.2.2. Condições ambientais .....	21
3.2.3. Restrições agronômicas .....	23
3.2.4. Nitrogênio .....	24
3.2.5. Déficit hídrico e irrigação.....	26
3.3. Matéria orgânica no sistema solo-planta-atmosfera .....	28
3.4. Modelagem de culturas agrícolas .....	30
3.5. O modelo APSIM .....	32
3.5.1. Relações entre as variedades e o modelo APSIM-Sugarcane.....	34
3.5.2. Balanço de água no solo e o módulo SOILWAT do APSIM .....	37
3.5.3. O módulo SURFACEOM do APSIM e a relação com a matéria orgânica do solo....	39
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	43
4.1. Dados para simulação .....	43
4.2. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo APSIM-Sugarcane .....	46
4.3. Calibração do modelo APSIM-Sugarcane .....	47
4.4. Simulação do efeito combinado de adubação nitrogenada com palhada de cana-de-açúcar na produtividade.....	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	52
5.1. Análise de sensibilidade local no modelo APSIM-Sugarcane.....	52
5.2. Calibração do modelo APSIM .....	56
5.3. Simulação do efeito combinado de adubação nitrogenada e palhada de cana-de-açúcar..	61
6. CONCLUSÕES .....	68
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
8. REFERÊNCIAS.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorias dos arquivos INI do APSIM-Sugarcane (Adaptado de APSIM-Sugarcane Wiki, 2012).....	35
Tabela 2: Dados de saída do módulo SurfaceOM (Adaptado de APSIM Wiki, 2012).....	42
Tabela 3: Características principais do experimento realizado no Campo Experimental localizado em Piracicaba (SP), extraídas de Gava et al. (2001).....	44
Tabela 4: Características principais do experimento realizado no Campo Experimental de Salinas (MG), extraídas de Barbosa (2005). ....	45
Tabela 5: Dados químicos e físicos de um Latossolo Vermelho-Escuro do campo experimental de Piracicaba (SP), extraídos de Laclau e Laclau (2009), e de um Latossolo Vermelho-Escuro, textura média distrófico, do município de Salinas (MG), extraídos de Embrapa (2012). ....	46
Tabela 6: Dados químicos e físicos de solos considerados nas simulações para os municípios de Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e São Simão, localizados no estado de São Paulo. ....	51
Tabela 7: Avaliação do modelo APSIM para a variedade brasileira SP80-1842, em duas localidades, Piracicaba-SP (Pira) e Salinas-MG, com palha (C Palha), sem palha (S Palha), irrigado (Irr) e sequeiro (Seq). ....	59
Tabela 8: Consolidação da análise estatística do modelo APSIM, para as condições de Piracicaba-SP e Salinas-MG, para a variedade brasileira SP80-1842, quanto à produtividade em matéria fresca (MF) e matéria seca (MS). ....	59
Tabela 9: Comparação estatística das áreas com e sem remoção da palhada da cana-de-açúcar, utilizando-se o Teste t. ....	61
Tabela 10: Comparação de diferentes doses de ureia na produtividade da cana-de-açúcar, em área com remoção total da palhada, utilizando o Teste t. ....	64
Tabela 11: Comparação de diferentes doses de ureia na produtividade da cana-de-açúcar, em área sem remoção da palhada, utilizando o Teste t. ....	64

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Situações de produção agrícola, com o nível de produção associado aos principais fatores limitantes da produção e os insumos agronômicos com potencial para proteger ou aumentar rendimentos (Adaptado de Rabbinge, 1993). ..... 18
- Figura 2: Estádios fenológicos da cana-de-açúcar (Adaptado de Gascho E Shih, 1983). ..... 19
- Figura 3: Distribuição da cana-de-açúcar no mundo (Adaptado de UNICA, 2012). ..... 22
- Figura 4: Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil, nas regiões Centro-Sul e Norte-Nordeste, de 2003 a 2010 (UNICA, 2012). ..... 23
- Figura 5: Efeito da aplicação de N-fertilizante na produtividade de colmos (TCH), em diferentes ciclos de crescimento da cana-de-açúcar no manejo irrigado. (Wiednfeld e Enciso, 2008). ..... 25
- Figura 6: Produtividade da cana-de-açúcar em resposta a doses de nitrogênio em presença de palhada; média de 15 experimentos (Rossetto et al., 2010b). ..... 26
- Figura 7: Esquema geral do modelo APSIM com os módulos principais e, em destaque, os utilizados na calibração para a variedade brasileira SP80-1842 (Adaptado de Keating et al., 2003). ..... 33
- Figura 8: Descrição do modulo APSIM-Sugarcane (Adaptado de Keating et al. 2003). ..... 34
- Figura 9: Diagrama que mostra a comunicação entre o módulo SoilWat e outros módulos do APSIM (Adaptado de APSIM Wiki, 2012). ..... 38
- Figura 10: Fluxograma do módulo SurfaceOM (Material Orgânico Superficial) (Adaptado de APSIM Wiki, 2012). ..... 40
- Figura 11: Fluxograma do delineamento experimental, utilizado para avaliação estatística das simulações de diferentes doses de adubação nitrogenada na produtividade de canaviais com e sem remoção da palhada da cana-de-açúcar [111(1...47) representa tratamento 1 (com remoção), na dose T1 (60 kg.ha<sup>-1</sup>), em B1(São Simão) para as repetições de 1 a 47]. ..... 49
- Figura 12: Fluxograma do delineamento experimental, utilizado para avaliação estatística da comparação de áreas no estado de São Paulo, com e sem remoção da palhada da cana-de-açúcar [11(1...47) representa tratamento Tc1 (com remoção), em B1(São Simão) para as repetições de 1 a 47]. ..... 50
- Figura 13: Sensibilidade relativa dos parâmetros do modelo APSIM na produtividade de colmos. Barras azuis representam respostas positivas e barras vermelhas, respostas negativas. .... 54
- Figura 14: Sensibilidade relativa dos parâmetros do modelo APSIM na produção de sacarose. Barras azuis representam respostas positivas e barras vermelhas, respostas negativas. .... 54
- Figura 15: Sensibilidade relativa dos parâmetros do modelo APSIM no índice de área foliar (LAI, da sigla em inglês). Barras azuis representam respostas positivas e barras vermelhas, respostas negativas. .... 55
- Figura 16: Produtividade da cana-de-açúcar em Piracicaba, observada (pontos) por Gava et al. (2001) e simulada (linha) pelo APSIM-Sugarcane. No tratamento T1 (com palha), (a) representa massa fresca de colmos, MF (t.ha<sup>-1</sup>) e (b) massa seca, MS (t.ha<sup>-1</sup>); Para o tratamento T2 (sem palha), c) representa MF (t.ha<sup>-1</sup>) e (d) MS (t.ha<sup>-1</sup>). ..... 57

- Figura 17: Simulação da produtividade da cana-de-açúcar em Salinas-MG (linha) e produção de massa fresca aérea medida por Barbosa (2005) em condições de campo (pontos), em tratamento irrigado (a) e em sequeiro (b). ..... 57
- Figura 18: Nível de estresse por nitrogênio (N Stress) e por água (W Stress), nos diferentes tratamentos simulados, onde 1 representa nenhum stress e 0 representa estresse total: a) e b) tratamento sem remoção da palhada, no experimento em Piracicaba; c) e d) tratamento com remoção da palhada, em Piracicaba; e) e f) tratamento irrigado em Salinas; e g) e h) tratamento em sequeiro, de Salinas. .... 60
- Figura 19: Variação temporal da produtividade de cana com e sem remoção da palhada ao longo de 50 anos em quatro localidades do Estado de São Paulo, a) Catanduva, b) Presidente Prudente, c) São Carlos e d) São Simão..... 62
- Figura 20: Produtividade de colmos ( $t \cdot ha^{-1}$ ) em função de doses de ureia ( $60 \text{ kg} \cdot ha^{-1}$  em azul,  $120 \text{ kg} \cdot ha^{-1}$  em vermelho e  $180 \text{ kg} \cdot ha^{-1}$  em verde), para a série histórica de 1961 a 2010, simulados por meio do APSIM para: a) Catanduva com remoção de palhada, b) Catanduva sem remoção de palhada, c) Presidente Prudente com remoção de palhada, d) Presidente Prudente sem remoção de palhada, e) São Carlos com remoção de palhada, f) São Carlos sem remoção de palhada, g) São Simão com remoção de palhada e h) São Simão sem remoção de palhada. .... 65
- Figura 21: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, com remoção da palhada e aplicação de  $60 \text{ kg(ureia)} \cdot ha^{-1} \cdot a$  a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total). ..... 66
- Figura 22: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, com remoção da palhada e aplicação de  $180 \text{ kg(ureia)} \cdot ha^{-1} \cdot a$  a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total). ..... 66
- Figura 23: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, sem remoção da palhada e aplicação de  $60 \text{ kg(ureia)} \cdot ha^{-1} \cdot a$  a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total). ..... 67
- Figura 24: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, sem remoção da palhada e aplicação de  $180 \text{ kg(ureia)} \cdot ha^{-1} \cdot a$  a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado ( $\text{kg} \cdot ha^{-1}$ ); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total). ..... 67

## LISTA DE SIGLAS

AirDry	Umidade no ponto de solo seco
Al	Alumínio
APSIM	Simulador de sistema de produção agrícola
APSIM-Sugarcane	Módulo de cana-de-açúcar do simulador de sistema de produção agrícola
B1,2,3,4	Bloco 1,2,3,4
Biom	Fração de biomassa do carbono orgânico total
BL	Modelagem padrão após calibração para Piracicaba-SP
BRIX	Porcentagem em massa de sólidos solúveis
BSES	Bureau of Sugar Experiment Stations
C	Carbono
C/N	Relação entre carbono e nitrogênio
C/P	Relação entre carbono e fósforo
CANEFW	Massa fresca de colmos
CF	Relação de colmos e folhas nas plantas ou Cane_Fraction
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	Capacidade de troca catiônica
DAC	Dias após a colheita
DAP	Dias após o plantio
DUL	Capacidade de campo
E	Índice utilizado para determinar a eficiência da modelagem
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESALQ-USP	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo
FOM	Matéria orgânica fresca
GLN	Número de folhas verdes ou green_leaf_no
ha	Hectare
HUM	Fração humificada do carbono orgânico total
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INI	Formato de arquivo no modelo APSIM
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

K	Potássio
LAI	Índice de área foliar
LEAF SIZE	Tamanho de folhas
LL15	Ponto de murcha permanente
ME	Mercado externo
MF	Massa fresca
MG	Estado de Minas Gerais
Mg	Magnésio
MI	Mercado interno
MJ	Megajoule
MOS	Matéria orgânica do solo
MS	Massa seca
MWCON	Porcentagem da solução, acima da capacidade de campo, que pode passar de um perfil de solo para outro.
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NH4	Amônio
NH4_N	Quantidade de nitrogênio na forma de amônio no APSIM
NO3	Nitrato
NO3_N	Quantidade de nitrogênio na forma de nitrato no APSIM
NRMSE	Raiz quadrada do erro médio normalizada
P	Fósforo
POL	Porcentagem em massa de sacarose aparente
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Alcool
RMSE	Raiz quadrada do erro médio
RUE	Eficiência no uso da radiação
SAT	Ponto de saturação do solo
SOILN	Módulo de nitrogênio no solo para o APSIM
SOILWAT	Módulo de água no solo para o APSIM
SP	Estado de São Paulo
SR	Sensibilidade relativa
SUCFS	Fração de sacarose no colmo
SUCROSE	Conteúdo de sacarose no colmo

SugarKL	Quantidade de água absorvida pelas raízes
SugarLL	Ponto de murcha permanente para a cana-de-açúcar
SugarXF	Porcentagem de raízes em determinado volume de solo
SURFACEOM	Material orgânico superficial
SW	Conteúdo de água no solo
SWCON	Porção da solução de solo, acima da capacidade de campo, que pode ser drenada em um dia
T1	Tratamento um
T2	Tratamento dois
Tc1	Tratamento com remoção da palhada
Ts2	Tratamento sem remoção da palhada
TCH	Toneladas de colmos industrializáveis por hectare
TTBF	Quantidade de energia térmica para transição entre emergência e crescimento do colmo ou tt_begcane_to_flowering
TTEB	Quantidade de energia térmica para transição entre crescimento do colmo e a maturação fisiológica ou tt_emerg_to_begcane
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
USD	Dólar dos Estados Unidos
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

## **SIMULAÇÃO DO EFEITO DE PALHADA E ADUBAÇÃO NITROGENADA NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR**

### **RESUMO**

A demanda crescente por fontes energéticas alternativas, em detrimento dos combustíveis fósseis, tem dado destaque ao Brasil no cenário internacional como modelo de produção de energia renovável e atraído investimentos massivos ao setor sucroenergético brasileiro nacional. Para garantir a segurança financeira do negócio, é necessário que a produção de cana-de-açúcar supra as necessidades socioeconômicas e agroambientais, com ênfase na relação entre a produção de energia elétrica, a partir da queima dos resíduos vegetais e do etanol por novas vias de obtenção, como a hidrólise de celulose, e a manutenção da palha sob o solo. Modelos de simulação de culturas baseados em processos biofísicos, como o APSIM (Agricultural Productions Systems Simulator), são ferramentas úteis para o planejamento da produção e na determinação dos pontos de estrangulamento que influenciam a lucratividade do setor. O objetivo do trabalho foi modelar o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em sistemas de colheita mecanizada, avaliando o efeito da remoção da palhada remanescente em combinação com doses de adubação nitrogenada de 60, 120 e 180 kg.ha<sup>-1</sup>. Os estudos foram realizados com base em dois experimentos localizados em Piracicaba-SP e Salinas-MG, conduzidos com a variedade SP80-1842. A avaliação do modelo revelou que o APSIM-Sugarcane é capaz de descrever adequadamente o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em diferentes ambientes produtivos com eficiência da modelagem (E) maior que 0,9 para massa seca de colmos (MS). As simulações também mostraram que a quantidade de palha no solo pode afetar a produtividade da cultura, que a remoção da palha, para utilização na indústria, acarretaria em redução da produtividade no longo prazo. Entretanto, nas simulações feitas a cultura não respondeu significativamente à adubação nitrogenada.

**Palavras chave:** Modelo de simulação; APSIM-Sugarcane; palha de cana; matéria orgânica do solo; setor sucroenergético.

## **SIMULATION OF TRASH AND NITROGEN EFFECTS ON SUGARCANE YIELD**

### **ABSTRACT**

The increasing demand for alternative energy sources for replacing fossil fuels has attracted investments for Brazilian sugarcane industry, which has been widely reconized as a model of renewable energy producer. To ensure financial security is necessary that production of sugarcane provide the socioeconomic and agri-enviromental needs, with emphasis on the relationship between the production of electricity from the burning of biomass and ethanol by new ways of obtaining such as cellulose hydrolysis and the maintenance of sugarcane trash under the soil. Process based crop models based, such as APSIM (Agricultural Productions Systems Simulator), are useful tools for planing the production system and to identify the bottlenecks influencing the profitability of the sector. The objective was to model the growth and productivity of green and burnt sugarcane harvesting systems, under several nitrogen fertilizer levels (60, 120 and 180 kg ha<sup>-1</sup>). The study was based on two experiments located in Piracicaba-SP and Salinas-MG caried on with cultivar SP80-1842. The evaluation of the model showed that the APSIM-Sugarcane is able to drescribe adequately the growth and productivity of cane sugar production in these environments, once the modeling efficiency (E) was greater than 0.9 for stlak dry mass (MS). Simulations also showed that the amount of trash on the soil would affect the crop yield and the remotion of trash for using in the mills would ultimately decrease the sugarcane yield along the time. However, in these simulations, the crop did not respond to nitrogen fertilization.

**Keywords:** Simulation model, APSIM-Sugarcane, sugarcane trash, soil organic matter; sugarcane industry.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os maiores produtores agrícolas do mundo, favorecido pela extensa área agricultável e clima adequado à produção vegetal durante o ano todo. A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das principais culturas agrícolas brasileiras, com importância econômica, social e ambiental. Sua produção tem aumentado desde o início do século XX com a implantação da cultura em novos locais, impulsionada principalmente pelo consumo de etanol no mercado interno e pelos bons preços do açúcar no mercado internacional.

Entre os países emergentes, o Brasil ganhou destaque como modelo no uso de energia renovável, notadamente pela produção de etanol e pela cogeração de energia elétrica a partir do bagaço. Nos últimos anos, contudo, uma nova demanda vem se apresentando ao setor sucroalcooleiro. O potencial de uso da palhada da cana-de-açúcar em sistemas de cogeração ou mesmo na produção do etanol de segunda geração parece interessante sob o ponto de vista econômico, dado o grande volume de biomassa produzido e a oportunidade de elevação da renda na indústria.

Nos últimos 20 anos, a modelagem de sistemas biofísicos tornou-se uma ferramenta acessível para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento, intervenção e importante para as tomadas de decisões agrícolas. O Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM, na sigla em inglês) é um modelo utilizado com credibilidade para simular os processos-chave da interação solo-planta-atmosfera. Esta ferramenta pode ser utilizada para estimar a produtividade de culturas agrícolas, agregar valor à experimentação de campo, estudar as limitações dos sistemas com o auxílio de pesquisadores e agências de extensão, além de gerar informações confiáveis para as tomadas de decisões.

Com a demanda crescente do setor sucroenergético por informações específicas da interação solo-planta-atmosfera, como as relacionadas à produtividade do canavial, preservação do solo, cogeração de energia elétrica e produção de etanol de segunda e terceira gerações, a utilização de modelos de simulação de culturas, baseados em processos biofísicos, tem importância fundamental, principalmente para otimização dos serviços, diminuição do tempo de realização dos processos e, principalmente, para a manutenção do embasamento técnico-científico nas tomadas de decisões do setor.

Neste trabalho utilizou-se um modelo de crescimento de plantas baseado em processos para simular o impacto de longo prazo do sistema de colheita sobre a produtividade da cana-de-açúcar. O trabalho é composto pelas etapas seguintes: revisão bibliográfica sobre o modelo, para compreensão dos processos de funcionamento e avaliação dos parâmetros de

entrada e saída; revisão sobre a cana-de-açúcar, com destaque para os fatores que interferem na produtividade da cultura e que são considerados na modelagem realizada pelo APSIM; obtenção dos dados experimentais para a cana-de-açúcar brasileira, que possibilitou a calibração e avaliação do modelo para a região centro-sul do Brasil e, conseqüentemente, a realização simulações da produtividade da cana-de-açúcar. A proposta do trabalho foi utilizar o modelo APSIM, a partir da calibração de uma cultivar específica de cana-de-açúcar, para simular o efeito do manejo da palhada e da adubação nitrogenada, em sistemas de colheita com e sem remoção da palhada, na produtividade de canaviais do estado de São Paulo.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem por objetivo utilizar o modelo APSIM para simular o padrão de crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em sistemas de colheita com e sem remoção da palhada, com diferentes doses de adubo nitrogenado.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analisar a sensibilidade local do modelo APSIM aos parâmetros de entrada referentes às características de solo, fisiologia da cana de açúcar e da atmosfera;
- Calibrar e avaliar o modelo APSIM para a variedade de cana-de-açúcar SP801842, cultivada em sistemas de colheita crua e queimada, com sistema de manejo irrigado e sequeiro, em duas condições edafoclimáticas da região sudeste do Brasil;
- Simular o efeito combinado de diferentes doses de nitrogênio (60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup>), na produtividade da cana-de-açúcar cultivada com e sem remoção da palhada no estado de São Paulo, com o modelo APSIM.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. A cultura da cana-de-açúcar

##### 3.1.1. Origem e trajetória

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é originária do Sudeste Asiático, especificamente da região de Nova Guiné e Indonésia (MOZAMBINI et al., 2006; JAMES, 2004). Segundo Scarpari e Beauclair (2008), a cana-de-açúcar era classificada taxonomicamente como pertencente à família das gramíneas, mas Cronquist classificou-a em 1981 como pertencente à família Poaceae.

A cana-de-açúcar cultivada no Brasil é um híbrido das espécies *Saccharum officinarum*, *Saccharum barberi*, *Saccharum robustum*, *Saccharum spontaneum*, *Saccharum sinensis* e *Saccharum edule*. A *Saccharum officinarum* é utilizada como base para o melhoramento genético no país, devido à capacidade de acumular altos níveis de sacarose no colmo; entretanto, possui baixa resistência a doenças. Os genes de resistência, vigor, perfilhamento e capacidade de rebrota são provenientes da espécie *Saccharum spontaneum* (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008).

No final do século XV e início do XVI, na Europa, o açúcar proveniente da cana-de-açúcar era tão valorizado quanto o ouro. Sua produção no continente europeu era limitada, principalmente por razões climáticas, assim, o cultivo deste vegetal consolidou-se como um negócio rentável, principalmente para países que possuíam o monopólio comercial sobre regiões aptas ao cultivo da cana-de-açúcar, como Portugal, com domínio sobre as ilhas de Açores, Madeira e o Brasil (UNICA, 2012). A partir da introdução da cana-de-açúcar em território brasileiro, consideram-se os três séculos subsequentes como o “Ciclo da Creoula”, devido ao predomínio desta variedade no período. Posteriormente, esta foi substituída pela variedade “Caiana”, com maiores teores de açúcar e mais produtiva (BARBOSA, 2005).

Com o início do melhoramento genético da cana-de-açúcar no final do século XIX e início do século XX, o Brasil passou a importar rotineiramente variedades de outros países, mais produtivas e com maiores teores de sacarose. Entretanto, neste período, o controle fitossanitário e o quarentenário não eram realizados. Consequentemente, os canaviais brasileiros foram acometidos por muitos problemas, com infestação de pragas e doenças que provocaram epidemias, como por exemplo, as do mosaico e do carvão. Com a crise do início do século XX, os produtores e governantes foram obrigados a criar centros experimentais e instituições de pesquisa na área de cana-de-açúcar, para o melhoramento genético e controle fitossanitário, de acordo com as necessidades locais (CESNIK e MIOCQUE, 2004).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil ganhou destaque em meados da década de

1970, quando o governo criou o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), em 1975. Este visava o incentivo a qualquer insumo capaz de substituir o petróleo, numa tentativa de minimizar a dependência externa aos combustíveis fósseis e ao elevado preço do barril na época (SZMRECSÁNYI e MOREIRA, 1991). A partir daí, a produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar aumentou significativamente, passando de 600 milhões de litros ano<sup>-1</sup> para 3,4 bilhões de litros ano<sup>-1</sup> em 1975 e 1976, respectivamente (BORGES et al., 1988). Após quatro décadas da criação dos programas de incentivo à produção de etanol, o Brasil ocupa o primeiro lugar no mercado mundial de produção de cana-de-açúcar, com 50% da produção mundial (NEVES et al., 2009).

A produção de cana-de-açúcar tem aumentado desde o início do século XXI com a implantação da cultura em novos locais, impulsionada principalmente pelo consumo de etanol no mercado interno (MARIN et al., 2011). Para a safra 2011/2012, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produtividade média da cana-de-açúcar foi estimada em 68,3 toneladas por hectare (t ha<sup>-1</sup>), 11,8% menor que na safra anterior. Entretanto, houve acréscimo de 9% na área cultivada, em um total de 8,3 milhões de hectares. O Estado de São Paulo, além de ser o maior produtor, é o que apresentou maior expansão territorial, com acréscimo de 265,5 mil hectares plantados (CONAB, 2011).

O programa de incentivo à produção de etanol ganhou destaque entre os países emergentes como modelo de energia renovável e, conseqüentemente, aumentou o interesse de investimentos internos e externos na sua produção (GOLDEMBERG, 2007). Dentre os principais destinos das exportações brasileiras de etanol em 2010 estão a Coreia do Sul com 19,9% do volume exportado, seguido dos Estados Unidos e Japão, com participações de 13,9% e 13,8%, respectivamente. Com relação ao açúcar, os principais destinos das exportações foram Rússia, com 12,5% do volume exportado, seguido da Índia e Irã, com participação de 8,3% e 5,7%, respectivamente (SECEX, 2010).

### **3.1.2. Diferenças na produtividade do canavial**

O rendimento da cana-de-açúcar é determinado pela massa dos caules entregue à indústria de processamento e o seu respectivo teor de sacarose. Atualmente, após triturar os colmos da cana e extrair o suco, o bagaço é queimado na própria indústria para a produção de vapor e, conseqüentemente, obtêm-se energia elétrica. A elevada produção de bagaço e de palha na cana-de-açúcar é evidenciada quando comparada à produção de outras culturas, como por exemplo, no caso do milho (*Zea mays*), com média 17,6 t ha<sup>-1</sup>, contra 39 t ha<sup>-1</sup> para a cana-de-açúcar (HEATON et al., 2008).

As estatísticas das produtividades comerciais da cana-de-açúcar são médias de todos os genótipos, em todos os ambientes e sistemas de produção. Elas não dão nenhuma indicação dos rendimentos que podem ser alcançados. Portanto, a comparação dos rendimentos obtidos em várias situações é prejudicada. A produção comercial difere-se do máximo comercial atingível e do máximo experimental ou potencial da cultura (RABBINGE, 1993; WACLAWOVSKY, 2010).

A produtividade máxima teórica para a cana-de-açúcar foi estimada em  $472 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . Entretanto, para níveis comerciais, os valores são 84 a  $148 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , ou inferior, dependendo dos fatores bióticos e abióticos que interferem no sistema (MOORE, 2009). No Brasil, a produção comercial máxima foi medida em  $260 \text{ t ha}^{-1}$ , para cana colhida com 13 meses e o máximo experimental foi avaliado em  $299 \text{ t ha}^{-1}$  (WACLAWOVSKY et al., 2010). Esta produtividade máxima pode variar de acordo com a estrutura arquitetônica da variedade e a incidência de radiação local. Isto porque mais da metade da energia está fora da região fotossinteticamente ativa e as perdas adicionais são associadas à reflexão e transmissão da luz incidente (LONG et al., 2006; MOORE, 2009).

O decréscimo da produtividade deve-se à interferência de fatores limitantes, conforme esquematizado na Figura 1. Os fatores fisiológicos, como arquitetura e características celulares, limitam a produtividade no máximo potencial da variedade. A quantidade de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), água, radiação, temperatura e características dos solos, como salinidade e sodicidade, delimitam o máximo atingível pelas culturas. No entanto, restrições agronômicas como quantidade de plantas infestantes, doenças, deficiência ou excesso nutricional, entre outros, estabelecem a produção atual e que realmente será colhida (RABBINGE, 1993).

Portanto, torna-se fundamental a identificação dos fatores que tenham relação causal com a produtividade da cultura da cana-de-açúcar e, assim, possibilitar a explicação de possíveis variações espaço-temporais na produção relacionada à rentabilidade dos canaviais.

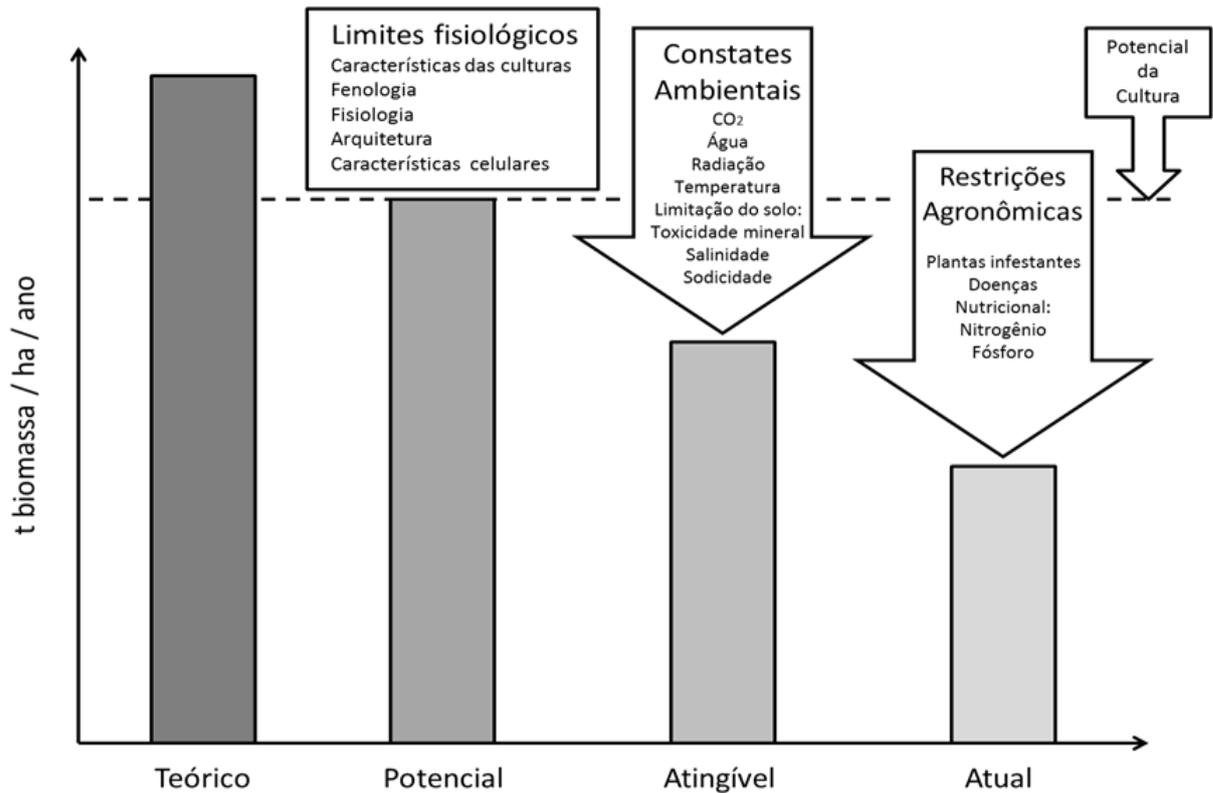


Figura 1: Situações de produção agrícola, com o nível de produção associado aos principais fatores limitantes da produção e os insumos agronômicos com potencial para proteger ou aumentar rendimentos (Adaptado de Rabbinge, 1993).

### 3.2. Fatores controladores da produtividade agrícola simulados pelo modelo APSIM

#### 3.2.1. Fenologia e fisiologia

A planta desenvolve-se em forma de touceira e perfilha abundantemente na fase inicial de desenvolvimento (JAMES, 2004). Ao estabelecer-se como cultura, o autossombreamento induz a inibição do perfilhamento e acelera o crescimento do colmo principal, até a ocorrência de alguma limitação no suprimento de água, temperaturas baixas ou ainda o florescimento, indesejável em culturas comerciais. O número de colmos por planta, a altura, o diâmetro dos colmos, o comprimento e a largura das folhas, assim como a arquitetura da parte aérea, são definidos pelas características varietais, e a expressão destes caracteres é influenciada pelo clima, manejo e práticas culturais utilizadas (RODRIGUES, 1995).

A forma ou fenótipo das variedades comerciais mudou consideravelmente desde os primeiros ancestrais do gênero *Saccharum*. Originalmente era um capim com talos finos que acumulavam pouco açúcar, que evoluiu para colmos mais grossos com entrenós mais suculentos e teores mais elevados de sacarose. A forma de uma planta é frequentemente associada a alterações em elementos reguladores, tais como os genes dos indivíduos. As

características consideradas nos processos de seleção dos programas de melhoramento têm a natureza quantitativa e são controlados por locos. Ou seja, parte dos genes que determinam as características quantitativas, tais como brix (taxa de sólidos solúveis medidos durante o desenvolvimento da planta), teor de sacarose, diâmetro e número de colmos, teor de fibra, resistência às pragas e à floração, precocidade, doenças congênitas e alguns destes locos são associados ao código de tolerância ao estresse da planta (WACLAWOVSKY et al., 2010).

Avaliar o comportamento fenológico das culturas propicia o entendimento e a determinação das épocas de ocorrência de cada fase do período vegetativo (Figura 2) e auxilia a escolha das melhores práticas culturais, como por exemplo, época de plantio mais adequada para cada espécie ou variedade, o que torna este conhecimento indispensável para a elaboração de estratégias de conservação e manejo das culturas (SILVA et al., 2010).

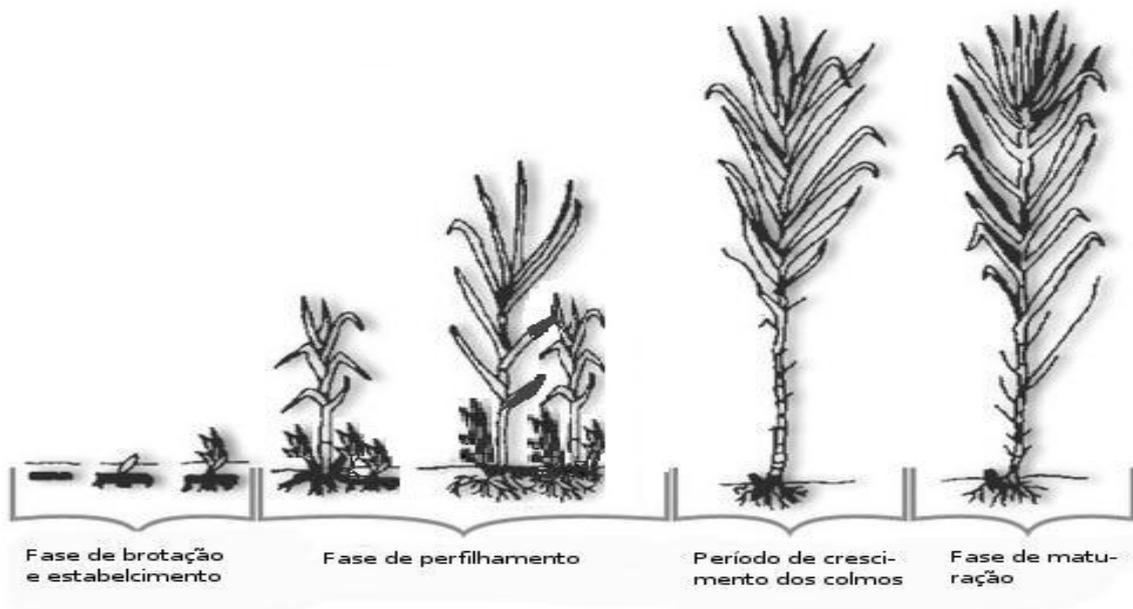


Figura 2: Estádios fenológicos da cana-de-açúcar (Adaptado de Gascho E Shih, 1983).

Um exemplo de característica fisiológica que interfere no potencial produtivo é o florescimento. Este processo é uma característica genética da cana-de-açúcar, entretanto, existem variedades floríferas e não floríferas. O florescimento ocorre naturalmente quando a planta atinge a maturação relativa de desenvolvimento, ou seja, passa de estado vegetativo para reprodutivo (MILLER e GILBERT, 2009). Embora considerada uma característica relevante para o melhoramento genético, o florescimento é indesejável em áreas comerciais, pois, nos processos de formação e emissão da inflorescência, ocorre consumo de sacarose, redução do volume de caldo e, conseqüentemente, aumento significativo nos teores de fibras

totais (ARALDI et al., 2010).

O florescimento apresenta os seguintes prejuízos: o crescimento vegetativo do colmo é paralisado, com evidente perda do rendimento de açúcar; os colmos florescidos diminuem seu rendimento em açúcar, devido à formação da folha bandeira ou flecha; completado seu ciclo vital, o colmo florescido entra em senescência e permite novas brotações. Os prejuízos do florescimento são maiores, quando o colmo ainda se encontra em fase de crescimento; os colmos florescidos não podem ser armazenados no campo, por muitos meses. Portanto, apesar de ocorrer diferenças entre as variedades de cana-de-açúcar, a isoporização resulta em diminuição na porcentagem de caldo em relação à porcentagem de cana, devido ao aumento do teor de fibras. Conseqüentemente, a produção de bagaço é aumentada. Embora o teor de sacarose do tecido isoporizado seja próximo da parte restante do colmo, é de difícil extração pelos métodos convencionais (RODRIGUES, 1995).

Alguns fatores contribuem para o florescimento da cana-de-açúcar tais como: a pré-disponibilidade genética da variedade, idade mínima, fotoperíodo, intensidade luminosa, temperatura, umidade, fertilidade do solo, estado nutricional da planta e altitude. No entanto, o fator crítico é o fotoperíodo, pois, determina o momento da indução floral (ARALDI et al., 2010). Nos períodos fotoindutivos, a variação de temperatura torna-se relevante, pois, quanto maior o número de dias com temperaturas entre 18 °C e 31 °C, melhores serão as condições de florescimento, assim como o bom suprimento de água para as plantas. Os locais de maior propensão para o florescimento se localizam entre as latitudes de 7° e 8°, nas quais há decréscimo do fotoperíodo de 12,8 para 12,3 horas de luz; entretanto, o fotoperíodo exato pode diferir entre as variedades (SILVA et al. 2010).

Alguns minerais possuem relação com o florescimento da cana-de-açúcar. Altas doses de nitrogênio alteram a relação carbono/nitrogênio e, conseqüentemente, reduzem a probabilidade de florescimento. No entanto, quando se combinam altas doses de nitrogênio com a suspensão da irrigação, em períodos adequados, os níveis de florescimento são ainda menores. No caso do potássio, altas dosagens aumentam os índices de florescimento de algumas variedades e diminuem em outras (ALEXANDER, 1973; ARALDI et al., 2010).

Normalmente, o florescimento é responsável por perdas na produção de cana e também nos teores de sacarose. Mas, existem alguns resultados controversos. Em anos com alto florescimento, a sacarose, o brix, a pol e a pureza são menores que em anos de baixo florescimento. Após a paralisação no desenvolvimento, causada pelo florescimento, a sacarose é catabolizada em glicose (dextrose) e frutose (levulose). O efeito do florescimento manifesta-se nos seis entrenós superiores e ocorre diminuição de 17% no total de caldo extraído. Nas

plantas florescidas, embora haja um teor 6,64% maior de sacarose aparente, a quantidade total de sacarose extraída é 5% menor, devido ao aumento do teor de fibras no colmo.

### **3.2.2. Condições ambientais**

Os fatores relacionados ao ambiente de produção, como por exemplo, CO<sub>2</sub>, água, radiação, temperatura, limitações dos solos, salinidade e sodicidade, são características que delimitam a produtividade máxima atingível pelas culturas (RABBINGE, 1993).

No caso da cana-de-açúcar, a cultura possui boa adaptabilidade ao tipo de solo e às condições climáticas. Exige precipitações durante o ciclo vegetativo de 1500 a 2500 mm (DOOREMBOS e KASSAN, 1979). Inman-Bamber e Smith (2005) mostraram que a precipitação de 1000 mm é suficiente para atingir produtividades elevadas, se distribuída adequadamente ao longo do ciclo produtivo, com restrição hídrica apenas no período de indução da maturação.

Segundo Liu et al. (1998), a temperatura adequada para o crescimento vegetativo está entre 25 e 33°C. Para Ebrahim et al. (1998) o ótimo para a produção de cana-de-açúcar é 27°C, sendo 15°C o limite inferior e 45°C o superior. Os maiores rendimentos da cana-de-açúcar ocorrem entre as temperaturas de 25 e 35° C (CLEMENTS, 1980).

Marin et al. (2011) adotaram o valor de 10°C como temperatura base, para o perfilhamento de cana de açúcar no Brasil, temperatura abaixo da qual o desenvolvimento da cultura é considerado nulo, em trabalho de parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO. No modelo APSIM - Sugarcane, utiliza-se a temperatura base de 9°C, a ótima de 32°C e a máxima de 45°C, para os cálculos dos graus-dia nos estádios de desenvolvimento e expansão da copa (KEATING et al., 1999). Para a cana-de-açúcar, a temperatura base pode variar entre 8 e 15° C (INMAN-BAMBER, 1994; ROBERTSON et al., 1998).

A deficiência hídrica, os baixos níveis de radiação solar, além das temperaturas extremas são fatores limitantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER, 2004; SMITH e SINGELS, 2006). Os países de maior relevância para a produção de cana-de-açúcar localizam-se entre as latitudes 36,7° Norte e 31,0° Sul (Figura 3).

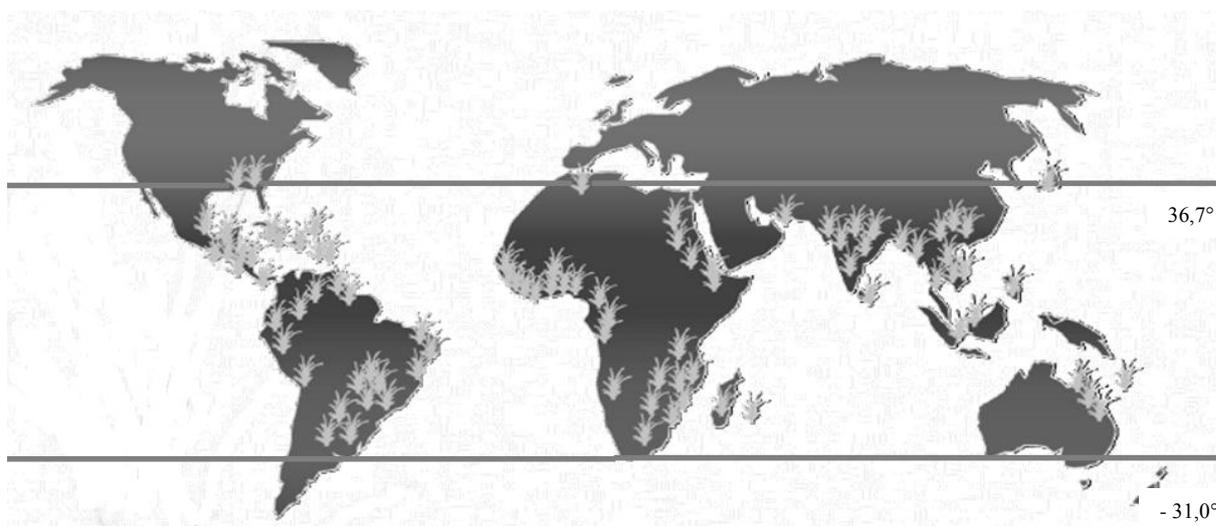


Figura 3: Distribuição da cana-de-açúcar no mundo (Adaptado de UNICA, 2012).

O desenvolvimento do dossel é determinado essencialmente pela temperatura e radiação. Entretanto, outros fatores, como características genéticas das variedades escolhidas, densidade de plantio, e estados hídrico e nutricional podem influenciar a produtividade final do canavial (SINGELS et al., 2005).

O crescimento das plantas depende da transformação das energias luminosa e química, na qual a intensidade é diretamente proporcional à interceptação da luz capturada pelo dossel da cultura (SMITH e SINGELS, 2006). A eficiência do crescimento da cultura é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada e, posteriormente, convertida em matéria seca, na qual o uso eficaz no processo de fotossíntese promove a acumulação de biomassa na planta (SINCLAIR et al., 2004).

As relações hídricas desempenham papel importante no alongamento dos perfilhos, assim como no crescimento dos colmos da cana-de-açúcar, principalmente na fase final de desenvolvimento (RAMESH e MAHADEVASWAMY, 2000). A cana-de-açúcar sob déficit hídrico sofre redução no alongamento do colmo e menor desenvolvimento foliar (INMAN-BAMBER, 2004). A cultura possui maior suscetibilidade à deficiência hídrica quando as plantas estão na fase de alongamento dos colmos, o que causa prejuízos na produção de fitomassa e no rendimento final de sacarose (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

O crescimento da cultura e o alongamento celular estão diretamente ligados ao nível de umidade do solo. Quanto maior a disponibilidade hídrica no solo maior o crescimento da cultura. Ao contrário, quanto maior a deficiência hídrica, maior será a formação de nós e entrenós curtos, o que diminui drasticamente o volume de parênquima para armazenamento de sacarose (CÂMARA, 1993).

### 3.2.3. Restrições agronômicas

O aumento da produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e eletricidade no Brasil, ao longo dos anos, ocorreram principalmente pelo aumento na produtividade e não somente pelo aumento da área plantada. A cultura mostrou aumento significativo na produtividade devido ao aporte tecnológico, que inclui o uso de fertilizantes, novas técnicas de manejo, entre outros fatores, observado na Figura 4 (ROSSETTO et al., 2010b).

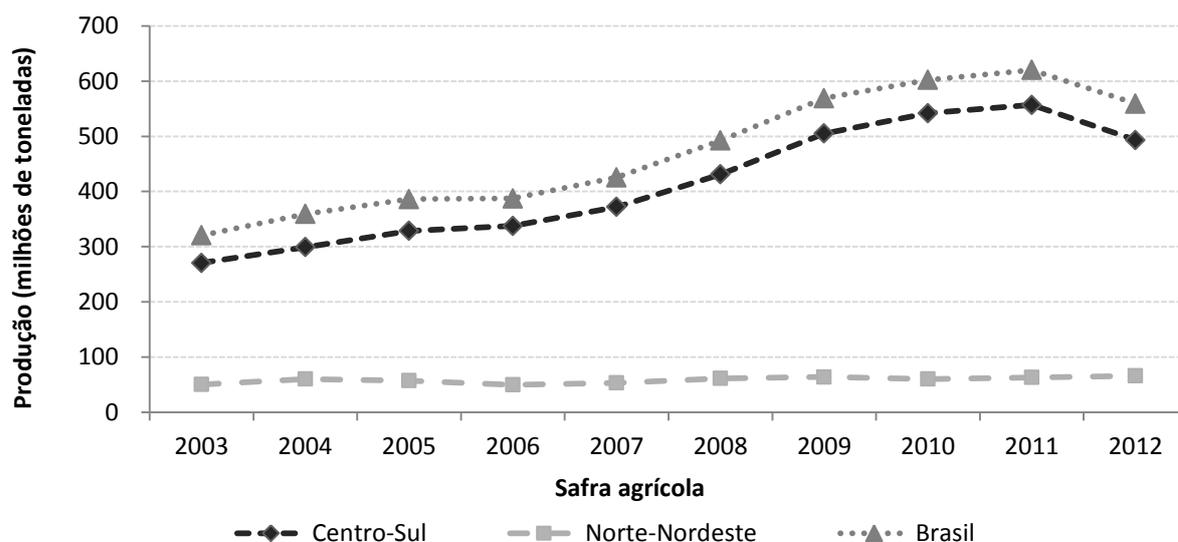


Figura 4: Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil, nas regiões Centro-Sul e Norte-Nordeste, de 2003 a 2010 (UNICA, 2012).

No Brasil, o estado de São Paulo destaca-se como maior produtor de cana-de-açúcar, com 4,37 milhões de hectares plantados na safra 2011/2012, aproximadamente 52,2% dos canaviais brasileiros (CONAB, 2011). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 20 anos de safra, de 1990 a 2009, a produtividade média da cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, aumentou em  $10 \text{ t ha}^{-1}$ . Entretanto, na comparação com o máximo produtivo teórico, observa-se déficit de 300 a  $400 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IBGE, 2011).

A carência ou o excesso de um nutriente pode proporcionar efeitos semelhantes em diferentes espécies vegetais, pois, os nutrientes possuem funções semelhantes. Entretanto, normalmente ocorrem efeitos distintos entre as espécies, assim como dentro das mesmas variedades. Esta diferenciação deve-se à expressão genética individual. Novas variedades de cana-de-açúcar apresentam eficiências nutricionais distintas, com respostas diferentes a determinados nutrientes. A observação dos efeitos da omissão dos nutrientes auxilia na maximização dos lucros da atividade canavieira (VALE et al., 2011).

A ordem de absorção de minerais para a cana planta é:  $N \geq K > Ca > Mg \geq S > P$  em Latossolo Vermelho;  $K > N > Ca > Mg > S > P$  em Latossolo Vermelho Férreo e  $K > N > Ca > Mg > P \geq S$  para Argissolos. Em cana-soca, a ordem é:  $K > N > Mg > Ca > S > P$  em Latossolo Vermelho;  $K > N > Mg > Ca \geq P > S$  em Latossolo Vermelho Férreo e  $K > N > Mg > Ca > P > S$  em Argissolos (ORLANDO FILHO, 1983). Observa-se que na cana-planta o pico de absorção, para a maioria dos elementos minerais, ocorre a partir de nove meses após o plantio. Já na cana-soca, a maior absorção acontece nos primeiros seis meses após a rebrota (RODRIGUES, 1995).

#### 3.2.4. Nitrogênio

Os sintomas de deficiência de nitrogênio aparecem primeiramente nas folhas mais velhas e, posteriormente, a deficiência aparece nos tecidos mais jovens, com os seguintes sintomas: clorose ou amarelecimento uniforme das folhas mais velhas, que podem secar ou se tornarem avermelhadas e, como consequência, causa a morte prematura destes tecidos afetados. As raízes se tornam mais compridas, entretanto, o diâmetro é relativamente menor que as raízes com suprimento adequado deste nutriente (SILVA e CASAGRANDE, 1983).

O nitrogênio é encontrado em apenas 1% da matéria seca total da cana-de-açúcar, entretanto, se houver deficiência, a planta apresenta redução na síntese de clorofila, aminoácidos essenciais, da energia necessária à produção de carboidratos e das estruturas carbônicas. As plantas submetidas à escassez ou omissão total de nitrogênio apresentam além de amarelecimento gradual das folhas, um crescimento vegetativo considerado raquítico (VALE et al., 2011).

Segundo Vitti et al. (2008), a resposta da cana-soca ao nitrogênio é maior que a obtida na cana-planta. Entretanto, na comparação entre cana de ano (ciclo de 12 meses) e de ano e meio (ciclo de 18 meses), a primeira obteve respostas melhores à adubação nitrogenada. A ausência de resposta da cana-planta é atribuída à fixação biológica de nitrogênio atmosférico, assim como à maior mineralização do nitrogênio no preparo do solo, pois, ocorre em condições climáticas favoráveis (temperatura e umidade elevadas). O sistema radicular da cana-planta é mais vigoroso, portanto, a eficiência de utilização de nitrogênio do solo é superior à obtida na cana-soca (TRIVELIN, 2000).

A adubação da cana-planta com nitrogênio no sulco de plantio depende do histórico da área. Se houver consórcio com leguminosa, a aplicação de N pode ser dispensada (RIPOLI et al., 2007). No sistema de sucessão de culturas entre cana-de-açúcar, mucuna preta (*Mucuna aterrimia*) e crotalária (*Crotalaria juncea*), a adubação verde propiciou acréscimo de 25 e 27 t

de cana  $\text{ha}^{-1}$ , assim como acréscimo de 3,0 e 3,2 t de açúcar  $\text{ha}^{-1}$ , quando comparados à testemunha sem adubo verde (MASCARENHAS et al., 1994).

A supressão de N provoca menor crescimento das plantas de cana-de-açúcar na redução de 92% da massa da matéria seca da parte aérea, 83% das raízes e 91% da planta inteira. O decréscimo nas taxas de crescimento das plantas se deve à diminuição da concentração de proteínas e da atividade da redutase de nitrato propiciada pela deficiência de N (VALE et al., 2011).

A produção de palha de um canavial colhido mecanicamente, que adiciona as folhas, as bainhas e o ponteiro, além de quantidade variável de pedaços de colmo, pode acrescentar de 10 a 30  $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de matéria seca. Esse material contém de 40 a 80  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de nitrogênio, que estará disponível para a cultura após a mineralização (TRIVELIN, 2000).

Segundo Rossetto et al. (2010a), aproximadamente 50% do nitrogênio total extraído pela cana-de-açúcar é exportado pelos colmos e, portanto, removido do campo, na qual a produção destes colmos nas soqueiras em função da adubação nitrogenada é elevada, observado na Figura 5. A mineralização do nitrogênio é lenta, portanto, a resposta à adubação nitrogenada é alta mesmo em presença da palhada.

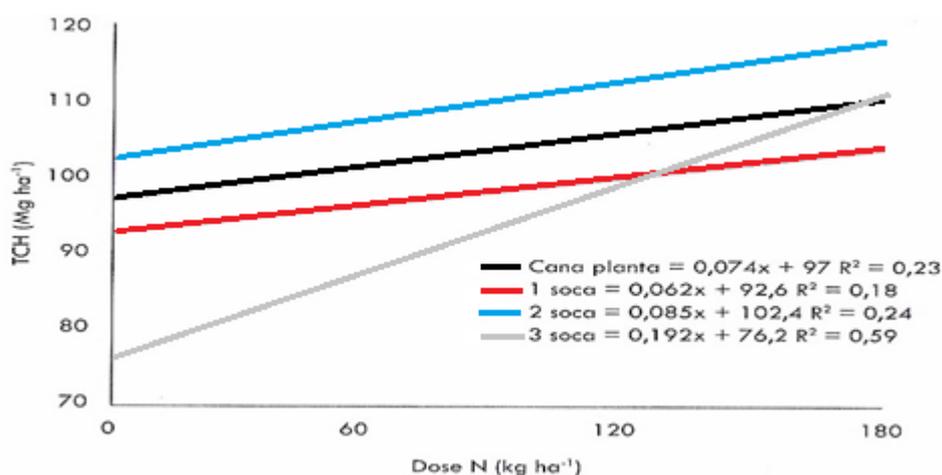


Figura 5: Efeito da aplicação de N-fertilizante na produtividade de colmos (TCH), em diferentes ciclos de crescimento da cana-de-açúcar no manejo irrigado. (Wiednfeld e Enciso, 2008).

O nitrogênio eleva o comprimento dos colmos da cana-de-açúcar, entretanto, o aumento da concentração deste elemento faz as paredes celulares ficarem mais delgadas e, como consequência, as paredes do colmo ficam tão finas, principalmente na região mediana, que acabam se rompendo, indicando diminuição na porcentagem de fibras nas plantas (SILVA e CASAGRANDE, 1983). O excesso de N no período de maturação proporciona o

crescimento vegetativo exagerado, provocando o acúmulo de açúcares nos vacúolos dos colmos, diminuindo a qualidade em termos de conteúdo de sacarose (RODRIGUES, 1995).

O excesso é indesejável, pois, induz a planta ao crescimento vegetativo excessivo, demonstrado na Figura 6. A maturação é atrasada e a qualidade da matéria prima prejudicada devido à diminuição dos teores de sacarose dos colmos (RODRIGUES, 1995; ROSSETTO et al., 2010b).

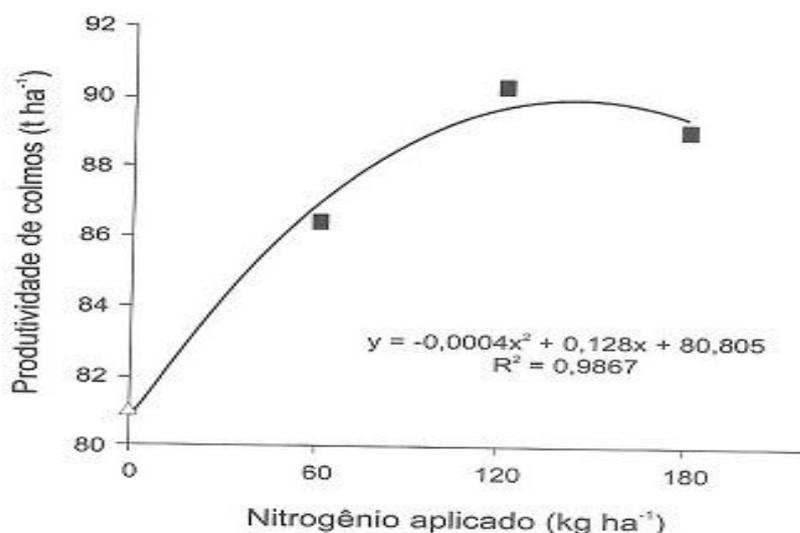


Figura 6: Produtividade da cana-de-açúcar em resposta a doses de nitrogênio em presença de palhada; média de 15 experimentos (Rossetto et al., 2010b).

### 3.2.5. Déficit hídrico e irrigação

O estresse hídrico impossibilita a obtenção de condições adequadas de sobrevivência para os vegetais, induz a transformações e respostas em todos os níveis funcionais dos organismos. Estas alterações são reversíveis a princípio, mas podem se tornar permanentes (LARCHER, 2000).

O déficit hídrico interfere negativamente em vários aspectos do crescimento vegetal, como tamanho das plantas, área foliar e produtividade da cultura. O grau de injúria depende do estágio fenológico da planta e do tempo de duração do estresse. Esta deficiência impede a divisão, o crescimento e a diferenciação celular (FARIAS et al., 2008).

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia com o estágio vegetativo e a variedade utilizada, sendo considerada função da área foliar, estágio fisiológico e densidade radicular (RAMESH e MAHADEVASWAMY, 2000; SMITH e SINGELS, 2006). O estresse hídrico nos períodos três e quatro, de 257 a 272 e 302 a 347 dias após o plantio, reduziu de 8,3 a 15% o rendimento da cultura (WIEDENFELD, 2000). Para a região de Piracicaba, SP, em sistema

irrigado, observou-se aumento de 20 t ha<sup>-1</sup> na primeira soca, que corresponde a um acréscimo de 16% em relação à cana não irrigada (DANTAS NETO et al., 2006).

Em condições de déficit hídrico, as variedades apresentam inúmeras modificações morfológicas, como enrolamento das folhas e modificação no ângulo de inserção, redução da área foliar, da transpiração, da condutância estomática, aumento da condutividade hidráulica das raízes e do conteúdo de carboidratos solúveis e aminoácidos livres, também podem ocorrer modificações nas atividades enzimáticas, contudo, ocorrem principalmente alterações nas taxas fotossintéticas, pois, estas são limitadas pela restrição da abertura dos estômatos diante a deficiência hídrica (LANDELL et al., 2010).

Os principais efeitos morfofisiológicos causados por déficit hídrico na cana-de-açúcar são: fechamento dos estômatos, redução no crescimento, senescência foliar, alteração no sistema radicular, ajustamento osmótico e, principalmente, alterações na fotossíntese (SILVA e PINCELLI, 2010). A fotossíntese é vital para as plantas e, em condições de déficit hídrico, este processo é comprometido, pois, a produção de carboidratos decresce, impossibilitando seu armazenamento, dificultando a respiração e o crescimento dos vegetais (RAE et al., 2005; SINGELS et al., 2005).

Um efeito relevante e considerado como resposta ao déficit hídrico é a limitação do crescimento das folhas, uma primeira defesa contra a seca. O estresse hídrico também impede o surgimento de novas folhas, pois, provoca elevação na síntese e sensibilidade ao hormônio etileno e, concomitantemente, aumenta a concentração do ácido abscísico, que provoca a queda das folhas (FARIAS, 2008). O fator época de colheita está diretamente relacionado ao déficit hídrico, no qual o menor déficit é observado nos canaviais de ciclo de outono, sofre acréscimo no ciclo de inverno e meio de safra e assume proporções restritivas no final, no ciclo de primavera (LANDELL et al., 2010).

Outros fatores são importantes na redução da produtividade da cana-de-açúcar, como plantas infestantes, pragas e doenças, outros nutrientes como fósforo, potássio, assim como calagem e gessagem. Entretanto, não fizeram parte da revisão por não serem fatores simulados para o experimento realizado no APSIM.

### 3.3. Matéria orgânica no sistema solo-planta-atmosfera

Em ecossistemas naturais, há estreita relação entre a cobertura vegetal e os sistemas físico, químico e biológico do solo. Essa relação deve-se à ciclagem de nutrientes, proporcionada pela relação harmônica entre formação e decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), indispensável para a manutenção da micro e mesofauna do solo (RESCK, 1996).

Os principais responsáveis por esses processos são os microrganismos do solo, como fungos, bactérias e algas, que formam a biomassa microbiana e estão em constante renovação. Esta biomassa pode funcionar tanto como fornecedor quanto dreno de nutrientes, pois, podem mineralizar ou imobilizar estas substâncias essenciais ao desenvolvimento das plantas (FERREIRA et al., 2007).

A MOS apresenta 58% de carbono e é composta por folhas e raízes mortas, produtos em decomposição e subprodutos, como os ácidos poliurônicos que auxiliam na estrutura do solo, e substâncias húmicas. A decomposição da MOS pode ser responsável por parte do nitrogênio fornecido às plantas (PRIMAVESI, 1979). A ciclagem dos nutrientes é interrompida fisicamente com as operações de preparo do solo e alterada quimicamente pela adição de corretivos e fertilizantes, pois, aceleraram ou retardam os processos de formação, decomposição e, conseqüentemente, a ciclagem da MOS no sistema (RESCK, 1996).

A bioestrutura e a produtividade das culturas se baseiam na presença de MOS em decomposição ou humificado (PRIMAVESI, 1979). A transformação de espaços naturais em cultivos agrícolas e pastagens alteram as características físicas e químicas dos solos. Como consequência, têm-se a degradação da área, com diminuição da fertilidade, aumento da compactação, fracionamento dos agregados, comprometimento da infiltração de água no solo e crescimento inadequado do sistema radicular (BERTOL et al., 2001; BRONICK e LAL, 2005). O uso de sistemas de manejo, com o revolvimento mínimo do solo, favorece o incremento da matéria orgânica, assim como a estruturação do solo (JOHNSON e KERN, 1993; BAYER e BERTOL, 1999). A decomposição da MOS resulta em perdas de carbono (C) e nitrogênio (N) na forma de gases como o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e na transferência de subprodutos e ou resíduos para o solo, como por exemplo, ácidos húmicos e fúlvicos (PROBERT et al., 1998; THORBURN et al., 2001).

De acordo com Bronick e Lal (2005), os sistemas de manejo que reduzem a taxa de decomposição de resíduos vegetais, diminuem as emissões de CO<sub>2</sub> e ocasionam aumento no estoque de C no solo. Portanto, o manejo inadequado pode reduzir rapidamente os estoques de C e, conseqüentemente, contribuir no aumento das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (JANZEN et al., 1998; CORAZZA et al., 1999). O sequestro de C no solo possui papel

ambiental relevante, pois, ambientes terrestres são apontados como alternativas mitigadoras para as mudanças climáticas (ASSIS et al., 2006).

A compreensão da dinâmica do C e do N no sistema solo-planta-atmosfera contribui para a melhoria das práticas de gestão da produção de cana-de-açúcar, principalmente agora que a prática tradicional da despalha a fogo será substituída pela colheita mecanizada. Esta prática agrega quantidade considerável de palha no solo e proporciona fertilização orgânica. Conseqüentemente, a dependência por fertilizantes minerais industrializados decresce (OLIVEIRA et al., 2000).

O comportamento dos atributos químicos, físicos e biológicos pode proporcionar diferenças significativas na variação da quantidade de MOS no solo (CZYCZA, 2010). A cana-de-açúcar, por exemplo, pode ser manejada sob dois sistemas de colheita, com ou sem despalha a fogo. Sem fogo, a manutenção do resíduo vegetal pode aumentar significativamente a quantidade de MOS no solo, em função da deposição de 10 a 30 t.ha<sup>-1</sup>. Esta quantidade de palha contém de 40 a 100 kg ha<sup>-1</sup> de N e 3 a 6 t.ha<sup>-1</sup> de C (ABRAMO FILHO et al., 1993; TRIVELIN et al., 1995; NG KEE KWONG et al., 1987).

Com a queima da palhada, quantidades relevantes de N e C são perdidas para a atmosfera na forma de óxidos, como CO<sub>2</sub> e, se os nutrientes contidos na palhada não permanecem no campo, a ciclagem é interrompida (BASANTA, 2004). A MOS superficial pode ser removida do sistema por queima, por seleção, enfardamento ou enleiramento, ou incorporada ao solo durante as operações de preparo da área. A palhada também pode ser transformada, por meio da decomposição em fração biótica, correspondente à fração prontamente disponível ou em fração húmica, composta pelo material de difícil solubilização e disponibilização (PROBERT et al., 1998).

A geração de cargas pelo material orgânico humificado influencia os fenômenos de adsorção no solo. Em consequência, diminuem as perdas de nutrientes devido à formação de complexos e quelatos. Os quelatos são estruturas cíclicas resultantes da união por ligações covalentes coordenadas entre uma molécula orgânica e um átomo metálico, micronutriente ou elemento secundário. Estes compostos húmicos facilitam a disponibilização de nutrientes às plantas, pois formam complexos organo-metálicos com íons que estariam na forma de precipitados insolúveis em pH ácido, comum em solos brasileiros. Na presença da fração fúlvica esses íons ficam mantidos em solução (BRONICK e LAL, 2005).

Os principais fatores de controle da humificação são: temperatura, presença ou ausência de cátions básicos no solo, teor de N e drenagem (CERRI e VOLKOFF, 1988). Estes fatores influenciam a atividade biológica e podem variar conforme o ambiente e ação

antrópica no sistema (MIRANDA, 2007).

A relação entre carbono e nitrogênio (relação C/N) da matéria orgânica fresca incorporada está relacionada à imobilização de N das camadas superiores. Se o suprimento de N mineral for inadequado restringe-se a decomposição da MOS e a absorção de N pelos vegetais devido à imobilização (PROBERT et al., 1998).

A biomassa microbiana constitui de 1 a 4% do total da MOS e está localizada no compartimento lábil da MOS, com variações relacionadas às alterações ambientais, manejo do solo e a ciclagem de nutrientes (MARCHIORI JUNIOR e MELO, 2000). Segundo Probert et al. (1998), o material humificado apresenta-se em estado avançado de decomposição e pode ser representado pelas substâncias húmicas, fracionadas em ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina.

### **3.4. Modelagem de culturas agrícolas**

Os modelos podem contribuir para o aumento do conhecimento antecipatório, funcionando como ferramenta auxiliar às práticas humanas, como agricultura e pecuária (THORNLEY e JOHNSON, 2000). Na utilização de modelos de simulação, parte-se do pressuposto que é possível descrever os processos biológicos por meio de equações matemáticas. Os sistemas são considerados como módulos, com entradas e saídas de matéria e energia, e são formados por compostos que interagem entre si, se autorregulam e são limitados no espaço e no tempo. Embora projetados para representar a dinâmica de funcionamento do sistema solo-planta-atmosfera e interagir concomitantemente com o clima e com as práticas culturais, os modelos não necessariamente descrevem e simulam todos os processos deste sistema (ANDRADE, et al., 2009).

Nos últimos 30 anos, a quantidade de modelos de culturas agrícolas aumentou consideravelmente, principalmente devido ao crescimento da capacidade computacional, que possibilitou o estudo e entendimento de sistemas complexos. Estes modelos são desenvolvidos por razões diferentes, em função do objetivo específico dos seus idealizadores (HEINEMANN et al., 2010). Assim, alguns modelos de culturas são desenvolvidos para melhorar a compreensão das relações entre as variáveis ambientais e tecnológicas de um sistema biológico. Outros podem quantificar o efeito destas variações sobre o rendimento das variedades analisadas. São utilizados como base para organização do conhecimento e como ferramenta para teste de hipóteses. Com o desenvolvimento computacional e aumento da capacidade humana de desenvolver modelos, cresce o interesse na utilização deles com objetivo de determinar as práticas de manejo a serem adotadas, e de auxiliar as tomadas de

decisões dentro dos sistemas agrícolas (CASTRO e KLUGE, 1999).

Modelos agrícolas podem ter duas abordagens distintas, porém, complementares. Uma refere-se aos modelos dinâmicos ou mecanísticos, nos quais são empregados algoritmos para descrever as interações do sistema solo-planta-atmosfera e geram como resultados os valores das variáveis ou dados das saídas dos modelos, com a vantagem de permitir avaliação dos processos intermediários do sistema. A outra abordagem considera os modelos como um conjunto de equações do tipo funções de resposta às variáveis explicatórias e permitem a análise direta do desempenho geral dos modelos (WALLACH et al., 2006).

Os modelos baseados em processos que simulam os sistemas de cultivo obtiveram destaque a partir de 1980. Os modelos agrícolas têm por objetivo principal simular com precisão o rendimento produtivo para ampla gama de condições ambientais e características genotípicas. O escopo deste tipo de modelo inclui as variáveis climáticas e de solo cujas relações afetam significativamente o rendimento das culturas.

O DSSAT (Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia, do inglês Decision Support System for Agrotechnology Transfer) é uma das plataformas de simulação mais conhecidas no mundo. Para a cana-de-açúcar, o DSSAT utiliza o módulo CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008), baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES e KINIRI, 1986), desenvolvido com o intuito de modelar os processos fisiológicos da cana-de-açúcar e o sistema de produção da indústria sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991). O DSSAT contém outro modelo de cana-de-açúcar (CASUPRO), mas que ainda requer desenvolvimento adicional para aplicações práticas (NASSIF, 2010).

O modelo QCANE é outro modelo desenvolvido para cana-de-açúcar pela Bureau of Sugar Experiment Stations (BSES) em Queensland, Austrália. O objetivo da criação do QCANE foi, principalmente, estudar o acúmulo de açúcares e as possíveis formas de maximizar este acúmulo. A ênfase, portanto, foi para a fotossíntese, respiração e particionamento dos fotoassimilados. A alocação e o acúmulo dos fotoassimilados e dos açúcares no colmo são determinados pelo estágio de crescimento, taxa de crescimento e pela temperatura (O'LEARY, 1999).

O Modelo de Sistemas de Cultivo para Pesquisas Operacionais (AUSIM, da sigla em inglês) foi desenvolvido para cultivo em sequeiro em áreas de clima semiárido tropical, com o intuito de simular o desempenho do milho e do sorgo em um sistema de rotação com pastagens, leguminosas ou consócio de espécies vegetais. Além disso, o modelo abrangia o efeito do sistema de plantio direto sem retirada da palhada do solo (MCCOWN e WILLIAMS, 1989).

O AUSIM consiste de um conjunto de modelos de culturas e de solo, envolvendo demandas de nitrogênio, água e fósforo, que correspondem às entradas no período simulado. Neste modelo, o solo e o clima compreendem as configurações básicas de funcionamento. Portanto, as culturas podem estar em pousio, em sistema de rotação ou consorciadas. O solo constitui o centro do processo de simulação e permite estimar os efeitos das rotações ou dos consórcios. Esta é a característica central do AUSIM e de seu sucessor, o modelo APSIM (Simulador de Sistemas de Produção Agrícola, do inglês Agricultural Productions Systems Simulator) (MCCOWN e WILLIAMS, 1989).

O modelo AUSIM foi desenvolvido com quatro objetivos: i) dispor de uma família de modelos de crescimento da cultura com características padronizadas e que compartilhassem as sub-rotinas, mesmos sem uma cultura específica; ii) possuir a capacidade de combinar modelos de crescimento em vários sistemas de cultivo; iii) melhorar a modelagem de culturas; e iv) aprimorar os modelos chave para os processos do solo (MCCOWN, 2012).

### **3.5. O modelo APSIM**

O APSIM é um programa utilizado para modelagem de processos, que foi desenvolvido pela Unidade de Pesquisa em Sistemas de Produção Agrícola (APSRU), na Austrália, grupo colaborativo estabelecido no Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). O APSIM foi projetado como um simulador de sistemas agrícolas que possui como característica combinar a estimativa de rendimento das culturas, com a previsão das possíveis consequências das práticas agrícolas sobre os recursos do solo, como a dinâmica da matéria orgânica no solo, acidificação e erosão (KEATING et al., 2003). Possui a finalidade de simular processos biofísicos em sistemas agrícolas, visando eficiência econômica e conservação ambiental nas práticas de gestão e tomadas de decisões, face os riscos envolvidos na agricultura. O modelo tem sido utilizado para projetar sistemas agrícolas para a produção com o objetivo de gestão, avaliação da previsão climática, gestão e análise da cadeia de suprimentos em atividades do agronegócio, desenvolvimento de diretrizes para gestão de resíduos, avaliação dos riscos nas decisões político-governamentais e como um guia para atividades de pesquisa e educação (KEATING et al., 2003).

O software que carrega o APSIM proporciona uma estrutura flexível para simulações climáticas, de manejo dos solos, no crescimento das culturas em diferentes sistemas agrícolas e para prever as possíveis alterações nos recursos do solo (PROBERT et al., 1998). O modelo também é capaz de simular o crescimento vegetativo, o acúmulo de nitrogênio (N) e de açúcares, o consumo de água, os pesos seco e fresco, com diferenciação entre estádios

fenológicos. Para cana-de-açúcar, também há diferenciação entre cana-planta e cana-soca. Os fatores avaliados são respostas ao clima, manejo, solo e fatores genéticos (KEATING et al., 1999). A estrutura para modelagem no APSIM é constituída pelos seguintes módulos: i) módulos contendo os algoritmos de simulação dos principais processos biológicos e físicos dos sistemas agrícolas; ii) módulos de gerenciamento de regras de manejo e caracterização do cenário a ser simulado; c) módulos de entrada e saída de dados; d) módulo de controle do fluxo de informações entre os módulos independentes. Estes elementos podem ser representados por um comando central e seus módulos anexos (Figura 7).

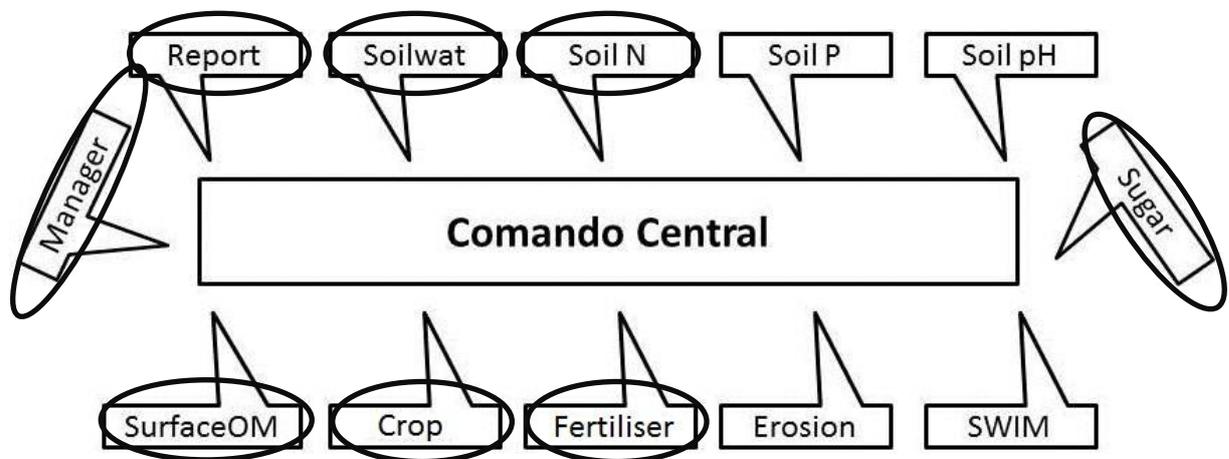


Figura 7: Esquema geral do modelo APSIM com os módulos principais e, em destaque, os utilizados na calibração para a variedade brasileira SP80-1842 (Adaptado de Keating et al., 2003).

O APSIM inclui um sistema de simulação genérico que somente pode ser aplicado em situações nas quais os módulos biofísicos estão disponíveis. O modelo contém uma matriz de módulos para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade dos sistemas agrosilvopastoris, assim como as possíveis interações com os outros modelos de solo e clima. Dentre os mais de 65 módulos disponíveis, tem-se o da cultura da cana-de-açúcar (KEATING et al., 2003). O fluxograma da Figura 8 descreve o módulo Sugar do APSIM e foi adaptado de Keating et al. (2003). O modelo possui parâmetros gerais para os solos que podem ser alterados de acordo com o local de interesse.

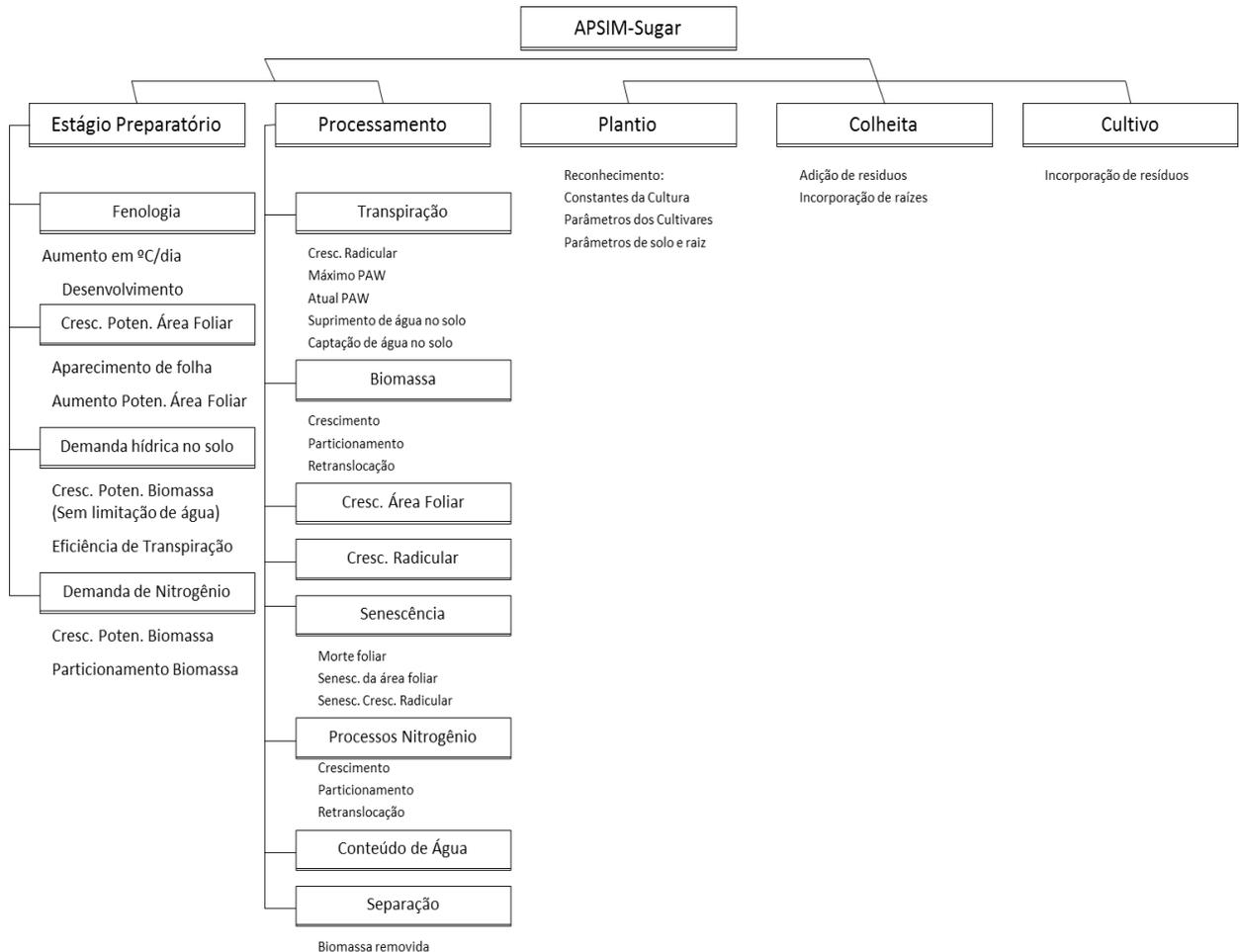


Figura 8: Descrição do módulo APSIM-Sugarcane (Adaptado de Keating et al. 2003).

### 3.5.1. Relações entre as variedades e o modelo APSIM-Sugarcane

No modelo APSIM, os cálculos são realizados em etapas, de acordo com o estágio fenológico, ou entre os diferentes ciclos da cultura. Por exemplo, são realizados cálculos distintos entre cana-planta e cana-soca dentro do mesmo módulo APSIM-Sugarcane.

Os arquivos no APSIM encontram-se um arquivo de texto com dados, externo ao programa principal. O módulo APSIM-Sugarcane pode ser utilizado para simular o desenvolvimento vegetal da cana-de-açúcar, concomitantemente ao desenvolvimento de outras espécies vegetais, ou em outros contextos diferentes de manejo, clima ou tipo de solo. Neste módulo, existem cinco categorias distintas, contendo elementos básicos da caracterização ambiental, informações genotípicas e das variedades (Tabela 1).

Tabela 1: Categorias dos arquivos INI do APSIM-Sugarcane (Adaptado de APSIM-Sugarcane Wiki, 2012).

<i>Basic parameters</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limites inferiores e superiores para os dados de clima e variáveis físicas de solo, como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e ponto de saturação (utilizados em todos os tipos de simulações).</li> </ul>
<i>Plant_crop</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atributos de crescimento e particionamento dos fotoassimilados.</li> <li>• Fatores para temperaturas baixas e geadas.</li> <li>• Atributos de uso da água e fatores de estresse para água e temperatura.</li> <li>• Teores de nitrogênio (N) e fator de estresse para N.</li> </ul>
<i>Ratoon_crop</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesmos atributos utilizados no <i>Plant_crop</i> com possibilidade de alteração para diferenciação entre cana-planta e cana-soca.</li> </ul>
<i>Cultivar plant crop</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atributos de desenvolvimento foliar</li> <li>• Fenologia.</li> <li>• Atributos de particionamento de sacarose nos colmos</li> </ul>
<i>Cultivar ratoon crop</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesmos atributos estabelecidos no <i>Cultivar plant crop</i>, com possibilidade de alteração para diferenciação entre os ciclos de cana-planta e cana-soca.</li> </ul>

Os componentes do modelo, segundo Keating et al. (1999) são: eficiência do uso da radiação (RUE, da sigla em inglês), interceptação de radiação incidente, biomassa, particionamento da matéria seca e dos fotoassimilados. A RUE condiciona o acúmulo de peso seco na cultura e pode sofrer redução por temperaturas extremas, excesso ou escassez de água no solo ou por limitação de nitrogênio utilizado na fotossíntese. As folhas localizadas na parte aérea das plantas são responsáveis por interceptar a radiação incidente. O aumento da área foliar ocorre em função do tempo e da temperatura. A redução também ocorre pelo tempo decorrido e por variações na temperatura. A biomassa pode ser dividida em vários compartimentos (folhas, meristema apical, folhas imaturas, colmo, raízes e açúcares, sacarose), em função do estágio fenológico da planta. A absorção de nitrogênio é simulada, assim como retorno de C e N para o solo por meio das raízes e da palhada. O modelo permite identificar e avaliar algumas diferenças encontradas entre cana-planta e cana-soca. O particionamento da matéria seca é realizado em cinco compartimentos (raiz, biomassa abaixo do solo; folhas; colmos, parte estrutural que pode ser moída; bainha da folha e meristema apical; teor de sacarose nos colmos).

Segundo Keating et al. (1999), no período entre a emergência e o início do crescimento da planta, a biomassa acima do solo é particionada entre a folha e o meristema apical, sendo que 63% da biomassa vai para as folhas e 37% para o meristema apical. Após o crescimento do caule, 70% da biomassa é direcionada para o colmo. Posteriormente, a

biomassa é dividida entre estrutural e sacarose.

Nas áreas comerciais, a medida de produção é realizada a partir do peso fresco de colmos e da concentração de sacarose. A variação genotípica é definida por parâmetros genotípicos específicos, que definem o desenvolvimento da planta e o particionamento dos assimilados.

Para descrição do desenvolvimento fenológico são considerados cinco estágios: plantio à brotação, brotação à emergência, emergência ao começo do crescimento da cana, crescimento ao florescimento e florescimento até o fim do ciclo da cultura. Na cana-planta são necessários 350 graus-dia para brotação e na cana-soca 100 graus-dia. Os brotos crescerão pela superfície do solo numa taxa de 0,8 mm por grau-dia. O tempo térmico entre a emergência e o começo do crescimento do colmo é específico para cada variedade, podendo variar entre 1200 graus-dia a 1800 graus-dia.

A cana produz flores e o número de colmos que podem florescer varia muito no campo. O modelo APSIM-Sugarcane foi desenvolvido para incluir o florescimento como um estágio fenológico, entretanto, nas simulações para cana-de-açúcar no Brasil, esta etapa foi desativada.

A base experimental do algoritmo de expansão da copa está descrita em Robertson et al. (1998). O índice de área foliar verde é o produto da área verde foliar por colmos e o número de colmos por unidade de área. Os perfis de área foliar são parâmetros pertencentes específicos aos coeficientes genotípicos. Segundo Robertson et al. (1998), a emergência das primeiras folhas necessitam de 80 graus-dia, enquanto que para a quadragésima folha são necessários 150 graus-dia. Tais respostas são reproduzidas no modelo para cana-soca e cana-planta, por meio de interpolação linear (KEATING, et al. 1999).

O número de colmos aumenta rapidamente até atingir o pico durante os primeiros 1400 graus-dia após a emergência; posteriormente, diminui até um número estável de colmos. Na cana-soca, o número máximo de colmos é atingido em tempo inferior ao da cana planta. O modelo é concebido para atingir um número final de colmos constante, que pode ser definido pelo usuário e diferenciado entre cana-planta e cana-soca.

A taxa diária de senescência de folhas verdes é calculada por fatores como envelhecimento, competição por luz, estresse hídrico e geada. Para evitar competição por luz, o modelo não permite mais que um número pré-definido de folhas verdes totalmente expandidas por colmo. A simulação induz a senescência quando a fração da radiação interceptada supera 0,85.

O estresse hídrico induz a senescência assim que o fator de déficit hídrico para a

fotossíntese atinge níveis inferiores a 1,0. Com a temperatura mínima de 0°C, o índice de área foliar sofre redução de 10% por dia. Quando a temperatura atinge -5°C ocorre falência total dos tecidos.

### 3.5.2. Balanço de água no solo e o módulo SOILWAT do APSIM

Segundo Keating et al. (2003), os módulos no APSIM para a modelagem do balanço hídrico no solo (módulo SoilWat) são: camada em cascata (do inglês *tipping bucket*) e pelo método de Richard. A abordagem das camadas do perfil em cascata está descrita em PROBERT et al. (1998). O módulo é operado em passo de tempo diário, com as características de solo baseadas no limite inferior da água disponível ou ponto de murcha permanente, medido em 15 atmosferas (LL15, da sigla em inglês), limite superior da água disponível ou capacidade de campo, em 0,33 atmosferas (DUL, da sigla em inglês) e saturação ou ponto de saturação do solo (SAT, da sigla em inglês), que representa o conteúdo volumétrico de água no solo, em cada camada, o parâmetro Air-Dry é o ponto de solo seco, inferior ao ponto de murcha permanente.

O movimento da água no SoilWat é descrito utilizando algoritmos específicos para o fluxo saturado ou insaturado, assumidos como unidimensionais por não considerar fluxo lateral. Outras características são: a) efeitos dos resíduos superficiais e da cobertura da cultura sobre a modificação do escoamento e redução da evaporação potencial do solo; b) pequenos eventos de chuva são perdidos como a primeira etapa da evaporação, em vez disso, ocorre um lento processo de evaporação; c) especificação do coeficiente de evaporação, identificado no modelo como “cona”, parâmetro que oferece mais flexibilidade para descrever as diferenças de solo com secagem em longo prazo, devido à textura do solo e efeitos ambientais.

O módulo SoilWat (Figura 9) é conectado com os módulos de resíduos e colheita de modo que a simulação do balanço hídrico do solo responde a alterações no estado dos resíduos na superfície e também à cobertura do solo pelas culturas (cultivo do solo, decomposição e crescimento da cultura). Os resíduos na superfície inibem o transporte de água ao longo da superfície do solo durante uma chuva. A amplitude do efeito do escoamento é especificado por uma cobertura superficial limítrofe (CNCov), acima da qual não há nenhum efeito da precipitação no escoamento superficial.

O escoamento superficial (runoff) é calculado apenas para precipitações de intensidade elevada. Portanto, chuvas esporádicas fracas e irrigação são consideradas de baixa intensidade e não entram na contabilidade do runoff.

Os fluxos de solutos também são simulados por algoritmos nos quais a água que entra

no sistema e os solutos são totalmente misturados com as soluções presentes nas camadas inferiores obtendo-se as concentrações de cada camada. Fatores de eficiência do fluxo ( $flux\_eff$  e  $flow\_eff$ ) são especificados no arquivo INI - SoilWater para ajustar a eficácia da mistura tanto para os fluxos saturados ou insaturados.

Fluxo insaturado pode ocorrer tanto em direção à superfície quanto para baixo, mas não pode mover a água para fora da camada mais profunda do perfil. O fluxo entre camadas adjacentes deixa em um gradiente de água no solo ( $gravity\_gradient$ ) também especificado no arquivo INI SoilWater.

Quando o conteúdo de água, em qualquer camada, está acima do DUL, uma fração da água é drenada para a camada mais profunda próxima a cada dia, conforme descrito pela Equação 1.

$$\text{Flux} = \text{SWCON} \times (\text{SW} - \text{DUL}) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: Flux é a quantidade de água em mm que passa de um perfil para outro.

SWCON é porcentagem de água acima da capacidade de campo que passa de uma camada para outra logo abaixo, no período de vinte e quatro horas.

SW é a quantidade de água no solo, no momento das simulações.

DUL é a capacidade de campo.

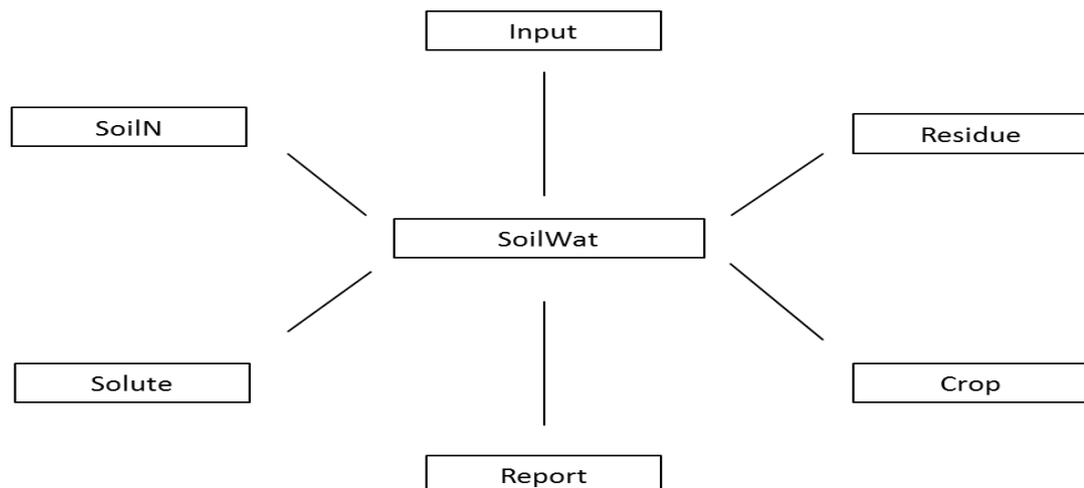


Figura 9: Diagrama que mostra a comunicação entre o módulo SoilWat e outros módulos do APSIM (Adaptado de APSIM Wiki, 2012).

### 3.5.3. O módulo SURFACEOM do APSIM e a relação com a matéria orgânica do solo

Segundo Probert et al. (1999) e Thorburn et al. (2001), os resíduos orgânicos superficiais (SurfaceOM na sigla em inglês) são definidos no modelo APSIM em termos de massa ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), relação C/N, relação C/P, fração estável e por tipo de resíduo. Para cada resíduo define-se a fração de carbono total, área específica ( $\text{ha kg}^{-1}$ ), taxa de decomposição diária, composição mineral, teores em partes por milhão (ppm) de  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$  e  $\text{PO}_4$  e as frações diárias de C, N e P em cada porção da matéria orgânica fresca (FOM da sigla em inglês). Ou seja, definem-se as quantidades presentes nos carboidratos, celulose e na lignina. Cada componente é mantido separado para o cálculo da relação C/N, decomposição diária e área específica. Os processos que fazem parte do módulo SurfaceOM estão representados na Figura 10.

Os dados de saída do modelo são valores referentes à mistura de materiais orgânicos na superfície ou a componentes específicos. Esta especificidade possibilita a determinação da taxa de absorção vegetal para cada componente. Entretanto, a cobertura efetiva total é calculada a partir da utilização dos dados de todos os componentes presentes na superfície. O resultado é utilizado para calcular os efeitos do material superficial na evaporação do solo e no escoamento superficial.

Se um determinado tipo de MOS possui componentes inorgânicos solúveis, como por exemplo, nitrato e amônio, no APSIM ( $\text{NO}_3\_N$  e  $\text{NH}_4\_N$ ), estes podem ser transferidos entre as porções do solo por lixiviação e escoamento. A quantidade lixiviada é proporcional à chuva cumulativa ou pode acrescentar-se a lâmina irrigada. No modelo também é possível especificar se certa porção de MOS é inerte aos processos de decomposição, no APSIM, considera-se como porção (*standing*) da MOS e adota-se o valor zero como padrão, significando que em condições normais todo o material é decomponível.

O cultivo da terra pode incorporar MOS em determinado volume de solo. O preparo da área incorpora C e N nas camadas de solo até a profundidade especificada e é dividido em MOS de decomposição rápida, média e tardia, de acordo com as frações e o tipo de FOM, material orgânico fresco, com diferenças entre os resíduos vegetais e os materiais de origem animal (esterco).

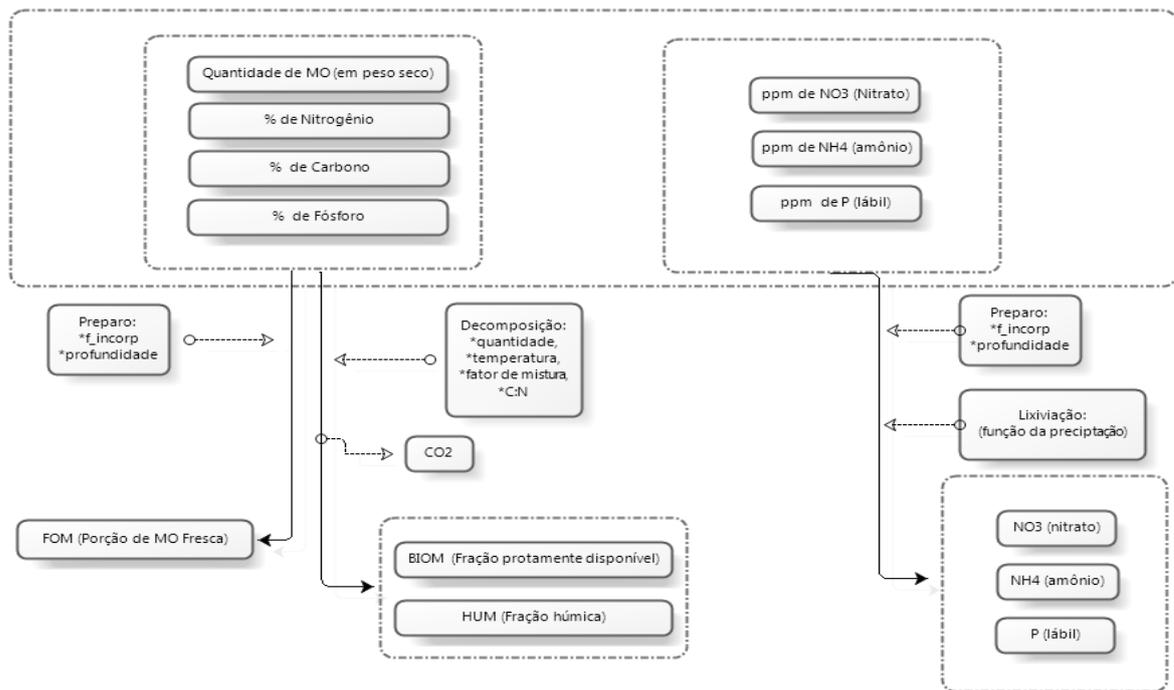


Figura 10: Fluxograma do módulo SurfaceOM (Material Orgânico Superficial) (Adaptado de APSIM Wiki, 2012).

A decomposição do material orgânico superficial no módulo SurfaceOM é calculada por um algoritmo de decaimento simples, no qual a fração decomposta de cada componente (F decomp) é expressa pela Equação 2.

$$F_{decomp} = TaxaDecompPot \times FatorUmid \times FatorTemp \times FatorContato \times CN \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

Taxa Decomp Pot é a taxa de decomposição potencial;

Fator Umid é o fator de umidade;

Fator Temp é o fator de temperatura;

Fator Contato é o fator de contato da MOS superficial com o solo e

CN é a relação C/N do constituinte em questão.

Os fatores que determinam a decomposição da MOS no modelo APSIM são:

Fator de umidade do resíduo

Os efeitos deste fator são observados na composição da MOS, pois, os resíduos que apresentam umidade relativa inferior são decompostos mais lentamente que os mais úmidos. No cálculo do fator de umidade são utilizados os dados do potencial acumulado de

evaporação de água do solo (Eos), e a evaporação crítica acumulada (cum\_eos\_máx), conforme Equação 3.

$$\text{Fator Umid} = 1 - \left( \frac{SEos}{\text{cum eos max}} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Os resíduos secam em taxa proporcional à evaporação do solo até o momento que a decomposição cessa por falta de umidade.

Fator temperatura:

O efeito da temperatura na decomposição é determinado a partir da temperatura ótima (opt\_temp) e temperatura média do ar, como na Equação 4.

$$\text{Fator Temp} = \left( \frac{\text{Temperatura média do ar}}{\text{opt}_{\text{temp}}} \right)^2 \quad (\text{Equação 4})$$

A temperatura média do ar é calculada pela Equação 5, dependente das temperaturas máxima e mínima.

$$\text{Temperatura média do ar} = \left( \frac{\text{maxt} + \text{mint}}{2} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

No modelo, a temperatura padrão utilizada é 20°C. Caso a temperatura média seja inferior a 0°C, o fator de temperatura será igual à zero, as máximas temperaturas não são determinantes para este fator igualar-se a zero.

c) Fator de contato:

É utilizado no cálculo, pois, em áreas com grandes quantidades de resíduos, as taxas globais de decomposição serão menores. Ou seja, presume-se que o material em contato direto com o solo seja decomposto mais rapidamente, quando comparado ao material superficial, sem contato direto com a biota do solo. A relação utilizada atualmente é baseada no trabalho de Thorburn et al. (2001) e envolve uma quantidade crítica de MOS na superfície, relacionada às quantidades globais de MOS:

- se a quantidade de MOS atual (surfaceom\_wt) < quantidade crítica, fator de contato = 1,
- se (surfaceom\_wt) > quantidade crítica, fator de contato = quantidade crítica/surfaceom\_wt).

Fator relação CN:

É calculado para cada tipo de resíduo individualmente, com variação de 0 a 1, conforme descrito pela Equação 6.

$$\text{Fator C/N} = \exp\left(-k * \left(\frac{\text{CN}-\text{CN}_{\text{opt}}}{\text{CN}_{\text{opt}}}\right)\right) \quad (\text{Equação 6})$$

onde:

CN - relação C/N dos resíduos na superfície,

CN<sub>opt</sub> - relação C/N ótima para a decomposição, com valor padrão igual à 25

k - coeficiente de determinação do declive da curva e igual a 0,277.

A partir das frações calculadas estimam-se as quantidades potenciais de C e N que se movimentaram no solo, para cada componente. Posteriormente, os outros módulos do APSIM poderão utilizar as quantidades potenciais em seus cálculos, como por exemplo, o módulo SoilN que utiliza as quantidades de N disponibilizadas ou imobilizadas pela MOS.

O valor atual de decomposição, específico para cada componente da MOS, é retransmitido para o módulo SurfaceOM e os valores de decomposição são recalculados utilizando-se estes valores obtidos anteriormente.

Os dados de saída para o módulo SurfaceOM do APSIM estão na Tabela 2.

Tabela 2: Dados de saída do módulo SurfaceOM (Adaptado de APSIM Wiki, 2012)

Nome	Unidades	Descrição
surfaceom_wt	kg.ha <sup>-1</sup>	Massa total de toda MO superficial
surfaceom_c	kg.ha <sup>-1</sup>	Massa total de carbono orgânico
surfaceom_n	kg.ha <sup>-1</sup>	Massa total de nitrogênio
surfaceom_p	kg.ha <sup>-1</sup>	Massa total de fósforo
surfaceom_NO3	kg.ha <sup>-1</sup>	Massa total de nitrato
surfaceom_NH4	kg.ha <sup>-1</sup>	Massa total de amônio
surfaceom_labile_p	kg.ha <sup>-1</sup>	Massa total de fósforo lábil
surfaceom_cover	0-1	Fração de solo coberto pela MO
Tf	0-1	Fator de temperatura na decomposição
Wf	0-1	Fator de umidade na decomposição
Cf	0-1	Fator de contato na decomposição
pot_c_decomp_xxx	0-1	Potencial de decomposição para c, n, e p
standing_fraction	0-1	Fração inerte, sem contato com o solo
cnrf_xxx	0-1	Relação C/N para decomposição

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Dados para simulação

O modelo APSIM foi calibrado para a variedade SP80-1842 utilizando dados de experimentos realizados por Gava et al. (2001) no município de Piracicaba (SP) e por Barbosa (2005) no município de Salinas (MG). Todos os experimentos foram realizados sem restrições nutricionais para fósforo, potássio, macronutrientes secundários e micronutrientes.

Quanto ao pH dos solos, o modelo APSIM ainda apresenta uma limitação pois não permite considerar pH inferior a 6,5 e existe forte efeito do pH sobre a taxa de nitrificação da amônia. Com isso, esta taxa é subestimada para solos brasileiros. Apesar de reconhecida pela equipe desenvolvedora do modelo, essa limitação não foi ainda sanada. Portanto nas simulações feitas neste trabalho considerou-se um pH inferior a 6,5 de modo a minimizar o efeito deste parâmetro no padrão de crescimento e na produtividade da cana-de-açúcar simulada.

No modelo APSIM é necessário indicar a relação C/N dos resíduos. Assim, nas simulações, adotou-se uma relação C/N igual a 50, assumindo-se que, ao longo de todo o ciclo produtivo da cana, este valor representa a média das relações C/N durante a decomposição da palhada até sua estabilização com relação c/N igual a 25. As correlações entre o valor adotado para C/N e a resposta à adubação nitrogenada serão discutidas neste trabalho.

As descrições sucintas das condições dos experimentos analisados, a partir de informações extraídas dos respectivos trabalhos, encontram-se nas Tabela 3 e Tabela 4 e os dados de solos utilizados nas simulações encontram-se na Tabela 5.

Para o experimento de Salinas, os dados meteorológicos (precipitação, temperaturas média, máxima e mínima), foram coletados em estação localizada no município de Montes Claros (MG). Como a estação não possui medição de radiação solar global, os dados faltantes foram estimados pelo método de Bristow e Campbell (1984), conforme a Equação 7.

$$Q_g = A[1 - \exp(-B (T_{\max} - T_{\min})^c)] \quad (\text{Equação 7})$$

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

Tabela 3: Características principais do experimento realizado no Campo Experimental localizado em Piracicaba (SP), extraídas de Gava et al. (2001).

Variedade	SP80-1842
Local	Talhão com cinco hectares de cana-de-açúcar em área pertencente à Usina Iracema S/A
Situação	22° 43' S e 47° 38' W
Clima	Cwa (classificação de Köppen)
Solo	Latossolo Vermelho-Escuro, em Laclau e Laclau (2009).
Dados Meteorológicos	Posto Agrometeorológico da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba (SP). Os dados diários coletados foram temperatura máxima e mínima (°C), precipitação (mm) e radiação solar global (MJ.m <sup>2</sup> )
Tratamentos	T1 = 100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> de vinhaça e 100 kg.ha <sup>-1</sup> de ureia misturadas e aplicadas em área total em 11/10/1997. Solo coberto com palha de cana-de-açúcar T2 = 100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> de vinhaça e 100 kg.ha <sup>-1</sup> ureia enterrada a 0,15 m, aplicadas separadamente em 11/10/1997. Solo sem palha
Plantio	20/10/1994, 16 gemas por metro linear, 0,3 m de profundidade.
Adubação	Somente no plantio: 100 kg.ha <sup>-1</sup> de ureia aplicados a 0,15 m de profundidade. Quantidades de P e K em definida de acordo com a análise de solo e necessidade da cultura.
Colheitas	Cana-planta: colheita mecanizada em 10/10/1995 1ª soca: colheita mecanizada e crua em 10/10/1996 2ª soca: colheita mecanizada e crua em 10/10/1997 (área do Tratamento 1) Em 2ª soca: colheita manual após queimada em 10/10/1997 (área do Tratamento 2)
Avaliações	Início da 3ª soca. Duração de 315 dias 1ª - 103 DAC (dias após colheita); 2ª - 137 DAC; 3ª - 169 DAC; 4ª - 204 DAC; 5ª - 237 DAC; 6ª - 267 DAC; 7ª - 299 DAC
Atributos avaliados	Massa fresca de colmos (MF) em t.ha <sup>-1</sup> , massa seca de colmos (MS) em t.ha <sup>-1</sup> e N acumulado em g.ha <sup>-1</sup> .

Tabela 4: Características principais do experimento realizado no Campo Experimental de Salinas (MG), extraídas de Barbosa (2005).

Variedade	SP80-1842
Local	Fazenda Experimental da Escola Agrotécnica Federal de Salinas
Localização	16°10' S e 42°18' W
Altitude	Altitude média: 472 m
Clima	Aw (Classificação de Köppen)
Solo	Latosolo Vermelho-Escuro, conforme banco de dados de solos da EMBRAPA (2012).
Dados Meteorológicos	Coletados na estação meteorológica de Montes Claros (MG). Dados diários coletados: temperaturas máxima e mínima (°C) e precipitação (mm). Radiação solar global (MJ.m <sup>2</sup> ) calculada pelo método Bristow e Campbell (1984)
Tratamentos	T1 = Irrigado implantado em 13/07/2003, com irrigações semanais, de 30 a 60 mm, dependendo da necessidade hídrica das plantas. Irrigação suspensa no período chuvoso T2 = Sequeiro implantado em 13/11/2003
Plantio	A 0,3 m de profundidade e 1,3 m entre linhas. Mudanças com idade entre 10 e 12 meses, 13 a 15 gemas por metro linear, cobertas com 0,1 m de solo destorroado.
Adubação	Adubação de plantio = 200 kg.ha <sup>-1</sup> de ureia.
	Adubação de cobertura = 150 kg.ha <sup>-1</sup> de ureia, 58 dias após o plantio.
	P e K na quantidade adequada, de acordo com a análise de solo e necessidade da cultura.
Avaliações	1ª avaliação do acúmulo de biomassa na parte aérea aos 90 dias após do plantio (DAP). Demais avaliações com intervalo de 60 dias, em 2 linhas por parcela de 2 m cada. 1ª avaliação em T1: outubro 2003; última em agosto de 2004. 1ª avaliação em T2: fevereiro 2004; última em outubro de 2004.
Atributos avaliados	Crescimento da cultura, número de perfilhos, comprimento médio dos colmos, diâmetro médio dos colmos, número de colmos, índice de maturação e Brix, produtividade total, produtividade de colmos industrializáveis, peso das folhas e peso das pontas.

Tabela 5: Dados químicos e físicos de um Latossolo Vermelho-Escuro do campo experimental de Piracicaba (SP), extraídos de Laclau e Laclau (2009), e de um Latossolo Vermelho-Escuro, textura média distrófico, do município de Salinas (MG), extraídos de Embrapa (2012).

Profundidade (cm)	pH	Carbono Orgânico (%)	CTC	Ca	Mg	K	Al	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Areia Silte Argila		
									(g.kg <sup>-1</sup> )		
<b>Latossolo Vermelho-Escuro em Piracicaba (SP)</b>											
0-20	4,0	1,37	8,71	0,27	0,17	0,24	1,80	1,37	39	7	54
20-40	4,1	1,03	8,15	0,40	0,23	0,09	1,30	1,35	36	7	57
40-60	4,1	0,63	7,64	0,43	0,20	0,02	1,23	1,15	41	5	54
60-100	4,5	0,40	3,80	0,70	0,20	0,00	0,40	1,13	35	6	59
100-200	4,7	0,17	2,90	0,15	0,10	0,02	0,26	1,12	33	22	45
200-300	5,1	0,47	2,60	0,14	0,40	0,06	0,10	1,10	33	19	48
300-400	4,7	0,40	2,66	0,10	0,30	0,06	0,20	1,12	34	19	47
<b>Latossolo Vermelho-Escuro em Salinas (MG)</b>											
0-12	5,5	1,32	8,40	3,30	1,30	0,25	-	1,37	43	28	29
12-28	5,4	0,91	6,60	2,30	1,30	0,05	-	1,35	37	29	34
28-70	5,4	0,49	5,10	1,60	1,20	0,03	-	1,15	32	27	41
70-150	5,5	0,24	4,10	1,30	1,30	0,02	-	1,13	38	25	38
150-200	5,7	0,15	3,50	1,00	1,40	0,02	-	1,12	35	25	40

#### 4.2. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo APSIM-Sugarcane

A análise de sensibilidade foi realizada alterando-se o valor de uma variável ou parâmetro de entrada do modelo, mantendo os demais inalterados. A variação nos parâmetros avaliados foi relacionada aos valores no final do ciclo das variáveis massa fresca de colmos, teor de sacarose e índice de área foliar. Utilizou-se a parametrização obtida para a variedade SP80-1842 nas condições de Piracicaba - SP, 3ª soca. A condição padrão (sem variação nos parâmetros de entrada) foi denominada condição BL, nas condições edafoclimáticas do campo experimental de Piracicaba - SP.

Para a determinação da sensibilidade do modelo, os parâmetros sofreram alteração de  $\pm 10\%$ . Foram analisados 51 parâmetros de entrada no modelo e comparados à condição padrão denominada BL. Os parâmetros estão descritos no Anexo 1.

A importância relativa dos parâmetros foi calculada com base no índice de sensibilidade absoluta que, posteriormente, foi convertido no índice de sensibilidade relativa (SALTELLI, 2002), conforme Equações 8 e 9.

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

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

$$\sigma r(y/k) = \sigma(y/k) \frac{k}{y} \quad (\text{Equação 9})$$

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

Após a alteração dos parâmetros do modelo em  $\pm 10\%$ , os resultados que apresentaram alteração superior a 0,1 na sensibilidade relativa foram plotados em três gráficos e separados pelas variáveis de saída Canefw, Sucrose e LAI. Para cada variável de saída, os resultados foram divididos de acordo com o tipo de influência que as variáveis exerceram. Se os parâmetros aumentavam a produção de massa fresca de colmos (TCH), o teor de sacarose e o índice de área foliar, a influência do parâmetro foi positiva e, se os valores diminuía, a influência foi considerada negativa.

### 4.3. Calibração do modelo APSIM-Sugarcane

A calibração do modelo foi baseada nos dados experimentais coletados em campo, para a variedade SP80-1842, em duas localidades brasileiras, Piracicaba-SP e Salinas-MG, com auxílio de bancos de dados meteorológicos e de solo, assim como revisão de literatura realizada sobre o modelo.

Os parâmetros de solo do modelo, alterados na calibração, foram SugarKL e SugarXF, interferentes na absorção radicular da cana-de-açúcar. Os parâmetros físicos de retenção de água no solo foram SAT, DUL, LL15 e AirDry, para determinação da quantidade de água disponível e os parâmetros específicos para cada variedade, determinados dentro do módulo Sugar.INI do modelo APSIM foram cane\_fraction, leaf\_size, leaf\_size\_no, tt\_emerg\_to\_begcane, tt\_begcane\_to\_flowering, tt\_flowering\_to\_crop\_end, green\_leaf\_no, tillerf\_leaf\_size, tillerf\_leaf\_size\_no. Os parâmetros foram baseados em uma variedade de cana-de-açúcar australiana e calibrados para a variedade brasileira SP80-1842.

Como método de parametrização, utilizou-se o procedimento de tentativa e erro por análise visual e utilização de programação em Visual Basic, para a coleta dos dados e realização de gráficos comparativos.

Na verificação da qualidade da calibração, foram utilizados os índices  $R^2$ , D de Willmott (1985), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o índice “E” denominado eficiência

da modelagem (WALLACH et al., 2006; NASSIF et al., 2010; MARIN et al., 2011).

No experimento de Piracicaba - SP, os índices estatísticos para avaliar o desempenho da calibração foram calculados com base na massa fresca de colmos ( $t\cdot ha^{-1}$ ) e matéria seca ( $t\cdot ha^{-1}$ ) e os resultados da simulação pelo APSIM–Sugar, analisados a partir do corte da 2ª soca. Em Salinas - MG, a análise foi realizada apenas para matéria seca ( $t\cdot ha^{-1}$ ) e os resultados da simulação pelo APSIM–Sugar, analisados para cana planta.

#### **4.4. Simulação do efeito combinado de adubação nitrogenada com palhada de cana-de-açúcar na produtividade**

Após a calibração, o modelo foi utilizado para simular os efeitos da remoção ou manutenção da palhada de cana-de-açúcar, em combinação com doses de N sobre a produtividade da cana-de-açúcar para os municípios de Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e São Simão, em São Paulo, utilizando dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2012) para série histórica de 1961 a 2010.

Os dados químicos e físicos dos solos de cada local foram coletados no Banco de Dados de Solos da Embrapa (2012), para os municípios de Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e São Simão, e encontram-se na Tabela 6.

Em cada local foram simulados dois tratamentos quanto ao sistema de colheita (com e sem remoção da palhada) e quatro tratamentos quanto à adubação nitrogenada (60, 120 e 180  $kg\cdot ha^{-1}$  de ureia). Nas simulações, a produtividade de massa fresca de colmos industrializáveis por hectare (TCH) foi avaliada para a série histórica de 1961 a 2010.

Foram avaliadas as diferenças na produtividade das áreas com e sem remoção da palhada, por meio da determinação da média móvel de cada cinco safras, de um total de 47, para cada município. O mesmo procedimento, média móvel para a sequência de cinco safras consecutivas em cada nível de ureia aplicada, foi adotado para avaliação de interferência da adubação na produtividade da cana-de-açúcar.

Em seguida, foi feita a análise estatística dos resultados por meio de comparação de médias utilizando os testes t, de Student e Tukey. O delineamento adotado foi o de blocos casualizados com repetições. Os municípios de São Simão (B1), São Carlos (B2), Presidente Prudente (B3) e Catanduva (B4) foram considerados blocos e os tratamentos foram doses de N e presença ou ausência de palha. O fluxograma da Figura 11 descreve o delineamento das diferentes doses de N (T1, T2 e T3) simuladas para os municípios considerados, enquanto que na Figura 12 o fluxograma descreve o delineamento dos tratamentos com remoção de palha (Tc1) e sem remoção de palha (Ts2), para os mesmos municípios.

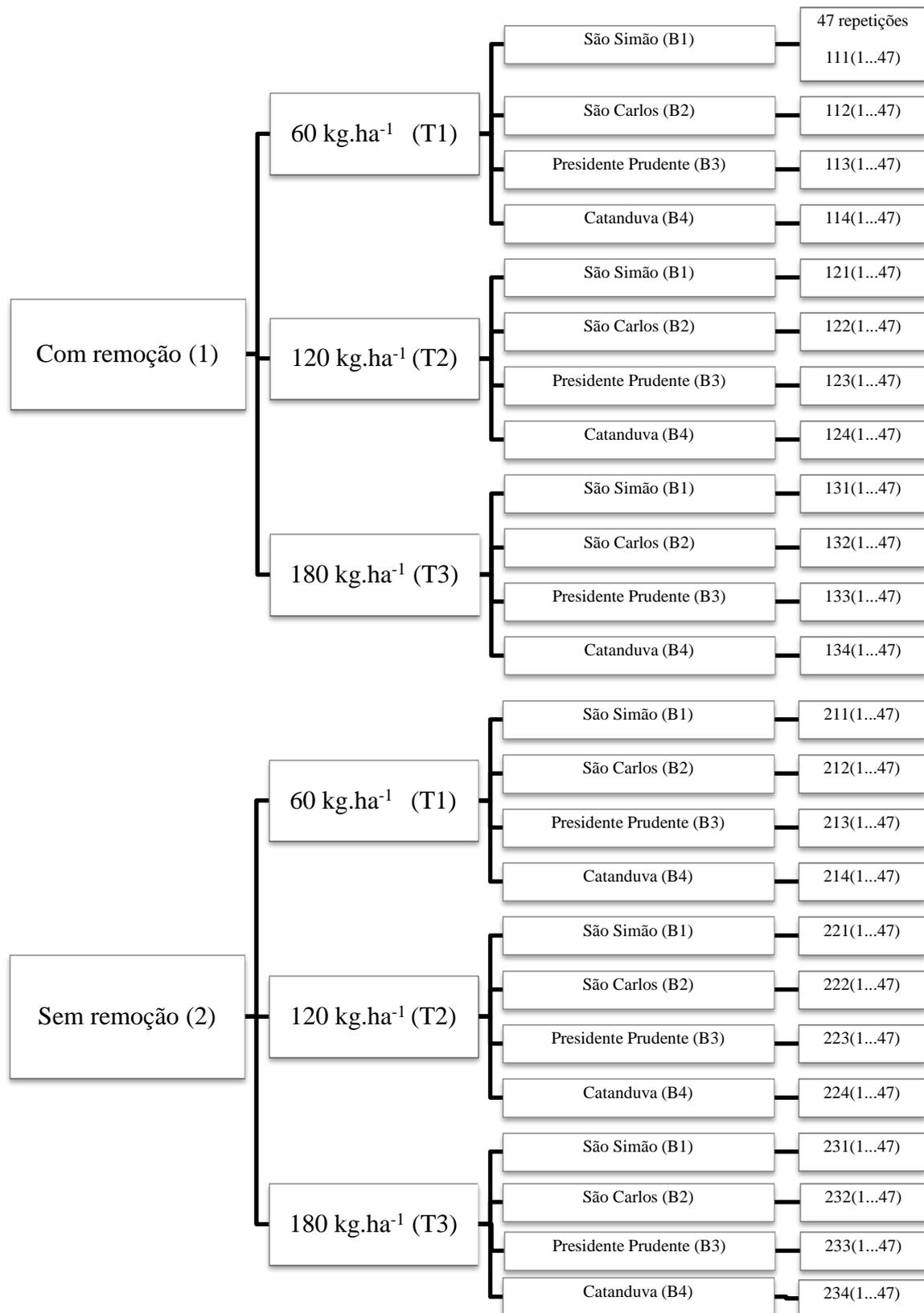


Figura 11: Fluxograma do delineamento experimental, utilizado para avaliação estatística das simulações de diferentes doses de adubação nitrogenada na produtividade de canaviais com e sem remoção da palhada da cana-de-açúcar [111(1...47) representa tratamento 1 (com remoção), na dose T1 (60 kg.ha<sup>-1</sup>), em B1(São Simão) para as repetições de 1 a 47].

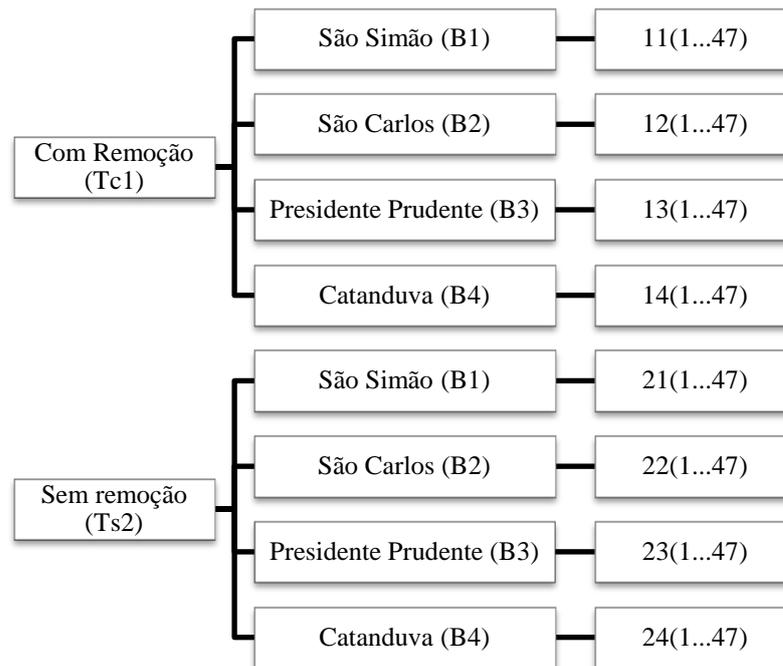


Figura 12: Fluxograma do delineamento experimental, utilizado para avaliação estatística da comparação de áreas no estado de São Paulo, com e sem remoção da palhada da cana-de-açúcar [11(1...47) representa tratamento Tc1 (com remoção), em B1(São Simão) para as repetições de 1 a 47].

Nas análises estatísticas utilizou-se o programa ASSISTAT (SILVA, 1996). O delineamento escolhido foi blocos casualizados com repetições.

Somente os resultados obtidos no Teste t estão sendo apresentados aqui, pois foram similares aos obtidos com o teste de Tukey. Todos os resultados gerados pelo programa ASSISTAT estão descritos nos Anexos 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

Tabela 6: Dados químicos e físicos de solos considerados nas simulações para os municípios de Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e São Simão, localizados no estado de São Paulo.

Catanduva e Presidente Prudente										
Profundidade (cm)	pH	Carbono Orgânico (%)	CTC	Ca	Mg	K	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Areia	Silte	Argila
			(cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )			(g.kg <sup>-1</sup> )				
0-15	5,6	1,43	7,49	3,480	1,040	0,130	1,45	87,2	1,2	11,6
15-30	5,7	0,44	3,28	2,010	0,600	0,100	1,49	87,2	3,0	9,8
30-50	5,5	0,48	4,05	2,270	0,950	0,210	1,45	78,5	2,9	18,6
50-70	5,4	0,31	3,49	1,490	1,050	0,240	1,43	78,1	1,9	20,0
70-200	4,7	0,24	2,53	0,330	0,400	0,090	1,44	75,8	1,7	22,5
200-290	4,8	0,15	5,59	0,380	0,300	0,200	1,42	78,6	6,9	14,5
290-330	5,0	0,09	8,33	2,400	3,260	0,190	1,43	78,5	7,8	13,7
330-450	5,0	0,09	8,33	2,400	3,260	0,190	1,43	78,5	7,8	13,7
São Carlos										
0-10	4,6	4,70	15,20	0,310	0,078	0,020	1,06	39,0	8,0	53,0
10-20	4,7	4,70	11,20	0,192	0,048	0,020	1,06	35,0	6,0	59,0
20-32	4,7	3,10	8,50	0,048	0,012	0,010	1,04	30,0	7,0	63,0
32-54	4,8	3,10	6,80	0,048	0,012	0,010	1,09	30,0	7,0	63,0
54-75	4,6	3,10	4,20	0,048	0,012	0,010	1,06	40,0	9,0	51,0
75-150	4,7	1,90	3,00	0,048	0,012	0,010	1,07	40,0	9,0	51,0
150-200	5,2	1,90	1,60	0,048	0,012	0,010	1,07	40,0	9,0	51,0
200-300	5,2	1,50	1,60	0,048	0,012	0,010	1,07	40,0	9,0	51,0
300-400	5,2	0,25	1,60	0,048	0,012	0,020	1,07	39,0	8,0	53,0
400-450	5,2	0,13	1,60	0,048	0,012	0,020	1,07	35,0	6,0	59,0
São Simão										
0-26	5,1	1,68	7,50	0,336	0,084	0,070	1,15	13,0	17,0	70,0
26-50	5,1	1,13	5,20	0,056	0,014	0,020	1,08	11,0	15,0	74,0
50-75	5,3	0,89	3,60	0,064	0,016	0,010	1,03	10,0	14,0	76,0
75-215	5,3	0,68	5,80	0,064	0,016	0,010	1,04	11,0	14,0	75,0
215-285	5,5	0,38	1,50	0,064	0,016	0,010	1,08	8,0	15,0	77,0
285-440	5,9	0,25	0,90	0,064	0,016	0,010	1,06	9,0	18,0	82,0
440-500	5,8	0,13	0,70	0,064	0,016	0,010	1,06	36,0	17,0	47,0

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análise de sensibilidade local no modelo APSIM-Sugarcane

No modelo APSIM, de todos os parâmetros alterados, o DUL, que regula a capacidade de campo, foi o que apresentou maior relevância na variação da produtividade de colmos (Figura 13). Este parâmetro regula a disponibilidade hídrica para as plantas, ou seja, o volume de água que pode ser armazenado no solo, e, conseqüentemente, afeta o estresse hídrico. Com o acréscimo de 10% no DUL, em relação ao padrão BL, a produtividade de colmos aumentou em 0,8 pontos na SR (sensibilidade relativa).

Quando o GLN, número de folhas verde, sofreu redução de 10%, a SR do modelo indicou decréscimo de 0,4 pontos na produtividade de colmos. Como as folhas são responsáveis por interceptar a radiação incidente, com a diminuição do número de folhas verdes, ou seja, redução de 10% no GLN, a fotossíntese é afetada, assim como a eficiência de uso da radiação, RUE, que também está relacionada à fotossíntese. Como consequência, observa-se decréscimo no acúmulo de peso seco na cultura.

O parâmetro GLN, em conjunto com o ponto de murcha permanente para a cana-de-açúcar, parâmetro SUGARLL, a umidade no ponto de solo seco, AIRDRY, e o ponto de saturação, SAT, tiveram também efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para as plantas. Isto porque este nutriente pode ser translocado ou lixiviado ao longo do perfil do solo, em função do fluxo saturado ou insaturado, ou ser perdido por volatilização.

A base teórica do algoritmo de expansão da copa está descrita em Robertson et al., (1998). Baseia-se na abordagem que o índice de área foliar referente às folhas verdes é dado pelo produto da área foliar em cada colmo e o número de colmos por unidade de área. Com a diminuição ou o incremento na quantidade de folhas por colmo, parâmetro GLN, o LAI é modificado e, conseqüentemente, outras variáveis relacionadas à área foliar são também alteradas, como por exemplo, a produtividade da cana-de-açúcar.

Para a variável de saída Sucrose, que determina o teor de sacarose nos colmos, o parâmetro de entrada mais relevante foi o SUCFS, do inglês sucrose fraction stalk. Esse parâmetro indica o teor de sacarose no colmo e teve efeito similar tanto para um aumento quanto para uma diminuição de 10% (Figura 14), com alteração correspondente no TCH de 2,5 pontos percentuais.

Além dos parâmetros de água que interferem no estresse hídrico das culturas, e, conseqüentemente, nas variáveis relacionadas à translocação de solutos, outro parâmetro relevante para alteração na produção de colmos é o CF, do inglês cane fraction (Figura 13),

que corresponde à relação entre massa de colmos e folhas. Este parâmetro é específico para cada variedade e interfere no índice de área foliar da cultura, afetando assim a capacidade fotossintética do canavial. Isso ocorre porque quanto menor a proporção de colmos, maior a quantidade de folhas, maior a produção de fotoassimilados, e, conseqüentemente, maior o acúmulo de biomassa.

Evidentemente, o parâmetro GLN, do inglês green leaf number, teve efeito diretamente proporcional sobre a simulação de LAI (Figura 15). Como observado na comparação entre a Figura 14 e a Figura 15, com exceção do parâmetro SUCFS, fração de sacarose no colmo, os demais parâmetros são os mesmos que interferem no índice de área foliar LAI.

Os parâmetros hídricos DUL, SUGARLL, SAT, SWCON e o MWCON, como já discutido, determinam a translocação dos solutos no perfil e são responsáveis pelo estresse hídrico, diminuindo, portanto, TCH (Figura 13) e LAI (Figura 15). Relacionado à fenologia, a redução dos parâmetros TTBF e TTEB em 10% acarretou em queda nas três variáveis de saída analisadas, produção de colmos, sacarose e no índice de área foliar. A alteração no tempo térmico proporciona variação no período de transição entre os estádios fenológicos, interferindo no crescimento, na absorção de água, nutrientes e no nível de estresse da cultura.

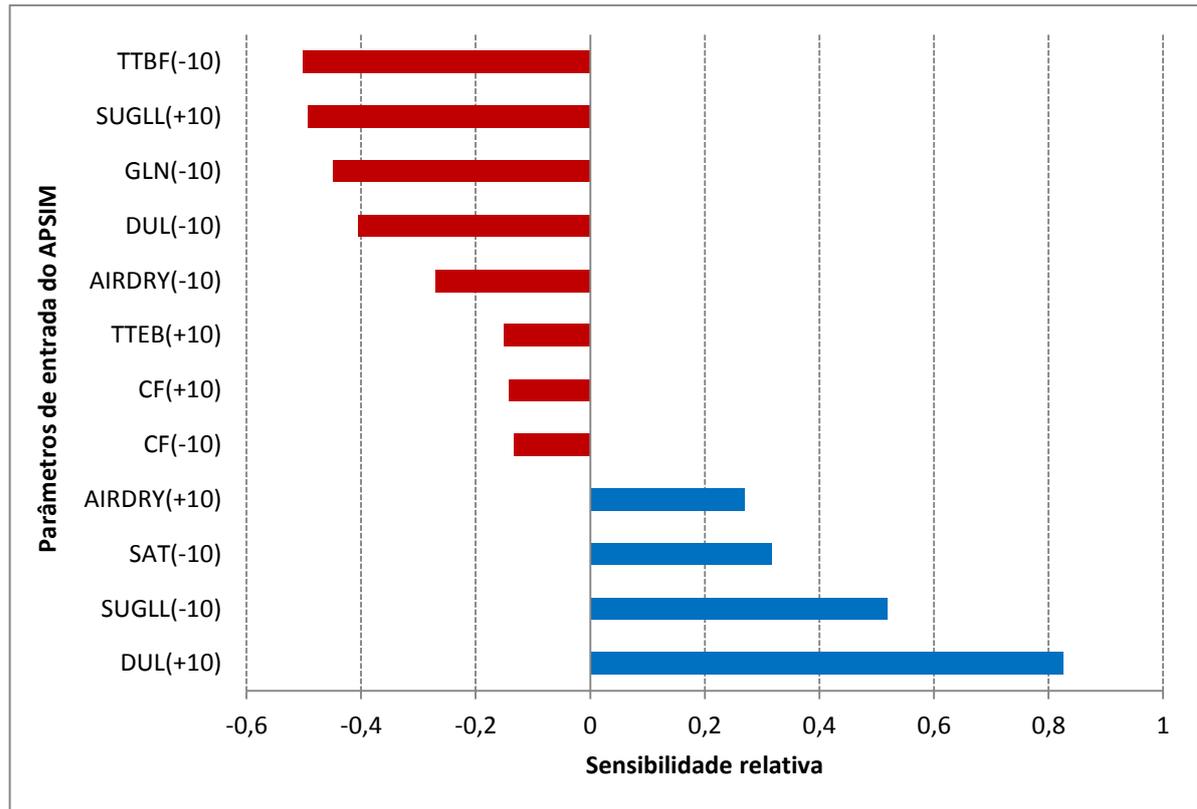


Figura 13: Sensibilidade relativa dos parâmetros do modelo APSIM na produtividade de colmos. Barras azuis representam respostas positivas e barras vermelhas, respostas negativas.

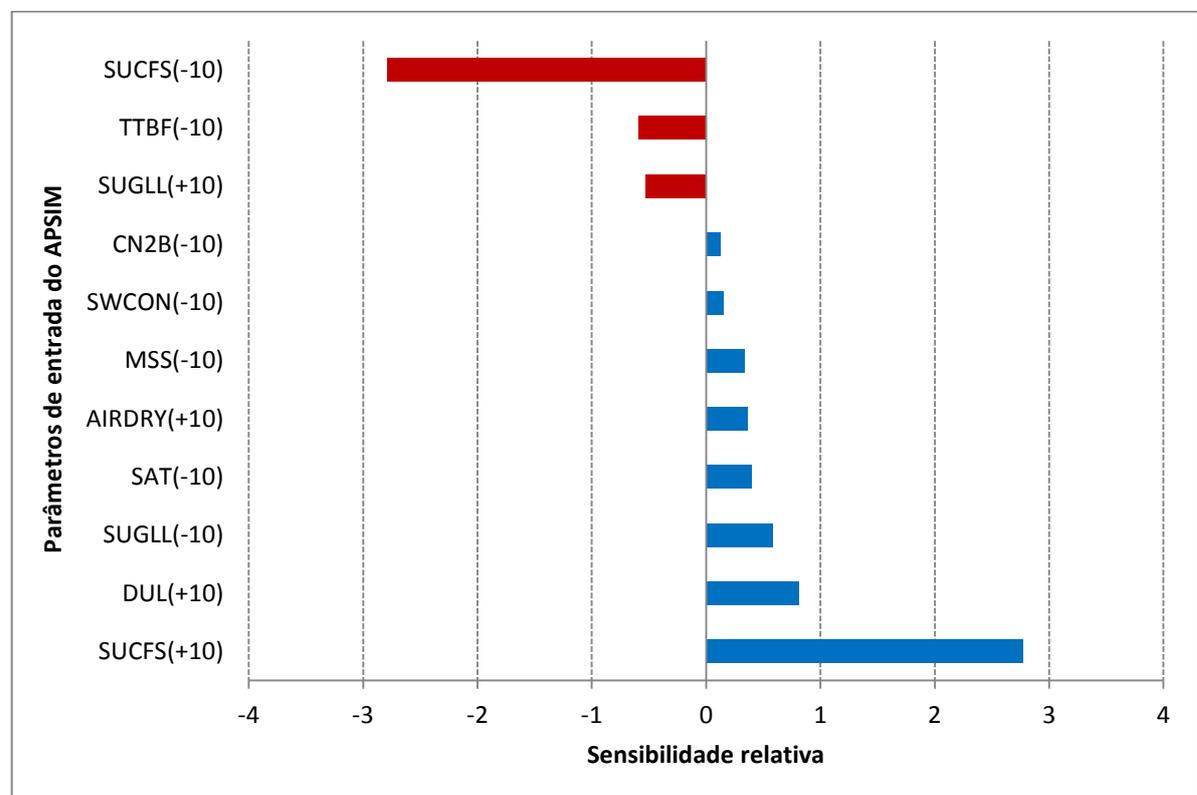


Figura 14: Sensibilidade relativa dos parâmetros do modelo APSIM na produção de sacarose. Barras azuis representam respostas positivas e barras vermelhas, respostas negativas.

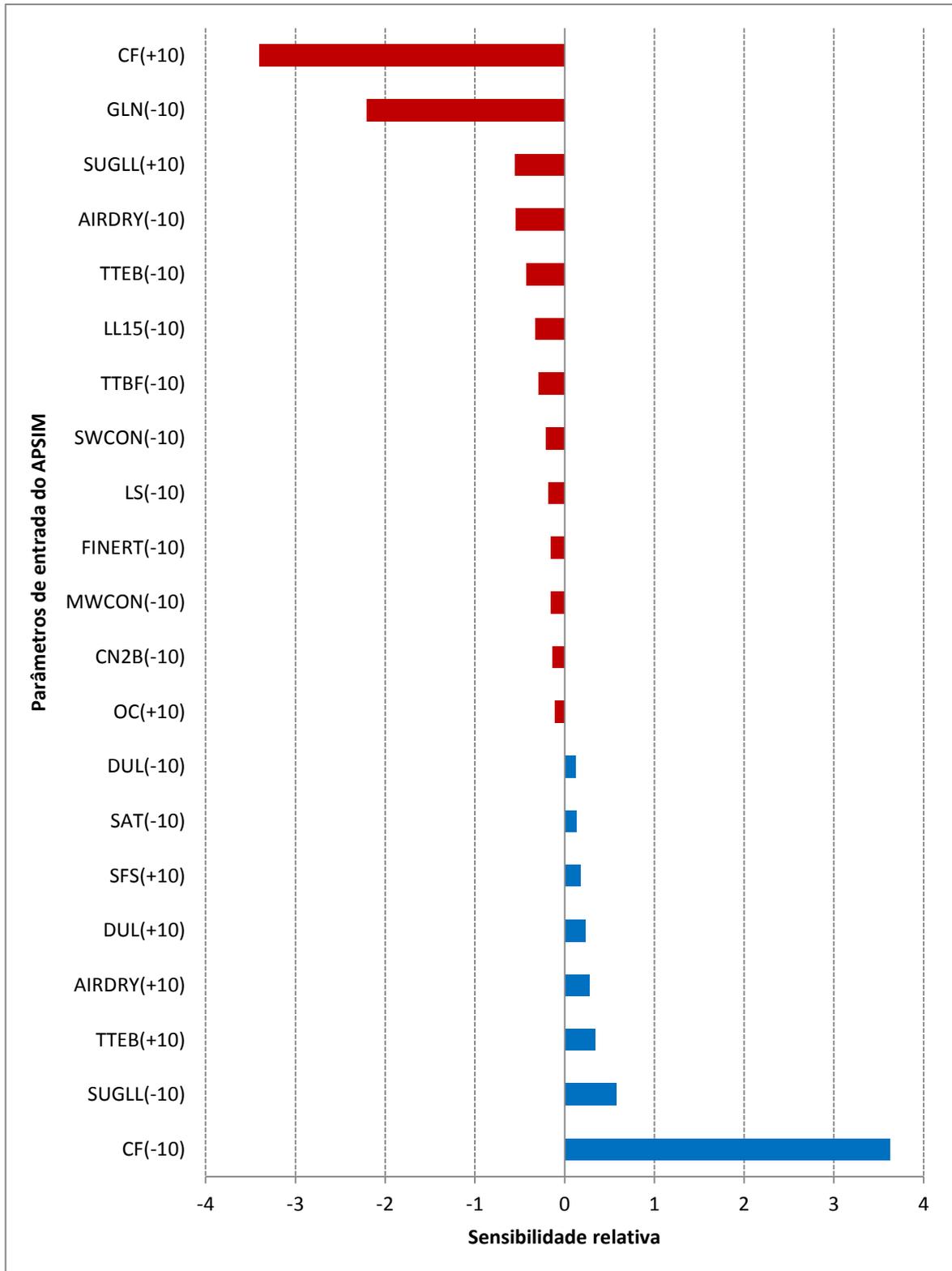


Figura 15: Sensibilidade relativa dos parâmetros do modelo APSIM no índice de área foliar (LAI, da sigla em inglês). Barras azuis representam respostas positivas e barras vermelhas, respostas negativas.

## 5.2. Calibração do modelo APSIM

Na calibração do modelo APSIM para a variedade SP80-1842, o parâmetro CF, relação de colmos e folhas nas plantas, foi fixado em 0,70 e o parâmetro `tt_emerg_begcane` foi calibrado para 1025 graus-dia. Marin et al. (2011) fixaram o tempo térmico, necessário para passar do período de emergência para crescimento, em 628 e 628 graus-dia, para as variedades SP83-2847 e RB82454, respectivamente. Tal diferença indica que a variedade SP80-1842 é relativamente mais exigente em energia térmica para sua emergência, mas a limitação de dados experimentais em ambos os trabalhos não permitem assegurar tal evidência.

O parâmetro `leaf_size` foi ajustado para variar entre 5.000 mm<sup>2</sup> para a folha número um e 50.000 mm<sup>2</sup> para a vigésima folha, com a máxima expansão em 55.000 mm<sup>2</sup>, na décima quarta folha. Nassif (2010), por exemplo, encontrou tamanho máximo de folhas, variando entre 50.000 e 52.910 mm<sup>2</sup> para cinco cultivares brasileiras. Marin et al. (2011), a partir de dados observados, encontrou `leaf_size` variando entre 36.000 e 79.600 mm<sup>2</sup>. Assim, a calibração da variedade SP80-1842 mostrou-se coerente com outras sete variedades nacionais abordadas na literatura brasileira. No modelo, o número de folhas verdes é um parâmetro de grande importância para calibração das variedades, pois influencia o índice de área foliar, e, conseqüentemente, outras variáveis correlacionadas, como a eficiência de uso da radiação. Para a variedade calibrada, apesar de não se contar com observações de campo para esse parâmetro, definiu-se o valor de 10 folhas verdes por colmo, com base nos trabalhos de Marin et al. (2011) e Marin et al. (2012), que estudaram as variedades RB72454, SP83-2847 e RB867515.

Após a calibração, a produtividade em termos de massa fresca de colmos (MF) e massa seca (MS), simuladas para Piracicaba (Figura 16) e Salinas (Figura 17), mostraram que o modelo descreveu o crescimento da variedade SP80-1842 nos dois ambientes edafoclimáticos.

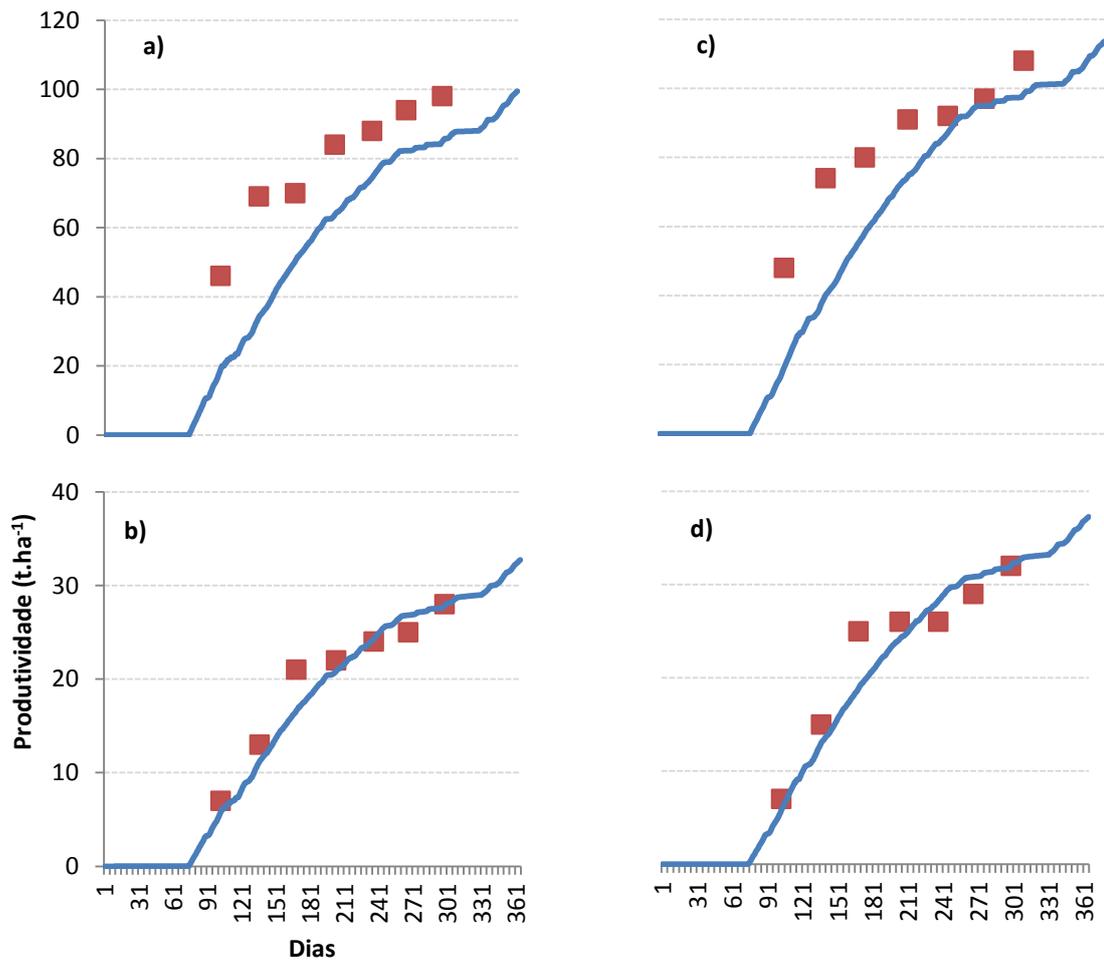


Figura 16: Produtividade da cana-de-açúcar em Piracicaba, observada (pontos) por Gava et al. (2001) e simulada (linha) pelo APSIM-Sugarcane. No tratamento T1 (com palha), (a) representa massa fresca de colmos, MF ( $t.ha^{-1}$ ) e (b) massa seca, MS ( $t.ha^{-1}$ ); Para o tratamento T2 (sem palha), (c) representa MF ( $t.ha^{-1}$ ) e (d) MS ( $t.ha^{-1}$ ).

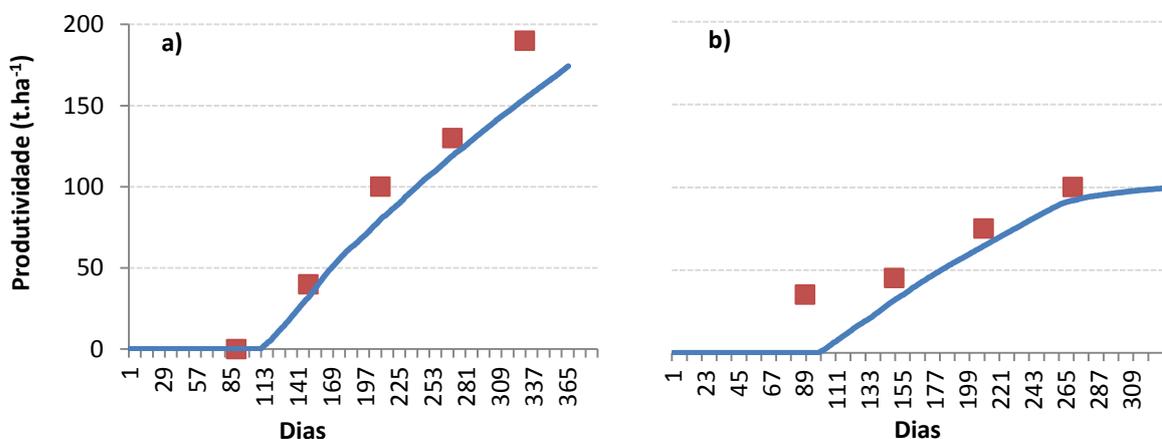


Figura 17: Simulação da produtividade da cana-de-açúcar em Salinas-MG (linha) e produção de massa fresca aérea medida por Barbosa (2005) em condições de campo (pontos), em tratamento irrigado (a) e em sequeiro (b).

Os cálculos para modelagem do incremento diário de biomassa são realizados em termos de massa seca. Portanto, o modelo descreve melhor o crescimento da cultura e o efeito dos estresses hídrico e nutricional em termos de matéria seca. Quanto à produtividade de colmos frescos, apesar de desempenho inferior, avalia-se que o modelo foi capaz de simular o desenvolvimento e o acúmulo de biomassa da cultura. Esse aspecto também revela uma oportunidade de aprimoramento no algoritmo responsável pela simulação da umidade do colmo.

O conteúdo de água no colmo, por sua vez, é representado no APSIM por uma relação que pode variar entre  $9 \text{ g.g}^{-1}$  (massa de água por massa de colmo seco), nos estádios iniciais de desenvolvimento, e  $5 \text{ g.g}^{-1}$  para o último período vegetativo. Além disso, com a deposição de sacarose nos colmos, a cana-de-açúcar perde umidade e o APSIM representa esse processo admitindo que a deposição de 1 g de sacarose corresponde à remoção da mesma quantidade de água, ou seja, a umidade diminui ao longo do período de desenvolvimento da cultura.

Após a calibração, nos tratamentos com e sem palha do experimento de Piracicaba, os indicadores estatísticos para a predição da biomassa vegetal em termos de matéria seca revelaram valores de  $R^2$ , E e D-index superiores a 0,91 (Tabela 7). Na produção de massa fresca de colmos, os valores de E foram -0,47 e -0,25 nos tratamentos com e sem palha, respectivamente, mas, na comparação com outros trabalhos de modelagem de culturas, estes valores podem ser considerados satisfatórios. Em Salinas, a eficiência na estimativa da produtividade foi melhor do que Piracicaba ( $E=0,73$ ).

A diferença nos valores de E simulados, para massas seca fresca, pode estar associada ao algoritmo no APSIM que calcula a umidade do colmo. Como observado anteriormente (Tabela 7), este modelo realiza primeiramente os cálculos de particionamento de biomassa e produtividade em massa seca (MS). Apenas após divisão dos fotoassimilados, o modelo pondera a umidade do colmo. Esta ponderação, dada pela proporção de  $9 \text{ g.g}^{-1}$  no crescimento do colmo, para fase inicial de desenvolvimento, e  $5 \text{ g.g}^{-1}$  no final do ciclo, foi estabelecida para variedades australianas (KEATING et al., 1999; KEATING et al., 2003). Essas proporções podem não representar adequadamente as variedades brasileiras. Com isso, atribui-se a diferença na produtividade simulada e observada (Figura 16a e 16c), principalmente, a alguma incoerência no algoritmo que faz o cômputo da umidade do colmo, uma vez que a matéria seca foi simulada adequadamente e aquele é o único componente a diferenciar nas simulações (Figura 18).

Tabela 7: Avaliação do modelo APSIM para a variedade brasileira SP80-1842, em duas localidades, Piracicaba-SP (Pira) e Salinas-MG, com palha (C Palha), sem palha (S Palha), irrigado (Irri) e sequeiro (Seq).

	Pira C Palha	Pira C Palha	Pira S Palha	Pira S Palha	Salinas Irri	Salinas Seq
	MS (t.ha <sup>-1</sup> )	MF (t.ha <sup>-1</sup> )	MS (t.ha <sup>-1</sup> )	MF (t.ha <sup>-1</sup> )	Prod (t.ha <sup>-1</sup> )	Prod (t.ha <sup>-1</sup> )
RMSE	2,01	21,38	2,77	20,17	16,30	14,97
R <sup>2</sup>	0,98	0,98	0,96	0,97	0,99	0,98
E	0,91	-0,47	0,91	-0,25	0,92	0,73
D-index	0,98	0,82	0,97	0,83	0,98	0,90

RMSE = raiz quadrada do erro médio, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, E = eficiência da modelagem e D-index = índice D de Willmott.

Tais resultados são indicativos que o modelo foi capaz de representar os principais processos biofísicos, regulando as relações solo-planta-atmosfera e simular o crescimento da cana-de-açúcar nas condições estudadas. A consolidação da análise estatística para ambos os locais e tratamentos (Tabela 8) confirmou que existe diferença na capacidade de simulação da produtividade em termos de massa seca (MS) e massa fresca de colmos (MF).

Tabela 8: Consolidação da análise estatística do modelo APSIM, para as condições de Piracicaba-SP e Salinas-MG, para a variedade brasileira SP80-1842, quanto à produtividade em matéria fresca (MF) e matéria seca (MS).

SP80-1842 – Total		
	MF (t.ha <sup>-1</sup> )	MS (t.ha <sup>-1</sup> )
RMSE	20,298	2,419
NRMSE	0,252	0,113
R <sup>2</sup>	0,959	0,967
E	0,997	0,999
D-index	0,928	0,977

RMSE = raiz quadrada do erro médio, NRMSE = raiz quadrada do erro médio normalizado, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, E = eficiência da modelagem e D-index = índice D de Willmott.

O modelo foi capaz de simular adequadamente a fenologia e o particionamento dos fotoassimilados na planta, assim como os efeitos da adubação nitrogenada, da irrigação e do manejo da palhada e os períodos de estresse relacionados ao nitrogênio e água, conforme evidenciado nas Figuras 18 a 19.

A resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada e à irrigação pode ser confirmada, correlacionando os resultados observados na Figura 18 e o delineamento experimental dos experimentos de Piracicaba e Salinas. Todos os tratamentos utilizados para a

calibração da variedade SP80-1842 utilizaram adubação nitrogenada a fim de evitar déficit nutricional, portanto, o modelo APSIM parece ter simulado de modo adequado a ausência de déficit expressivo de N à cultura. Por outro lado, esperava-se algum nível de déficit hídrico nos três tratamentos em sequeiro, como também foram simulados pelo APSIM (Figura 18b, 18d e 18h). Para o experimento irrigado (Figura 18f), as simulações não mostraram déficit hídrico da cultura, o que corresponde com a realidade do experimento.

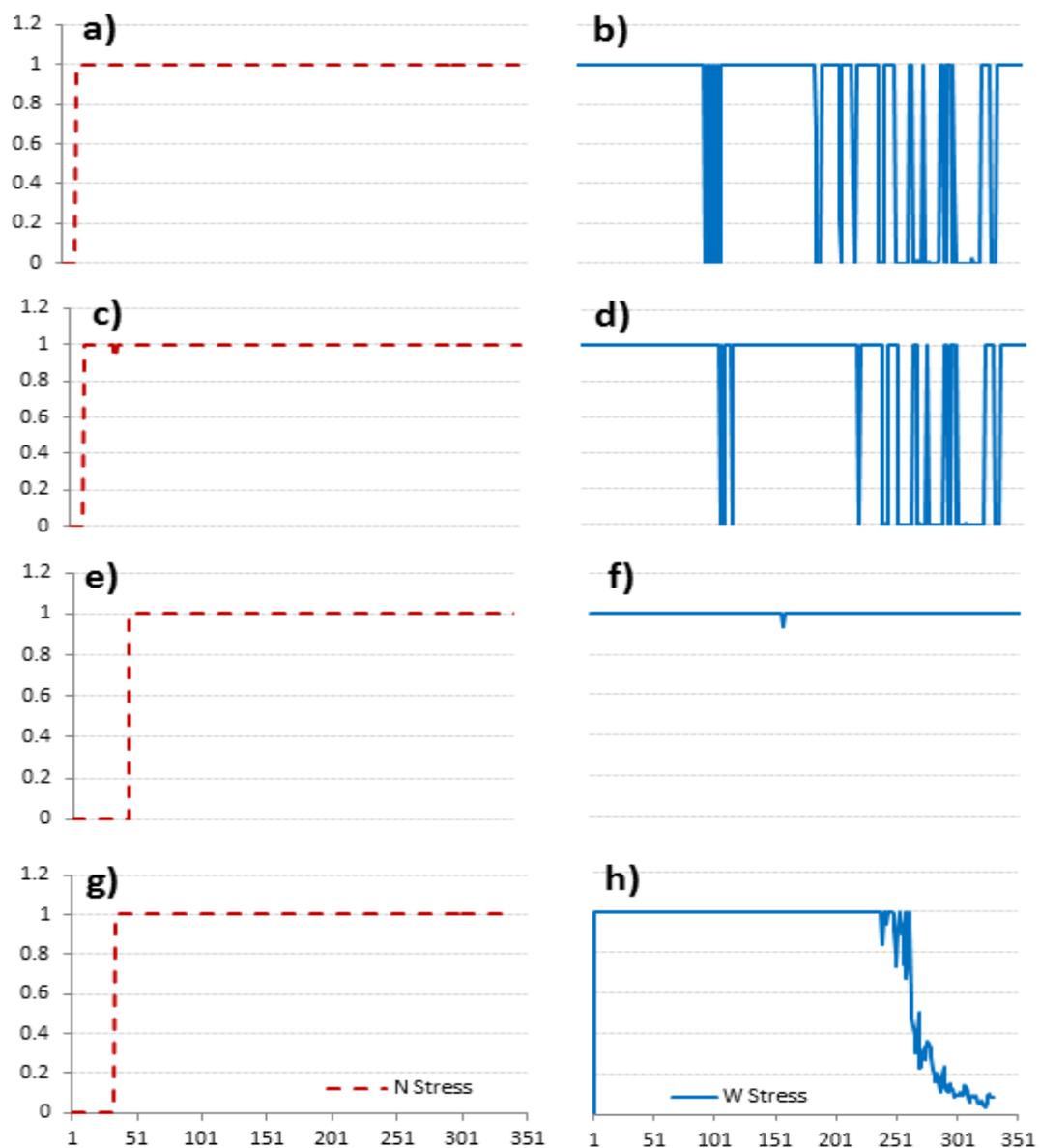


Figura 18: Nível de estresse por nitrogênio (N Stress) e por água (W Stress), nos diferentes tratamentos simulados, onde 1 representa nenhum stress e 0 representa estresse total: a) e b) tratamento sem remoção da palhada, no experimento em Piracicaba; c) e d) tratamento com remoção da palhada, em Piracicaba; e) e f) tratamento irrigado em Salinas; e g) e h) tratamento em sequeiro, de Salinas.

### 5.3. Simulação do efeito combinado de adubação nitrogenada e palhada de cana-de-açúcar

As simulações indicaram que, para Piracicaba e Salinas, a cana-de-açúcar responde positivamente à manutenção da palhada no solo (Figura 19). A comparação das produtividades obtidas com e sem presença de palhada (Tabela 9) confirmam que houve diferença significativa entre as duas áreas estudadas.

O clima e o solo de cada local influenciaram no padrão da produtividade simulada (Figura 19), tanto pela influência direta sobre a produtividade da cultura, quanto pela taxa de decomposição de matéria orgânica do solo. A decomposição está relacionada à umidade do material, influenciando na ciclagem de nutrientes, disponibilidade e na imobilização do nitrogênio. Segundo Rossetto et al. (2010), devido à imobilização do nitrogênio, principalmente durante o processo de decomposição, a resposta à adubação nitrogenada é alta mesmo em presença da palhada.

A decomposição da palhada pode imobilizar N (BASSANTA et al., 2003; GAVA et al., 2001) e, conseqüentemente, aumentar o estresse por N a que a cultura estará submetida. Isso ocorre, principalmente, nos primeiros ciclos produtivos após a conversão do sistema de colheita de cana-queimada para cana-crua e, por isso, recomenda-se elevação da dose de N em 20 ou 30% (VITTI et al., 2008) durante os primeiros anos após a conversão.

Diferente da literatura, que sugere a diferenciação nas doses de N entre cana-planta e cana-soca (VITTI et al., 2008; ROSSETTO et al., 2010), nas simulações aqui realizadas essa prática não foi adotada por uma limitação computacional, e também porque os algoritmos responsáveis pela simulação deste componente não são capazes de diferenciar os ciclos produtivos da cultura quanto à absorção de N. Este é um ponto a ser desenvolvido no modelo, em trabalhos futuros.

Tabela 9: Comparação estatística das áreas com e sem remoção da palhada da cana-de-açúcar, utilizando-se o Teste t.

Tratamentos	Blocos			
	São Simão	São Carlos	Pres. Prudente	Catanduva
Sem remoção	90,41 aD	135,18 aA	102,14 aC	117,38 aB
Com remoção	77,87 bB	91,57 bA	75,60 bB	94,19 bA

\* Letras minúsculas iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre os blocos e letras maiúsculas iguais na linha determinam a não existência de diferença significativa entre os tratamentos, para o Teste t no nível de 5% de probabilidade.

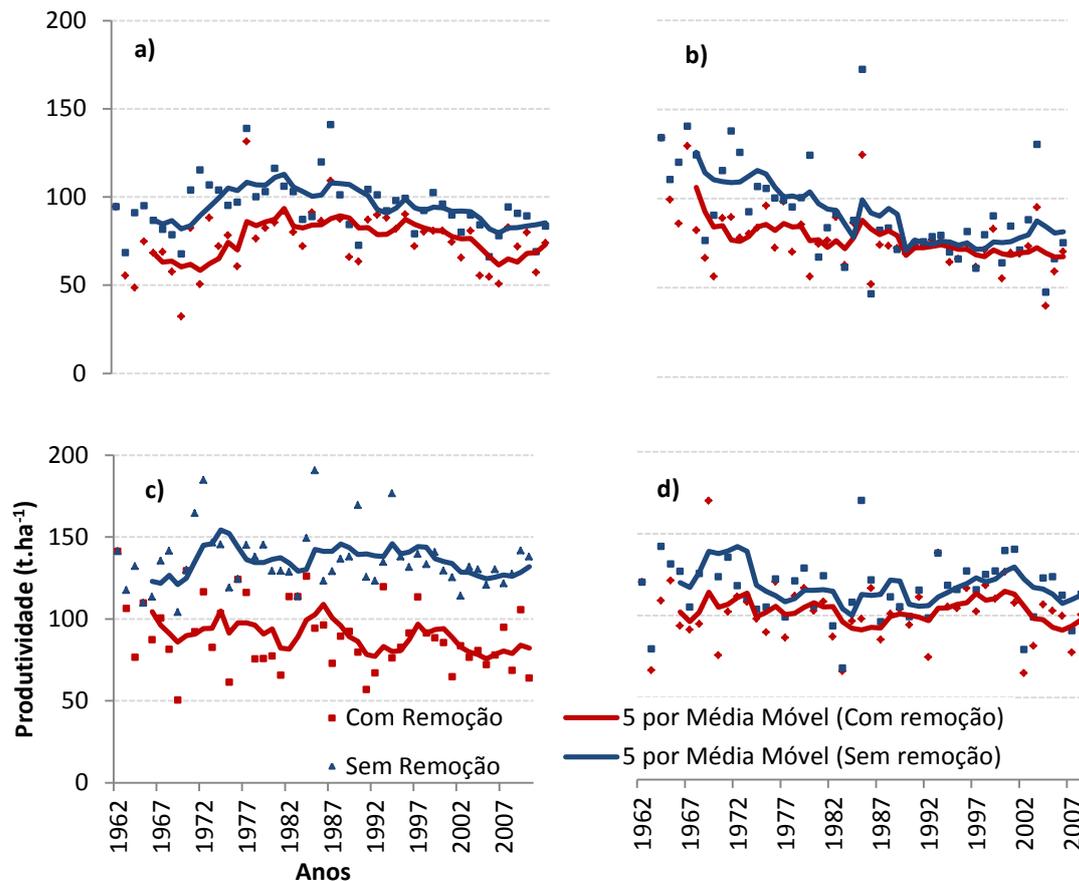


Figura 19: Variação temporal da produtividade de cana com e sem remoção da palhada ao longo de 50 anos em quatro localidades do Estado de São Paulo, a) Catanduva, b) Presidente Prudente, c) São Carlos e d) São Simão.

Em todos os locais simulados, a diferença entre a produtividade das áreas com e sem remoção da palhada (Figura 19) e (Tabela 9) deveu-se principalmente ao estresse hídrico. Como observado nas Figura 21c e Figura 22c, nas áreas com remoção da palhada, o estresse hídrico foi expressivamente superior àquele simulado em áreas sem remoção da palhada (Figura 23c Figura 24c).

As simulações indicaram que os sistemas produtivos modelados não responderam à adubação nitrogenada (Tabela 10 e Tabela 11). Isto parece estar relacionado à elevada taxa de mineralização de N, mesmo nas áreas com remoção total da palhada, que alcança  $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em média (Figura 21b, Figura 22b, Figura 23b e Figura 24b). Esses resultados contrariam dados experimentais como os de ROSSETTO et al. (2010) e VITTI et al. (2007). Cabe salientar que as simulações neste trabalho foram feitas para um longo período (1961 a 2010) e nos experimentos de adubação, alguns deles aqui citados, o período de avaliação é muito mais curto.

Vale destacar que um possível fator de incerteza nas simulações aqui realizadas foi a relação C/N da palhada, fixada em 50 para as simulações. A literatura mostra que a relação C/N parte de valores mais elevados, para a palhada recém cortada, como em obtido por Oliveira et al. (1999), que determinou C/N = 98 para 1ª soca e C/N = 68 para 2ª soca, atingindo ao longo do tempo valores em torno de 40, ou inferiores, com estabilização entre 20 e 15 (SMITH e DOUGLAS, 1971; SIQUEIRA e FRANCO, 1988). Infere-se que os valores de relação C/N utilizados aqui podem ter induzido a mineralização de N e reduzido com isso o efeito da adubação sobre a cultura.

A mineralização e a imobilização do N da palhada por parte da biomassa microbiana ocorrem simultaneamente no solo, e, portanto, a quantidade de N do material em decomposição determinará qual das reações será predominante no sistema (CASSMAN e MUNNS, 1980). Com base nas Figura 21a, Figura 22a, Figura 23a e Figura 24a, pode-se observar que a taxa de imobilização diminui nos períodos mais secos, e, conseqüentemente, a mineralização passaria a contribuir no aporte de nitrogênio para as plantas. Contudo, essa contribuição depende da disponibilidade de água no solo para se efetivar. Segundo Kladvko e Keeney (1987) a imobilização ou mineralização de N está relacionada com a umidade e temperatura do solo. Isto se confirma nas figuras 21c e 22c, que evidenciam a menor imobilização de N no período de maior estresse hídrico, ou seja, no período mais seco do ano.

Em teoria, a exportação de N da área, devido à colheita dos colmos, retirada da palhada do campo, lixiviação, volatilização ou por imobilização, pode não ser suprida com a aplicação anual de 60 kg.ha<sup>-1</sup> de ureia, ou seja, 30 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio. Segundo Trivelin et al. (2002), em cana-soca, as perdas totais (N derivado de ureia e outras fontes assimilados pela cana-de-açúcar) foram da ordem de 90 kg.ha<sup>-1</sup> de N.

Observa-se que em algumas safras, a imobilização de nitrogênio superou 35 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (Figura 23c e Figura 24c). Portanto, quando a taxa de mineralização do nitrogênio, somada à adubação, não foi suficiente para suprir a necessidade da cultura, observa-se redução da produtividade. Por outro lado, nas áreas que receberam 180 kg.ha<sup>-1</sup> de ureia o efeito do estresse de N é menor, como pode ser observado no período de 1987 a 1992 (Figura 20h).

Nas simulações para Presidente Prudente, a diferença na produtividade das doses de 60 e 180 kg.ha<sup>-1</sup> de ureia foi de aproximadamente 2,5 t.ha<sup>-1</sup> (Tabela 10 e Tabela 11). As correlações entre diferentes doses de N e a produtividade de colmos apresentadas por Wiednfeld e Enciso (2008) para avaliação de cana-planta e três ciclos de cana soca, variaram em média 6,13 t.ha<sup>-1</sup> a cada 60 kg de N aplicado. Rossetto et al. (2010) também encontrou

correlação similar, de 6,24 t.ha<sup>-1</sup> a cada 60 kg.ha<sup>-1</sup> de N aplicado. Parte dessa diferença na resposta ao N pode estar relacionada ao fato que as simulações aqui apresentadas tratam de um longo período, enquanto que os trabalhos citados analisaram no máximo quatro safras. Conforme discutido anteriormente, o longo período simulado e a relação C/N utilizada no modelo (igual a 50) têm efeito sobre a taxa de mineralização de N e parecem ter reduzido a sensibilidade da cultura ao N mineral nas simulações.

Tabela 10: Comparação de diferentes doses de ureia na produtividade da cana-de-açúcar, em área com remoção total da palhada, utilizando o Teste t.

Tratamentos	Blocos			
	São Simão	São Carlos	Pres. Prudente	Catanduva
60 kg(ureia). ha <sup>-1</sup>	90,85 aB	102,14 aA	76,64 aC	73,66 aC
120 kg(ureia). ha <sup>-1</sup>	90,43 aB	102,14 aA	77,84 aC	75,49 aC
180 kg(ureia). ha <sup>-1</sup>	89,95 aB	102,13 aA	79,13 aC	75,82 aC

\* Letras minúsculas iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre os blocos e letras maiúsculas iguais na linha determinam a não existência de diferença significativa entre os tratamentos, para o Teste t no nível de 5% de probabilidade.

Tabela 11: Comparação de diferentes doses de ureia na produtividade da cana-de-açúcar, em área sem remoção da palhada, utilizando o Teste t.

Tratamentos	Blocos			
	São Simão	São Carlos	Pres. Prudente	Catanduva
60 kg(ureia). ha <sup>-1</sup>	133,87 aA	117,38 aB	89,68 aC	92,27 aC
120 kg(ureia). ha <sup>-1</sup>	135,54 aA	117,38 aB	91,92 aC	95,08 aC
180 kg(ureia). ha <sup>-1</sup>	136,13 aA	117,37 aB	93,11 aC	95,22 aC

\* Letras minúsculas iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre os blocos e letras maiúsculas iguais na linha determinam a não existência de diferença significativa entre os tratamentos, para o Teste t no nível de 5% de probabilidade.

É interessante notar que, no Brasil, a adubação nitrogenada é realizada na proporção de 1 kg de N para cada tonelada de colmos esperada. Portanto, a aplicação de 60 kg.ha<sup>-1</sup> de ureia ou 30 kg de N está abaixo da expectativa de adubação média do setor. Além do aspecto nutricional, os resultados da simulação indicam que os rendimentos mais elevados, em áreas com manutenção da palhada no solo, estão parcialmente relacionados à diminuição da evapotranspiração e, conseqüentemente, à diminuição do estresse hídrico da cultura. Além disso, para o setor sucroenergético, a retirada da palhada poderá reduzir a produtividade dos canaviais no longo prazo, além de contribuir para o aumento da erosão do solo, a volatilização de N e a lixiviação de insumos, com possível impacto nos custos de produção.

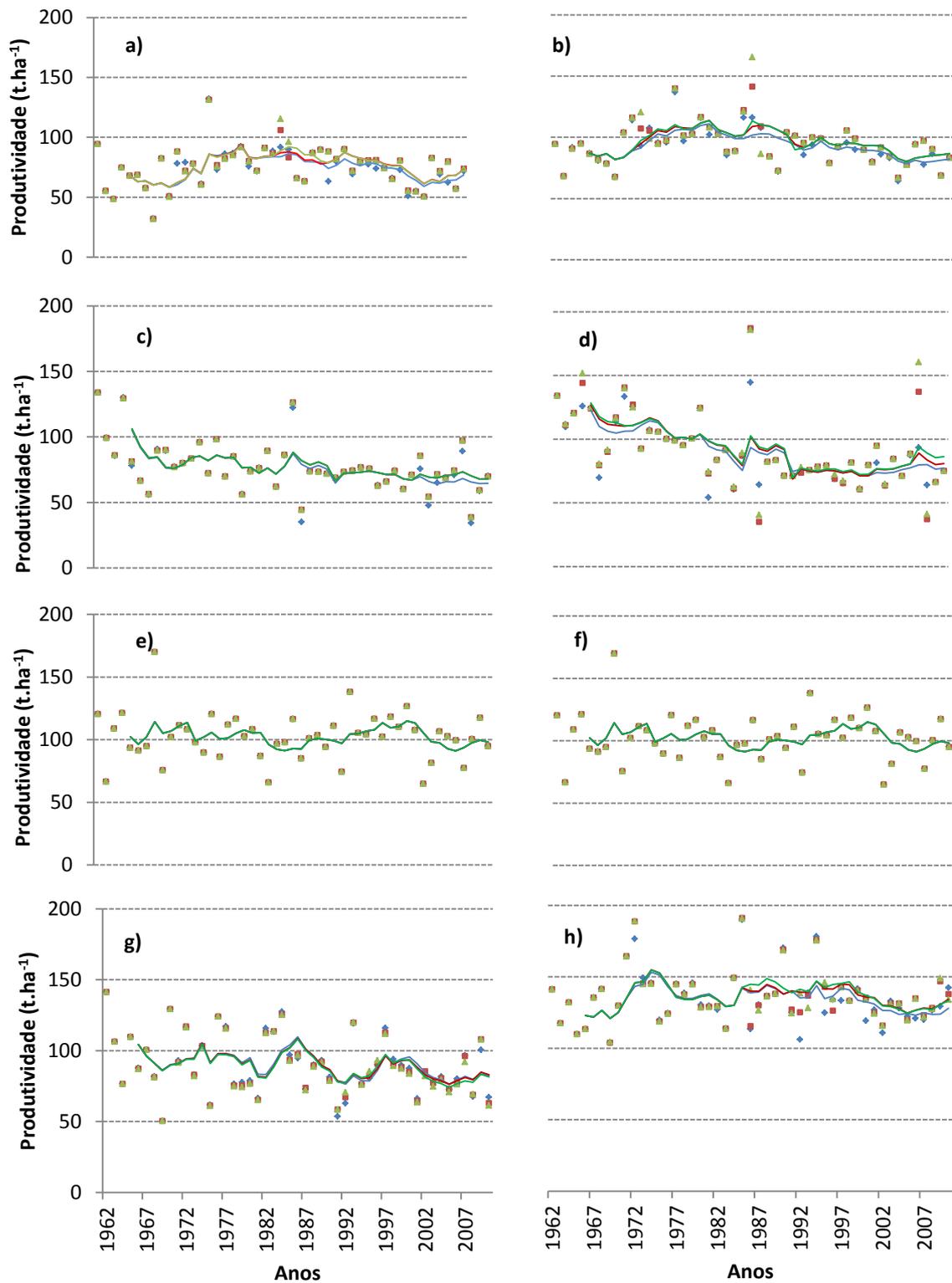


Figura 20: Produtividade de colmos ( $t \cdot ha^{-1}$ ) em função de doses de ureia ( $60 \text{ kg} \cdot ha^{-1}$  em azul,  $120 \text{ kg} \cdot ha^{-1}$  em vermelho e  $180 \text{ kg} \cdot ha^{-1}$  em verde), para a série histórica de 1961 a 2010, simulados por meio do APSIM para: a) Catanduva com remoção de palhada, b) Catanduva sem remoção de palhada, c) Presidente Prudente com remoção de palhada, d) Presidente Prudente sem remoção de palhada, e) São Carlos com remoção de palhada, f) São Carlos sem remoção de palhada, g) São Simão com remoção de palhada e h) São Simão sem remoção de palhada.

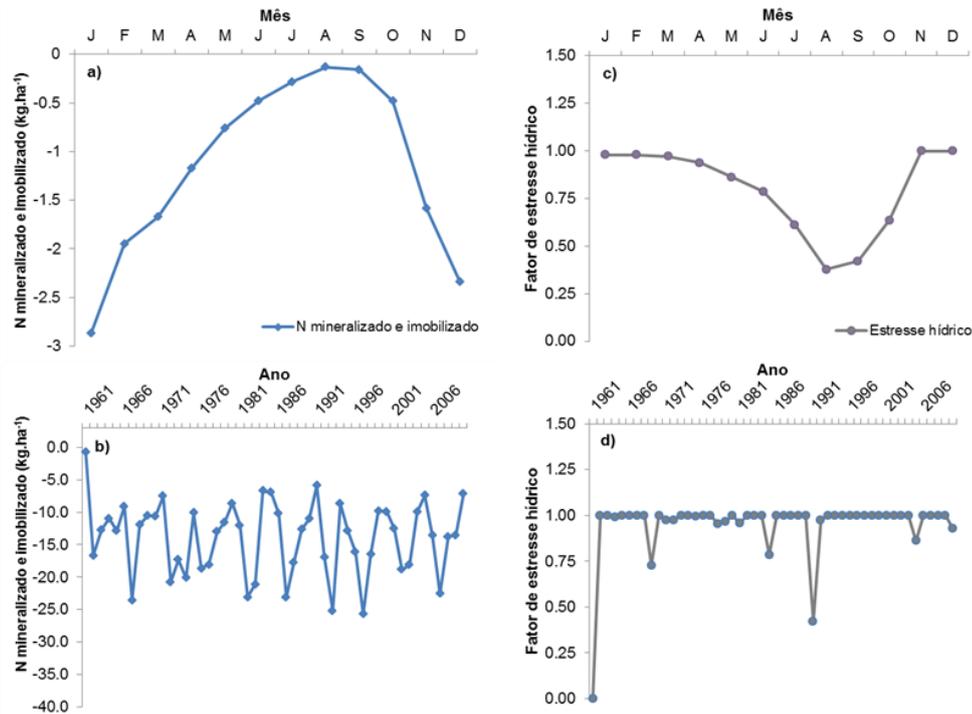


Figura 21: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, com remoção da palhada e aplicação de 60 kg(ureia).ha<sup>-1</sup>a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) (kg.ha<sup>-1</sup>); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado (kg.ha<sup>-1</sup>); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total).

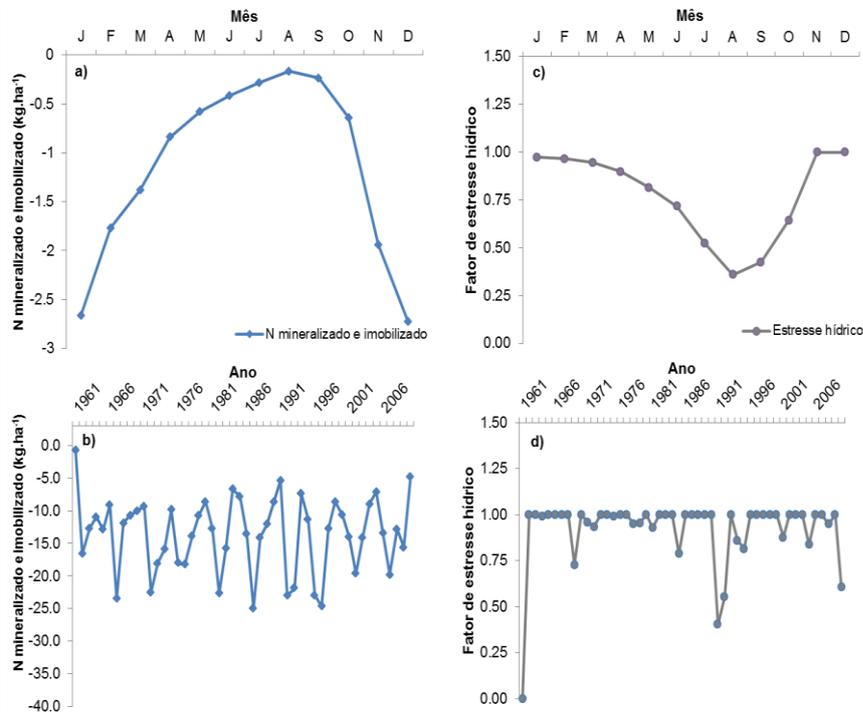


Figura 22: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, com remoção da palhada e aplicação de 180 kg(ureia).ha<sup>-1</sup> a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) (kg.ha<sup>-1</sup>); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado (kg.ha<sup>-1</sup>); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total).

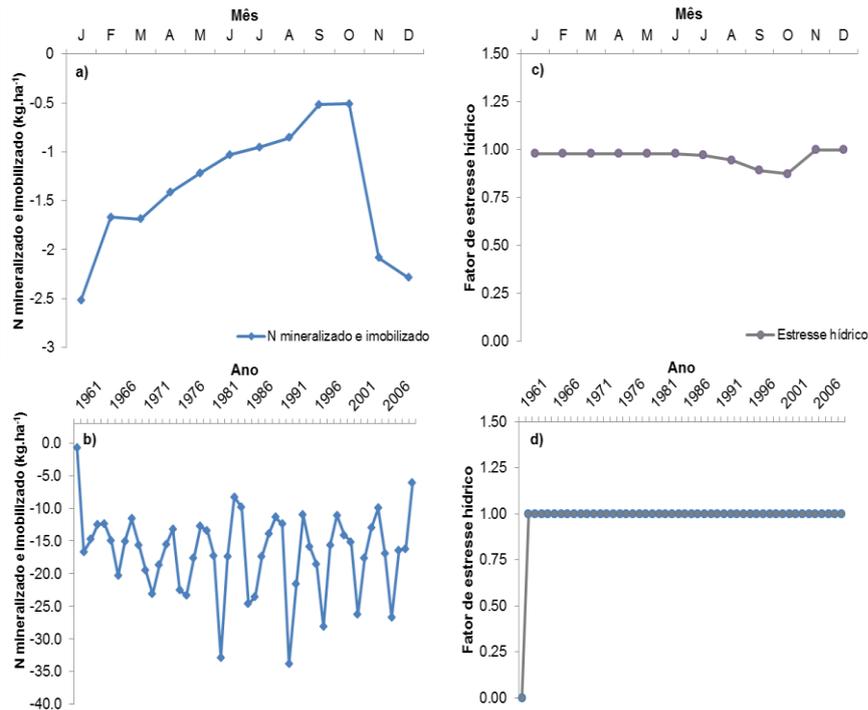


Figura 23: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, sem remoção da palhada e aplicação de 60 kg(ureia).ha<sup>-1</sup> a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) (kg.ha<sup>-1</sup>); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado (kg.ha<sup>-1</sup>); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total).

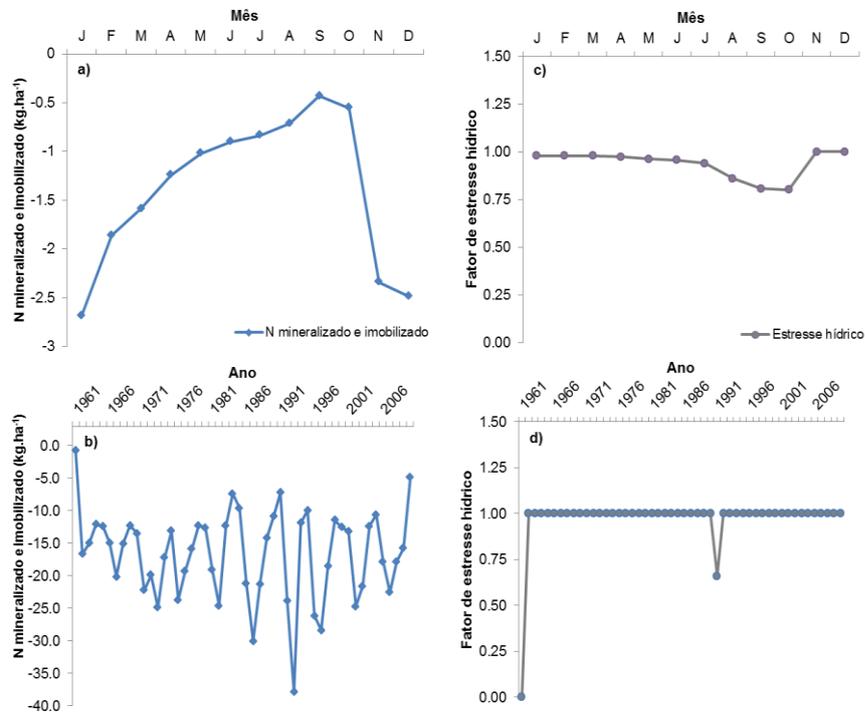


Figura 24: Simulações para cana-de-açúcar plantada em São Simão, sem remoção da palhada e aplicação de 180 kg(ureia).ha<sup>-1</sup> a) variação mensal média do nitrogênio mineralizado (valores positivos) e imobilizado (valores negativos) (kg.ha<sup>-1</sup>); b) variabilidade anual do nitrogênio mineralizado e imobilizado (kg.ha<sup>-1</sup>); c) fator de estresse hídrico mensal (1 = nenhum e 0 = total); d) fator de estresse hídrico anual (1 = nenhum e 0 = total).

## 6. CONCLUSÕES

O modelo APSIM é sensível a 45 dos 51 parâmetros analisados, referentes às características de solo, fisiologia da cana-de-açúcar e atmosfera.

Conforme demonstrado neste estudo, o APSIM é capaz de simular o crescimento da cana-de-açúcar na região Sudeste do Brasil, notadamente a massa seca de colmos.

A partir dos dados utilizados, verificou-se que o modelo APSIM foi capaz de simular os efeitos da manutenção ou remoção da palhada do solo, assim como a relação das diferentes doses de adubação nitrogenada para compensar a remoção do resíduo.

Nas simulações realizadas para quatro localidades do estado de São Paulo, o longo período simulado e a relação C/N igual a 50 tiveram efeito sobre a mineralização de N e reduziram a sensibilidade da cultura ao N mineral. Todavia, as simulações indicaram que a remoção total da palhada reduz significativamente a produtividade de colmos, se comparada à manutenção da palhada no campo.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para melhorar a calibração das variedades de cana-de-açúcar brasileiras, quanto à massa fresca de colmos, o modelo APSIM necessita aprimoramento no algoritmo responsável pela simulação da umidade do colmo. Uma das soluções temporárias, sugerida pela banca examinadora deste trabalho, seria a utilização de um algoritmo de compensação, que corrija o déficit de produção encontrado nas simulações para massa fresca de colmos.

O modelo APSIM ainda apresenta limitações na utilização do módulo que descreve o pH, principalmente nas simulações para as áreas com pH abaixo de 5,5, comumente encontrado em solos brasileiros, portanto, a recomendação dos próprios desenvolvedores do modelo é utilizar o pH 6,5 em todas as simulações e, com isso, evitar a influência do pH na calibração e nas simulações para a cana-de-açúcar brasileira.

Durante as simulações, a diferenciação na absorção de nitrogênio entre cana-planta e cana-soca possibilitaria melhores resultados e, possivelmente, haveria diferença estatística entre as doses de ureia aplicadas em cada tratamento. Para quatro localidades do estado de São Paulo, o longo período simulado e a relação C/N igual a 50 tiveram efeito sobre a mineralização de N e parecem ter reduzido a sensibilidade da cultura ao N mineral. Novos estudos deverão ser realizados para aprimorar os resultados obtidos.

Contudo, os resultados encontrados mostraram que o modelo APSIM possui potencial significativo para auxiliar os estudos e o conhecimento dos processos que envolvem o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil. Destaca-se a necessidade de continuar os estudos sobre a influência da remoção da palhada em longo prazo, tanto para a predição da produtividade dos canaviais, quanto para as questões ambientais e a utilização de ferramentas, como os modelos de simulação baseados em processos, viabiliza este tipo de trabalho, diminuindo os custos operacionais e o tempo para obtenção de resultados.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDIO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D.; MARCHETTI, L.L. Resíduo da colheita mecanizada de cana crua. **Álcool e Açúcar**, n.67, pp.23-25, 1993.
- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**. A comprehensive study of the Saccharum source-to-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 725p.
- ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; BORGES JUNIOR, J. C. F.; HEINEMANN, A. B.; GARCIA, A. G.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. F. HICKMANN, C.; SANTANA, C. B.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. **Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho**. 1. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.
- APSIM-SUGARCANE. **Wiki**. Disponível em: <<http://www.apsim.info/Wiki/APSIM-Documentation.ashx>>. Acesso em: 19 fev. 2012.
- ARALDI, R.; SILVA, F.M.L.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, n.3, 2010.
- ASSIS, C. P.; JUCKSH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J.C.L. Carbon and nitrogen in aggregates of an Oxisol submitted to different use and management systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, pp. 1541–1550, 2006.
- BARBOSA, E. A. **Avaliação fitotécnica de cinco variedades de cana-de-açúcar para o município de Salinas – MG**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Fitotecnia). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, 2005. 70 p.
- BASANTA, M.D.V. **Dinâmica do nitrogênio na cultura de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo de resíduos da colheita**. Tese (Doutorado em Agronomia – Fitotecnia), 2004, 103 p.
- BASANTA, M.V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; MACEDO, L.F. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma**. 116, pp. 235–248. 2003.
- BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo Húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase a matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, pp. 687–694, 1999.
- BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Sci. Agric**. v. 58, pp. 555–560, 2001.
- BORGES, U.; FREITAG, H.; HURTIENNE, T.; NITSCH, M. **PROALCOOL: economia política e avaliação sócio-econômica do programa brasileiro de biocombustível**. Aracajú: UFS, 1988.

- BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural Forest Meteorology**. 31, pp.159-166, 1984.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**. v. 124, pp. 3-22, 2005.
- CÂMARA, G.M.S. **Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar**. In: CÂMARA, G.M. S., OLIVEIRA, E. A. M. (Eds.). *Produção da cana-de-açúcar*. Piracicaba: FEALQ, pp.31-64, 1993.
- CASSMAN, K.G.; MUNNS, D.N. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture temperature and depth. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, pp. 1233-1237, 1980.
- CASTRO, P.R.C.; KLUGE R.A. **Ecofisiologia de Cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz e mandioca**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1999, 126 p.
- CERRI, C.C.; VOLKOFF, B. Matéria orgânica de três solos dos campos inundáveis da Ilha de Marajó/PA. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 12, pp. 93-100, 1988.
- CESNIK, R; MIOCQUE, J. **Melhoramento de Cana-de-açúcar**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 307 p.
- CLEMENTS, H.F. **Registro cultura da cana e controle das culturas: Princípios e práticas**. University Imprensa Havaí, Honolulu, 1980.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro de 2011**. Brasília, Conab, 2011, 20 p.
- CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 23, pp. 425–432, 1999.
- CZYCZA, R. V. **Quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO. J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, C.A.V. resposta da cana-de-açúcar. primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n.2, pp. 283-288, 2006.
- DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper 33**, Roma: FAO, 1979. 193 p.
- EBRAHIM M.K., ZINGSHEIM O., EL-SHOUBAGY M.N., MOORE P.H., KOMOR E. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, 153 (5-6), pp. 593-602. 1998.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema de informações de solos brasileiros**. Disponível em: <<http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2012.
- FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.A.; DANTAS NETO, J. Índice de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, n. 4, pp. 356-62, 2008.
- FERREIRA, E.A.B.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C.; RAMOS, M.L.G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, pp. 625–1635, 2007.
- GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, pp. 445-479, 1983.
- GAVA, G.J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada . **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.
- GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, p. 808-810. Washington, 2007.
- HEATON, E. A; DOHLEMAN, FG; LONG, SP. **Meeting US biofuel goals with less land: the potential of Miscanthus**. Glob. Chang. Biol., 14, 2008, 15 p.
- HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. **Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agrônômica**. 1 ed. Santo Antônio de Goiás, GO, Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 26 p.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Dados de produtividade média da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 10 ago. 2011.
- INMAM-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interseptation of sugarcane. **Field Crop Res.** 36, pp. 41-51. 1994.
- INMAN-BABER, N.G.; Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, pp.107-122, 2004.
- INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **S. Afr. J. Plant Soil**, Mount Edgecombe, v.8, n.2, pp. 93-99, 1991.
- INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, pp.185-202, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET – **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 20 jan. 2012.

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

JANZEN, H.; CAMPBELL, C.; IZAURRALDE, R.; ELLERT, B.; JUMA, N.; MCGILL, W.; ZENTNER, R. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. **Soil and Tillage Research**, v. 47, pp.181–195, 1998.

JOHNSON, M.G., KERN, J.S. Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, pp. 200-210, 1993.

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

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

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

KLADIVKO, J.E.; KEENEY, D.R. Soil nitrogen mineralization as affected by water and temperature interaction. **Biol Fertt Soils**, v. 5, pp. 248-252, 1987.

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

LANDELL, M. G. A.; MACHADO, R. S.; SILVA, D. N.; SCARPARI, M. S.; XAVIER, M. A.; CRESTE, S.; ANJOS, I. A.; PRADO, H.; PINTO, L. R.; BIDÓIA, M. A. P. A interação da cana-de-açúcar e os ambientes de produção estressantes. In: CRUSCIOL, C. A. C. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF, pp. 43-48, 2010.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RIMA, 2000, 531 p.

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

LONG, S. P.; ZHU, X.-G.; NAIDU, S. L.; ORT, D. R. **Can improvement in photosynthesis increase crop yields?**. *Plant, Cell & Environment*, pp. 315-330, 2006.

- MARCHIORI JUNIOR, MILTON; MELO, WANDERLEY JOSÉ DE. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 35, n. 6, 2000.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yields in Southern Brazil. **Climatic Chang**, v.1, pp.101-110, 2012.
- MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane brazilian production systems. **Agronomy Journal**, v.103, pp.100-110, 2011.
- MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; COSTA, A. A.; ROSA, F. V. Efeito residual das leguminosas sobre o rendimento físico e econômico da cana-planta. Campinas: IAC (**Boletim científico IAC**, 32), 1994. 15 p.
- MCCOWN, R. L.; WILLIAMS, J. **AUSIM: A cropping system model for operational research**. SSA IMACS 1989 Biennial Conference on Model ling and Simulation Canberra. Australian National University, 25-27 de Setembro, 1989.
- MCCOWN, R.L. **Systems modeling**. Disponível em: < [http://www.bob-mccown.com/?page\\_id=676](http://www.bob-mccown.com/?page_id=676)>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- MILLER, J.D.; GILBERT, R.A. **Sugarcane Botany: A Brief View**. University of Florida IFAS extension. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/SC034>>. Acesso em: 06 dez. 2011.
- MIRANDA, C. C.; CANELLAS, L. P.; TRINDADE NASCIMENTO, M. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, 2007.
- MOORE, P. H. **Sugarcane Biology, Yield and Potential for Improvement**. Bioen Workshop on Sugarcane Improvement. São Paulo: FAPESP, 2009.
- 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, Atualização em produção de Cana-de-Açúcar**. Piracicaba: - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, pp.11-18, 2006.
- NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Ciências – Física do Ambiente), Escola Superior de Agricultura – Universidade de São Paulo, 2010, 98 p.
- NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; CONSOLI, M. **Mapeamento e quantificação do setor sucroenergético 2008**. Ribeirão Preto: MARKESTRAT/ FUNDACE/ UNICA, 2009.
- NG KEE KWONG, K.F.; DEVILLE, J. Residual fertilizer nitrogen as influenced by timing and nitrogen forms in a silty clay soil under sugarcane Mauritius. **Fertilizer Research**, v.14, pp. 219-226, 1987.

- O'LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models in their prediction of sucrose yield. **Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.**, 1999, p. 73.
- OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; DOURADO-NETO, D.; TRIVELIN, P.C.O.; TOMINAGA, T.T.; NAVARRO, R. DE C.; PICCOLO, M. DE C.; CÁSSARO, F.A.M. Nitrogen dynamics in a soil-sugar cane system. **Scientia Agricola**, v. 57, pp. 467-472, 2000.
- ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e Adubação da Cana-de-Açúcar**. IAA/PLANALSUCAR. Superintendência Geral, Piracicaba, 1983, 369 p.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo. Ed. Nobel, 1979.
- PROBERT M.E.; DIMES J.P.; KEATING B.A.; DALAL R.C.; STRONG W.M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems, **Agric. Syst.**, v. 56, pp 1-28, 1998.
- THORBURN P.J.; PROBERT M.E.; ROBERTSON F.A. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue, **Field Crops Research**, v. 70, pp. 223-232, 2001.
- RABBINGE, R., 1993. The ecological background of food production. In: Chadwick, D.J., Marsh, J. (Eds.), **Crop Protection and Sustainable Agriculture**. Ciba Foundation Symposium, vol. 177. John & Wiley and Sons, Chicester, pp. 2-29, 1993.
- RAE, A.L.; GROF, C.P.L.; CASU, R.E.; BONNET, G.D. sucrose accumulation in the sugarcane stem: pathways and control points for transport and compartmentation. **Field Crop Research**, Amsterdam, v.92, pp.159-168, 2005.
- RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, n. 4, v.185, pp. 249-258, 2000.
- RESCK, D.V.S. Manejo de solos e sustentabilidade dos sistemas agrossilvipastoris na região dos Cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., Brasília, 1996. Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: Anais / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: **Proceedings**. Planaltina, Embrapa-CPAC, pp. 81-89, 1996.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de Cana-de-açúcar: estado da arte**. 2 ed. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2007, 198 p.
- ROBERTSON, M. J.; BONNETT, G. D., HUGHES, R. M., MUCHOW, R. C.; CAMPBELL, J. A. **Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies**. Aust. J. Pl. Physiol, pp. 819-828, 1998.
- RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da Cana-de-açúcar**. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Campus Botucatu, 1995. 101 p.

- ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A.C.; TAVARES, S. Cana-de-açúcar. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Ed.) **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba, Cap. 5, v. 3, pp. 160-230, 2010.
- ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI A. C, CANTARELLA H. (2010) Fertility maintenance and soil recovery in sugarcane crops. In: CORTEZ, L. A. B. (Ed.), **Sugarcane Bioethanol R&D For Productivity And Sustainability**. São Paulo: Blucher, pp. 381-403, 2010.
- SALTELLI, A. Sensitivity analysis for importance assessment. **Risk Analysis**, New York, v. 22, n. 3, pp. 579-590, 2002.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 882 p.
- SECEX. **Exportações de Etanol e Açúcar do Brasil em 2010**. Principais Destinos. São Paulo, 2010.
- SILVA, A.S.; SANTOS, C.M.; ARANTES, M.T.; PINCELLI, R.P. Fenologia da cana-de-açúcar. p.8-21. 2010. In: In: CRUSCIOL, C. A. C. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF, pp. 43-48, 2010.
- SILVA, F. A. S. The ASSISTAT Software: statistical assistance. In: International Conference on Computers in Agriculture, 6, Cancun, 1996. **Anais...** Cancun: American Society of Agricultural Engineers, pp.294-298, 1996.
- SILVA, L. C. F.; CASAGRANDE J. C. Nutrição Mineral da Cana-de-Açúcar: Macronutrientes. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e Adubação da Cana-de-Açúcar**. IAA/PLANALSUCAR. Superintendência Geral, Piracicaba, 1983, 369 p.
- SILVA, M. A.; PINCELLI, R. P. Alterações morfológicas na cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. In: CRUSCIOL, C. A. C. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF, pp. 43-48, 2010.
- SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE, J.R.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, pp. 171-178, 2004.
- SINGELS, A., SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R.A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugar cane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, v.92, pp.249-260, 2005.
- SINGELS, A.; JONES, M.; Van der Berg, M. DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO **Sugarcane Plant Module. Scientific Documentation**. International Consortium for sugarcane Modelling, South African Sugarcane Research Institute, Mount Edgecombe, South Africa, 2008, 34 p.
- SIQUEIRA, J.O.; FRANCO, A.A. **Biotecnologia do solo: Fundamentos e perspectivas**. Brasília, MEC; ABEAS; ESAL; FAEPE, 1988. 236p.

- SMITH, J.H.; DOUGLAS, C.L. Wheat straw decomposition in the field. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 35, pp. 269-272, 1971.
- SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, pp. 97-260, 2006.
- SZMRECSÁNYI, T.; MOREIRA, E. P. **O desenvolvimento da agroindústria canavieira no Brasil desde a Segunda Guerra Mundial**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 5, n. 11, p. 57-79, 1991.
- THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling** – A mathematical approach to plant and crop physiology. 1 ed. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669 p.
- TRIVELIN, P.C.O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com uso do traçador <sup>15</sup>N**. Livre docência, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000. 143p.
- TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIQUES, J.C. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.12, pp.1375-1385, 1995.
- TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 37, n. 2, pp. 193-201, 2002.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. **Setor Sucroenergético - Histórico**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/default.asp?cchCode={C2B8C535-736F-406B-BEB2-5D12B834EF59}>>. Acesso em: 01 abr. 2012.
- VALE, D. W.; PRADO, R. M.; AVALHÃES, C. C.; HOJO, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.**, Recife, v.6, n.2, pp.189-196, 2011.
- VITTI, A. C.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; ROSSETTO, R. Nutrição e Adubação: Nitrogênio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. 882 p.
- VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesq. agropec.bras.**, Brasília, v.42, n.2, pp.249-256, 2007.
- WACLAWOVSKY, A. J.; SATO, P. M.; LEMBKE, C. G.; MOORE, P. H.; SOUZA, G. M. **Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose contet**. Plant Biotechnology journal, pp. 263-276, 2010.
- WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. 449p.

- WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **Agricultural Water Management**. Elsevier, v.43, pp.173-182, 2000.
- WIEDENFELD. B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south texas. **AgronomyJournal**, v. 100, pp. 665-671. 2008.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLES, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDEMMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, pp. 8995-9005, 1985.

## ANEXO 1

<b>Parâmetro de entrada no APSIM</b>	<b>Sigla nos gráficos</b>	<b>Unidades</b>
Sugar_cane_fraction	CF	0-1
Sugar_green_leaf_no	GLN	-
Initial_nitrogen_NH4	INNH4	Kg.ha <sup>-1</sup>
Initial_nitrogen_NO3	INN03	Kg.ha <sup>-1</sup>
Initial_nitrogen_SW	INSW	mm.mm <sup>-1</sup>
Initial_water	IW	%
Sugar_leaf_size	LS	mm <sup>2</sup>
Sugar_leaf_size_no	LSN	-
Sugar_min_sstem_sucrose	PC_MSS	g.m <sup>-2</sup>
Sugar_min_sstem_sucrose_redn	MSSR	g.m <sup>-2</sup>
SoilOrganicMatter_EnrACoeff	EAC	-
SoilOrganicMatter_EnrBCoeff	EBC	-
SoilOrganicMatter_FBiom	FBIOM	0-1
SoilOrganicMatter_Finert	FINERTO	0-1
SoilOrganicMatter_OC	OC	%
SoilOrganicMatter_RootCn	RCN	-
SoilOrganicMatter_RootWt	RWT	-
SoilOrganicMatter_SoilCn	SCN	-
SoilWat_CatchmentArea	CTMA	-
SoilWat_Cn2Bare	CN2B	0-100
SoilWat_Cn2Red	CNR	0-100
SoilWat_CnCov	CNC	0-1
SoilWat_DischargeWidth	DW	-
SoilWat_KLAT	KLAT	mm.dia <sup>-1</sup>
SoilWat_MaxPond	MP	-
SoilWat_MWCON	MWCON	0-1
SoilWat_Salb	SALB	-
SoilWat_Slope	SLOPE	-
SoilWat_SummerCona	SCONA	-
SoilWat_SummerU	SU	mm
SoilWat_SWCON	SWCON	0-1
SoilWat_WinterCona	WCONA	-
SoilWat_WinterU	WU	mm
SoliWat_DiffusConst	DFC	-
SoliWat_DiffusSlope	DFS	-
Sugar_stress_factor_stalk0	SFS	0-1
Sugar_sucrose_delay	SD	0-2000
Sugar_sucrose_fraction_stalk	SUCFS	0-1
Sugar_tillerf_leaf_size	TLS	mm <sup>2</sup>
Sugar_tillerf_leaf_size_no	TLSN	-
Sugar_tt_begcane_to_flowering	TTBF	Graus.dia <sup>-1</sup>
Sugar_tt_emerg_to_begcan	TTEB	Graus.dia <sup>-1</sup>
Sugar_tt_flowering_to_crop_end	TTFCE	Graus.dia <sup>-1</sup>
Water_AirDry	AIRDRY	mm.mm <sup>-1</sup>
Water_BD	BD	g.cm <sup>-3</sup>
Water_DUL	DUL	mm.mm <sup>-1</sup>
Water_LL15	LL15	mm.mm <sup>-1</sup>
Water_SAT	SAT	mm.mm <sup>-1</sup>
Water_Sugar_KL	KL	mm.dia <sup>-1</sup>
Water_Sugar_LL	SUGLL	mm.mm <sup>-1</sup>
Water_Sugar_XF	XF	0-1

## ANEXO 2

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>  
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.30/07/2012

Arquivo RESULTADOSCOMPARACAOTUKEY.TXT  
 Data 20/11/2012 Hora 13:04:45

## EXPERIMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS COM REPETIÇÕES

## QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	0.06585	0.06585	164.2076 **
Blocos	3	0.05381	0.01794	44.7323 **
Trat x Bloc	3	0.01171	0.00390	9.7363 **
Resíduo	368	0.14756	0.00040	
Total	375	0.27894		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
1	368	6.6855	164.2076	<0.001
3	368	3.8208	44.7323	<0.001
3	368	3.8208	9.7363	<0.001

## MÉDIAS E MEDIDAS

## Médias tratamento

1	0.11128 a
2	0.08481 b

dms = 0.00406

## Médias de bloco

1	0.08414 c
2	0.11338 a
3	0.08887 c
4	0.10578 b

dms = 0.00753

## MÉDIAS DE INTERAÇÃO

### Tratamentos x Blocos

Bloco

Trat. -----

B1      B2      B3      B4

T1    0.0904 aD   0.1352 aA   0.1021 aC   0.1174 aB

T2    0.0779 bB   0.0916 bA   0.0756 bB   0.0942 bA

dms para colunas =    0.0081    dms para linhas =    0.0106

Classific.c/letras minúsculas    Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

MG = 0.09804

CV% = 20.42

Ponto médio = 0.11971

### DADOS

Os dados não foram apresentados porque a tabela excede a largura desta tela ou porque a quantidade deles é grande

### SIGLAS E ABREVIACÕES

UFMG = Universidade Federal de Campina Grande

CTRN = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola

FV = Fonte de variação    GL = Graus de liberdade

SQ = Soma de quadrado      QM = Quadrado médio

F = Estatística do teste F    MG = Média geral

CV% = Coeficiente de variação em %

dms = Diferença mínima significativa

## ANEXO 3

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>  
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.30/07/2012

Arquivo RESULTADOCOMPARATIVOCOMESEMREMOCAOTESTT.TXT  
 Data 20/11/2012 Hora 12:30:32

## EXPERIMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS COM REPETIÇÕES

## QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	65845.84656	65845.84656	164.2076 **
Blocos	3	53811.78954	17937.26318	44.7323 **
Trat x Bloc	3	11712.54959	3904.18320	9.7363 **
Resíduo	368	147564.87336	400.99150	
Total	375	278935.05904		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
1	368	6.6855	164.2076	<0.001
3	368	3.8208	44.7323	<0.001
3	368	3.8208	9.7363	<0.001

## MÉDIAS E MEDIDAS

## Médias tratamento

1	111.27540 a
2	84.80867 b

DMS = 4.05786

## Médias de bloco

1	84.14068 c
2	113.37560 a
3	88.86795 c
4	105.78390 b

DMS = 5.73868

## MÉDIAS DE INTERAÇÃO

## Tratamentos x Blocos

-----  
Bloco

Trat. -----

B1        B2        B3        B4

-----  
T1    90.4108 aD   135.1775 aA   102.1372 aC   117.3761 aB

T2    77.8705 bB   91.5736 bA    75.5987 bB    94.1918 bA

-----  
dms para colunas =    8.1157    dms para linhas =    8.1157

Classific.c/letras minúsculas    Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste t ao nível de 5% de probabilidade

MG = 98.04203

CV% = 20.42

Ponto médio = 119.71400

## DADOS

-----  
Os dados não foram apresentados porque a tabela excede a largura desta tela ou porque a quantidade deles é grande

## SIGLAS E ABREVIACÕES

UF CG = Universidade Federal de Campina Grande

CTR N = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola

FV = Fonte de variação    GL = Graus de liberdade

SQ = Soma de quadrado        QM = Quadrado médio

F = Estatística do teste F        MG = Média geral

CV% = Coeficiente de variação em %

dms = Diferença mínima significativa

## ANEXO 4

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>  
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.30/07/2012

Arquivo RESULTADOSEMREMOCAO.TXT Data 20/11/2012 Hora 13:18:47

## EXPERIMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS COM REPETIÇÕES

## QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	482.99966	241.49983	0.5203 ns
Blocos	3	180062.16697	60020.72232	129.3097 **
Trat x Bloc	6	191.36446	31.89408	0.0687 **
Resíduo	552	256217.70905	464.16252	
Total	563	436954.24014		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
2	552	0.0253	0.5203	>0.050
3	552	3.8002	129.3097	<0.001
6	552	0.1128	0.0687	<0.010

## MÉDIAS E MEDIDAS

## Médias tratamento

1	108.30080 a
2	109.98060 a
3	110.45880 a

dms = 5.22364

## Médias de bloco

1	135.17780 a
2	117.37630 b
3	91.57392 c
4	94.19213 c

dms = 6.59822

## MÉDIAS DE INTERAÇÃO

## Tratamentos x Blocos

-----  
Bloco

Trat. -----

B1        B2        B3        B4

-----  
T1    133.8653 aA    117.3791 aB    89.6845 aC    92.2742 aC

T2    135.5418 aA    117.3759 aB    91.9225 aC    95.0822 aC

T3    136.1264 aA    117.3739 aB    93.1148 aC    95.2200 aC  
-----

dms para colunas = 10.4473    dms para linhas = 11.4285

Classific.c/letras minúsculas    Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

MG = 109.58005

CV% = 19.66

Ponto médio = 121.18650

## DADOS

-----  
Os dados não foram apresentados porque a tabela excede a largura desta tela ou porque a quantidade deles é grande  
-----

## SIGLAS E ABREVIACÕES

UFCEG = Universidade Federal de Campina Grande

CTRN = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola

FV = Fonte de variação    GL = Graus de liberdade

SQ = Soma de quadrado    QM = Quadrado médio

F = Estatística do teste F    MG = Média geral

CV% = Coeficiente de variação em %

dms = Diferença mínima significativa

## ANEXO 5

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>  
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.30/07/2012

Arquivo RESULTADOSSEMREMOOCAOTESTT.TXT  
 Data 20/11/2012 Hora 11:10:34

## EXPERIMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS COM REPETIÇÕES

## QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	482.99966	241.49983	0.5203 ns
Blocos	3	180062.16697	60020.72232	129.3097 **
Trat x Bloc	6	191.36446	31.89408	0.0687 **
Resíduo	552	256217.70905	464.16252	
Total	563	436954.24014		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
2	552	0.0253	0.5203	>0.050
3	552	3.8002	129.3097	<0.001
6	552	0.1128	0.0687	<0.010

## MÉDIAS E MEDIDAS

## Médias tratamento

1	108.30080 a
2	109.98060 a
3	110.45880 a

DMS = 4.36032

## Médias de bloco

1	135.17780 a
2	117.37630 b
3	91.57392 c
4	94.19213 c

DMS = 5.03486

## MÉDIAS DE INTERAÇÃO

## Tratamentos x Blocos

-----  
Bloco

Trat. -----

B1        B2        B3        B4

-----  
T1    133.8653 aA    117.3791 aB    89.6845 aC    92.2742 aC

T2    135.5418 aA    117.3759 aB    91.9225 aC    95.0822 aC

T3    136.1264 aA    117.3739 aB    93.1148 aC    95.2200 aC

-----  
dms para colunas =    8.7206    dms para linhas =    8.7206

Classific.c/letras minúsculas    Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste t ao nível de 5% de probabilidade

MG = 109.58005

CV% = 19.66

Ponto médio = 121.18650

## DADOS

-----  
Os dados não foram apresentados porque a tabela excede a largura desta tela ou porque a quantidade deles é grande  
-----

## SIGLAS E ABREVIACÕES

UFCEG = Universidade Federal de Campina Grande

CTRN = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola

FV = Fonte de variação    GL = Graus de liberdade

SQ = Soma de quadrado    QM = Quadrado médio

F = Estatística do teste F    MG = Média geral

CV% = Coeficiente de variação em %

dms = Diferença mínima significativa

## ANEXO 6

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>  
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.30/07/2012

Arquivo RESULTADOSEMREMOCAO.TXT Data 20/11/2012 Hora 13:18:47

## EXPERIMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS COM REPETIÇÕES

## QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	482.99966	241.49983	0.5203 ns
Blocos	3	180062.16697	60020.72232	129.3097 **
Trat x Bloc	6	191.36446	31.89408	0.0687 **
Resíduo	552	256217.70905	464.16252	
Total	563	436954.24014		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
2	552	0.0253	0.5203	>0.050
3	552	3.8002	129.3097	<0.001
6	552	0.1128	0.0687	<0.010

## MÉDIAS E MEDIDAS

## Médias tratamento

1	108.30080 a
2	109.98060 a
3	110.45880 a

dms = 5.22364

## Médias de bloco

1	135.17780 a
2	117.37630 b
3	91.57392 c
4	94.19213 c

dms = 6.59822

## MÉDIAS DE INTERAÇÃO

## Tratamentos x Blocos

-----  
Bloco

Trat. -----

B1        B2        B3        B4

-----  
T1   133.8653 aA   117.3791 aB   89.6845 aC   92.2742 aC

T2   135.5418 aA   117.3759 aB   91.9225 aC   95.0822 aC

T3   136.1264 aA   117.3739 aB   93.1148 aC   95.2200 aC  
-----

dms para colunas = 10.4473    dms para linhas = 11.4285

Classific.c/letras minúsculas    Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

MG = 109.58005

CV% = 19.66

Ponto médio = 121.18650

## DADOS

-----  
Os dados não foram apresentados porque a tabela excede a largura desta tela ou porque a quantidade deles é grande  
-----

## SIGLAS E ABREVIACÕES

UFCEG = Universidade Federal de Campina Grande

CTRN = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola

FV = Fonte de variação    GL = Graus de liberdade

SQ = Soma de quadrado    QM = Quadrado médio

F = Estatística do teste F    MG = Média geral

CV% = Coeficiente de variação em %

dms = Diferença mínima significativa

## ANEXO 7

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>  
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.30/07/2012

Arquivo RESULTADOSSEMREMOOCAOTESTT.TXT  
 Data 20/11/2012 Hora 11:10:34

## EXPERIMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS COM REPETIÇÕES

## QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	482.99966	241.49983	0.5203 ns
Blocos	3	180062.16697	60020.72232	129.3097 **
Trat x Bloc	6	191.36446	31.89408	0.0687 **
Resíduo	552	256217.70905	464.16252	
Total	563	436954.24014		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
2	552	0.0253	0.5203	>0.050
3	552	3.8002	129.3097	<0.001
6	552	0.1128	0.0687	<0.010

## MÉDIAS E MEDIDAS

## Médias tratamento

1	108.30080 a
2	109.98060 a
3	110.45880 a

DMS = 4.36032

## Médias de bloco

1	135.17780 a
2	117.37630 b
3	91.57392 c
4	94.19213 c

DMS = 5.03486

## MÉDIAS DE INTERAÇÃO

## Tratamentos x Blocos

-----  
Bloco

Trat. -----

B1        B2        B3        B4

-----  
T1   133.8653 aA   117.3791 aB   89.6845 aC   92.2742 aC

T2   135.5418 aA   117.3759 aB   91.9225 aC   95.0822 aC

T3   136.1264 aA   117.3739 aB   93.1148 aC   95.2200 aC  
-----

dms para colunas = 8.7206    dms para linhas = 8.7206

Classific.c/letras minúsculas    Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste t ao nível de 5% de probabilidade

MG = 109.58005

CV% = 19.66

Ponto médio = 121.18650

## DADOS

-----  
Os dados não foram apresentados porque a tabela excede a largura desta tela ou porque a quantidade deles é grande  
-----

## SIGLAS E ABREVIACÕES

UFCEG = Universidade Federal de Campina Grande

CTRN = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola

FV = Fonte de variação    GL = Graus de liberdade

SQ = Soma de quadrado    QM = Quadrado médio

F = Estatística do teste F    MG = Média geral

CV% = Coeficiente de variação em %

dms = Diferença mínima significativa

## REFERÊNCIAS DO ASSISTAT

Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. A New Version of The Assistat-Statistical Assistance Software. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 4, Orlando-FL-USA: Anais... Orlando: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. p.393-396.

Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4,n.1, p71-78,2002.

Silva, F.de A.S.e. The ASSISTAT Software: statistical assistance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 6, Cancun, 1996. Anais... Cancun: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p.294-298.

OBS: Estes resultados estão em fonte Courier New de tamanho = 12