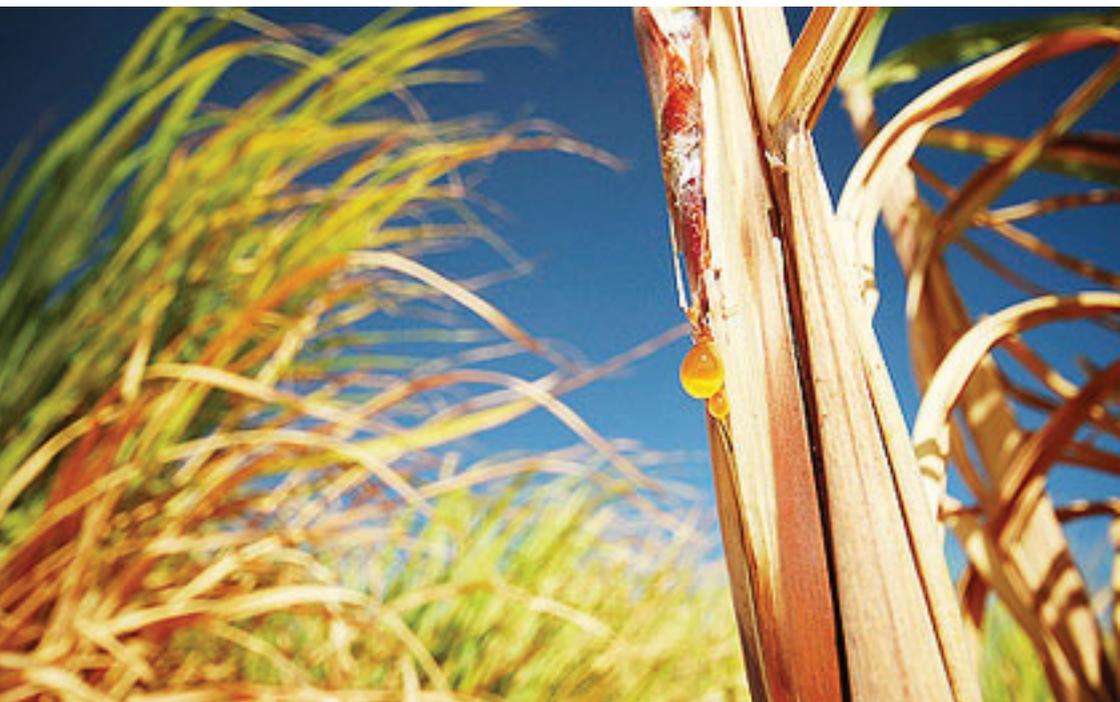


## MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CRESCIMENTO DE CANA-DE- AÇÚCAR PARA PREDIÇÃO DE PRODUTIVIDADE POTENCIAL





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

# ***Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 31***

## **MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CRESCIMENTO DE CANA-DE- AÇÚCAR PARA PREDIÇÃO DE PRODUTIVIDADE POTENCIAL**

*Fabio Cesar da Silva*

*Valter Barbieri*

*Carlos Gregorio Hernandez Díaz-Ambrona*

*Alexandre de Castro*

*Felipe Ferreira Bocca*

*Stefan Barradas Podslan*

## **Embrapa Informática Agropecuária**

Av. André Tosello, 209 - Barão Geraldo  
Caixa Postal 6041 - 13083-886 - Campinas, SP  
Fone: (19) 3211-5700 - Fax: (19) 3211-5754  
[www.cnptia.embrapa.br](http://www.cnptia.embrapa.br)  
[sac@cnptia.embrapa.br](mailto:sac@cnptia.embrapa.br)

## **Comitê de Publicações**

Presidente: *Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá*

Membros: *Poliana Fernanda Giachetto, Roberto Hiroshi Higa, Stanley Robson de Medeiros Oliveira, Maria Goretti Gurgel Praxedes, Adriana Farah Gonzalez, Neide Makiko Furukawa*

Membros suplentes: *Alexandre de Castro, Fernando Attique Máximo, Paula Regina Kuser Falcão*

Supervisor editorial: *Stanley Robson de Medeiros Oliveira, Neide Makiko Furukawa*

Revisor de texto: *Adriana Farah Gonzalez*

Normalização bibliográfica: *Maria Goretti Gurgel Praxedes*

Editoração eletrônica/Capa: *Rebeca Freitas da Silva*

Imagem da capa: <https://www.google.com.br/imghp>

Secretária: *Carla Cristiane Osawa*

## **1ª edição on-line 2012**

### **Todos os direitos reservados.**

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

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

#### **Embrapa Informática Agropecuária**

---

Modelagem computacional do crescimento de cana-de-açúcar para predição de produtividade potencial / Fabio Cesar da Silva .... [et al.]- Campinas : Embrapa Informática Agropecuária, 2012.  
40 p. il.: cm. - (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Informática Agropecuária, ISSN 1677-9266; 31 ).

1. Modelo matemático ecofisiológico. 2. Produtividade potencial. 3. Curva de crescimento.  
I. Silva, Fabio Cesar. I. Embrapa Informática Agropecuária. II. Título. III. Série.

CDD: 003.3

# Sumário

<b>Resumo</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	7
<b>Introdução</b> .....	8
<b>Material e Métodos</b> .....	12
Produção de carboidrato pela cana-de-açúcar .....	13
Carboidrato bruto corrigido (CBC).....	17
Produção líquida: mensal e acumulada .....	20
Modelagem, construção e parametrização .....	23
Biomassa total e produção de colmos .....	24
Validação experimental e estatísticas .....	25
Análises estatísticas .....	26
<b>Resultados e Discussão</b> .....	28
Validação .....	28
Resultados da validação .....	31
<b>Conclusão</b> .....	33
<b>Referências</b> .....	34



# MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CRESCIMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PREDIÇÃO DE PRODUTIVIDADE POTENCIAL

---

*Fabio Cesar da Silva<sup>1</sup>*

*Valter Barbieri<sup>2</sup>*

*Carlos Gregorio Hernandez Díaz-Ambrona<sup>3</sup>*

*Alexandre de Castro<sup>4</sup>*

*Felipe Ferreira Bocca<sup>5</sup>*

*Stefan Barradas Podslan<sup>6</sup>*

## Resumo

Neste artigo é apresentado um modelo ecofisiológico-matemático (BrCane) para prever a produtividade potencial - sem restrições nutricionais ou de água -, a fim de analisar a sustentabilidade da expansão do cultivo de cana-de-açúcar em novas áreas para produção de etanol. A arquitetura do modelo BRCANE foi concebida para uma planta tipo C4, onde a evolução mensal da biomassa foi estimada em função da temperatura do ar e da radiação incidente. Nas simulações apresentadas a produção de biomassa levou em conta a taxa bruta de fotossíntese subtraídas as perdas para respiração de manutenção, senescência de folhas e morte de perfilhos durante o ciclo da cultura. O modelo BRCANE também foi usado para

---

<sup>1.</sup> Pós-doutor em modelagem de cultivos energéticos, Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041, Barão Geraldo, 13083-886, Campinas, SP, e-mail: fcesar@cnptia.embrapa.br

<sup>2.</sup> Doutor em Agronomia, Professor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, SP, email: vbarbier@esalq.usp.br

descrever o comportamento fisiológico em função das condições ambientais relacionadas ao tempo termal. A implementação de tais condições permitiu ajustar os resultados das simulações a resultados experimentais disponíveis na literatura. As estimativas de biomassa foram comparadas com dados obtidos durante o ciclo da cultura em experimentos de campo com irrigação (Cultivares RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB47-355, CP51-22, Q138 e Q141) no Estado de São Paulo (Brasil) e em Bundaberg e Queensland (Austrália) e os resultados foram expressos em toneladas de colmo por hectare ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), por meio de uma relação linear para cada variedade ( $R^2 = 0,88$ ). O modelo apresentou resultados consistentes com dados experimentais para crescimento de biomassa no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

**Palavras chave:** Modelo ecofisiológico, produtividade potencial, curva de crescimento.

---

<sup>3</sup> *Doutor em Agronomia, Professor da Universidade Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Espanha, e-mail: carlosgregorio.hernandez@upm.es*

<sup>4</sup> *Doutor em Ciências, Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041, Barão Geraldo, 13083-886, Campinas, SP, e-mail: acastro@cnptia.embrapa.br*

<sup>5</sup> *Estagiário da Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: felipefbca@gmail.com*

<sup>6</sup> *Estagiário da Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: stefan\_hxcx@hotmail.com*

# COMPUTATIONAL MODELING OF SUGARCANE GROWTH TO PREDICT POTENTIAL PRODUCTIVITY

---

## Abstract

A model of sugarcane was constructed to predict the potential yield (without nutrition and water restrictions) for sustainability analysis of new expanded cultivation areas to ethanol production. The potential yield in terms of dry matter of sugarcane was adjusted to estimate the carbon dioxide absorption ( $\text{CO}_2$ ), AS C4 plant, in relation with air temperature and solar radiation to calculate a monthly production of dry mass (DM), during the crop cycle. The DM take in account a gross photosynthetic rate subtracting loses by maintenance respiration, senescence of leafs and tillers during the cycle. The BRCANE model is composed by equations which describe the physiological behaviour due to environment conditions averaging the thermal variables, which constants was obtained through adjusts of literature results with experimental data. The estimated DM by the model was contrasted with data which obtained during the cycle from experimental irrigated field (varieties RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB 47-355, CP 51-22, Q138 and Q141), in the São Paulo State (Brazil) and in Bundaberg SES, Queensland (Australia). The results of total DM were modified in stalk tons per hectare ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) through linear equation for each variety, with regression coefficients higher than 0,88. The model showed consistent simulations with DM during the CROP cycle, as well as in the prediction of yield.

**Index terms:** Ecophysiological model, climatic variables, leaf area index, biomass production, growth curve of cane sugar.

## Introdução

A importância econômica da cana-de-açúcar para o país é incontestável, seja na produção de biocombustível renovável ou na geração de divisas pela exportação de açúcar. Na safra brasileira 2008/2009, a área plantada perfez 6,75 milhões de hectares, sendo processados 569 milhões de toneladas de colmo de cana-de-açúcar, com produção de 31,05 milhões de toneladas de açúcar e 27,51 bilhões de litros de álcool hidratado e anidro (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇUCAR, 2010).

Para garantir o crescimento e uma maior participação do setor sucroenergético no Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio, o aprimoramento do setor da agroenergia necessita de ferramentas que auxiliem na previsão de produtividade, em escalas regionais e locais, considerando-se os parâmetros de solo e de clima incorporados pela modelagem de agrossistemas.

Existem dois tipos de clientes interessados nestas informações estratégicas: a) a empresa sucroenergética para aperfeiçoar suas programações operacionais da época ideal de corte e planejamento agrícola da lavoura canavieira - o que é fundamental na otimização da rentabilidade do empreendimento (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004, 2009); b) o governo que se utiliza do zoneamento edafoclimático da cultura para minimizar o risco de sinistro no sistema de financiamento bancário (ROSSETTI, 2001). Do ponto de vista governamental, o conhecimento de informações do zoneamento de riscos climáticos, associados aos aspectos edáficos para cultura de cana-de-açúcar, possibilita direcionar o acesso ao financiamento de crédito bancário oficial nas regiões tradicionais ou em expansão.

A produtividade média nacional para a cultura da cana-de-açúcar está na ordem de 68,2 toneladas por hectare (CONAB, 2011), a qual é influenciada pelo número de cortes, condições edafoclimáticas, variedades e manejo da cultura. Considerando estes fatores a produtividade pode ser modelada em três níveis, como descrito na sequência (WIT, 1965, 1982):

## A. Produtividade potencial

Os fatores que definem a capacidade fotossintética da planta para transformar energia solar em biomassa vegetal são  $\text{CO}_2$ , radiação, temperatura e características da cobertura vegetal. Tal produtividade potencial é definida pela capacidade de assimilação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em relação à temperatura e à radiação solar com base na metodologia descrita por Heemst (1986). As variedades cultivadas de cana-de-açúcar são selecionadas com base nas características agronômicas para produzir biomassa, sendo a produção potencial de colmos de até  $400 \text{ t.ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  (ALEXANDER, 1985; DILLEWIJN, 1952).

A produção potencial das culturas pode ser definida como a capacidade de conversão da matéria seca em superfície foliar durante o período total de crescimento (MONTEITH, 1965). Nesse caso, os esquemas de cálculo da matéria seca total e matéria seca colhida são dependentes somente do regime de temperatura, da radiação e do fotoperíodo (STANHILL, FUCHS, 1977). No processo da fotossíntese o  $\text{CO}_2$  (gás carbônico) do ar é convertido em  $\text{CH}_2\text{O}$  (carboidrato), conforme a seguinte reação:



## B. Produtividade real

Os fatores mais importantes que limitam a produção potencial são a água e os nutrientes. A água é o primeiro fator de restrição, cuja contabilidade no solo é mais utilizada para fins climatológicos. Uma metodologia prática e usual de balanço hídrico foi proposta por Thornthwaite e Mather (1955), a qual consiste na avaliação entre a precipitação e a evapotranspiração estimadas por Penman-Monteith (método padrão - FAO). Tal método foi ajustado para cana-de-açúcar por Barbieri e Silva (2007) e Doorenbos e Kassan (1994), onde os autores consideraram a capacidade de retenção de água no solo, a partir do tipo de cobertura vegetal e das características físicas do sistema. Uma outra alternativa é o cálculo simplificado de Priestley-Taylor, cuja implementação requer apenas a temperatura do ar.

Outro fator importante é o estresse hídrico que causa nas plantas a redução da taxa de assimilação de dióxido de carbono, da taxa de transpiração,

do potencial de água na planta, e da taxa de crescimento e abertura estomática (HSIAO, 1973). Também, um outro aspecto importante é a interferência do déficit hídrico sobre o florescimento, a alongação dos perflhos e a altura final dos colmos em cana-de-açúcar (GASCHO; SHIH, 1983).

Teruel et al. (1997) estimaram a influência da deficiência hídrica sobre o índice de área foliar (IAF) e verificaram que os efeitos da deficiência de água no solo não são lineares. Até o acumulado de 600 graus e 400 graus dias não há efeito pronunciado na porcentagem de crescimento do IAF, em função da deficiência hídrica na cana-planta e na soca, respectivamente. Considerando estes valores acumulados de temperatura, o incremento de IAF encontrado por Teruel et al. (1997) situa-se em torno de 12,4% e 5,1% na cana-planta e na soca, respectivamente.

O segundo fator restritivo que também limita a produção potencial é a deficiência de nutrientes no sistema solo-planta. Segundo Silva et al. (2005), esta deficiência baseia-se no balanço de N e na carência de K disponível no solo. Contudo, a maioria dos softwares disponíveis no mercado apresenta o nitrogênio como principal fator restritivo modelado.

### **C. Produção atual ou realizada**

Na literatura internacional em modelagem da cultura de cana existem três modelos mais conhecidos de simulação para predição de produtividade de biomassa e de sacarose na cana-de-açúcar: APSIM-Sugarcane, CANEGRO-DSSAT e QCANE (O'LEARY, 2000). Tais modelos se limitam a avaliar os estágios do desenvolvimento vegetativo e da maturação, mas não simulam o balanço do nitrogênio no solo e nem do carbono orgânico, os quais são necessários para o entendimento dos processos dinâmicos no agrossistema (SILVA; BERGAMASCO, 2001).

No Brasil, trabalhos de modelagem do crescimento da cana-de-açúcar são encontrados em Barbieri (1993), Barbieri e Silva (2007) e Machado (1981), que utilizaram o conceito de graus-dia a partir de dados de temperaturas. Outros fatores de clima que também afetam a produtividade, como radiação solar e umidade, são os que interferem mais diretamente na produção e influenciam desde o preparo do solo e a aplicação de herbicidas, até a

colheita, o transporte e o armazenamento dos produtos (PEREIRA et al., 2002). Por outro lado, a análise de Berg et al. (2000) aborda limitações quanto às características climáticas e quanto à absorção de água pelo sistema radicular da cana (DOOREMBOS; KASSAN, 1994). Estudos que relacionam físicas e químicas do solo também são úteis para determinação do potencial produtivo de determinada cultura (BARBIERI; SILVA, 2007; BERNARDES et al., 2002; TERAMOTO, 2003), sendo que as características de solo são tradicionalmente determinadas nas unidades produtoras.

Há uma forte evidência de que os modelos de simulação de culturas tenham uma participação importante na pesquisa científica, na tomada de decisão e na análise dos fatores que possam aperfeiçoar a produtividade de culturas e transferência de tecnologia para os sistemas de produção. Entretanto, a utilização destes modelos na prática - nos vários níveis de suporte à decisão e no planejamento da lavoura da cana-de-açúcar - requer um conjunto grande de informações de clima e de solo que estejam disponíveis para implementação. Portanto, torna-se fundamental a simplificação de entradas (inputs) dos modelos de sistema de cultivo para a sua aplicação regional.

## Material e Métodos

O modelo BRCANE apresentado neste Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento foi implementado para estimar a produtividade mensal potencial de biomassa baseada na conversão de  $\text{CO}_2$  em carboidrato e em função da temperatura, radiação solar e insolação. O modelo considera a arquitetura descrita originalmente por Barbieri (1993) e incorpora diversos elementos como o IAF, morte de folhas e perfilhos, bem como novos ajustes do efeito da temperatura na produção de biomassa. (BARBIERI et al., 2010).

Neste contexto, levando-se em conta a dinâmica do agrossistema acima do nível do solo, o modelo BRCANE permite estimar a produção máxima de carboidrato total ( $\text{CB}_{\text{max}}$ ) para um dia limpo (CBc) e em um dia completamente nublado (CBn). No BRCANE, o cálculo de  $\text{CB}_{\text{max}}$  considera a fração produzida em dia nublado com as correções de CBc e CBn em função da temperatura.

No trabalho aqui apresentado, o valor de  $\text{CB}_{\text{max}}$  foi corrigido para refletir as diferentes cultivares utilizadas na construção do modelo. Em consequência, após as realização das correções na capacidade de conversão de planta em carboidrato – em função do IAF e da idade foliar – foi obtido o valor de carboidrato bruto corrigido ( $\text{CB}_c$ ). Assim, a eficiência de conversão de carboidrato em matéria seca resultou na quantidade bruta produzida pela fotossíntese ( $\text{MS}_0$ ). O fluxograma que representa a arquitetura conceitual do BRCANE (Figura 1).

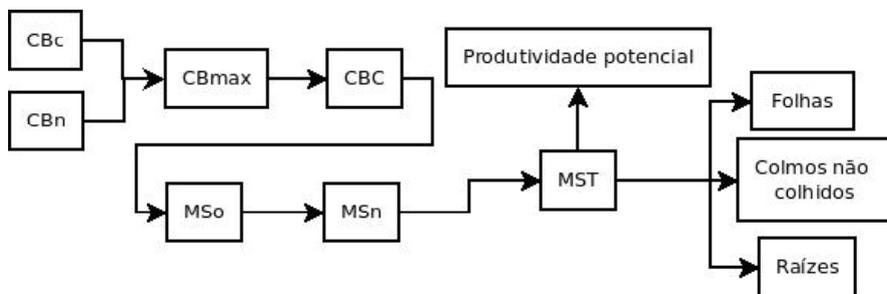


Figura 1. Representação esquemática do modelo BRCANE.

A partir do modelo conceitual, pode-se observar que a quantidade bruta produzida pela fotossíntese ( $MS_0$ ) resulta na produção líquida de matéria seca ( $MS_n$ ) acumulada ao longo do desenvolvimento da cultura (MST). Este desenvolvimento, conseqüentemente, pode ser particionado em produção potencial (colmos colhíveis), folhas, raízes e colmos não colhíveis.

### **Produção de carboidrato pela cana-de-açúcar**

Para simular a produção de carboidratos pela cana-de-açúcar é requerido um modelo matemático fisiológico onde um balanço de massa para população vegetal integra os processos de respiração de manutenção e crescimento, bem como a fotossíntese para simular a produção de matéria seca em colmos e folhas (GLOVER, 1972).

Para o processo da fotossíntese, o modelo BRCANE inclui a interceptação da radiação, utilizando uma adaptação da lei de Beer - admitindo uma distribuição esférica das folhas da cana de açúcar (WIT, 1965) e também que o efeito da radiação é atenuado pelo dossel.

De acordo com o equacionamento proposto por Inman-Bamber (1991), Monsi e Saeki (1953), Banber e Thompson (1989) tem-se:

$$I_{IAF} = I_0 e^{-k \cdot IAF} \quad (1)$$

onde:

I IAF= radiação transmitida por um IAF [ cal.  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

lo = radiação incidente no topo do IAF [ cal.  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

K = coeficiente de atenuação do dossel.

O modelo diferencial da atenuação da radiação na passagem pelo dossel pode ser visto na Figura 2.

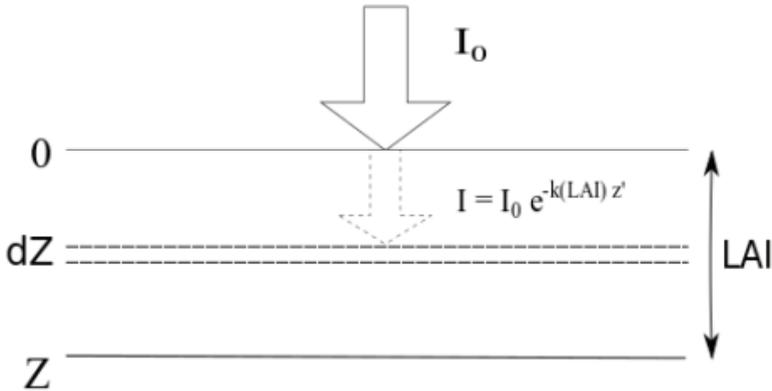


Figura 2. Absorção de radiação pela folha.

A relação entre a intensidade de radiação e a produção de carboidratos é dada pela Equação 2:

$$CB = \frac{a \cdot I}{1 + b \cdot I} \quad (2)$$

Combinando as equações 1 e 2 e desenvolvendo a equação diferencial de 0 a Z, temos uma equação que integrada pode ser utilizada para cálculo da síntese total de carboidratos para todo o dossel. O resultado da combinação das equações pode ser vista na Equação 3.

$$CB_{IAF} = \int \frac{a \cdot I_0 \cdot e^{-k(LAI)z'}}{1 + b \cdot I_0 \cdot e^{-k(LAI)z'}} \cdot d(LAI) \quad (3)$$

Assim, a energia transmitida da primeira camada de folhas para as demais folhas do dossel a partir da Equação 4 será:

$$CB_{LAI} = 10^3 \cdot \frac{a}{b \cdot k} \cdot \ln \left( \frac{1 + b \cdot I_0}{1 + b \cdot I_0 \cdot e^{-k(LAI)}} \right) \quad (4)$$

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente no dossel pode ser calculada a partir da radiação incidente no topo da atmosfera ( $Q_0$ ), em um dia com N horas de incidência solar, assumindo-se que para condições locais RFA é 75 % da radiação global (DOOREMBOS; KASSAN, 1994). Essas considerações com os devidos ajustes dimensionais levam à equação (5).

$$I_{oc} = \frac{0.75 \cdot Q_0}{N \cdot 60} = \frac{0.0125 Q_0}{N} \quad (5)$$

A partir da equação (5) podemos estimar, em [ $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ], a RFA diária média para um dia completamente limpo.

Combinando as equações (4) e (5) é possível calcular a produção de carboidrato em um dia limpo ( $CB_c$ ) com N horas de luz solar, sendo:

$$CB_c = \frac{10^3 \cdot a}{b \cdot k} \cdot \ln \left( \frac{1 + 0.0125 \cdot b \cdot Q_0 / N}{1 + 0.0125 \cdot b \cdot e^{-k \cdot LAI} \cdot Q_0 / N} \right) \cdot N \quad (6)$$

A equação (6) pode ser ajustada para um dia completamente nublado, assumindo que 20% da radiação solar incidente é transmitida como radiação difusa no dossel e que a RFA nessa condição é 50 % maior em comparação a um dia completamente limpo (STANHIL, 1977; SZEICZ, 1966). Essas correções permitem estimar a produção diária de carboidratos em um dia nublado ( $CB_n$ ).

Nessas condições, a atenuação solar do dossel ( $k$ ) é igual a 0,58, conforme obtido por Barbieri (1993) para um dossel com IAF igual 5. As constantes  $a$  e  $b$  assumem os valores de  $6.193 \times 10^{-2}$  e 0.261, respectivamente; e admite-se que estes valores são dependentes das cultivares de cana, de acordo com o que também foi proposto por Barbieri (1993) a partir dos dados estimados por Bull (1967) e Hartt e Burr (1967).

Utilizando esses valores é possível calcular os valores de  $CB_c$  e  $CB_n$  e obter a produção bruta de carboidratos diária ( $\text{CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) para

um cultivo com dossel de IAF 5 a uma temperatura de 23 °C. Com isso, os valores de  $CB_c$  e  $CB_n$  devem ser ajustados para representar a produção de carboidratos em temperaturas diferentes das condições ideais onde foram realizados os experimentos. Tal ajuste é realizado utilizando os dados de experimentos de acumulação de matéria seca em diferentes temperaturas (BARBIERI; SILVA, 2007; BULL, 1969).

A partir dos dados supracitados foi possível ajustar as estimativas em relação a temperatura do ar, o que é representado em um coeficiente obtido de acordo com a equação para um dia limpo, onde assume-se que a temperatura da folha está a 2 °C abaixo da temperatura do ar (BARBIERI, 1993):

$$C_c(t) = \frac{-186.4 + 17.3(t+2) - 0.29(t+2)^2}{-186.4 + 17.3(23) - 0.29(23)^2} \quad (7)$$

Foi considerado o valor unitário (referência) obtido a 22.4 °C para temperatura do ar, onde  $C_c(t) = 1$  e  $C_c(20) = 0.72$

Para dias nublados, onde a temperatura da folha é aproximadamente igual a do ar, a Equação torna-se:

$$C_n(t) = \frac{-186.4 + 17.3t - 0.29t^2}{-186.4 + 17.3(23) - 0.29(23)^2} \quad (8)$$

A fim de considerar-se a interceptação de radiação pelas nuvens e seu efeito na produção potencial de carboidratos, é utilizado o fator de ponderação  $F$  para refletir a fração RFA retida pelas nuvens em relação ao máximo que poderia ser retido (ASSUNÇÃO, 1994).

$$F = \frac{PAR_{max} - PAR_{actual}}{PAR_{max} - PAR_{min}} \quad \text{onde:} \quad PAR = Q_g (0.5 - 0.1 \cdot n/N) \quad (9)$$

(10)

Sendo  $Q_g$  a radiação global (direta e difusa) medida ou estimada do dossel. Esta radiação pode ser calculada conforme a expressão a seguir:

$$Q_g = Q_0 \cdot (a + b \cdot n/N) \quad (11)$$

onde  $Q_0$ ,  $a$  e  $b$  são as constantes locais de Angstrom-Prescot.

A partir das estimativas de  $CB_c$  e  $CB_n$  ajustadas respectivamente pelos coeficientes calculados nas Equações (7) e (8) é possível calcular a produção mensal de carboidratos usando o valor de  $F$  (Equação 12).

$$CB_{max}(t) = \#days \cdot (F \cdot CB_n \cdot C_n(t) + (1 - F) \cdot CB_c \cdot C_c(t)) \quad (12)$$

Sendo que estes valores ainda devem ser corrigidos para refletir aspectos das condições locais.

## Carboidrato bruto corrigido (CBC)

O valor de  $CB_{max}$  deve ser corrigido para refletir fatores fisiológicos que determinam mudanças na produção de carboidratos, uma vez que existem diferenças nos fatores de produção quando compara-se os experimentos usados para construção do modelo e as condições de simulação.

Para as refletir a diferentes condições vegetais, deve ser realizada então uma correção para as diferenças no IAF e idade das plantas. Essas correções são realizadas por fatores multiplicativos aplicados ao  $CB_{max}$  e permitem o cálculo (Equação 13) da produção bruta mensal de carboidrato já corrigidos ( $CB_c$ ).

$$CB_c = CB_{max}(t) \cdot C_{LAI} \cdot Cr(i) \quad (13)$$

Sendo que a correção pela idade da cultura é dada por:

$$Cr(i) = 0.6 + \frac{73.00}{\left(\sum GD \cdot 0.893\right)^2} \quad (14)$$

onde:

C(i) = correção devida a idade da planta  
 $\Sigma$ GD = soma de graus-dias

O fator de 0.8903 é obtido a partir do ajuste do acumulado de graus-dias no fotoperíodo (N/12). Essa equação assume valor igual a unidade para valores de  $\Sigma$ GD menores que 166 (BARBIERI, 1993).

Os valores de  $C_{b_{\max}}$  foram determinados para um IAF máximo – o que só ocorre em uma única fase do ciclo de desenvolvimento da cultura. Logo, a correção referente ao IAF ( $C_{IAF}$ ) é obtida pela equação 15:

$$C_{IAF} = 0.645 e^{\left(\sum GD - \frac{900}{500}\right) \cdot 2} + 0.998 e^{\left(\sum GD - \frac{1.868}{1.080}\right) \cdot 2}, \text{ com } R^2 = 0,952 \quad (15)$$

A função que permite estimar o IAF foi obtida utilizando os dados experimentais de Barbieri (1993) e Machado (1981) em experimentos localizados em Leme e Araras (SP) ao longo do desenvolvimento da cultura. A estimativa foi realizada correlacionando os valores de graus-dia acumulados com o IAF da cultura, utilizando-se as equações a seguir que consideram a relação entre a temperatura basal mínima ( $T_b$ ) e a temperatura mínima diária ( $T_m$ ); de acordo com Bacchi e Souza (1978) a temperatura base para o crescimento da cana-de-açúcar é de 18 °C.

Para  $T_b < T_m$ ,

O cálculo dos graus-dia diários é realizado de acordo com:

$$GDD = \left( \frac{TM + T_m}{2} \right) - T_b \quad (16)$$

Já para  $T_m \leq T_b$ , tem-se:

$$GDD = \frac{(TM + T_m)^2}{2(TM + T_m)} \quad (17)$$

Assim, os valores calculados de GDD para cada dia foram corrigidos de acordo com a equação abaixo:

$$GDD_{mes} = \frac{GDD \cdot N}{12} \quad (18)$$

onde:

$GD_{mes}$  = graus-dia acumulados no mês(°C.dia)

N = número de horas de sol no mês em questão

A correlação entre os valores do IAF e o acumulado de graus-dia apresentou diferentes comportamentos entre a cana-planta e a cana-soca. O IAF, então, foi calculado para o ciclo de acordo com a metodologia descrita por Teruel et al. (1997). Para cana-planta foi utilizada a equação (19):

$$IAF_{pl} = \left( e^{-13.521} \right) \cdot \left( \sum GDD_{st} \right)^{2.784} \cdot \left( e^{-0.004023 \cdot \sum GDD_{st}} \right) \quad (19)$$

Os expoentes da equação para a cana-soca considerados foram: -17.707, 3.373 e 0.004265, respectivamente.

## Produção líquida: mensal e acumulada

A matéria seca produzida ( $MS_n$ ) é dada por  $CB_c$  (Carboidrato bruto corrigido) multiplicado pelo valor de  $CR_n$ .

$$MS_n = CBC \cdot CR_n \quad (20)$$

Do ponto de vista energético, são consumidos 0,27 g de  $CH_2O$  no processo de conversão de carboidratos em biomassa. Com isso tem-se:

$$CR_n = \frac{1}{1.27} = \frac{0.79 \text{ g}_{dm}}{\text{g}_{CH_2}} \quad (21)$$

Por outro lado, a manutenção da biomassa demanda energia para manutenção dos processos vitais da planta, conforme descrito por Bull e Tovey (1974), que mensuraram as taxas de respiração noturna nas folhas de cana de açúcar, mostrando uma boa correlação entre a taxa de assimilação fotossintética bruta e a respiração noturna (ou respiração de manutenção). A correção da respiração de manutenção é um fator multiplicativo e é dado pela equação (22):

$$CR_m = 1 - R_{max} \cdot C_r(t) \cdot C_r(i) \quad (22)$$

onde:

$R_{max} = 0,023 \text{ g/g}$  – (respiração máxima),  $C_r(t)$  – correção de  $R_{max}$  em função da temperatura e  $C_r(i)$  – correção de  $R_{max}$  em função da idade da planta.

Os valores de  $R_{max}$  foram determinados a partir dos resultados de Machado (1981), e os valores da correção pela temperatura foram calculados de acordo com os resultados de Medina (1970). Este último autor correlacionou os valores da temperatura local com a respiração de manutenção e obteve a seguinte relação:

$$C_r(t) = e^{-4.11 + 0.1383 \cdot t} \quad (23)$$

quando  $t > 28,5$  °C, têm-se  $Cr(t) = 1$ .

Para obtenção da correção pela idade também foram utilizados os dados obtidos por Medina (1970), correlacionando o acúmulo de graus-dia durante o ciclo da cultura com o valor médio da respiração. Essa análise gerou a seguinte relação:

$$C_r(i) = 1.26 \cdot 0.9995^{\sum GD} \quad (24)$$

se  $\sum GD$  (soma de graus-dia)  $< 372$ , têm-se  $C_{r(i)} = 1$ .

Assim, o valor de  $MSn$ , corrigido pelo coeficiente de respiração de manutenção, resulta no valor da matéria seca por área, através da relação:

$$MSC' = MSn \cdot CR_m \quad [kg_{dm} \cdot ha^{-1}] \quad (25)$$

A correção do consumo de carboidratos pela respiração de manutenção deve ser aplicada para ( $\overline{MS}$  sendo:

$$\overline{MS} = \frac{MSn}{n} \quad (26)$$

onde  $MSn$  é o valor dado pela equação (20) e  $n$  é o número de dias do mês considerado.

Dessa forma:

Para  $n = 1$  dia:

$$MSC = \overline{MS} \cdot CR_m \quad (27)$$

Para  $n = 2$  dias:

$$MSC = (\overline{MS} \cdot CR_m + \overline{MS}) CR_m \quad (28)$$

Para  $n = 3$  dias:

$$MSC = [(\overline{MS} \cdot CR_m + \overline{MS}) CR_m + \overline{MS}] \cdot CR_m \quad (29)$$

Para  $n$  dias:

$$MSC = \overline{MS} \cdot CR_m^n + \overline{MS} \cdot CR_m^{n-1} + \dots + \overline{MS} \cdot CR_m \quad (30)$$

A equação (16) pode ser expressa na forma de uma soma de termos cujo resultado é dado por

$$MSC = \overline{MS} \frac{(CR_m^n - 1)}{(CR_m - 1)} \quad (31)$$

A equação (31) expressa o resultado mensal de matéria seca em  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  para um mês de  $n$  dias. Deste resultado, deve-se ainda subtrair os valores relacionados a palhada que se desprende dos colmos.

Observa-se que durante o ciclo da cultura, as folhas velhas são substituídas continuamente. Esses materiais, ao qual se dá o nome de palha (MP), uma vez fora da planta, não consomem mais energia.

Para as estimativas de MP utilizaram-se os critérios biométricos para um canavial adulto mensurados por Machado (1981), em que:

9 colmos/ $\text{m}^2$  x 1,5 = 13,5 colmos por metro linear

9 folhas/colmo

4,57 g MS/folha

De acordo com estes dados, e admitindo-se uma taxa média de queda de 1,85 folhas/colmo/mês (GLOVER, 1972), tem-se:

$$MP = MST_n \cdot \left( \frac{13/100}{1 + \exp(9.62 - 0.00881 \cdot (220 - \sum GD))} \right) - MST_{n-1} \cdot \left( \frac{13/100}{1 + \exp(9.62 - 0.00881 \cdot (200 - \sum GD))} \right) \quad (32)$$

onde MST representa a matéria seca total do n-ésimo mês e é a soma de graus-dia para uma temperatura de base de 18 °C.

### Modelagem, construção e parametrização

O modelo proposto para produtividade da cana-de-açúcar expressa em matéria seca de biomassa - totalizada no mês (MST) ao final de n dias, com um ganho de biomassa (MS) - é dado pela equação (33):

$$MST = MS_0 \cdot CR_m + MSC$$

A equação 33 é aplicada diretamente no início do desenvolvimento da cultura e passa a ser corrigida posteriormente para incorporar o efeito da senescência das folhas, sendo:

$MST$  = matéria seca acumulada no mês em questão (kg.ha<sup>-1</sup>)

$MS_0$  = matéria seca (MS) remanescente no início do mês (kgMS.ha<sup>-1</sup>).

$MSC$  = matéria seca adicionada naquele mês (kgMS.ha<sup>-1</sup>)

Rearranjando-se a equação 33, a partir da dedução das estimaivas de MP, tem-se:

$$MST = MS_0 \cdot CR_m + MSC - MP \quad (34)$$

onde  $MSC$  é a matéria seca adicionada no mês de estudo considerado (kgMS.ha<sup>-1</sup>).

## Biomassa total e produção de colmos

Para converter a matéria seca total em produtividade de colmos, o modelo BRCANE utiliza relações obtidas experimentalmente para cada cultivar. Para tal, foram realizadas regressões lineares a partir dos dados de biomassa total e produtividade de colmos. O coeficiente angular da regressão linear foi obtido pela Equação 35:

$$MST_{colmos} = MST / b \quad (35)$$

onde MST é a matéria seca total e  $MST_{colmos}$  representa a produtividade potencial. Os coeficientes para as diferentes cultivares e o coeficiente de ajuste da regressão linear são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Coeficiente para relação entre a biomassa total e a produtividade de colmos

Cultivar	b	H2
RB72 454	2,01	0,951
NA 56-79	1,87	0,960
CB 41-75	1,68	0,914
CD 47-355	1,81	0,951
CP 51-22	1,82	0,934
Q138	1,78	0,934
Q148	1,62	0,887

## Validação experimental e estatísticas

Para comprovar-se a eficiência do modelo, fez-se a comparação dos valores de produtividade estimadas pelo modelo com os resultados de produtividade obtidos experimentalmente sobre condições de irrigação e adubação completa nas regiões de Piracicaba e de Araras (Brasil) e de Bunadberg (Austrália).

Para validação do modelo proposto com vistas à produção final foram utilizados os dados de produção da cultura irrigada e adubada (produção potencial (Pp), medidos nos experimentos irrigados, com 11 a 20 meses de cultivo, entre os anos de 1974 a 1986, conduzidos na Estação Experimental de cana-de-açúcar, do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) - Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (Planalsucar), nos municípios de Araras (latitude: 22°18'S, longitude: 47°23'O e altitude: 617m) (DELGADO-ROJAS; BBARBIERI, 1999) e de Piracicaba (latitude: 22°42'30"S, longitude: 47°38'00" O e altitude: 546 metros), no Estado de São Paulo medidos pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), nos anos de 1984 a 2000 e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, nos anos de 2001 a 2006 (SILVA et al., 2005), sendo os dados climáticos originários dos postos meteorológicos da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e da Escolas Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP). Os experimentos australianos foram realizados em solo Euchrozem (Rhodic Eutradox), na Estação Experimental de Bureau of Sugar Experiment, em Bundaberg (Bundaberg SES), Queensland (lat. 24,83°S, 152,43°E), no período de 1991 a 1995.

Os experimentos utilizaram as cultivares Q138 e Q141, onde foram realizados seis plantios para determinar as datas fenológicas durante o desenvolvimento da cultura. Os parâmetros do modelo foram obtidos de culturas plantadas em 13 de agosto de 1991 e 27 de maio de 1992 e soqueiras em 5 de novembro de 1993 e 18 de fevereiro de 1994. A partir do processo de maturação, da biomassa acumulada fez-se a partição do açúcar, utilizando-se os dados experimentais de culturas de soqueiras em 18 de agosto de 1992, plantadas em 19 de novembro de 1992, plantadas em 24 de fevereiro de 1993 e as soqueiras cultivadas em 3 de junho de 1993 e

informações complementares (umidade do solo foi controlada por sonda de nêutron) para manter o suprimento hídrico desejado (LIU; BULL, 2001). Quanto ao processo de maturação, a gradativa queda de temperatura e redução das precipitações são determinantes para a ocorrência do processo, dessa forma, na região Sudeste do Brasil, o processo tem ocorrência natural a partir de abril/maio, com clímax no mês de setembro. Temperaturas de 17 °C a 18 °C parecem ser particularmente favoráveis para o acúmulo de altos níveis de sacarose. Há efeito interativo entre luz solar, temperatura e diferentes variedades de cana-de-açúcar em resposta ao processo de maturação. Para a estimativa do grau de estresse para promover a maturação do colmo de cana utilizou-se graus dias negativos acumulados pela planta e o nível de estresse hídrico no solo.

Para a simulação das variedades RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB 47-355, CP 51-22, Q138 e Q148, utilizou-se os dados médios mensais de radiação solar global ( $Q_g$ ), fotoperíodo (horas de insolação), temperaturas mínimas ( $T_m$ ) e máximas ( $T_M$ ) do ar, no período contemplado pelo cultivo e dados astronômicos locais, em relação às médias mensais para cada uma das duas regiões, exigidos como parâmetros de entrada pelo modelo proposto, procedendo-se as estimativas para sete cultivares de cana-de-açúcar, entre as safras de 1974/1986 (Araras) e de 1998/2005 (Piracicaba) no Brasil e de 1991/1994 (Bundaberg) na Austrália.

## Análises estatísticas

Para a avaliação da conformidade das estimativas de produtividade utilizou a diferença **Ei** (estimativa) - **Mi** (medido). Os melhores índices foram especificados, tanto para as condições experimentais do Brasil quanto para as da Austrália, considerando-se os valores medidos e estimados, respectivamente.

O confronto entre os valores medidos e estimados foi feito através de regressões lineares (teste T). As análises foram individualizadas para as diferentes variedades de cana-de-açúcar, analisando-se o conjunto como um todo.

Para a avaliação do modelo utilizou-se o programa Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates (Irene), uma ferramenta de análise de pares de dados concebida para proporcionar um acesso fácil a um conjunto de técnicas de testes (FILA et al., 2003). A ênfase é dada aqui em técnicas estatísticas, que devem ser aplicadas ao comparar as estimativas (EI) confrontadas com as medições (Mi). Os parâmetros úteis para o modelo aplicado para análises técnicas de avaliação: a) desvio da mediana – SB (KOBAYASHI; SALAM, 2000); b) Raiz quadrada da variação do erro – RMSV (KOBAYASHI; SALAM, 2000); c) Root mean squared error (RMSE) (FOX, 1981); d) General standard deviation (GSD); e) “Modeling efficiency” (EF) (GREENWOOD et al., 1985); f) “Index of agreement”- d (WILLMOTT; WICKS, 1980); g) “Mean bias error” (MBE) (ADDISCOTT; WHITMORE, 1987); h) “Coefficient of residual mass” (CRM) (LOAGUE; GREEN, 1991).

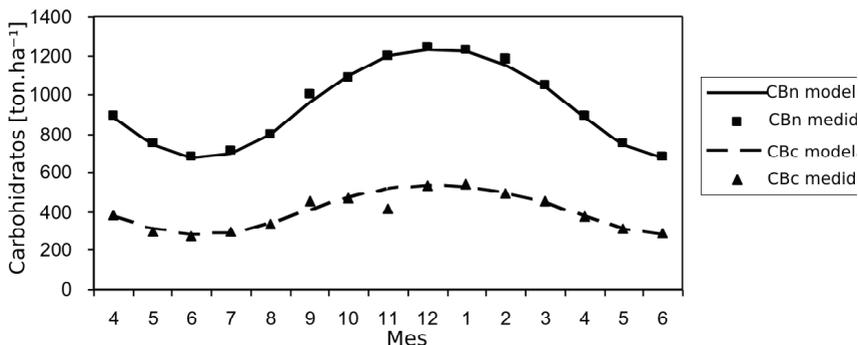
## Resultados e Discussão

### Validação

Os valores correspondentes de matéria seca total estimados pelo modelo variaram de 79 a 142 ton/ha. Irvine (1983) e Barbieri (1993) citam uma série de valores de matéria seca encontrados por distintos autores em várias condições edafoclimáticas, com valores máximos de experimentação entre 75 a 140 ton/ha.ano. No atual estudo, considerou-se ciclos que variam de 11 a 20 meses de cultivo, correspondente aos ciclos cana de ano e cana de ano e meio, cujos valores obtidos variaram de 79 a 140 t/ha.

Os meses de verão são potencialmente mais produtivos. Todavia, nesses meses o valor de  $F$  é maior, indicando que a razão de insolação ( $n/N$ ) foi menor, ou seja, são meses mais nublados, e quase invariavelmente são mais chuvosos. Durante o inverno  $CB_{max}$  se aproxima de  $CB_c$  e, durante o verão, de  $CB_n$ , como notado por Machado (1981). Salienta-se então que a irrigação em igual quantidade e distribuição de água, pode promover produções maiores, por não diminuir a luminosidade, como ocorre nos dias chuvosos (Figura 3).

**Figura 3.** Valores simulados de  $CB_c$  e  $CB_n$  em condições climáticas do período em estudo na safra 1980/1981 ( $kg\ CH_2O/ha.mês$ ) em comparação com dados originais de Machado (1981).  
Fonte: Machado (1981).



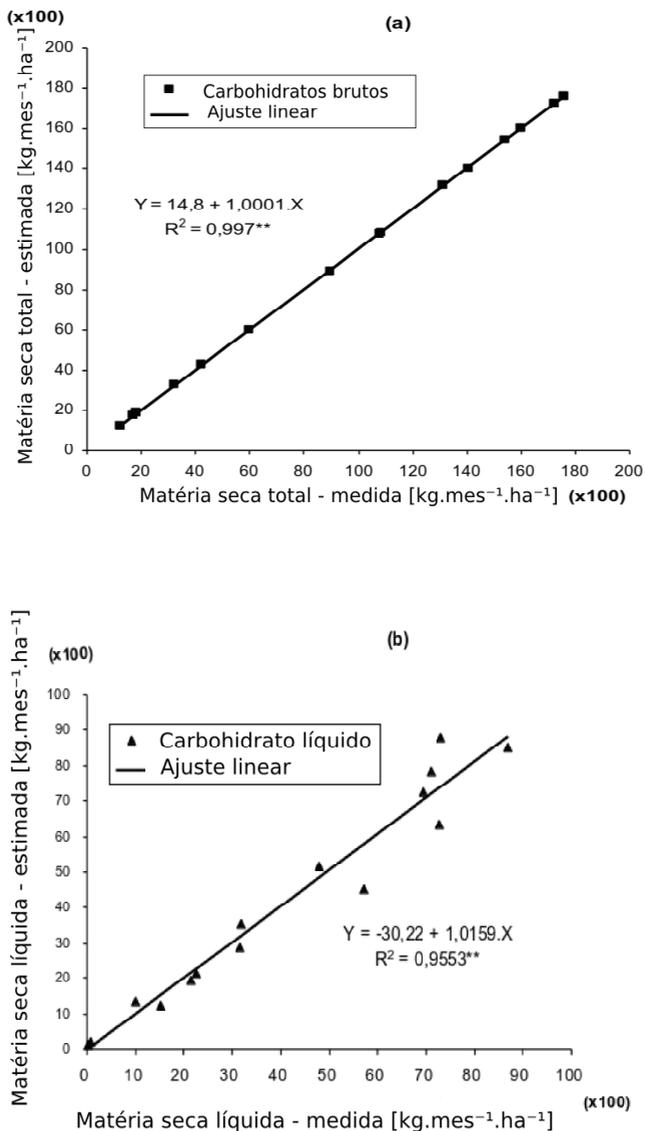
Assim sendo, a quantidade de energia interceptada pelas folhas será muito baixa conforme indica o fator de correção  $[C(IAF)]$ , o que leva a baixos valores de  $CB_c$  (Figura 4).

É sabido que do mês de outubro em diante o valor de IAF cresce numa taxa acentuada e, apesar do fator idade ( $C(i)$ ) diminuir a taxa de fotossíntese, os valores de  $CB_c$  e  $CB_n$  permaneceram altos (Figura 3). Somando-se todos estes efeitos, os valores encontrados de  $CB_c$  se mantiveram altos até o mês de março do ano seguinte. Deste mês em diante, até o fim do ciclo, a diminuição da energia disponível, da temperatura e o aumento da idade acarretaram uma queda no valor de  $CB_c$  (CHANG et al., 1963).

Esse conjunto de resultados obteve seu valor máximo no mês de outubro, sendo que do plantio até este mês, a matéria seca acumulada não atingiu valores muito altos. A fração consumida ( $R_m$ ) pela respiração foi estimada em 15% da matéria seca produzida neste mês. Durante o pico da respiração, a produção de matéria seca bruta foi de 7414 kg/ha, e a matéria seca acumulada foi de 14183 kg/ha (Figura 4).

Os valores estimados pelo modelo para a matéria seca bruta (Figura 4a) e líquida (Figura 4b) assemelham-se aos medidos por Glover (1972), Machado (1981) e Medina et al. (1970). Observa-se que a capacidade do modelo para os valores estimativos de biomassa líquida apresentaram menor aderência aos resultados de Machado (1981), em comparação aos valores estimados de matéria seca bruta nas condições climáticas consideradas.

Deve-se levar em conta que o fator de correção da  $r_{max}$ , relativo a idade  $Cr(i)$ , foi modelado utilizando-se dados que abrangiam um curto período de tempo, ou seja, aproximadamente 300 dias (não foram encontradas na literatura pesquisas brasileiras conduzidas com cultivos mais velhos). Contudo, a função matemático-fisiológica que estima  $Cr(i)$  é passível de futura revisão por meio de dados bibliográficos ou dados coletados experimentalmente para estimativa de matéria seca líquida.



**Figura 4.** Valores da matéria seca bruta (a) e de matéria seca líquida (b), expressos em kg MS/ha.mês, estimada pelo modelo BRCANE, comparado aos resultados de Machado (1981).

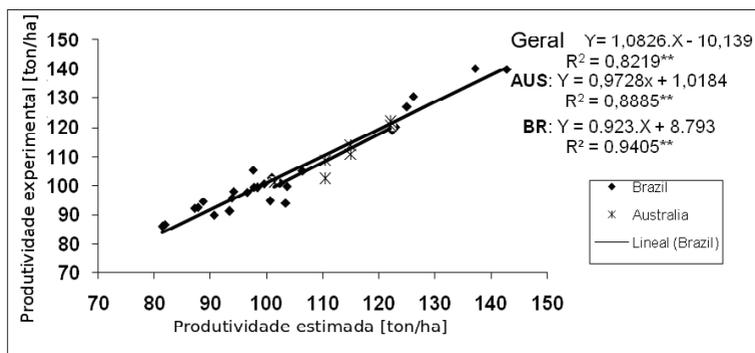
Fonte: Machado (1981).

## Resultados da validação

A produtividade das variedades de cana obtida nos experimentos irrigados variou da seguinte forma: RB72 454 (102 a 131); NA 56-79 (95 a 140); CB 41-76 (89 a 125); CB 47-355 (92 a 140), CP 51-22 (79 a 133), Q138 (100 a 121) e Q141 (102 a 122). Observou-se que o modelo ofereceu valores de produtividade superestimados para CB41-76 e CB47-355 em 3% e subestimado em 0,5% para CP5122, NA5679 e RB72454. No caso das cultivares australianas foram ligeiramente subestimadas as produtividades pelo modelo (CR=0,01), na ordem de 2%.

Também verificou-se que correu maior variabilidade dentro das estimativas para as condições australianas que se deve ao fato de a calibração não incluir dados desse país, apenas do Brasil. Os valores  $R^2$  de regressão linear entre as produtividades estimadas e medidas foram na ordem de 0,94 e 0,88, como pode ser visto na Figura 5, para o Brasil e Austrália, respectivamente. Comparando-se os valores estimados e medidos, verificou-se que o maior erro de superestimativa ocorreu para a variedade CP51-22 (fev-79 a set-80), com erro estimado de 11,6 toneladas por hectare.

Considerando-se apenas os casos de produtividade que superestimaram a produtividade de cana-de-açúcar, obteve-se uma diferença sempre inferior a 10% ao dado observado, o que está compatível com os resultados apresentados por Lima e Catâneo (1997).



**Figura 5.** Regressão linear entre dados estimados e observados em produtividade de cana, no Brasil (t) e na Austrália (Ü).

Utilizando a diferença **Ei** (estimativa) - **Mi** (medido), os melhores índices para as condições experimentais do Brasil e da Austrália são respectivamente:

- Simulation bias (**SB**): 0,009 and 1,8477;
- Root mean squared variation (**RMSV**): 4,5187 and 2,7262;
- Root mean squared error (**RMSE**): 4,5197 and 3,2062;
- General standard deviation (**GSD**): 4,5095 and 3,4162;
- Modeling Efficiency (**EF**): 0,9162 and 0,8089;
- Index of Agreement (**d**): 0,9785 and 0,9563;
- Coefficient of residual mass (**CRM**): 0,001 and 0,0149.

Assim, os resultados obtidos pelo modelo BRCANE, agregando-se as estimativas para cana de ano e cana de ano e meio, mostraram-se melhores que os resultados obtidos pelos modelos de simulação propostos por Doorenbos e Kassan (1979), Liu e Bull (2001), Teramoto (2003) e Scarpari e Beauclair (2004), além disso, o modelo aqui proposto é de mais simples utilização e requer um menor número de variáveis edafoclimáticas.

## Conclusão

- O modelo apresentou-se eficaz na estimativa da produtividade de cana-de-açúcar irrigada, para cultivos de 12 e 18 meses, sendo capaz de realizar predições da produtividade final ao longo da safra;
- O modelo foi capaz de estimar a taxa de fotossíntese pela subtração das perdas por senescência das folhas e respiração de manutenção ao longo do ciclo;
- A matéria seca estimada pelo modelo foi comparada com sucesso com dados de experimentos de cultivo irrigado das variedades (RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB 47-355, CP 51-22, Q138 e Q141) no estado de São Paulo (Brasil) e Bundaberg (Austrália).

## Referências

ADDISCOTT, T. M.; WHITMORE, A. P. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 109, n. 1, p. 141-157, Mar.1987.

ALEXANDER, A. G. **The energy cane alternative**. Amsterdam; New York: Elsevier, 1985. 509 p.

ASSUNÇÃO, H. F. Relações entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação solar global em Piracicaba/SP. 1994. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BACCHI, O. O. S.; SOUZA, J. A. G. C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS. **Proceedings...** São Paulo, Impress, 1978. v. 2, p. 1733-1741.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

BARBIERI, V.; SILVA, F. C. da. Adequação do método da zona agroecológica (FAO) para estimativa do acúmulo mensal potencial de matéria seca da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e da produtividade agrícola para diferentes condições climáticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Efeito das mudanças climáticas na agricultura**: anais. Aracajú: SBA: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. 1 CD-ROM.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 2., 1997. **Anais...** Rio de Janeiro: STAB, 1977. v. 3. p. 37-52.

BARBIERI, V.; SILVA, F. C.; DIAS-AMBRONA, C. G. H; Modelagem de cana de açúcar para previsão de produtividade de canaviais no Brasil e na Austrália. In: CONGRESO DE AGROINFORMÁTICA, 2., 2010, Buenos Aires. **Anales...** Buenos Aires: Sociedad Argentina de Informática, 2010. p. 745-762. Disponível em: < <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/handle/item/19387> >. Acesso em: 10 fev. 2012.

BARBIERI, V.; SILVA, F. C. da; GODOY, A. Coeficiente de cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), na planta e soca como função do acúmulo de graus-dia durante ciclo de produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Efeito das mudanças climáticas na agricultura**: anais. Aracaju: SBA: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. 1 CD-ROM.

BERG, M. B. P. van den. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potentials in São Paulo State, Brazil. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 81, 43-55, 2000.

BERNARDES, M. S.; TERAMOTO, E. R.; BARBOSA, M.; SADER, S. L. Comparação entre a produtividade real e simulada através do modelo matemático, avaliada em cinco variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 1, n. 2, p. 44, 2002.

BULL, T. A. Photosynthesis efficiencies and photorespirations in Calvin cycle and C4 - dicarboxylic acid plants. **Crop Science**, Madison, v. 9, p. 726-729. 1969.

\_\_\_\_\_. The taxonomix significance of quantitative morphological characters and physiological stuchis in *Saccharum*. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 12., 1965, San Juan, 1965. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 1967. p. 985-994.

BULL, T. A.; TOVEY, D. A. Aspects of modelling sugarcane growth by computer similation. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, **Proceedings...** Durban: Hayne & Gibson, 1974. v. 2, p. 1021-1032.

CONAB (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira: cana de açúcar: safra 2011/2012: terceiro levantamento.** 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

CHANG, J. H.; CAMPBELL, R. B.; ROBINSON, F. E. On the relationship between water and sugarcane yield in Hawaii. **Agronomy Journal**, Madson, v. 55, p. 450-453, 1963 .

DELGADO-ROJAS, J. S.; BARBIERI, V. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 67-73, 1999.

DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane.** Waltham: Chronica Botanica, 1952. v. 1, p. 53-58.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.** Roma: FAO, 1979. (Estudio FAO: Riego y Drenaje 33).

\_\_\_\_\_. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Tradução de GHEYI, H.; SOUSA, A. A. de; DAMASCENO, F. A. V.; MEDEIROS, J. F. de. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e drenagem, 33).

FILA G., BELLOCCHI, G., DONATELLI, M.; ACUTIS, M. IRENE\_DLL: a class library for evaluating numerical estimates. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1330–1333, 2003.

FOX, D.G. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 62, p. 599-609, 1981.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations.** New York: J. Wiley, 1983. 547 p.

GREENWOOD, D. J.; NEETESON, J. J.; DRAYCOTT, D. A. Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. **Plant and Soil**, The Hague, v. 85, p. 185-203, 1985.

GLOVER, J. Practical and theoretical assessments of sugarcane yield potential in Natal. **Proceedings...** [S. I.]: South African Sugar Technologists' Association, 1972. v. 46, p. 138–141.

HARTT, C.E.; BURR, G.O. Factors affecting photosynthesis in sugarcane. INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12., 1967. **Proceedings...** Cartagena de Indias: Celam, 1967. p. 590-609.

HEEMST, H. D. J. van. Grop phenology and dry matter distribution. In: KEULEN, H. van; WOLF, J. (Ed.). **Modelling of agricultural production: weather, soils and crops**. Wageningen: Pudoc, 1986. p. 27-40.

HSIAO, T. C. Plant response to water stress. **Plant Physiology**, Minneapolis, n. 24, p. 519-570, 1973.

INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **Journal of Plant and Soil**, Pretoria, v. 8, p. 93-99, 1991.

INMAN-BAMBER, N. G., THOMPSON, G. D. Models of dry matter accumulation by sugarcane. **Proceedings...** South Africa Sugarcane Technology Association, v. 63, p. 212 – 216, 1989.

IRVINE, J. Sugarcane. In: SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS. Los Baños, Philippines: IRRI, 1983. p. 361-381.

KOBAYASHI, K.; SALAM, M. U. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, 2, p. 345-352, 2000.

LIMA, C. L. C.; CATÂNEO, A. Seleção de variáveis influentes na produtividade da cana-de-açúcar na usina Utinga/AL. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 12, n. 2, 1997, p. 56-62.

LIU, D. L.; BULL, T. A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 144, n. 2, p. 181 – 211, 2001.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 7, p. 51-73. 1991.

MACHADO, E. C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*)**. 1981. 115 f. Tese (Mestrado) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MEDINA, E.; SAN JOSE, J. J.; SEQUEIRA, P. E. Análisis de la productividad en caña de azúcar. III. Respiración en la oscuridad de hojas y tallos de cinco variedades de caña de azúcar y pérdidas nocturnas de materia seca. **Turrialba**, San Jose, v. 20, n. 2, p. 302-306, 1970.

MONSI, M.; SAEKI, T. Uber den lichfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v. 14, n. 1, p. 22-52. 1953.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIA OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., 1965. Cambridge: University Press, Cambridge, p. 205-234, 1965.

\_\_\_\_\_. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany**, 29, n. 1, p. 17-37, 1965..

O'LEARY, G. J. A Review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, n. 2, p. 97-111, Oct. 2000.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**, Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

ROSSETTI, L. A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e segurança rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 386-399, dez. 2001. Número especial.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. de. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v. 61, n. 5, p. 486-491, Sep./Oct. 2004 .

\_\_\_\_\_. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)* [online]. 2009, v. 66, n. 5, p. 622-628.

SILVA, F. C. da; BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. *Revista Biociências*, Taubaté, v. 7, p. 7-14, jan./jun. 2001.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F.; MONTALI, E. F.; RODRIGUES, L. H.; FARIAS, J. R. B., Avaliação da adubação nitrogenada e potássica em cana-de-açúcar baseada em modelos, In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, São Pedro, SP. **Anais...** Piracicaba: Potafos, 2005. Editado por Yamada, T. e Roberts, T. L.

STANHILL, G.; FUCHS, M. The relative flux density of photosynthetically active radiation. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, 14: 371-322, Apr.1977.

SZEICZ, G. **Field measurements of energy in the 0.4-0.7 micron range:** light as an ecological factor. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1966.

TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (Saccharum spp) baseados em parâmetros do solo e do clima.** 2003. 86 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JUNIOR, L. A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p. 39-44, 1997. Número especial.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in climatology, v. 8, n. 1).

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇUCAR (São Paulo). **Dados e cotações - estatísticas**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dados-Cotacao/estatistica/>>. Acesso em: 18 fev. 2012.

WILLMOTT, C. J.; WICKS, D. E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, Norwick, v. 1, p. 59-73. 1980.

WIT, C. T. de. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen: Pudoc, 1965. 57 p. (Agriculture research report , 663).

\_\_\_\_\_. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F. W. T.; LAAR, H. H. van (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 3-8. (Discussão, 538).



---

*Informática Agropecuária*

Ministério da  
**Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**



CGPE 10000