CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE- AÇUCAR (Saccharum spp.): UM MODELO MATEMÁTICO-FISIOLÓGICO DE ESTIMATIVA

VALTER BARBIERI

Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova

**Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração: Solos
e Nutrição de Plantas.**

**P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Fevereiro - 1993**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

Barbieri, Valter
B236c Condicionamento climático da produtividade poten-
cial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): um modelo
matemático fisiológico de estimativa. Piracicaba,
1993.
142p.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Cana-de-açúcar Produtividade - Simulação
2. Cana-de-açúcar - Rendimento - Simulação 3. Clima
tologia agrícola 4. Fotossíntese - Simulação 5. Simu-
lação - Modelo I. Escola Superior de Agricultura Luiz
de Queiroz, Piracicaba

CDD 633.61

CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE- AÇUCAR (*Saccharum* spp.): UM MODELO MATEMÁTICO-FISIOLÓGICO DE ESTIMATIVA

VALTER BARBIERI

Aprovada em: 16/04/93

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova	ESALQ/USP
Prof. Dr. Valdomiro Correa de Bittencourt	ESALQ/USP
Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira	ESALQ/USP
Prof. Dr. Clovis A. Volpe	UNESP
Prof. Dr. Marcelo B. Paes de Camargo	IAC

NILSON AUGUSTO VILLA NOVA
orientador

CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE- AÇUCAR (Saccharum spp.): UM MODELO MATEMÁTICO-FISIOLÓGICO DE ESTIMATIVA

VALTER BARBIERI

Aprovada em: 16/04/93

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova ESALQ/USP

Prof. Dr. Valdomiro Correa de Bittencourt ESALQ/USP

Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira ESALQ/USP

Prof. Dr. Clovis A. Volpe UNESP

Prof. Dr. Marcelo B. Paes de Camargo IAC

**NILS ON AUGUSTO VILLA NOVA
orientador**

*A minha mãe Maria e
a Renata*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Nilson Augusto Villa Nova, pelos ensinamentos, orientação e amizade.

Ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por permitir a realização do Curso de Doutorado.

Aos Professores do Departamento de Solos de Nutrição de Plantas pelos ensinamentos e amizade.

Aos Eng^o Agr^o Valdomiro Correa de Bittencourt, Antonio Roberto Pereira, Clovis A. Volpe e Marcelo Bento Paes de Camargo pelas sugestões prestadas.

Ao Robinson Luis Tuon, pela colaboração no processamentos dos dados.

A Márcia Regina Telles de Freitas pelo zelo e dedicação no trabalho de digitação.

A todos que de uma forma ou de outra,
contribuíram para realização deste trabalho.

CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE- AÇÚCAR (Saccharum spp.): UM MODELO MATEMÁTICO-FISIOLÓGICO DE ESTIMATIVA

Autor: Valter Barbieri

Orientador: Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento dos conceitos básicos de simulação que podem ser utilizados em modelagem de previsão da produção potencial da cana-de-açúcar. Procurou-se desenvolver um modelo no qual medidas regulares de elemento de clima possam ser utilizadas para fornecer informações sobre o desempenho da cultura, especialmente o acúmulo da matéria seca durante o ciclo. Os resultados deste estudo consideraram um conjunto de critérios e funções requeridas para prever a evolução temporal dos estágios fenológicos tais como: a germinação e estabelecimento, a formação do aparato fotoassimilatório (folhas), a renovação das folhas (formação de palhas), a morte dos colmos por competição, e o acúmulo de matéria seca

considerando as variações da fotossíntese e da respiração. Os elementos de clima utilizados foram insolação e temperatura do ar, juntamente com dados astronômicos como o fotoperíodo e a radiação no topo da atmosfera. A disponibilidade de água no solo foi considerada como ideal, uma vez que o modelo simula a produção potencial (sem restrições hídricas, pragas, doenças, características físicas e químicas do solo). O modelo é composto por uma série de equações que descrevem o comportamento fisiológico da planta em resposta às condições ambientais. As constantes das equações foram obtidas adaptando-se os resultados de pesquisas disponíveis na literatura. A produção da matéria seca foi feita considerando-se a taxa de assimilação fotossintética bruta, subtraindo-se as perdas provocadas pela respiração, senescência e morte das folhas e dos colmos durante o ciclo. A fotossíntese e a respiração foram estimadas considerando-se a taxa potencial máxima, e suas variações devidas às condições ambientais (insolação e temperatura do ar), e devido à idade das folhas e da cultura, juntamente com o desenvolvimento da área foliar. Considerou-se a fração da energia incidente interceptada pelas folhas e sua extinção no dossel. Os valores da matéria seca acumulada durante o ciclo, estimados pelo modelo, foram confrontados com os dados medidos no campo. A distribuição da matéria seca nos diversos órgãos da planta também foi considerada.

A equação de acúmulo potencial da matéria seca foi:

$$MST = MS_0 \cdot Cr^n + \frac{\overline{MS} \cdot (Cr^n - 1)}{(Cr^n - 1)}$$

onde

MST = mat. seca acumulada no fim do mês em questão(kg/ha)

MS₀ = mat. seca existente no início de mês (kg/ha)

(considera as perdas de folhas e de colmos)

Cr = Coef. de respiração de manutenção (termo subtrativo)

Cr = 1 - r max . Cr(t) . Cr (i)

r max = 0,023 g/g - respiração máxima

Cr(t) = correção da r max em função da temperatura

Cr(i) = correção da r max em função da idade da planta

n = nº de dias do mês

$\overline{MS}$ = matéria seca média mensal produzida por dia(kg/ha)

Os resultados de MST obtidos podem ser transformados em toneladas de colmos por hectare através das seguintes equações de regressão linear, ajustadas aos dados medidos:

$$\hat{Y} = b \cdot X$$

onde

$\hat{Y}$ = t colmos/ha (estimado)

X = MST (t/ha)

b = coeficiente angular considerando-se a(s) variedade(s)

CP 51-22	b= 2,07	r=0,98*
CB 41-76	b= 1,99	r=0,88**
CB 47-355	b= 2,22	r=0,91**
NA 56-79	b= 2,27	r=0,94**
Variedades	b= 2,12	r=0,80**

O modelo proposto mostrou-se consistente tanto para a simulação da matéria seca acumulada durante o ciclo (crescimento), como para a estimativa da produtividade potencial da cultura (Pp).

**CLIMATIC CONDITIONING OF THE
POTENTIAL YIELD OF SUGAR CANE
(Saccharum spp.) A MATHEMATICAL-
PHYSIOLOGICAL ESTIMATION MODEL**

Author: Valter Barbieri

Adviser: Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova

SUMMARY

This thesis describes the development of basic concepts that may be used in modelling the prevision of sugar cane yield. An attempt was made to develop a model in which regular climatic measurements can be used to provide informations about the state of the culture, with emphasis to the accumulation of dry matter. The results of this study considered a set of needed criterions and functions to predict the evolution with time of the phenological stages, such as: germination and establishment, forming of the photoassimilatory apparatus (leaves), renewal of leaves (straw forming), stem death due to competition, and the dry matter cumulation considering variations of photosynthesis and respiration. Climatic data used were insolation and

temperature, together with astronomical data like photoperiod and radiation at the top of the atmosphere. Limitations due to water stress were not considered, since the model simulates the potential production (without water shortage, diseases and limitations due to physical or chemical soil characteristics). The model is compound by a series of equations that describe the physiological behaviour of the plant, responding to environmental conditions. The equation constants were obtained adapting the research data available from literature. The dry matter production was calculated considering the gross assimilation rate, subtracting losses due to respiration, aging and death of leaves and stems during the cycle. The photosynthesis and respiration were estimated considering a maximum potential rate and its variations due to environmental conditions (insolation and temperature) and due to the age of leaves and plants, together with the leaf area development. The fraction of incoming light intercepted by the leaves was considered. Dry matter values estimated by the model were matched with field data. The distribution of the dry matter within the different plant organs was also considered.

The equation for dry matter accumulation was:

$$MST = MS_0 \cdot Cr^n + \frac{\overline{MS} \cdot (Cr^n - 1)}{(Cr^n - 1)}$$

where

MST = cumulated dry matter at the end of month (kg/ha)

MSo = dry matter at the beginning of month (kg/ha)

(considering leaf and stem losses)

Cr = maintenance respiration coefficient (subtractive term)

$Cr = 1 - r_{max} \cdot Cr(t) \cdot Cr(i)$

$r_{max} = 0,023 \text{ g/g}$ - maximum respiration

$Cr(t)$ = correction of r_{max} due to temperature

$Cr(i)$ = correction of r_{max} due to plant age

n = number of days per month

$\overline{MS}$ = mean monthly dry matter production per day (Kg/ha)

The obtained results for MST may be transformed in stems per hectare using the following linear regression equations, adjusted to measured data:

$$\hat{Y} = b \cdot X$$

where

$\hat{Y}$ = tons of stems/ha

X = MST (tons/ha)

b = angular coefficient considering the variet(ies)

CP 51-22	b= 2.07	r=0.98*
----------	---------	---------

CB 41-76	b= 1.99	r=0.88**
----------	---------	----------

CB 47-355	b= 2.22	r=0.91**
-----------	---------	----------

NA 56-79	b= 2.27	r=0.94**
----------	---------	----------

Varieties	b= 2.12	r=0.80**
-----------	---------	----------

The proposed model showed to be consistent both for the simulation of dry matter cumulation during the cycle (growth), and for the estimation of the potential yield of the culture (Pp).

ÍNDICE

Páginas

RESUMO.....	iv
SUMMARY.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. MODELOS.....	6
2.2. BROTAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR...	10
2.3. CRESCIMENTO DA ÁREA FOLIAR.....	14
2.4. FATORES QUE AFETAM A FOTOSSÍNTESE.....	20
2.4.1. RADIAÇÃO.....	21
2.4.1a. TEMPERATURA.....	27
2.4.2. MOVIMENTO DO AR (VENTO).....	30
2.4.3. IDADE DAS FOLHAS E DA PLANTA.....	34
2.5. RESPIRAÇÃO.....	38
2.6. CRESCIMENTO (DISTRIBUIÇÃO E ACÚMULO DE MATÉRIA SECA).....	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1. LOCAIS.....	54
3.2. CONCEITUAÇÃO BÁSICA.....	54

3.3. RELAÇÕES ENTRE A PRODUÇÃO DE CARBOIDRATO E ENERGIA SOLAR.....	55
3.4. RELAÇÕES ENTRE A PRODUÇÃO DE CARBOIDRATO E ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR. (IAF).....	57
3.5. PRODUÇÃO DE CARBOIDRATO PELA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	61
3.6. DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS MENSAIS DE QoEN.....	62
3.7. DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO NÃO CORRIGIDA DE CARBOIDRATO (CB).....	64
3.8. DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DO CARBOHIDRATO BRUTO CORRIGIDO (CB _c).....	64
3.9. CORREÇÃO DEVIDO AO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (C(IAF)).....	67
3.10. CORREÇÕES DEVIDO À TEMPERATURA DO AR.....	71
3.11. CORREÇÃO DEVIDO À IDADE DA CULTURA C(i).....	73
3.12. RESPIRAÇÃO DE CRESCIMENTO (efic. de conversão) (C _{rc}).....	75
3.13. RESPIRAÇÃO DE MANUTENÇÃO (CR _m).....	76
3.14. AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO LÍQUIDA DE CARBOIDRATO, MENSALEACUMULADO.....	78
3.14.1. APLICAÇÃO DA CORREÇÃO DE RESPIRAÇÃO.....	78
3.14.2. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO POTENCIAL (Pp).....	83
3.14.3. VALIDAÇÃO DO MODELO COM VISTAS À PRODUÇÃO FINAL.....	85

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1. PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA MENSAL.....	87
4.1.1. PRODUÇÃO MENSAL DE CARBOIDRATOS (CBmax).....	88
4.1.2. ESTIMATIVA DO CARBOIDRATO BRUTO MENSAL CORRIGIDO (CBC).....	90
4.1.3. RESPIRAÇÃO DE MANUTENÇÃO.....	93
4.1.4. ESTIMATIVA DO DESCARTE DE FOLHAS MORTAS (PALHA).....	98
4.1.5. PRODUÇÃO E ACÚMULO DA MATÉRIA SECA: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS E SIMULADOS.....	101
4.1.6. VALIDAÇÃO DO MODELO COM VISTAS À PRODUÇÃO FINAL.....	104
5. CONCLUSÕES.....	112
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

LISTA DE TABELAS

Figuras	Páginas
1	Efeitos da temperatura do ar e do solo sobre a fotossíntese medida em condições uniformes.....30
2	Composição química, valores de conversão da glicose e requerimento de glicose para a biossíntese de 1,0 grama de biomassa.....39
3	Distribuição do peso seco da cana-de-açúcar, var. PR 980, aos 317 dias depois de plantada.....50
4	Valores de CBmax diários e mensais, CBc e CBn (kg CH ₂ O/ha.dia).....89
5	Valores estimados de CBC (kg CH ₂ O/ha dia) corrigido em função da temperatura, insolação, IAF e idade da cultura.....91
5a	Valores medidos da produtividade da cana-de-açúcar irrig. e da mat. seca total estimada pelo modelo MST. (t/ha).....105
6	Conjunto de resultados obtidos no desenvolvimento do modelo proposto.....133
7	Conjunto de resultados obtidos no desenvolvimento do modelo proposto.....134

8	Valores da radiação no topo da atmosfera (cal/cm ² .dia) para as latitudes Norte e Sul.....	135
9	Valores do comprimento do dia para as latitudes Norte e Sul (horas).....	136
10	Valores do Carboidrato máximo para um dia claro (CBc) (kg CH ₂ O/ha dia).....	137
11	Valores do carboidrato máximo produzido em dias nublados (CBn) (kg CH ₂ O/ha.dia).....	138
12	Dados climáticos de Araras-SP.....	139
13	Dados climáticos de Araras-SP.....	140
14	Dados climáticos de Araras-SP.....	141
15	Dados climáticos de Araras-SP.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Páginas
1 e 2	Efeitos de temperaturas constantes e temperaturas diferentes no dia e noite 1) na altura das plantas. 2) no peso seco dos brotos e primórdios radiculares após 29 dias do plantio (Para este tratamento aplicou-se uma queda de 4°C durante a noite e foi plotado no gráfico a média das temperaturas).....12
3	Brotação e perfilhamento da cana-de-açúcar plantada em sulcos de diferentes profundidades, com uma cobertura de terra de 5cm, durante o mês de inverno.....13
4	Diferenças no índice de área foliar durante o período de crescimento da cana-de-açúcar no Havaí (BORDEN, 1946) GUIAHA (MCLEAN et al, 1968), África do Sul (GOSNELL, 1968).....15
5	Relações entre o índice de área foliar e a idade da cultura, durante o ciclo de cana soca, para diferentes regimes de água. Araras - SP. (LEME et al, 1984).....16

6	Relações entre o índice de área foliar, a porcentagem de radiação transmitida através das folhas e a evapotranspiração da cultura (CHANG et al, 1965).....	17
7	Relações entre o índice de área foliar e a porcentagem de radiação solar transmitida através das folhas. (MEDINA et al, 1970).....	18
8	Relações entre a altura do colmo e a porcentagem de cobertura para a variedade NCo.376. (THOMPSON, 1965).....	20
9	Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera, e na superfície do solo ao nível do mar, em dias limpos e em dias nublados. (GATES, 1980).....	22
10	Ação espectral na fotossíntese média (<u>Saccharum</u> spp) (ALEXANDER & BIDDULPH, 1974).....	23
11	Relações entre a taxa de fotossíntese bruta e a intensidade de radiação, em folhas sombreadas mutuamente, com um índice de área foliar igual a 4. (WALDRON et al, 1967).....	24

12	Relação entre a taxa de fotossíntese bruta e a intensidade de radiação em folhas individuais. (WALDRON et al, 1967).....	25
13	Relações entre a intensidade de radiação e fotossíntese: a) na primeira folha totalmente expandida aos dois meses de idade da planta. b) na última folha verde da mesma planta. Temperatura do ar de 23°C e da folha de 25°C. (BULL, 1969).....	26
14	Relações entre a taxa de fotossíntese e a concentração de CO ₂ no ar (HARTT & BURR, 1965).....	27
15	Principais efeitos da temperatura do dia e da noite em logaritmo da matéria seca produzida (g), em seis clones de cana-de-açúcar. (BULL, 1965).....	29
16	Taxa de fotossíntese em folhas não destacadas variando a densidade de luz e o fluxo de ar. (IRVINE, 1971).....	32
17	Porcentagem de estômatos abertos a diferentes intensidades de luz e de fluxos de ar iguais aos da fig.16.(IRVINE 1971).....	33

18	Tendência da composição vegetativa da parte aérea de uma colheita de cana cultivada no Havaí (BORDEN, 1944). Citado por van DILLEWIJN (1952).....	35
19	Variações da taxa fotossintética da cana-de-açúcar, do plantio até 22 meses de idade (HARTT e BURR, 1965). 1944). Citado por van DILLEWIJN (1952).....	36
20	Diferenças no número de colmos durante o período de crescimento da cana-de-açúcar no Havaí (NICKEL, 1967); África do Sul (GOSNELL, 1968); Brasil (MACHADO, 1981; ROSENFELD & LEME, 1984).....	37
21	Correlação entre a fotossíntese bruta e a respiração noturna medida no campo com um índice de área foliar em torno de 2.....	40
22	Curso anual da respiração noturna de folhas de cana-de-açúcar PR 980 (MEDINA et al 1970).....	41
23	Variação da respiração dos colmos da cana-de-açúcar PR 980, durante o período de crescimento.....	42
24	Taxa de respiração de algumas variedades de cana-de-açúcar (MEDINA et al, 1970).....	43

25	Perdas por respiração noturna de colmos e folhas em cana-de-açúcar (MEDINA et al 1970).....	44
26	Relação teórica entre a taxa de fotossíntese bruta (FOTb), taxa de fotossíntese líquida (POTl), taxa de respiração de manutenção (Fm) em relação ao índice de área foliar para a cultura da cana-de-açúcar. MACHADO (1981).....	45
27	Crescimento em altura da cana de açúcar em condições controladas de temperatura.....	49
28	Acumulo e distribuição da matéria seca durante o período de crescimento (SAN JOSÉ & MEDINA, 1970).....	52
29	Mat. seca acum., medida e ajustada (MACHADO, 1981).....	53
30	Estágios do desenvolvimento da cana-de-açúcar (KUYPER) FONTE: DOORENBOS e KASSAM (1979).....	53
31	Produção de carboidratos e intensidade de radiação.....	56
32	Representação esquemática da radiação solar transmitida pelo dossel.....	58
33	Demonstração gráfica da dependência da relação $C_{(IAF)} \times IAF$	68

34	Valores do IAF calculados em função da somatória de graus dia (ΣGD).....	70
35	Valores de $c_c(t)$ e $C_n(t)$ entre 0 e 30°C.....	72
35a	Curva de variação C_0 x GD entre 125 e 675.....	74
36	Curva de variação C_0 x GD entre 700 e 2000.....	75
37	Relação de dependência entre correção de idade na respiração ($Cr(i)$) x ΣGD	78
38	Valores de CBC, CBn e CBmax nas condições climáticas do período em estudo. (kg CH ₂ O/ha.mês).....	90
39	Valores de IAF estimados para o período estudado.....	92
40	Valores mensais de CBmax e CBC para o período estudado (kg CH ₂ O/ha.mês).....	93
41	Valores das correções da respiração de manutenção (r_{max}), dependentes da idade ($Cr(i)$) e da temperatura ($Cr(t)$) durante o período estudado.....	94
42	Coeficiente de respiração (g m.s.consumida/gm.sacumulada).....	95
43	Valores da matéria seca bruta e da matéria seca líquida (kg m.s./ha.mês) estimados pelo modelo.....	97
44	Respiração de manutenção R_m (%) e R_m (kg/ha) gráfico.....	98

45	Valores estimados da taxa mensal e acumulada da produção de palhas (kg/ha).....	100
46	Valores da produção mensal de matéria seca líquida (kg m.s/ha.mês), estimados pelo modelo proposto e observados e ajustados por MACHADO (1981).....	103
47	Valores acumulados da matéria seca produzida (kg/ha). Estimados pelo modelo proposto e medidos e ajustados por MACHADO (1981).....	104
48	Variedade CP 51-22.....	107
49	Variedade CB 41-56.....	108
50	Variedade CB 47-355.....	109
51	Variedade Na 56-79.....	110
51a	Variedades CP 51-22; CB 41-76; CB 47355; NA 56-79.....	111

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm-se realizado importantes progressos na elaboração de modelos para estimar o rendimento das culturas. De uma ou de outra forma, esses modelos pretendem correlacionar os efeitos dos dados meteorológicos com a produção e rendimento das culturas. Afim de se obter esses resultados, tem-se seguido numerosos enfoques.

Um enfoque dinâmico tende a considerar os aumentos periódicos de matéria seca da planta viva, condicionada pela simultânea influência dos diversos dados meteorológicos, a fim de simular os processos da natureza, para chegar a um prognóstico do rendimento agrícola. Isto tem sido possível graças a um melhor conhecimento dos processos fisiológicos que ocorrem na planta, e por existir nos dias atuais, sistemas computadorizados de cálculos, aperfeiçoados para elaboração e redução de equações relativamente precisas e detalhadas desses processos. Esses modelos tem contribuído para um melhor conhecimento dos mecanismos fisiológicos para avaliações qualitativas e quantitativas dos sistemas de plantio.

Como o cultivo da cana-de-açúcar tem sido muito incrementado no Brasil, aumentou-se, a demanda de vários níveis de controle ambiental da cultura canavieira, desde formas de manipulação do solo, profundidade e densidade de plantio, irrigação, controle da maturação, pragas e doenças, etc..

Para obtenção de altos rendimentos agrícolas da cana-de-açúcar, a temperatura do ar, a radiação solar e a água no solo devem estar a níveis adequados durante as diferentes fases fenológicas do desenvolvimento. Para uma boa germinação, a temperatura do solo é considerada primordial; quanto à água, durante esta fase, o tolete depende principalmente do seu próprio suprimento. Posteriormente, para o estabelecimento da fase vegetativa, dependerá da disponibilidade hídrica, a qual poderá ser fornecida pela chuva e/ou irrigação, da temperatura do ar e da energia solar. Estas fases (germinação, estabelecimento e vegetativa) são consideradas como as fases cuja deficiência hídrica mais afeta no rendimento da cultura, seguida em importância pela fase da formação da produção, a qual requer temperaturas maiores que a temperatura base inferior e menores que a temperatura base superior. Na fase seguinte, a da maturação dos colmos, para bom acúmulo de sacarose, é necessário que a temperatura do ar seja menor que a temperatura base inferior e, preferencialmente, acompanhada de ligeira deficiência hídrica.

Para a maioria das variedades, após alcançarem estágio suficiente, e dependendo das condições climáticas, poderá ocorrer o florescimento, fenômeno este que é extremamente interessante para os melhoristas, para que se possam fazer cruzamentos genéticos, e inconveniente para os produtores de cana-de-açúcar, uma vez que tal fenômeno promove consumo de açúcares para a emissão da panícula, diminuindo o rendimento agro-industrial.

Para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, a cultura da cana-de-açúcar é submetida, durante o seu ciclo, a diferentes níveis de temperatura e radiação solar, sendo esses níveis baixos no inverno e altos no verão; a amplitude destes níveis é acentuada à medida que se afasta do Equador. Com raras exceções, pode-se considerar que os índices de precipitação pluvial também têm esse mesmo comportamento, podendo em alguns casos, ocorrer fenômenos como "veranicos", fazendo com que os valores observados de precipitação sejam menores que os normais nos meses chuvosos. Nas regiões citadas acima, a cana-de-açúcar é plantada desde o mês de maio até o mês de novembro, em caso extremo. A época de colheita coincide com estes mesmos meses, sendo que o pico de maturação, para a maioria das variedades, ocorre durante os meses de setembro e outubro e devido ao frio e/ou a seca ocorrida nos meses anteriores. Lembrando que esta cultura é semi-perene, sendo renovada de quatro em quatro anos em média, a sua colheita é feita todos os anos, aguardando-se a

rebrotar para a próxima colheita. A cada ciclo, a cultura submeter-se-á, durante o seu desenvolvimento, a diferentes condições de tempo, sendo o rendimento agrícola afetado diretamente por estas condições.

Muitas pesquisas foram feitas para estimar esses efeitos, no entanto, cada uma delas foi realizada em condições particulares de clima, em locais, épocas, com variedades e densidade de plantio diferentes. Na sua maioria foram observados efeitos isolados dos elementos meteorológicos de clima (temperatura do ar, radiação solar, disponibilidade hídrica, vento, etc.) na fotossíntese, respiração, crescimento, acúmulo de sacarose, desenvolvimento da área foliar, etc..

Serão, reunidos os resultados destas pesquisas, analisados conjuntamente, elaborando-se um modelo matemático-fisiológico, englobando todas estas condições, calibrando-o com as variedades NA56-79 CB41-76 CB47-355 CP51-22 e com as características climáticas da região Sudeste (maior produtora de cana-de-açúcar). Este modelo poderá ser usado como meio de ajuda para os pesquisadores definirem a direção da pesquisa, e também para auxiliar no entendimento das interações básicas no desenvolvimento da cultura. Sabe-se, porém, como escreveu DUNCAN (1967) citado por PEREIRA (1988) que tal trabalho é como receber uma caixa contendo peças de um relógio e ter que dizer a hora certa.

Objetiva-se que este modelo possa estimar o

crescimento e o rendimento agrícola potencial (sem deficiência hídrica, pragas e/ou doenças, e com bom nível de fertilidade e preparo do solo) em diferentes condições climáticas. Se associado com outros modelos (DOORENBOS & KASSAM (1979); SCARDUA (1985); ROSENFELD (1990)), possa predizer as melhores épocas de plantio em condições naturais e de irrigação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MODELOS

Provavelmente, a maioria dos modelos em biologia agrônômica envolvem análises estatísticas de uma grande quantidade de dados, para produzir uma série de curvas de regressão, relacionando a planta com os fatores de produção. Tais modelos são empíricos e não se preocupam em explicar os processos fisiológicos envolvidos, portanto perdendo a eficiência quando utilizados em condições diferentes das quais foram desenvolvidos. Para a cana-de-açúcar, tais modelos foram desenvolvidos por ALLEN et al (1978) e PANOL (1974). Os modelos de crescimento das plantas se esforçam para simular a produção fotossintética e a partição dos fotossintetizados para o crescimento, o armazenamento e a respiração. A pesquisa da fotossíntese é refletida em sofisticados modelos, os quais existem para prever a fotossíntese pelos dados da elevação solar, geometria das folhas, penetração da luz, taxa individual da fotossíntese, etc. A estratégia de adaptar a construção de um modelo depende da visão do autor e dos objetivos deste modelo.

Então, os modelos podem variar de simples, como os elaborados por MONSI e MURATA (1970), os quais são baseados num padrão de distribuição dos fotossintetizados, para os modelos mais completos e complexos como os desenvolvidos por de WIT et al (1970) e FICK et al (1973), nos quais a distribuição é predita pela integração dos dados fisiológicos básicos.

De WIT (1959) considerou, em um modelo proposto, que a cobertura vegetal era completa durante todo o período de crescimento da cultura, e ALBERDA (1962), deu um passo à frente, considerando as variações da cobertura vegetal. Estes modelos consideram a interceptação total da radiação solar incidente, entretanto a penetração da radiação no dossel vegetal depende da distribuição vertical das folhas e portanto cada camada recebe quantidades diferentes de radiação; sendo assim, a fotossíntese total é representada pelo somatório destas camadas, como são considerados nos modelos desenvolvidos por SAEKI (1960); MONTEITH (1965) e outros. Modelos mais complexos também consideram a temperatura do ar, a qualidade e quantidade da radiação solar, a idade das folhas e da planta, as taxas de respiração, etc. Estes modelos são apresentados por de WIT (1970), MACHADO (1981) e PEREIRA (1988). Desenvolvendo um modelo para a cana-de-açúcar, MANIEIRO (1980) correlacionou o crescimento dos colmos e o crescimento da área foliar com a temperatura ambiente e a temperatura base da cultura, usando para isso o conceito de Graus-dia. BARBIERI & VILLA

NOVA (1978) desenvolveram um modelo semelhante a este. Outro modelo matemático de produção da cana-de-açúcar foi desenvolvido por SCARDUA (1985), o qual envolveu a radiação solar global, a temperatura do ar e a precipitação, permitindo a estimativa da produção em condições naturais e de irrigação, com boa precisão para o local onde foi desenvolvido, sendo simples e de fácil utilização.

Como foi vista, para a fotossíntese a quantidade de informações é muito grande, enquanto para a respiração, principalmente para a cana-de-açúcar, poucas são as informações disponíveis. Alguns autores consideram a respiração como sendo proporcional ao peso de matéria verde (1904) citado por VAN DILLEWIJN (1952), ao peso de matéria seca e/ou ao índice de área foliar (DAVIDSON & PHILIP, 1958; SAEKI, 1960; MONTEITH, 1965), enquanto outros consideram proporcional à taxa de fotossíntese (FICK et al, 1973 e 1975; BULL & TOVEY, 1974). Desta forma, MCCREE (1970, 1974) propôs que a respiração seja considerada como a soma da respiração associada à fotossíntese e à respiração de manutenção, que por sua vez é proporcional ao peso de matéria viva. Na respiração de manutenção parte dos carboidratos são consumidos para prover de energia que será utilizada na reposição de compostos degradados durante as atividades metabólicas, bem como para os processos de transportes, manutenção do gradiente iônico e integridade das membranas (BEEVERS, 1970; MCCREE 1970, 1974; PENNING DE VRIES, 1975

a,b). Resumindo, a respiração de manutenção provê a energia necessária para manter as funções vitais da planta. A respiração de crescimento corresponde ao consumo de carboidratos na conversão dos fotossintetizados em constituintes da planta, tais como: proteínas, celulose, lignina, lipídios, etc.. Equações que permitem tais estimativas são apresentadas por THORNLEY (1970, 1976), testadas experimentalmente por BAKER et al (1972) e THORNLEY & HESKETH (1972). O modelo proposto por MCCREE (1970, 1974), tem sido utilizado por de WIT et al (1970); JAGER & KING (1974); MACKINNON et al (1978); ACOCK et al (1979); HODGES et al (1979); HUNT & LOOMIS (1979) e WANN & RAPER (1979).

Na elaboração de um modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura é necessário conhecer a distribuição dos fotossintetizados entre os diversos órgãos da planta (LOOMIS, 1970). Foi proposto por HOLT et al (1975), que a taxa de crescimento de um órgão qualquer seja estimada através da taxa de translocação para este órgão. Todavia, poucas são as informações disponíveis a este respeito. Este fato justifica a utilização das relações alométricas descritas por RICHARDS (1969), nos modelos propostos por CURRY & CHEN (1971); JAGER (1974); VANDERLIP & ARKIN (1977); ACOCK et al (1979). Reconhece-se, todavia, que tais relações sejam específicas para as variedades consideradas e para as condições ambientais ocorridas durante sua elaboração (LOOMIS et al, 1979; MACHADO, 1981). Para a

cana-de-açúcar estas relações são menos complexas do que para as espécies cuja produção econômica seja sementes e/ou frutos, uma vez que se pode considerar como órgãos principais, as folhas, colmos e raízes, para efeito de modelagem.

Tendo-se, então, escolhido ou elaborado os modelos da fotossíntese, respiração e distribuição dos fotossintetizados, pode-se elaborar um modelo de crescimento e desenvolvimento da cultura. É evidente que o conjunto de equações que constituirão o modelo inclui uma série de fatores e constantes que foram previamente determinadas experimentalmente. Faz-se, assim, o ajuste do modelo até que os resultados sejam satisfatórios.

Muitos modelos são disponíveis na literatura, para muitas culturas como: milho de WIT et al (1970); CURRY & CHEN (1971); DUCAN (1973, 1975); SPLINTER (1974); MACKINNON et al (1978); soja - HEILMAN et al (1977); WANN & RAPER (1979); trigo - RICKMAN et al (1975); HODGES & KANEMASU (1977); citrus - (MECHLIA & CARROLL (1989); cana-de-açúcar PANOL (1974); DOORENBOS & KASSAN (1978); MACHADO (1981); SCARDUA (1985), ALLEN et al (1978) e IDE (1984).

2.2. BROTAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

O efeito da temperatura do solo na germinação e crescimento inicial foi revisado na literatura por Van

DILLEWIJN (1952). Embora diferenças varietais sejam evidentes, MATHUR (1941) encontrou que a germinação foi adversamente afetada por temperaturas abaixo de 19°C e REGE & WAGLE (1939), que abaixo de 10°C foram injuriosas. SARTORIS (1929) observou germinação de brotos e raízes à temperatura de 6°C e VARRET (1927) notou que 44°C foi muito alta para boa germinação (Citados por WHITEMAN et al, 1963).

Van DILLEWIJN (1952) relatou que diferenças na temperatura ótima para germinação estão relacionada⁵ com o local de origem da variedade. Canas de origem subtropical têm temperatura ótima para germinação menores, em geral entre 26 e 33°C. Para canas de origem tropical, VARRET (1927) registrou um ótimo entre 34 e 38°C. Estudando os efeitos da temperatura, luz e água na germinação, enraizamento e crescimento inicial desta cultura, WHITEMAN et al (1963) observaram que mudas cortadas recentemente e molhadas antes do plantio tiveram uma germinação de 100%, todavia o pré-molhamento não acelerou a germinação e, subsequente, o crescimento. Notaram também que a temperatura ótima, em condições de escuro ou claridade, foi em torno de 30°C, com severa diminuição do crescimento abaixo de 22°C e virtualmente nenhum crescimento abaixo de 10-16°C. Para temperaturas abaixo de 26°C, o crescimento dos brotos é severamente diminuído. O crescimento das raízes é menos afetado pela falta de água externa e após 14 dias sem água o restabelecimento das raízes foi pequeno. Até 29 dias

ainda existiam alguns brotos viáveis, mas após 29 dias sem água todas as mudas morreram. As figuras 1 e 2 a seguir mostram alguns resultados desta pesquisa.

Fig. 1 e 2. Efeitos de temperaturas constantes e temperaturas diferentes no dia e noite: 1) na altura das plantas; 2) no peso seco dos brotos e primórdios radiculares após 29 dias do plantio. (Para este tratamento colocou-se uma queda de 4°C durante a noite e foi plotado no gráfico a média da temperaturas). Fonte: WHITEMAN et al (1963).

Estudando os efeitos da profundidade do sulco no plantio, na germinação e perfilhamento da cana-de-açúcar, BARBIERI & MANIERO (1986) observaram que no inverno, nas menores profundidades, a germinação e perfilhamento foram mais numerosos, devido às temperaturas máximas serem maiores na superfície; estes resultados são apresentados na fig. 3.

Fig. 3. Brotação e perfilhamento da cana-de-açúcar plantada em sulcos de diferentes profundidades, com uma cobertura de terra de 5cm, durante o mês de junho. Fonte: BARBIERI & MANIERO (1986).

Estudando a germinação de toletes provenientes de colmos florescidos, e portanto "isoporizados" devido a grande perda de água, BARBIERI & LEE (1984) concluíram que este chochamento não afeta a germinação, mas o estabelecimento no solo é afetado caso ocorra deficiência hídrica. SCOBBER (1968) observou que os toletes da ponta germinam melhor que os intermediários, que por sua vez germinam melhor que os toletes basais. Acrescenta que quanto menor for o intervalo entre a colheita das mudas e o plantio, e quanto maior o diâmetro dos colmos, melhores serão a germinação e o estabelecimento das mudas.

2.3. CRESCIMENTO DA ÁREA FOLIAR

Após a germinação inicia-se o desenvolvimento das folhas, que são responsáveis diretamente pela transformação da energia solar em energia química através da fotossíntese. Cada colmo produz uma nova folha a cada 10 dias aproximadamente (GLASZIOU et al, 1965), e devido a senescência e queda das folhas mais velhas observa-se um número praticamente constante, de 8 a 10 folhas por colmo, após o fechamento do dossel (MACHADO, 1981). Para a cana-de-açúcar, a produção de novas folhas pode ser truncada se ocorrer a indução ao florescimento, estudado por BARBIERI (1978) e modelado climaticamente por PEREIRA et al (1983).

O comportamento do desenvolvimento do índice de

área foliar (IAF), durante o ciclo da cultura, é de extrema importância para os estudos de crescimento e produção. Para cada estágio da cultura, existem diferentes IAF. Sendo verificado por YOON (1971), que na maturação o IAF é da ordem de $3,6 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e CHANG (1968), que encontrou que o índice de área foliar é ótimo ao redor de $9-12 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Resultados citados obtidos por BULL & GLASZIOU (1975) e são apresentados na fig. 4.

Fig. 4. Diferenças no índice de área foliar durante o período de crescimento da cana-de-açúcar no Havai (BORDEN, 1946), GUIANA (MCLEAN et al, 1968) e África do Sul (GOSNELL, 1968).

Estudando o crescimento do IAF tanto para

condições ambientais naturais como com irrigação (fig.5), e espaçamento entre sulcos de 1,4 m, LEME et al (1984) mostraram que o tratamento irrigado promoveu um IAF ligeiramente superior ao não irrigado. Este fato, entre outras coisas, justifica uma maior produção agrícola dos tratamentos com irrigação. O aumento do IAF promove maior consumo de água, observado por BARBIERI & VILLA NOVA (1981), estudando a evapotranspiração potencial desta cultura. Diferenças varietais e climáticas promovem diferentes IAF, todavia o comportamento deste crescimento é semelhante em todos os locais apresentados nas fig 4 e 5.

Fig. 5. Relações entre o índice de área foliar e a idade da cultura, durante o ciclo de cana soca, para diferentes regimes de água. Araras - SP. (LEME et al, 1984).

À medida que ocorre o aumento do IAF, aumenta-se a energia interceptada pelo dossel, diminuindo-se a energia transmitida através das folhas para a superfície do solo, e que portanto seria "perdida", como pode ser observado na fig. 6 do trabalho realizado por CHANG et al (1965).

Fig. 6. Relações entre o índice de área foliar, a porcentagem de radiação transmitida através das folhas e a evapotranspiração da cultura. CHANG et al (1965).

A arquitetura do dossel foto assimilatório, ou seja, a distribuição espacial das folhas, varia de espécie para espécie e de variedade para variedade, e é a causa pela qual o IAF ótimo é maior nas espécies de folhas eretas, como

a cana-de-açúcar. Em consequência, estas plantas são em geral mais produtivas. MEDINA et al (1970), estudando o desenvolvimento da área foliar e a distribuição espacial com relação à interceptação da radiação na faixa do visível, encontraram que o fechamento quase completo ocorre quando o IAF torna-se maior que $4 \text{ m}^2/\text{m}^2$, como pode ser visto na fig. 7.

Fig. 7. Relações entre o índice de área foliar e a porcentagem de radiação solar transmitida através das folhas. (MEDINA et al, 1970).

Este fato determina a aceleração do amarelecimento e morte das folhas. O que quer dizer que superfícies foliares (IAF) maiores que 4 praticamente não são assimilatórias. Resultados semelhantes foram observados por WALDRON et al (1967), onde a maior porção da energia incidente foi interceptada pelas seis folhas superiores. As folhas abaixo iniciam a senescência, e o seu potencial fotossintético individual em torno de 60% das folhas acima. GASCHO & SHIGH (1983) e BARBIERI (1981), estudando as características biométricas da cana-de-açúcar em diferentes espaçamentos de plantio, observaram que o IAF cresce mais rápido nos espaçamentos menores, aproveitando melhor a radiação solar disponível.

A porcentagem de cobertura foi também estudada por THOMPSON (1965), onde foi relacionada a porcentagem de cobertura com a altura dos colmos em função do tempo, apresentado na fig. 8 a seguir. Lembra-se aqui que a altura dos colmos é muito mais fácil de se obter, e trabalhos com este parâmetro são numerosos na bibliografia (ARAGÃO & PEREIRA, 1979; ROSENFELD & LEME, 1984; entre outros).

A transmissão da radiação solar no dossel em uma cultura, pode ser estimada pela lei de BEER, utilizada com este propósito por vários autores (SAEKI, 1960, 1963; ALLEN et al, 1964; YOCUM et al, 1964). O coeficiente de transmissão varia com o ângulo de incidência da radiação, ou seja, com a inclinação solar, implicando na variação do coeficiente de

extinção (K), conforme relatam ANDERSON (1966), GLEGG et al (1974), MACHADO (1981). Para MACHADO (1981), estudando a cana-de-açúcar, o K mínimo ocorreu ao redor das 12 horas e sua variação no período considerado foi entre 0,4 e 0,6 para radiação global, 0,2 e 0,4 para o infravermelho próximo e de 0,6 a 1,0 para a radiação fotossinteticamente ativa. (PAR).

Fig. 8. Relações entre a altura do colmo e a porcentagem de cobertura para a variedade NCo.376. THOMPSON (1965).

2.4. FATORES QUE AFETAM A FOTOSSÍNTESE

Na agricultura, a energia solar é armazenada para seu uso no futuro via fixação em biomassa pelo processo da fotossíntese. Neste processo, o CO_2 do ar é convertido em carboidratos $(\text{CH}_2\text{O})_n$, através da seguinte reação:

Este processo é também chamado de assimilação de CO_2 . Existem diferenças na eficiência do uso da luz entre as plantas, principalmente entre as plantas do tipo C_3 e do tipo C_4 (cana-de-açúcar). Esses nomes referem-se ao comprimento do esqueleto de carbono do primeiro produto estável no processo fotossintético (ácido málico). Para níveis baixos de luz, a diferença na eficiência é pequena, mas a taxa de assimilação em condições de saturação luminosa é muito maior para as plantas do tipo C_4 . A principal carboxilase na C_4 (PEPcase fosfoenolpiruvato carboxilase) tem maior afinidade ao CO_2 , em torno de duas vezes maior que a da C_3 (RuDP-Ribulose bifosfato). Na planta do tipo C_4 a fotorrespiração é ausente, implicando assim em maior fotossíntese líquida, entre outros fatores detalhadamente descritos por Van HEEMST (1986). BULL (1969) acredita que a ausência de fotorrespiração nas C_4 não é somente devido à eficiência na reciclagem do CO_2 , mas também à falta de atividade das enzimas fotorrespiratórias.

2.4.1.4 RADIAÇÃO

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR), cuja faixa de comprimento de onda vai de 0,4 a 0,7 μm não é rotineiramente medida, embora esta informação seja sempre requerida para muitos propósitos, incluindo modelagem de crescimento e produção das culturas econômicas. SZEICZ (1974)

observou que sob condições de céu limpo, esta fração (PAR) foi de 0,41 da radiação global com 10 graus de elevação solar e 0,49 a 70 graus. STANHIL & FUCHS (1977) determinaram 0,70 de PAR na radiação difusa e YEFIMOVA (1971), para estimar a fração PAR, usou as constantes 0,43 para dias limpos e 0,47 para dias nublados sendo que MEEK et al (1984) estimaram em 0,45 da radiação global incidente.

Fig. 9. Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera e em dias limpos e em dias nublados na superfície do solo ao nível do mar. (GATES, 1980).

Para a cana-de-açúcar, a fotossíntese máxima ocorre com o comprimento de onda da luz azul (na faixa de $0.48\mu\text{m}$) para todos os clones estudados, e também ocorrem picos, embora menores, na faixa do vermelho (de $0,62$ a $0.64\mu\text{m}$), observados por ALEXANDER & BIDDUPH (1974), resultados estes mostrados na fig. 10 abaixo.

Fig. 10. Ação espectral na fotossíntese média (Saccharum spp)
(ALEXANDER & BIDDULPH, 1974).

Os efeitos da intensidade luminosa foram observados por WALDRON et al (1967) em condições de folhas individuais, sem sombreamento (fig. 12), onde detectou-se ocorrência de saturação luminosa em torno de $0,6 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$. Em folhas com sombreamento mútuo, com o IAF igual a $4 \text{ m}^2/\text{m}^2$, não foi detectada a saturação, como pode ser visto na fig. 11. Estes valores foram medidos com uma concentração de CO_2 no ar de 125 ppm. Dobrando-se quando a concentração foi para 237 ppm. A concentração normal do CO_2 na atmosfera está em torno de 353 ppm.

Fig. 11. Relações entre a taxa de fotossíntese bruta e a intensidade de radiação, em folhas sombreadas mutuamente, com um índice de área foliar igual a 4. (WALDRON et al, 1967).

Fig. 12. Relação entre a taxa de fotossíntese bruta e a intensidade de radiação em folhas individuais. (WALDRON et al, 1967).

Observações semelhantes também foram feitas por BULL (1969) (fig. 13), que escreve neste mesmo artigo que a absorção em folhas de cana jovem excede a $100 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$, à radiação de $1,7 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$, equivalente à $0,9 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ na fração PAR.

Fig. 13. Relações entre a intensidade de radiação e fotossíntese: a) na primeira folha totalmente expandida aos dois meses de idade da planta; b) na última folha verde da mesma planta. Temperatura do ar de 23°C e da folha de 25°C. (BULL, 1969).

HARTT & BURR (1965), estudando os efeitos da concentração de CO₂ do ar na taxa fotossintética (fig. 14), encontraram, para algumas variedades, que a taxa fotossintética pode ser aumentada com o aumento do CO₂, contudo, para outras variedades, a saturação ocorre com o CO₂ em torno de 300 ppm.

Fig. 14. Relações entre a taxa de fotossíntese e a concentração de CO_2 no ar (HARTT e BURR, 1965).

3.5 TEMPERATURA

Para a cana-de-açúcar, flutuações rápidas e esparsas da temperatura afetam o processo fotossintético com um Q_{10} em torno de 1,1, na faixa de 8-34°C (WALDRON et al, 1967), o que quer dizer que assimilação é aumentada 1,1 vezes a cada 10°C de aumento na temperatura do ar. Tratamentos prolongados com temperaturas abaixo de 20°C afetam a partição

dos fotossintetizados entre o armazenamento de açúcares e a alongação dos colmos, e também a eficiência fotossintética. (GLASZIOU et al, 1965). Temperaturas do ar entre 17-18°C parecem ser particularmente favoráveis para a produção de açúcares e armazenamento e acúmulo de altos níveis de sacarose (WALDRON et al, 1967). A maturação desta cultura depende, portanto, da redução sazonal da temperatura do ar, a qual reduz o crescimento do colmo e permite que os fotossintetizados, normalmente utilizados para o crescimento, sejam canalizados para armazenamento (GLASZIOU et al, 1965). Estudando os efeitos da temperatura do ar no acúmulo de matéria seca em nove clones de cana-de-açúcar, BULL (1965) observou algumas diferenças, todavia, a temperatura do dia esteve ótima ao redor de 34°C para todos eles, como pode ser visto na fig. 15 à seguir.

Sob condições experimentais, HARTT & BURR (1965), tab. 1, observaram que a temperatura do solo tem grande efeito na fotossíntese, sendo as mais altas taxas atingidas a 21,1°C na raiz, independente da temperatura do ar nos limites estudados.

Fig. 15. Principais efeitos da temperatura do dia e da noite em logarítmo da matéria seca produzida (g), em 6 clones 3 variedades de cana-de-açúcar. (BULL, 1965).

Tabela 1. Efeitos da temperatura do ar e do solo sobre a fotossíntese medida em condições uniformes.

Taxa fotossintética da variedade H 50-7209 a diferentes temperaturas do ar e das raízes.

TEMP. RAIZ (°C)	FOTOSSÍNTESE (ml CO ₂ /dm ² .h)	
	TEMP. DO AR °C	
	23,9	18,3
23.9	15.13	14.80
	15.79	13.21
21.1	13.41	17.56
	17.85	17.49
	13.41	10.66
	16.97	15.20
18.3	17.27	13.58
	17.31	12.05
	15.63	11.34
	15.30	12.78
15.6	8.15	8.68
	14.34	7.61

2.4.2. MOVIMENTO DO AR (VENTO)

A taxa de movimento do CO₂ da atmosfera para o cloroplasto pode limitar a fotossíntese. O movimento é afetado pelo vento e pela superfície das folhas. A turbulência do ar do lado de fora das folhas aumenta a taxa

de movimento do CO_2 e reduz a espessura da camada limite do ar na qual ocorre somente difusão. Maior difusão de CO_2 é governada pela permeabilidade da cutícula e pelo comportamento estomático. A resistência estomática à difusão é minimizada pelo aumento da quantidade de estômatos e pela dimensão da sua abertura (porosidade). A difusão do CO_2 é, logicamente, controlada pelo seu gradiente de concentração. Dentro da folha o gradiente é afetado pela translocação dos fotossintetizados, pelo suprimento de água, pela anatomia interna e pelas taxas de fotossíntese e respiração. O controle afetado pelo comportamento estomática é interposto entre o movimento de ar (afetando a turbulência e a resistência da camada limite), e a intensidade de luz (afetando o gradiente interno de CO_2 pelas mudanças na taxa fotossintética).

Estudando estes efeitos em cana-de-açúcar, IRVINE (1971) observou que a baixas intensidades de luz, a fotossíntese aumenta rapidamente com o aumento desta intensidade, e a altos níveis de intensidade luminosa, a fotossíntese cresce lentamente, aproximando-se da taxa máxima fig. 16.

O incremento do fluxo de ar aumentou a fotossíntese. Para cada cm/s aumentado na velocidade do vento, houve um aumento de $10 \text{ mg } \text{CO}_2 / \text{dm}^2.\text{h}$ na taxa fotossintética (fig.16).

Fig. 16. Taxa de fotossíntese em folhas não destacadas variando a densidade de luz e o fluxo de ar. (IRVINE, 1971).

Em alguns dos níveis de fluxo de ar (vento), a abertura estomática foi incrementada com o aumento da intensidade luminosa. A abertura estomática tende a aumentar lentamente a baixos níveis de luz, mais rapidamente a níveis intermediários e novamente lenta a níveis altos, conforme pode ser visto na fig. 17.

Se a velocidade do vento e a intensidade de luz for aumentada, a fotossíntese é incrementada, mas a

porosidade (abertura estomática) decresce. IRVINE (1971) escreve que estes resultados sugerem que o decréscimo da resistência da camada limite (causada pelo aumento do fluxo de ar) e o decréscimo da resistência interna (causada pelo aumento da intensidade de luz) sobrepujam o aumento na resistência estomática (fechamento dos estômatos), permitindo aumentos na difusão do CO_2 e altas taxas de fotossíntese. Outros autores citados por IRVINE (1971) observaram comportamentos semelhantes com relação a estes parâmetros (GASTRA, 1954; NEVIS & LOOMIS, 1970; KUIPER, 1961).

Fig. 17. Porcentagem de estômatos abertos a diferentes intensidades de luz e de fluxos de ar iguais aos da fig. 16. (IRVINE, 1971)

2.4.3. IDADE DAS FOLHAS E DA PLANTA

A produção de uma nova folha e a senescência das mais velhas ocorrem concomitantemente (GLASZIOU et al, 1965; HART & BURR, 1965). Como visto anteriormente, o colmo dá origem a uma nova folha, aproximadamente a cada 10 dias. Após ter completado em torno de 6 folhas, contadas a partir da 1ª aurícula visível, pouca luz consegue atravessar estas folhas. A partir daí, dando origem a uma nova folha, inicia-se a senescência da número 7. Ao dar origem à 10ª folha, a de nº 10 já deve estar morta, não fazendo mais parte da matéria viva do canavial. Este processo, morte e substituição das folhas, ocorre durante toda a vida da planta, de forma que a idade média das folhas permanece praticamente constante. Mantém-se assim, um número aproximado de 9 folhas vivas por colmo. Van DILLEWIYN (1952) mostrou que após a 17ª semana do plantio inicia-se o acúmulo de folhas mortas (palha) sobre o solo (fig. 18). MACHADO (1981) determinou que as folhas têm uma área foliar específica de 1 g de mat.seca/dm² de folhas. Conforme os resultados obtidos por SAN JOSÉ & MEDINA (1970), o acúmulo de matéria seca das raízes da cana-de-açúcar é praticamente igual ao das folhas, para a variedade apresentada na fig 28.

Informações colhidas por RIPOLI & VILLA NOVA (1991), indicam que as variedades plantadas no Estado de São

Paulo produzem em torno de 10 t palha/ha, o que pode ser considerado como uma perda dos produtos fotossintetizados.

Fig. 18. Tendência da composição vegetativa da parte aérea de uma colheita de cana cultivada no Havaí (BORDEN, 1944). Citado por Van DILLEWIJN (1952).

A taxa fotossintética bruta das folhas de 1-7 e de 8-10, determinada por GLASZIOU et al (1965), foi de 1,5 vezes maior para o conjunto das folhas mais jovens. Ponderando a energia recebida em cada camada de folhas, a taxa fotossintética média é de 95% da taxa máxima.

À medida que o colmo envelhece, a taxa

assimilatória decresce, observação esta apresentada por BULL (1969), detectando um decréscimo de 60% dos 2 meses para os 18 meses de idade da planta. Esta taxa decresce constantemente, até os 15 meses, permanecendo constante após essa idade. (fig. 19), HARTT & BURR (1965). Quando o canavial é colhido, após a rebrota (soqueira), a taxa fotossintética torna-se alta novamente. Então, altas taxas são atingidas, tanto na cana planta como nas soqueiras .

Fig. 19. Variações da taxa de fotossintética da cana-de-açúcar, do plantio até 22 meses de idade (HARTT e BURR, 1965).

Durante o estágio de fechamento do dossel, ocorre uma super produção de colmos (Fig. 20). O pico da população de colmos ocorre, aproximadamente, entre 3° e 5°

meses após o plantio, mas em seguida, em torno de 50% deles morrem e a população torna-se estável perto dos 9 meses de idade (MACHADO, 1981; LEME, 1982; ROSENFELD, 1984). A morte desses colmos também é considerada como perda de matéria seca, ou melhor, de produtos fotossintetizados (celulose e lignina principalmente). Considere-se, também, que ao serem descartados durante o processo de competição, não fazem mais parte da matéria viva, portanto não consomem mais energia pelo processo de respiração.

Fig. 20. Diferenças no número de colmos durante o período de crescimento da cana-de-açúcar no Havai (NICKEL, 1967); África do Sul (GOSNELL, 1968). Brasil (MACHADO, 1981; ROSENFELD, 1984).

2.5. RESPIRAÇÃO

A liberação de energia dos carboidratos produzidos é descrita pela equação:

Este processo é chamado de respiração. Em torno de 40% do peso do carboidrato produzido durante a assimilação são perdidos pela respiração. A subtração da taxa de respiração da taxa de assimilação resulta na taxa de incremento no peso da planta, isto é, na taxa de crescimento.

Como foi vista anteriormente, a fotorrespiração é ausente na cana-de-açúcar (van HEEMST, 1986), todavia a respiração de crescimento e de manutenção ocorrem.

A eficiência do processo construtivo da respiração (respiração de crescimento) foi demonstrado por THORNLEY (1970, 1976). Com o conhecimento da eficiência de conversão de cada composto químico (proteína, lignina, celulose, lipídios, aminoácidos, etc.), bem como a composição química quantitativa da planta em estudo, é possível estimar o valor da eficiência global de conversão deste processo (PENNING DE VRIES (1975 a). Para a cana-de-açúcar, os valores de converção de glicose são apresentados na tabela 2.

Tab. 2. Composição química, valores de conversão da glicose e requerimento de glicose para a biossíntese de 1,0 grama de biomassa.

COMPOSTOS	COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA ($\frac{\text{g da fração química}}{\text{g de biomassa}} \times 100$)	VALOR DE CONVERSÃO ($\frac{\text{g de produto}}{\text{g de glicose}}$)	NECESSIDADE DE GLICOSE $\frac{\text{g de glicose}}{\text{fração química da biomassa}}$
Proteína	1,5	0,404	0,04
Carboidrato	88,0	0,826	1,06
Lípídeo	0,8	0,330	0,02
Lignina	7,0	0,465	0,15
TOTAL			1,27

Fonte: MACHADO (1981), tabela 1.

Desta forma, MACHADO (1981) estimou que são necessários 1,27g de glicose para formar 1g de matéria seca. Portanto, a eficiência de conversão é de 0,79, implicando num consumo de 21% do fotossintetizado bruto, neste processo.

Quanto à respiração de manutenção, pode-se dizer que as proteínas nas plantas, especialmente nas folhas, consistem principalmente de enzimas as quais têm existência muito curta. Sua deterioração ocorre na taxa aproximada de 10% por dia à temperatura de 20°C, e então tem que ser ressintetizada. A taxa de reciclagem das proteínas depende da temperatura com um Q_{10} em torno de 2. Isso significa que esta taxa é dobrada a cada aumento de 10°C da temperatura.

Embora sejam escassos dados precisos da

respiração de manutenção para a cana-de-açúcar, BULL & TOVEY (1974) apresentaram medidas da taxa de respiração noturna em folhas de cana-de-açúcar mostrando uma boa correlação entre a taxa de assimilação fotossintética bruta diária e o total de respiração noturna (respiração de manutenção) em plantas no campo. fig (21).

Fig. 21. Correlação entre a fotossíntese bruta e a respiração noturna medida no campo com um índice de área foliar em torno de 2.

A concentração dos íons nos vacúolos das células das plantas é mais alto que ao redor dos tecidos, o que causa saída de íons dos vacúolos. Para manter a concentração interna, os íons tem que ser capturados contra o gradiente de concentração. Isto requer um transporte ativo através das membranas celulares; transporte que demanda energia, provinda da respiração de manutenção.

Estudando a respiração noturna em folhas e colmos da cana-de-açúcar, MEDINA et al (1970) encontraram os resultados apresentados na fig 22, a qual ilustra a variação da respiração média das quatro primeiras folhas do colmo durante o crescimento da cultura.

Fig. 22. Curso anual da respiração noturna de folhas de cana-de-açúcar. PR 980 (MEDINA et al, 1970).

No caso dos colmos, o quadro é mais complexo, já que depende simultaneamente da idade dos internódios e do estágio de desenvolvimento da cultura. Na fig. 23, o internódio apical mostra sempre maior taxa de respiração que os internódios basais; este fato ocorre em todos os estágios ("idades") da cultura, sendo maior nos colmos mais jovens e diminuindo gradativamente com o tempo (MEDINA et al, 1970).

Fig. 23. Variação da respiração dos colmos da cana-de-açúcar PR 980, durante o período de crescimento.

Ainda nesse trabalho, é apresentada a correspondência da respiração e o curso diário da temperatura (fig. 24), sendo a temperatura máxima média do local em torno de 28°C e a temperatura mínima média de 18°C. Nas horas mais quentes do dia, a taxa de respiração no escuro foi muito maior que nas horas mais frias.

Fig. 24. Taxa de respiração de algumas variedades de cana de açúcar (MEDINA et al, 1970).

Durante o período de maior taxa de crescimento (fig. 25), entre os dias 170 e 240 após o plantio, as perdas por respiração noturna da parte aérea (colmos e folhas), ultrapassam a 30% da produção bruta. Depois dos 260 dias, quando a produtividade decresce abruptamente, as perdas por respiração noturna ultrapassam 50% da produção.

Fig. 25. Perdas por respiração noturna de colmos e folhas em cana-de-açúcar (MEDINA et al, 1970).

Estes resultados assemelham-se aos estimados por

MACHADO (1981), também trabalhando com cana de açúcar (fig. 26) em Piracicaba - SP.

Fig. 26. Relação teórica entre a taxa de fotossíntese bruta (FOT_b), taxa de fotossíntese líquida (FOT_l), taxa de respiração de manutenção (R_m) em relação ao índice de área foliar para a cultura da cana-de-açúcar. MACHADO (1981).

2.6. CRESCIMENTO (DISTRIBUIÇÃO E ACÚMULO DE MATÉRIA SECA)

Normalmente, pensa-se em crescimento em termos de alongação dos colmos. Num sentido mais amplo, o crescimento inclui o aumento da matéria seca, que é igual ao aumento do tamanho e do peso. Esses aumentos não se apresentam necessariamente paralelos. Durante o período de frio, por exemplo, a alongação do colmo pode ser paralisada, mas ainda continua a assimilação, produzindo um aumento de matéria seca. O inverso pode ocorrer durante a etapa inicial da germinação, quando o desenvolvimento dos brotos e raízes se faz às expensas dos nutrientes armazenados nos toletes. Neste caso, o aumento de tamanho está associado a uma diminuição da matéria seca.

No colmo ocorre o fenômeno de engrossamento secundário, e o aumento em comprimento é mais ou menos proporcional ao aumento de volume. O diâmetro dos internódios do colmo não é uniforme, sendo os da ponta mais finos que os da base. O diâmetro dos internódios intermediários pode ser afetado em consequência das condições anormais de crescimento. A correlação entre os incrementos em comprimento e diâmetro e volume da cana-de-açúcar é suficientemente elevada para justificar a substituição da simples e fácil medição do comprimento pelo trabalhosa determinação do volume. BARBIERI (1987) explica que a medição de volume é necessária para determinar os efeitos do florescimento na

cana-de-açúcar, uma vez que neste caso a quantidade de açúcar deve ser expressa por unidade de volume de colmos.

Três processos figuram na formação de novos órgãos: a divisão celular, a diferenciação celular e a alongação celular. Na divisão celular ocorre a formação contínua de novas células, no meristema do ponto de crescimento. As células recém formadas passam gradualmente a diferenciarem-se, formando deste modo as diferentes classes de células, ocorrendo a alongação na etapa seguinte. O crescimento da cana, assim como das suas partes constituintes, não se realiza em ritmo uniforme. O desenvolvimento começa muito lentamente, na gema em brotação, e aumenta gradualmente, até alcançar um máximo, e após é seguido de uma diminuição gradual. Esta tendência é explicada pelo fato de que na etapa inicial de brotação, o aparato de assimilação (folhas), assim como o aparato de absorção (raízes), são muito pequenos. Em consequência, a matéria orgânica é produzida em ritmo limitado. Com cada aumento da matéria seca, tanto o aparato de assimilação como o de absorção são aumentados, e em consequência aumenta-se a produção de matéria seca.

Ao aumentar a idade da planta, a proporção de tecidos que não contribuem na produção de matéria seca cresce de maneira gradual. Isso se aplica particularmente ao colmo, às folhas que recebem pouca ou nenhuma luz, e àquela parte do sistema radicular que não participa ativamente da absorção.

Esses órgãos, não só não são mais ativos no processo de produção, como, alguns dele consomem carboidratos com a respiração.

Ocorre, gradualmente, uma diminuição da relação entre os tecidos produtores e tecidos consumidores. Uma vez estabelecida a planta jovem, ocorre uma acentuada ascensão da curva que representa o crescimento. Quando esta relação é cada vez mais favorável, a curva se aproxima de um máximo, seguido de uma diminuição que pode chegar ao ponto zero ou próximo de zero, indicando que a produção e o consumo se encontram em equilíbrio. O incremento mensal e crescimento acumulado pode ser apresentado em forma gráfica, resultando numa curva sigmóide, exemplificada na fig. 28.

Todos os elementos climáticos afetam o crescimento, mas a temperatura é o elemento que mais afeta a partição dos fotossintetizados, uma vez que quase sempre, ela representa a energia disponível no ambiente; desta forma, GLASZIOU et al (1965), estudando as relações entre o crescimento da cana-de-açúcar e a temperatura, encontraram que da germinação até determinada altura, a temperatura é fator decisivo no crescimento, mas a partir daí o efeito é minimizado, como pode ser observado na fig. 27.

Na tabela 3 a seguir, SAN JOSÉ & MEDINA (1970) mostram que do plantio à colheita o canavial produziu 8160 kg de palha/ha.

Fig. 27. Crescimento em altura da cana-de-açúcar em condições controladas de temperatura. Fonte: GLASZIOU et al (1965).

**Tab. 3. Distribuição do peso seco da cana-de-açúcar,
var. PR 980, aos 317 dias depois de plantada.**

ORGÃOS	PESO SECO kg/ cm ² solo
Colmos	4,205
Colmos mortos	0,467
Folhas	0,752
Folhas mortas	0,826
Raízes	0,660
TOTAL	6,900

Fonte: San Jose e Medina (1970).

A taxa de crescimento da cultura (g mat. seca/m² de solo. dia) máxima, observada por MACHADO (1981), ocorreu entre os 300-400 dias após o plantio, e foi de 25 g/m².dia, que atribui o ocorrido, principalmente a variação da taxa assimilatória líquida, uma vez que neste período, o IAF é máximo, porém constante. BULL & GLASZIOU (1975) escrevem que em média a cana de açúcar, em condições excepcionais, pode atingir valores de 40 g/m² dia, com uma produção de 150 t/ha. ano. Valor este que raramente é atingido, variando em média de 10-22 g/m².dia (BORDEN & DENISON, 1982; GOSNELL, 1968; SAN JOSÉ & MEDINA, 1970; ROSTRON, 1974. Os valores máximos registrados por SAN JOSÉ & MEDINA (1970) e por MACHADO (1981)

foram $46\text{g/m}^2.\text{dia}$ e $25\text{g/m}^2.\text{dia}$, respectivamente, em curto período de tempo.

MACHADO (1981) encontrou a taxa de crescimento média de $12\text{g/m}^2.\text{dia}$, valor menor que os encontrados por BORDEN & DENISON (1942), SAN JOSÉ & MEDINA (1970), ROSTRON (1974), justificando que este fato ocorreu provavelmente porque os experimentos destes outros autores foram conduzidos sob irrigação. Esta prática proporciona o estabelecimento mais rápido do IAF (WATSON, 1952; LEME et al, 1984), o que pode elevar a taxa de crescimento líquido (SHIBLES & WEBER, 1965).

Para a cana-de-açúcar, 4 grandes estádios de crescimento podem ser distinguidos, conforme pode ser observado na fig. 30 (KUYPER, citado por DOORENBOS e KASSAN, 1979). A cultura não só acumula matéria seca, como também passa por vários estágios fenológicos: 1) estabelecimento, 2) vegetativo, 3) formação da produção e 4) maturação. Durante estes estágios ocorre a partição dos produtos fotossintetizados. Pode-se considerar os resultados citados por Van DILLEWIJN (1952), e os obtidos por SAN JOSÉ & MEDINA (1970) (Fig.28) como bons exemplos para a cana-de-açúcar. Pode-se observar a distribuição da matéria seca nos diferentes órgãos: raízes, colmos e folhas. Estes últimos autores enfatizam que a massa foliar desenvolve mais rapidamente que o incremento da massa seca total, e que o

incremento da massa foliar e das raízes alcançaram 95% do valor total aos 250-260 dias.

Fig. 28. Acúmulo e distribuição da matéria seca durante o período de crescimento (SAN JOSÉ e MEDINA, 1970).

Resultados encontrados por MACHADO (1981), medidos no campo e estimados por um modelo matemático fisiológico proposto, apresentaram correlação consistente. Todavia, comenta que os vários parâmetros e relações adotados no desenvolvimento do seu modelo devem ser revistos com mais detalhes, visando melhor ajustamento entre a curva teórica e a experimental apresentada na fig.29.

Fig. 30 Estágios do desenvolvimento da cana-de-açúcar (KUYPER)

FONTE: DOORENBOS e KASSAN (1979).

Acúmulo de peso seco medido (●) e simulado (linha)

Fig. 29 Mat.seca acum., medida e ajustada (MACHADO, 1981)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCAIS

Piracicaba Lat.: 22°42' Sul Long.: 47°38' W

Araras Lat.: 22°18' Sul Long.: 47°23' W

3.2. CONCEITUAÇÃO BÁSICA

A produção potencial das culturas, já definida anteriormente como o total de matéria seca produzida pelas folhas, a qual, durante o período total de crescimento é provida de água e de todos os nutrientes essenciais, bom nível de preparo do solo, e sem interferência de doenças, pragas e ervas daninhas. Neste caso, o esquema de cálculo da matéria seca total e matéria seca colhida será dependente somente do regime de temperatura do ar, radiação solar e fotoperíodo.

No processo da fotossíntese, o CO_2 (gás carbônico) do ar é convertido em CH_2O (carboidrato), conforme

a seguinte reação:

na qual 44 g de CO_2 são convertidos em 30 g de CH_2O , mantendo-se, então, a relação de 0,682 g de $\text{CH}_2\text{O/g CO}_2$.

3.3. RELAÇÕES ENTRE A PRODUÇÃO DE CARBOIDRATO E ENERGIA SOLAR

As relações entre a intensidade de radiação solar e a produção de CH_2O , pode ser representada pela forma:

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

onde

$CB =$ g CH_2O produzido/ dm^2 de folha.hora

$I =$ radiação solar global em $\text{cal/cm}^2.\text{min}$

$a = 6,193 \times 10^{-2}$

$b = 0,261$

Os valores de a e b são constantes dependentes da espécie e variedade vegetal, e da temperatura do ar e da folha na qual foi submetida para as medidas de assimilação fotossintética.

Baseado nos dados medidos por BULL (1965), apresentado na fig. 13 anteriormente, o qual referia-se à temperatura do ar de 23°C e da folha de 25°C, e ajustando-os na equação 1, obteve-se os valores de a e b para a cana-de-açúcar.

Os valores de CB calculados, conforme a equação 1, são representados na fig.31.

Fig. 31. Produção de carboidratos e intensidade de Radiação.

3.4. RELAÇÕES ENTRE PRODUÇÃO DE CARBOIDRATOS E O ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR. (IAF).

Admitindo-se que a cana-de-açúcar tem uma distribuição espacial esférica das folhas (de WIT, 1965), e que a radiação solar, ao penetrar no dossel, atenua-se conforme a equação proposta por MONSI & SAEKI (1953), análoga a lei de BEER, ou seja:

$$I_{(IAF)} = I_o \cdot e^{-k \cdot (IAF)} \quad (2)$$

$I(IAF)$ = radiação transmitida após atravessar um dado índice de área foliar(IAF) (cal/cm².min)

I_o = radiação solar incidente no topo da cultura.(cal/cm².min)

K = coeficiente de atenuação da radiação solar pelo dossel.

De acordo com os dados obtidos por CHANG et al (1965), e ajustando-os à equação 2, para IAF maiores que 1, obteve-se um $K = 0,58$.

Considerando-se o modelo esquemático da figura 32:

Fig. 32. Representação esquemática da radiação solar transmitida pelo dossel.

No nível $z' + dz$, a síntese de CH_2O (CB), de acordo com a equação 1 será dada por

$$d(\text{CB}) = \left(\frac{a \cdot I_o \cdot e^{-k(\text{IAF})_{z'}}}{1 + b \cdot I_o \cdot e^{-k(\text{IAF})_{z'}}} \right) \cdot d(\text{IAF}) \quad (3)$$

Integrando-se a equação 3, a síntese total de CH_2O para o dossel inteiro, será:

$$\text{CB}_{(\text{IAF})} = \int_0^{\text{IAF}} \frac{a \cdot I_o \cdot e^{-k(\text{IAF})_{z'}}}{1 + b \cdot I_o \cdot e^{-k(\text{IAF})_{z'}}} \cdot d(\text{IAF}) \quad (4)$$

então

$$CB_{(IAF)} = 10^3 \cdot \frac{a}{b \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{1 + b \cdot I_o}{1 + b \cdot I_o e^{-k(TAF)}} \right) \quad (5)$$

onde

$CB_{(IAF)}$ = CH_2O sintetizado por um determinado índice de área foliar (kg/ha.hora)

I_o = radiação global incidente no topo da cultura

a , b e K = constantes quantificadas anteriormente

De acordo com a equação 5, determina-se com boa aproximação a produção diária de carboidratos para um dia completamente limpo, cuja fração PAR é aproximadamente 0,4 da Radiação Global, considerando-se um valor médio diário por hora (I_{oc}), e multiplicando-se este valor pelo número de horas de brilho solar (N), (comprimento de dia). Sendo:

$$I_{oc} = \frac{0,8 Q_o}{60 N} = \frac{0,0133 Q_o}{N} \quad (6)$$

I_{oc} = radiação solar média para um dia completamente claro (limpo). (cal/cm².min)

Q_o = radiação no topo da atmosfera (função da época do ano e da latitude do local) ($\text{cal}/\text{cm}^2.\text{dia}$).

0,8 = constante, considerando-se que 80% da Q_o é transmitida para o nível do solo.

Substituindo-se a equação 6 em 5, tem-se:

$$CB_c = 10^3 \cdot \frac{a}{b \cdot K} \cdot \ln \left(\frac{1 + 0,0133 \cdot b \cdot \frac{Q_o}{N}}{1 + 0,0133 \cdot b \cdot \frac{Q_o}{N} \cdot e^{-K(IAF)}} \right) \cdot N \quad (7)$$

Dia completamente limpo

onde

CB_c = carboidrato produzido (kg/ha dia), em um dia completamente limpo.

Q_o = radiação no topo da atmosfera ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{dia}$)

N = comprimento do dia (horas)

a , b , e k = constantes

A equação 5, definida para um dia limpo, pode ser adequada para um dia completamente nublado, assumindo que nesta condição, 20% da radiação Q_o é transmitida para o topo da cultura (radiação difusa), e que a fração fotossinteticamente ativa (PAR) é 1.5 vezes maior que em um dia completamente limpo (SZEICZ, 1966; STANHIL & FUCHS, 1977), teremos,

$$I_{on} = 0,2.1,5. \frac{Q_o}{60.N} \quad (8)$$

sendo

I_{on} = radiação solar média para um dia completamente encoberto de nuvens (nublado). (cal/cm².min)

0,2 = fração da radiação Q_o transmitida pelas nuvens

Substituindo-se a equação 8 em 5, tem-se,

$$CB_n = 10^3 \cdot \frac{a}{bK} \cdot \ln \left(\frac{1 + 0,005 \cdot b \cdot \frac{Q_o}{N}}{1 + 0,005 \cdot b \cdot \frac{Q_o}{N} \times e^{-k \cdot (IAF)}} \right) \cdot N \quad (9)$$

Completamento encoberto (nublado)

sendo

CB_n = carboidrato produzido em um dia completamente nublado (kg/ha.dia)

Q_o e N = já definidos anteriormente

3.5. PRODUÇÃO DE CARBOIDRATO PELA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Assumindo-se os valores de a , b , e k relatados anteriormente, e o índice de área foliar (IAF) igual a 5, as

equações 7 e 9 tornam-se:

$$CB_c = 409,1 \cdot \ln\left(\frac{1 + 0,003479 \cdot \frac{Q_o}{N}}{1 + 0,0001732 \cdot \frac{Q_o}{N}}\right) \cdot N \quad (10)$$

Claro

$$CB_n = 409,1 \cdot \ln\left(\frac{1 + 0,001305 \cdot \frac{Q_o}{N}}{1 + 0,000065 \cdot \frac{Q_o}{N}}\right) \cdot N \quad (11)$$

Nublado

As equações 10 e 11, estimam o carboidrato bruto (kg CH₂O/ha.dia) elaborado por uma cultura de cana-de-açúcar, na fase de IAF igual a 5, à temperatura do ar de 23°C em um dia cuja radiação no topo da atmosfera foi Q_o(cal/cm².dia), e o fotoperíodo de N (horas), sendo:

CB_c = kg CH₂O/ha.dia, produzido em um dia completamente limpo.(tabela 10 do apêndice).

CB_n = kg CH₂O/ha.dia, produzido em um dia completamente nublado.(tabela 11 do apêndice)

3.6. DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS MENSAIS DE Q_o E N

Para facilitar o uso das equações 10 e 11 os valores de Q_o e N foram calculados pelas equações:

$$Q_o = \int_{T_n}^{T_p} \frac{J_o}{R^2} \cdot \cos z \cdot dt \quad (12)$$

$$\cos z = \operatorname{sen} \delta \cdot \operatorname{sen} \theta + \cos \delta \cdot \cos \theta \cdot \cosh \quad (13)$$

$$N = 0,1333 \cdot \operatorname{arcos}(-\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \theta) \quad (14)$$

sendo

J_o = constante solar (2 cal/cm².min)

R = distância terra-sol, expressa em termos de
distância média.(adimensional)

z = angulo zenital

h = angulo horário

θ = latitude do local

δ = declinação solar no 15º dia do mês

t_n e t_p = tempo de nascer e por do sol no 15º dia do

mês

Os valores de Q_o e N assim obtidos são
apresentados nas tabelas 8 e 9 respectivamente. (apêndice).

3.7. DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO NÃO CORRIGIDA DE CARBOIDRATO (CB)

(referindo-se a temperatura do ar e ao IAF como 23°C e 5 respectivamente e a idade de 2 meses após plantio)

De acordo com van HEEMST (1986) a produção máxima mensal de carboidrato bruto será dado pela expressão:

$$CB_{\max} = n[F.CB_n + (1-F).CB_c] \quad (15)$$

sendo

$CB_{\max}$ = produção total mensal de carboidratos não corrigida (kg/ha/mês)

n = nº de dias do mês

F = fração do dia que foi nublado

$(1-F)$ = fração do dia que foi claro(sem nuvens)

CB_n = produção média diária de carboidratos, em um dia nublado (kg.ha.dia)

CB_c = produção média diária de carboidratos, em um dia limpo (kg/ha.dia)

Segundo HEEMST(1986) a fração do dia que foi nublada é conceitualmente a energia interceptada pelas nuvens dividida pela máxima interceptação possível, ou seja:

$$F = \frac{\text{Energia Interceptada}}{\text{Máxima energia intercep possível}} = \frac{0,8Q_o - Q_g}{0,8Q_o - 0,2(0,8Q_o)}$$

ou simplificando

$$F = 1,25 - 1,56 \frac{Q_g}{Q_o} \quad (16)$$

Q_o = radiação no topo da atmosfera (cal/cm².dia)

Q_g = radiação global (cal/cm².dia)

0,8 e 0,2 são as frações de Q_o transmitidas em um dia completamente limpo, e em um dia completamente nublado respectivamente.

exemplificando:

no caso particular no qual $Q_g = 0,40 Q_o$ então:

$$F = 1.25 - 1.56 * 0,40 = 0,626$$

Observe-se que na falta de informação sobre Q_g medido, pode-se estimar o valor de F , pela equação de Angstron onde:

$$Q_g = Q_o * (A + B * n / N) \quad (17)$$

substituindo 17 em 16 teremos:

$$F = 1,25 - 1,56 \left(A + B \frac{n}{N} \right) \quad (18)$$

a qual poderá ser utilizada desde que se conheça os valores de A e B (constantes) para o local em questão.

3.8. DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO BRUTA DO CARBOIDRATO CORRIGIDO (CBC)

A produção mensAL de carboidrato corrigido (CBC), será obtida, principalmente corrigindo a $CB_{\max}$ com relação a temperatura observada ao longo do ciclo, da seguinte forma

$$CB_{\max(t)} = n[F.CB_n.C_n(t) + (1-F).CB_c.C_c(t)] \quad (18b)$$

e posteriormente pelas correções devidas aos fatores fisiológicos que determinam modificações no CB, uma vez que tais fatores sejam diferentes das condições padrões de calibração, ou seja:

$$CBC = CB_{\max(t)} \cdot C(IAF) \cdot C(i_p) \cdot C(I_f) \quad (19)$$

onde

CBC = carboidrato bruto corrigido mensal
(kg/ha.mês)

$CB_{\max(t)}$ = carboidrato bruto mensal a dada temperatura
(kg/ha.mês)

$C_n(t)$ e $C_c(t)$ = correlações devido a temp. do ar para dias nublados e claros respectivamente, definidos mais adiante.

$C_{(IAF)}$ = correção devido ao IAF

$C_{(if)}$ = correção devido a idade das folhas

$C_{(ip)}$ = correção devido a idade da planta

3.9. CORREÇÃO DEVIDO AO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR ($C(IAF)$)

A correção devido ao IAF é obtida através da equação (20) e se faz necessária, porque $CB_{\max}$ foi determinado para um IAF máximo, que só ocorre em uma fase do ciclo.

$$C_{(IAF)} = \frac{CB_{(IAF=5)}}{CB_{(IAF=0-5)}} \quad (20)$$

Considerando os valores de $CB_{(IAF)}$ para IAF variando de 0 a 5 , conforme a equação 5, e $CB_{(IAF)}$ para IAF

igual a 5, aplicando na equação 20, resulta na seguinte função, que depende dos valores de IAF observados ao longo do ciclo (fig. 33).

$$C_{(IAF)} = [L_n(\frac{1,23309}{1+0,23309 \cdot e^{-0,58 \cdot (IAF)}})] \times 5,05 \quad (21)$$

Fig. 33. Demonstração gráfica da dependência da relação $C_{(IAF)} \times IAF$.

A função que permite a estimativa de IAF, foi obtida através dos dados medidos por MACHADO (1981), ao longo do ciclo da cultura, correlacionados com os valores de "GRAUS DIA", calculados pelas seguintes equações:

sendo para $t_b < t_m$

$$GD = n \frac{(TM - Tb)^2}{2(TM - Tm)} \quad (22)$$

e para $t_b \Rightarrow t_m$

$$GD = n \cdot \left(\frac{TM - Tm}{2} + TM - Tm \right) \quad (23)$$

onde,

GD = graus dia mensal ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$)

TM = temperatura máxima média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

tm = temperatura mínima média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

tb = temperatura base (18°C) BACCHI(1977)

n = nº dias do mês

A correlação entre estes valores (IAF x Σ GD) resultou na função:

$$IAF = \frac{3,71}{1 + e^{3,149 - 0,00711 \cdot \Sigma GD}} - 0,15 \quad (24)$$

a função é válida para valores de $\Sigma GD > 80$. Para valores menores, IAF é considerado igual a 0.

Fig. 34. Valores do IAF calculados em função da somatória de graus dia ΣGD .

3.10. CORREÇÕES DEVIDO A TEMPERATURA DO AR

Os parâmetro a e b da equação 1 foram determinados, a partir dos dados obtidos a temperatura média de 23°C por BULL (1965), apresentados na fig. 15 da revisão bibliográfica. Utilizando os dados de acúmulo de matéria seca, em diferentes temperaturas (BULL, 1965), para 9 clones e variedades diferentes, apresentados na fig 15, encontrou-se a seguinte função:

$$C_c(t) = -0,774 + 0,0887 \cdot t(^{\circ}C) \quad (25)$$

considerou-se como valor unitário (de referência) o obtido a 20°C de temperatura do ar.

onde

$$C_c(20) = 1$$

$C_c(t)$ = correção do carboidrato bruto a temperatura observada (dias claros) (temperatura do ar está em torno de 2°C menor que a da folha em média).

Para dias nublados, temperatura das folhas é aproximadamente igual a do ar, a equação torna-se:

$$C_n(t) = 0,636 + 0,0729 \cdot t(^{\circ}\text{C}) \quad (26)$$

onde

$$C_c(20) = 0,82$$

$C_n(t)$ = correção do carboidrato bruto a temperatura observada (dias nublados)

-□- $C_c(t)$

- $C_n(t)$

Fig. 35. Valores de $c_c(t)$ e $C_n(t)$ entre 0 e 30°C.

3.11. CORREÇÃO DEVIDO A IDADE DA CULTURA C(i)

Baseando-se nas variações da taxa fotossintética da cana-de-açúcar, com a idade da planta apresentada por HART e BURR (1965), fig. 19 e correlacionando estes dados com "graus-dia", já definidos anteriormente, determinou-se a seguinte função:

$$C_{(i)} = 0,6 + \frac{73000}{(\sum GD)^{2,5}} \quad (27)$$

onde

$C(i)$ = correção devido a idade da planta

$\sum GD$ = somatório dos graus-dia

esta equação tem valor igual a 1 para valores de $\sum GD < \text{que } 127$.

Expressou-se a função $C(i)$ em termos de graus-dia e não em função de tempo, para poder diferenciar as situações de inverno e verão, para os quais o mesmo tempo decorrido tem significado bem diferente, em termos de crescimento e desenvolvimento da cultura. Os valores de $C(i)$ são apresentados nas figs. 35 e 36.

Fig. 35a. Curva de variação C_0 x GD entre 125 e 675.

Fig. 36. Curva de variação $C_{(u)}$ x GD entre 700 e 2000

3.12. RESPIRAÇÃO DE CRESCIMENTO (efic. de conversão) (C_{π})

Adotou-se o valor apresentado por MACHADO (1981) como eficiência de conversão, apresentado na tabela 2 ou seja, são necessários 1,27 g de CH_2O fotossintetizado para produzir 1 g de matéria seca (m.s.), o que quer dizer que em termos energéticos são consumidos 0,27 g de CH_2O neste

processo, consumo este relatado por van HÉEMST (1988) como respiração de crescimento, portanto:

$$C_{rc} = 0,79 \text{ g m.s./g CH}_2\text{O}$$

3.13. RESPIRAÇÃO DE MANUTENÇÃO (CR_m)

A respiração de manutenção se aplica a matéria seca originária do carboidrato bruto corrigido (CBC). Ocorre devido ao consumo de energia para manutenção dos processos fisiológicos vitais da planta, descrito durante a revisão bibliográfica. A correção de respiração é multiplicativa e expressa pela equação:

$$CR_m = 1 - R_{\max} \cdot C_{r(t)} \cdot C_{r(i)} \quad (28)$$

onde

CR_m = correção de respiração (multiplicativa)

r max = valor máximo da respiração(30°C) = 0,023

g m.s/g m.s.

C_{r(t)} = correção da respiração devido a temperatura

C_{r(i)} = correção da respiração devido a idade da

cultura

O valor de r max foi obtido baseando-se nos resultados de MEDINA (1970), apresentado na fig 24, onde estimou-se a respiração máxima como sendo igual a 0,023 g

m.s. perdida no processo, por 1 g de matéria seca viva no vegetal.

$$\text{portanto } CR_m = 1 - 0,023 \cdot C_{r(0)} \cdot C_{r(i)}$$

Os valores de correção de respiração devido à temperatura $Cr(t)$ foram calculados em função dos resultados de MEDINA (1970), fig.37, correlacionando os valores da temperatura do local com a respiração de manutenção, onde encontrou-se a seguinte relação:

$$C_{r(t)} = e^{-4,11+0,1383 \cdot t(^{\circ}C)} \quad (29)$$

para valores $t > 30^{\circ}C$, considera-se $C_{r(0)} = 1$

A correção devido à idade $Cr(i)$, foi da mesma forma obtido, utilizando dos dados da fig.37, e correlacionando a respiração de manutenção com "graus-dia", durante o ciclo da cultura. Foram utilizados os valores médios da respiração dos colmos. Tal análise, originou a seguinte relação:

$$C_{r(i)} = 1,25 \cdot 0,9994^{(\Sigma GD)} \quad (30)$$

Para valores $\Sigma GD < 372$ considera-se $C_{r(0)} = 1$

Fig. 37. Relação de dependência entre correção de idade na respiração [$C_{(n)}$] x Σ GD.

3.14. AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARBOIDRATO LÍQUIDO, MENSAL E ACUMULADO

3.14.1. APLICAÇÃO DA CORREÇÃO DE RESPIRAÇÃO

A correção da respiração é multiplicativa e deve

ser aplicada diariamente, requerendo para o seu uso o estabelecimento do seguinte modelo:

MS_0 = massa de matéria seca (m.s.) remanescente no início do mês (kg/ha)

CR_m = correção multiplicativa da respiração

MSC_n = massa de matéria seca (m.s.) corrigida ao fim de n dias do mês (kg/ha.mês)

Considerando MS_0 como os valores de CBC transformados em matéria seca, através do fator de respiração de crescimento (eficiência de conversão), igual a 0,79 g m.s./g CH_2O . (MACHADO, 1981), ao fim de n dias do mês, tem-se para a matéria seca inicial corrigida:

$$MSC_n = MS_0 \cdot CR_{\frac{n}{m}} \text{ (kg m.s./ha)} \quad (31)$$

Para a matéria seca produzida dia a dia ($CBC \times 0,79/n$), a correção será feita em função do nº de dias da seguinte forma:

$$\overline{MS} = \frac{MS}{n} = \text{mat. seca média diária produzida (kg/ha dia)}$$

então:

Para $n = 1$ dia:

$$\Sigma MS = \overline{MS} \cdot Cr$$

Para $n = 2$ dias:

$$\Sigma MS = (\overline{MS} \cdot Cr + \overline{MS}) \cdot Cr$$

Para $n = 3$ dias:

$$\Sigma MS = [(\overline{MS} \cdot Cr + \overline{MS}) \cdot Cr + \overline{MS}] \cdot Cr$$

Para n dias:

$$\Sigma MS = \overline{MS} \cdot Cr^{n-1} + \overline{MS} \cdot Cr^{n-2} \dots + \overline{MS} \quad (32)$$

A equação 35 compõe uma progressão geométrica cuja soma dos termos, resulta a massa (m.s.) corrigida ao fim de n dias (MS), expressa pela equação 33, a seguir:

$$\Sigma MS = \frac{\overline{MS}(Cr^n - 1)}{(Cr - 1)} \quad (kg \text{ m.s./ha}) \quad (33)$$

Portanto a massa total de matéria seca ao fim de

n dias será:

$$MST = MSC_n + \sum MS: \quad (34)$$

$$MST = MS_0 \cdot Cr^n + \frac{\overline{MS}(Cr^n - 1)}{(Cr - 1)} \quad (35)$$

MST = massa total de matéria seca

Observe-se que durante o ciclo da cultura, as folhas velhas são substituídas continuamente. Este material, ao qual se dá o nome de palha, uma vez fora da planta, não consome mais energia, isto é, não é mais "respirado", de modo que a equação 35 tem que incluir um termo subtrativo, relativo a palha depositada(MP).

Para estimativa de MP usou-se seguinte critério:

num canavial adulto, segundo MACHADO(1981), existem:

9 colmos/m²

9 folhas/colmo

4,57 g m.s./folha

De acordo com estes dados, tendo o fator temperatura como mais importante na partição dos produtos fotossintetizados, admitiu-se uma taxa média de queda de 1.85 folhas/colmo.mês, tem-se:

$$MP = 1,85 \text{ folhas/colmos } 9 \times 10^4 \text{ colmos/ha} \times 4,57 \text{g/folha}$$

$$MP = 749 \text{ Kg/ha mês}$$

$$MP = \text{massa média de palha por dia (kg/ha.mês)}$$

Como o ritmo de queda é função do ritmo de crescimento, o qual depende da temperatura (C_t), adotou-se, a seguinte equação para a estimativa das folhas discutidas por mês então:

$$MP_{(mês)} = 74.9 \times C_t$$

onde

$$MPE = \text{massa de palha estimada (kg/ha.mês)}$$

$C_{(t)}$ = correção devida a temperatura (já descrita anteriormente)

Da mesma forma, também foi considerado, uma perda de matéria seca, relativa à diminuição da população, após atingido um pico, como pode ser observado na fig 28. A morte de colmos inicia-se após o IAF estar em torno de 2 m²/m², devido a quantidade de radiação solar que consegue atravessar o dossel ser da ordem de 20-30%, apenas, iniciando-se a partir disso a competição por luz. Conforme observações feitas por MEDINA (1970), mostrado na tab. 3, durante o ciclo do canavial, ocorre o descarte aproximado de 4500 kg de colmos/ha. Adotou-se a subtração desta matéria

seca morta nos 3 primeiros meses nos quais o IAF é maior ou igual a 2 na taxa de 1500 Kg/ha mês.

Considerando as perdas de folhas e colmos, durante o ciclo da cultura, tem-se que o acúmulo de matéria seca ao fim de n dias pode ser expresso pelas equações:

$$MST = MS_o \cdot Cr^n + \frac{\overline{MS}(Cr^n - 1)}{(Cr - 1)} \quad (36)$$

Para antes da formação da 9ª folha do colmo

$$MST = MS_o \cdot Cr^n + \frac{\overline{MS}(Cr^n - 1)}{(Cr - 1)} - 749 \cdot Ct \quad (37)$$

Para após a formação da 9ª folha no colmo

$$MST = MS_o \cdot Cr^n + \frac{\overline{MS}(Cr^n - 1)}{(Cr - 1)} - 749 \cdot Ct - 1500 \quad (38)$$

Para os 3 primeiros meses nos quais IAF é maior que 2

Os resultados das equações 36, 37 e 38 considerando n = nº dias do mês serão dados em kg m.s./ha ao fim do mês considerado.

3.14.2. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO POTENCIAL (Pp)

A cana-de-açúcar tem em média 70% de umidade (van DILLEWIJN, 1952), com base no peso umido. Durante a colheita deixa-se no campo as raízes e os tocos dos colmos, as pontas e as folhas verdes (queimadas ou não).

A raiz, conforme resultados obtidos por MEDINA (1970), apresentados na fig. 28, tem seu peso aproximadamente igual ao das folhas vivas, durante quase todo o ciclo da cultura. Considerando os resultados de MACHADO (1981), que encontrou 1 g m.s./dm².folha, tem-se então 1000 kg folhas/ha.IAF. Desta forma, conhecendo-se o IAF do mês em questão estima-se o peso das raízes da seguinte forma:

$$P(\text{raiz}) = \text{IAF} \cdot 1000 \quad (\text{kg/ha})$$

Com relação aos tocos que são deixados no campo, durante a colheita, conforme resultados apresentados por van DILLEWIJN, 1951) e MEDINA et al (1970), estima-se uma quantidade aproximadamente igual ao das raízes, logicamente, o valor aqui adotado, depende da forma da colheita (mecânica ou manual), o que leva a:

$$P(\text{tocos}) = P(\text{raiz})$$

Quanto as folhas (verdes ou queimadas) deixadas no campo, considerando que na colheita, são descartadas através do fogo, pode-se dizer que a produção potencial é igual a:

$$P_p = MST - P_{(raiz)} - P_{(tocos)} - P_{(folhas)}$$

sendo $P_{(raiz)} = P_{(tocos)} = P_{(folhas)}$ então:

$$P_p = MST - 3 \times P_{(folhas)} \quad (m.s./ha.ciclo)$$

e para expressar em peso de colmos, considerando 70% de umidade

$$P_p = \frac{MST - 3 \times P_{(folhas)}}{0,3} \quad (kg \text{ colmos}/ha.ciclo)$$

3.14.3. VALIDAÇÃO DO MODELO COM VISTA A PRODUÇÃO FINAL

Para validação do modelo proposto com vistas a produção final foram utilizados os dados de produção da cultura irrigada e adubada (produção potencial (P_p), medidos nos experimentos conduzidos na Estação Experimental de cana-de-açúcar, do IAA - Instituto do Açúcar e do Alcool - PLANALSUCAR - Araras -SP, durante os anos de 1974 a 1986.

O confronto entre os valores medidos e estimados foi feito através de regressões lineares (teste T). Considerou-se os pares X e Y como sendo o valor estimado e o

medido, respectivamente.

As análises individualizaram as diferentes variedades de cana-de-açúcar, analisando-se também o conjunto como um todo.

Variedades:

NA 56-79

CB 41-76

CB 47-355

CP 51-22

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA MENSAL

Para a estimativa de produção da matéria seca mensal, através do modelo proposto foram utilizados os seguintes dados climáticos e astronômicos.

Dados climáticos e astronômicos

Piracicaba-SP Lat.: 22°42'S, Long.: 47°38'W, Alt.: 546m

ANO	MES	TM (oC)	Tm (oC)	Tmed (oC)	n (h/DIA)
1978	ABR	29.0	12.4	20.7	7.0
1978	MAI	25.7	9.8	17.8	5.8
1978	JUN	24.7	7.6	16.1	7.3
1978	JUL	26.3	8.3	17.2	6.6
1978	AGO	25.9	8.2	17.0	6.8
1978	SET	26.8	11.7	19.3	5.1
1978	OUT	29.2	14.3	22.8	6.9
1978	NOV	28.7	16.5	22.6	6.4
1978	DEZ	29.3	16.7	23.0	3.9
1979	JAN	28.6	15.7	22.2	6.6
1979	FEV	30.7	16.7	23.7	6.4
1979	MAR	29.6	15.1	22.3	7.1
1979	ABR	27.8	12.3	20.0	7.0
1979	MAI	26.0	11.1	18.5	5.8
1979	JUN	24.8	8.1	16.4	7.3

Os valores de Q_0 e N foram obtidos por interpolação das tabelas 8 e 9 do apêndice, calculados conforme as equações 14 e 12.

4.1.1. PRODUÇÃO MENSAL DE CARBOIDRATOS (CBmax)

Os valores de CBmax foram calculados em função de CBc, e CBn interpolados na tabelas 10 e 11.(apêndice), e apresentados na tabela 4 (pg. 89).

Durante todo o ciclo em questão o valor de CBc foi em torno de 2,5 vezes maior que CBn, como pode ser visto na fig 2. Sabe-se que em termos de radiação global (Q_g), um dia limpo tem aproximadamente 4 vezes mais energia que um dia nublado. Considera-se que, num dia limpo (sem nuvens), que a energia incidente está em torno de 0,8 de Q_0 , enquanto que num dia nublado está em torno de 0,2 de Q_0 . Considerando a radiação fotossinteticamente ativa, a fração PAR num dia nublado é em média 0.7^5 de Q_g , e num dia limpo em torno de 0,4 de Q_g . Sendo assim, num dia nublado esta fração (PAR) será em torno de 0,15 de Q_g , e em um dia limpo, em torno de 0,32 de Q_g . Isto explica parcialmente a diferença de 2,5 vezes entre CBc e CBn.

Os meses de verão são potencialmente mais produtivos, todavia, nestes meses o valor de F são maiores indicando que a razão de insolação (n/N) foi menor, ou seja,

são meses mais nublados, e quase invariavelmente são mais chuvosos. Quando n for ainda menor, poderá provocar baixa produtividade da cana-de-açúcar. Especialmente esta cultura, em condições de baixa intensidade luminosa, tem sua produção diminuída, uma vez que CB_{max} tenderá para valores mais próximos de CB_n (fig 38). Observações estas que foram citadas e descritas por van DILLEWIJN (1952), num estudo sobre os efeitos da insolação na adubação nitrogenada.

Durante o inverno CB_{max} se aproxima de CB_c e durante o verão de CB_n . Salienta-se então que a irrigação em igual quantidade e distribuição de água que a chuva, pode promover produções maiores, por não diminuir a luminosidade, como ocorre nos dias chuvosos.

Tab. 4. Valores de CB_{max} diários, CB_c e CB_n (CH_2O kg/ha.dia).

ANO	MES	CB_{max}	CB_c	$C_c(t)$	$1-F$	CB_n	$C_n(t)$	F
1978	4	623	886	1.062	0.663	376	0.873	0.337
	5	379	746	0.805	0.600	314	0.662	0.400
	6	288	673	0.654	0.649	282	0.538	0.351
	7	313	698	0.752	0.527	293	0.618	0.47
	8	346	797	0.734	0.515	336	0.603	0.485
	9	536	960	0.938	0.521	409	0.771	0.479
	10	842	1094	1.248	0.562	469	1.026	0.438
	11	831	1198	1.231	0.448	515	1.012	0.552
	12	889	1230	1.266	0.464	529	1.041	0.536
1979	1	823	1221	1.195	0.450	525	0.982	0.550
	2	891	1153	1.328	0.488	495	1.092	0.512
	3	731	1044	1.204	0.490	446	0.990	0.510
	4	507	886	1.027	0.441	376	0.844	0.559
	5	395	746	0.867	0.557	314	0.713	0.443
	6	298	673	0.681	0.640	282	0.560	0.360

-◇- CB_c -□- CB_{max} - CB_n

Fig. 38. Valores de CB_c , CB_n e CB_{max} nas condições climáticas do período em estudo. (kg CH_2O /ha.mês).

4.1.2. ESTIMATIVA DO CARBOIDRATO BRUTO MENSAL CORRIGIDO (CBC) (eq. (19) pg. 67)

Na tabela 5 são apresentados os dados de CBC, cuja correção depende da temperatura, ^{de} insolação, do IAF e da idade da planta (estágio fenológico).

Tab. 5 . Valores mensais estimados de CBC (kg CH₂O/ha dia), corrigido em função da temperatura, insolação, IAF e idade da cultura.

ANO	MES	CBC	CBmax	C(IAF)	C(i)	IAF	GD
1978	4	837	18698	0.038	1.000	0.070	54
	5	1543	11761	0.121	0.926	0.231	138
	6	1420	8635	0.185	0.755	0.364	186
	7	2037	9701	0.265	0.685	0.543	236
	8	2960	10729	0.368	0.650	0.801	293
	9	5755	16093	0.491	0.630	1.162	358
	10	12455	26092	0.667	0.616	1.831	462
	11	14004	24917	0.809	0.608	2.635	598
	12	16697	27564	0.875	0.605	3.175	746
1979	1	15785	25515	0.898	0.603	3.414	892
	2	15647	24956	0.906	0.602	3.498	1017
	3	14257	22669	0.909	0.602	3.536	1150
	4	9493	15205	0.910	0.601	3.550	1272
	5	7798	12257	0.911	0.601	3.554	1352
	6	5743	8927	0.911	0.601	3.556	1405

Durante os 6 primeiros meses, de abril a setembro, a temperatura esteve muito próxima da temperatura base ($t_b=18^{\circ}\text{C}$, BACCHI, 1977), reduzindo o desenvolvimento da área foliar (IAF), conforme os valores estimados pela equação 24 (fig. 39). 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 CBC (fig.40). 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 CBC e CBn

permanecem altos. Somando-se todos estes efeitos, os valores encontrados de CBC se mantem 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 condicionam queda no valor de CBC.

Fig. 39. Valores de IAF estimados para o período estudado.

-□- CB_{max} - CB_c

Fig. 40. Valores mensais de CBmax e CBC para o período estudado (kg CH₂O/ha.mês).

4.1.3. RESPIRAÇÃO DE MANUTENÇÃO

A correção da matéria seca produzida é feita através do coeficiente de respiração Cr. Este valor é composto pelo fator de idade (Cr(i)) e de temperatura (Cr(t)) apresentados nas figuras 41 e 42.

-□- Cr(t) - Cr(i)

Cr(t) = coefic. de correção da r max referente a temp. do período.

Cr(i) = coefic. de correção da r max referente a idade da planta.

Fig. 41. Valores das correções da respiração de manutenção (r max), dependentes da idade (Cr(i)) e da temperatura (Cr(t)) durante o período estudado.

Fig. 42. Coeficiente de respiração (g matéria seca consumida/g matéria seca acumulada).

Este conjunto tem 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 42 % da matéria seca produzida neste mês. Durante o pico da respiração, a produção de matéria seca bruta foi de 9807 kg/ha, e a matéria seca acumulada até o fim deste mês foi de

12335 kg/ha (fig. 44). Nesta fase a energia consumida pela respiração, para manter as funções fisiológicas vitais, mantém uma relação muito alta com a produção. O comportamento destes resultados é explicado pelo grande crescimento dos órgãos de consumo, enquanto que os órgãos produtores, permanecem praticamente estabilizados ou diminuídos na sua capacidade.

Os valores apresentados da matéria seca bruta e líquida calculados (fig. 43), assemelham-se aos medidos por MEDINA et al (1970), e aos estimados por MACHADO (1981). Isto mostra que o modelo proposto foi consistente em seus resultados, 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 dados que abrangiam, curto período de tempo, ou seja, aproximadamente 300 dias. A função matemático-fisiológica que estima $Cr(i)$ poderá, conseqüentemente, ser revista ou modificada, através de dados bibliográficos ou levantados experimentalmente.

-□- matéria seca bruta (kg m.s./ha mês)

-△- matéria seca líquida (kg m.s./ha mês)

Fig. 43. Valores da matéria seca bruta e da matéria seca líquida (kg m.s./ha.mês) estimados pelo modelo.

-□- Rm(%) = Resp. de manutenção em porcentagem da matéria bruta.

- Rm = respiração de manutenção (kg/ha mês).

Fig. 44. Respiração de manutenção Rm(%) e Rm (kg/ha) gráfico.

4.1.4. ESTIMATIVA DO DESCARTE DE FOLHAS MORTAS (PALHA)

Durante o crescimento e desenvolvimento das

folhas, quando a energia transmitida para o solo chega ao nível aproximado de 30% da radiação incidente no topo do dossel, após a formação da 8ª ou 9ª folha do colmo, a mais velha seca e é descartada (palha). O colmo dá origem à uma nova folha a cada 10 dias em média, então, a cada decêndio uma folha torna-se palha, conforme foi descrito por van DILLEWIJN (1952), e medido por MACHADO (1981).

Utilizando as equações 37 e 38 , as quais incluem as folhas descartadas, encontrou-se a taxa mensal de produção de palhas (kg/ha.mês), e seu acúmulo durante o ciclo estudado, conforme mostrado na fig 45.

Salienta-se que o descarte de folhas inicia-se no mês de julho, sendo acentuado até o mês de fevereiro, diminuindo nos meses de março em diante, devido a queda sazonal da temperatura. Neste período os carboidratos fotossintetizados são carregados para a maturação, ou seja acumulados na forma de açúcares (GALSZIOU et al, 1965).

A quantidade final de palhas acumuladas de 9340 kg/ha aproxima-se da obtida por SAN JOSE & MEDINA (1970) e por RIPOLI & VILLA NOVA (1992). As características genéticas da cana-de-açúcar e as condições ambientais no desenvolvimento, poderão promover maiores diferenças entre os valores observados e os simulados. Este modelo de estimativa da quantidade de palhas não pode ter seus valores parciais checados com valores medidos, considerando que as informações bibliográficas encontradas a respeito foram incompletas ou

inexistentes. Com respeito ao valor acumulado no final ^{do} ciclo o modelo mostrou-se consistente.

-□- valores mensais

- valores acumulados

Fig. 45. Valores estimados da taxa mensal e acumulada da produção de palhas (kg/ha).

4.1.5. PRODUÇÃO E ACÚMULO DA MATÉRIA SÊCA: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS E SIMULADOS

A simulação da matéria seca líquida produzida mensalmente para a cultura da cana-de-açúcar, foi elaborada em função dos dados meteorológicos apresentados no item 4.1, conforme as equações descritas anteriormente. Os resultados desta simulação são apresentados na fig.46, onde são confrontados com os observados e ajustados por MACHADO (1981). Estes resultados ajustaram-se consistentemente durante o ciclo estudado. O modelo aqui proposto, estimou para os meses de agosto a janeiro, valores da matéria seca maiores que os obtidos por MACHADO (1981). Pode-se atribuir estas diferenças ao fato de que os dados medidos, consideram somente a parte aérea da planta. Não foi medida, a fração constituída pelas raízes e tocos dos colmos, deixadas no campo durante a colheita. Resultados citados por van DILLEWIJN (1952) e medidos por MEDINA (1970), indicam que a soma de raízes e tocos pode chegar a 10% da produção total de matéria seca final, equivalendo a aproximadamente 10 toneladas por hectare.

É durante os meses iniciais, até o fechamento do dossel, que as raízes e os colmos são formados, podendo justificar as diferenças observadas entre os dados medidos e estimados. Após o mês de novembro, os valores medidos e os estimados tornam-se praticamente iguais, uma vez que a partir

desta data a quantidade de raízes e colmos permanecem mais ou menos constantes. Os valores acumulados, da matéria seca medidos e estimados são apresentados na fig 47. Estas diferenças também podem ser atribuídas à enorme gama de informações utilizadas na elaboração das constantes das funções matemático-fisiológicas deste modelo. Foram geradas a partir de dados que consideraram variedades de cana-de-açúcar de diversas origens e diversas condições ambientais de observação. Nas tabela 1 e 2 do apêndice, são apresentados conjuntamente todos os resultados parciais e finais do modelo proposto. Deve ser considerado que as equações relativas aos calculos parciais, que compõe este modelo, poderão ser modificadas ou melhoradas, em posse de novas informações experimentais, dependendo do interesse do pesquisador ou usuário da metodologia ora utilizada.

Nos modelos propostos por DOOREMBOS & KASSAM (1978), MACHADO (1981) e por SCARDUA (1985) entre outros, a idade cronológica da planta é um dos fatores de ajuste utilizados; o modelo proposto nesta simulação, utiliza o conceito de graus-dia para estimar o estágio fenológico e o índice de área foliar (IAF), pretendendo, desta forma, suavizar as possíveis distorções entre as estimativas de produção para os plantios de inverno e de verão. Este simulador matemático-fisiológico da produção poderá ser usado para outros propósitos, tais como, estimar o possível acréscimo de produção que será obtido com o uso da irrigação,

desde que se conheça a produtividade em condições naturais do local. Esta informação é necessária na decisão de irrigar ou não.

Fig. 46. Valores da produção mensal líquida de matéria seca (kg m.s./ha.mês), estimados pelo modelo proposto, e observados ajustados por MACHADO (1981), cujas observações iniciaram-se no mes de julho.

Fig. 47. Valores acumulados da matéria seca produzido (kg/ha). Estimados pelo modelo proposto e medidos e ajustados por Machado(1981).

4.1.6. VALIDAÇÃO DO MODELO COM VISTAS A PRODUÇÃO FINAL

Para testar o modelo proposto com vistas a produção final, foram confrontados os valores obtidos pelo

modelo e as produções obtidas em Araras-SP em experimentos controlados, para diferentes variedades demonstradas na tabela 5.

Tab. 5. Valores medidos e estimados da produtividade da cana-de-açúcar irrigada e da matéria seca total estimada pelo modelo MST.(t/ha).

Data plantio	Data colheita	Variedade	Prod.Med. (t colmos/ha) Y	MST (t MS/ha) X	Prod.Est. (t colmos/ha) Y
FEV 79	SET 80	CP 51-22	133.50	62.48	129.59
SET 80	AGO 81		79.30	41.96	87.01
AGO 81	AGO 82		91.60	42.92	89.02
AGO 82	AGO 83		85.10	41.38	85.83
MAR 74	SET 75	CB 41-76	105.43	53.83	107.12
SET 76	OUT 77		101.02	46.92	93.36
OUT 77	OUT 78		91.30	46.19	91.92
OUT 79	OUT 80		93.27	47.86	95.23
OUT 80	SET 81		82.37	43.36	86.28
SET 81	SET 82		85.55	44.19	87.94
SET 82	SET 83		73.60	40.78	81.16
FEV 78	AGO 79		125.62	59.63	118.66
AGO 79	OUT 80		97.65	52.30	104.08
OUT 80	SET 81		79.90	43.36	86.28
SET 78	SET 79		91.75	43.30	86.17
SET 79	SET 80		89.50	43.71	86.98
SET 80	SET 81		92.20	44.97	89.50
SET 81	SET 82		91.20	44.19	87.94
SET 82	SET 83		86.00	40.78	81.16
SET 83	SET 84		94.60	44.56	88.68
SET 85	SET 86		86.80	48.60	96.71
SET 84	SET 85		89.90	44.67	88.90
MAR 77	SET 78	CB 47-355	140.05	58.57	129.91
SET 79	SET 80		101.00	43.71	96.94
SET 80	SET 81		92.30	44.97	99.75
SET 81	SET 82		98.10	44.19	98.01
SET 82	SET 83		95.70	40.78	90.46
SET 83	JUL 84		97.80	44.56	98.84
JUL 84	JUL 85		94.10	44.67	99.08
JUL 85	JUL 86		99.90	48.60	107.79
MAR 77	SET 78	NA 56-79	139.89	58.57	133.20
SET 78	SET 79		105.05	43.30	98.47
SET 79	SET 80		99.40	43.71	99.39
SET 80	SET 81		100.80	44.97	102.27
SET 81	SET 82		99.50	44.19	100.49
JUL 83	JUL 84		105.40	48.66	110.65
JUL 84	JUL 85		94.90	44.67	101.58

Nota: Os dados climáticos utilizados encontram-se no apêndice

Na análise de regressão linear admitiu-se que a reta que estima os valores de Y , passa pela origem (0), conforme método descrito por PEREIRA & ARRUDA (1987). As equações encontradas são representadas graficamente nas figs. 48, 49, 50, 51, 52.

Para a análise de significância, utilizou-se o teste t , onde encontrou-se, na maioria dos casos, significância aos níveis de 1 e 5 % de probabilidade. Considera-se, então que o modelo proposto é adequado para estimativas da produção potencial (P_p), todavia deve-se levar em conta que a sua transferibilidade está condicionada à amplitude das condições ambientais e características genéticas das variedades utilizadas na sua calibração.

□ Produção observada

Fig. 48. Variedade

CP 51-22

r

$$\hat{Y} = 2,07 \cdot X$$

$$0,9772^*$$

$\hat{Y}$ = ton de colmos/ ha estimado

X = Prod. mat. seca obtida pelo modelo MST (t/ha).

□ Produção observada

Fig. 49. Variedade

CB 41-56

r

$\hat{Y} = 1,99. X$

$0,8779^{**}$

$\hat{Y}$ = ton de colmos/ ha

estimado

X = Prod. mat. seca obtida pelo modelo MST (t/ha)

□ Produção observada

Fig. 50. Variedade

CB 47-355

r

$$\hat{Y} = 2,22 \cdot X$$

$$0,9095^{**}$$

$\hat{Y}$ = ton de colmos/ ha estimado

X = Prod. mat. seca obtida pelo modelo MST (t/ha)

□ Produção observada

Fig. 51. Variedade

Na 56-79

r

$$\hat{Y} = 2,27 \cdot X$$

$$0,9391^{**}$$

$\hat{Y}$ = ton de colmos/ ha estimado

X = Prod. mat. seca obtida pelo modelo MST (t/ha)

□ Produção observada

Fig 51a. Variedades

CP 51-22 ; CB 41-76 ; CB 47355 ; NA 56-79:

$$\hat{Y} = 2,09 \cdot X \quad r=0,7987^{**}$$

2,05

$\hat{Y}$ = ton de colmos/ ha estimado

X = Prod. mat. seca obtida pelo modelo MST (t/ha)

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho nos permitem as seguintes conclusões:

5.1 A substituição do parâmetro tempo pela somatória dos graus-dia acumulados (ΣGD) no período, nas funções de correção de idade na fotossíntese $[C(i)]$, índice de área foliar (IAF), e correção de idade na respiração $[Cr(i)]$, é possível, com a vantagem de permitir maior generalização do modelo, em termos de época de ciclo.

5.2 A integração dos valores de CBc e CBn ao longo do perfil do dossel, com valores médios assumidos de energia solar, forneceu valores consistentes de produção máxima de carboidrato para a cana-de-açúcar.

5.3 As equações propostas para o cálculo da correção de respiração ao longo do ciclo mostraram-se aplicáveis, sendo compatíveis com os valores reais medidos.

5.4 A estimativa da produção potencial proposta demonstra que:

a) São viáveis as estimativas de produção potencial mensal da matéria seca da cultura da cana-de-açúcar, em função dos meteorológicos climáticos do ciclo, tal

como demonstrou o confronto realizado entre as produções medidas e as estimadas por este modelo.

b) São viáveis as previsões de produção potencial de colmos, em função das condições meteorológicas ocorrentes, em um dado ciclo, desde que se observem as constantes varietais adequadas, como demonstram os confrontos entre as produções potenciais medidas em experimentos irrigados e as estimadas pelo modelo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOCK, B.; CHARLES-EDWARDS, D.A.; SAWYER, S. Growth response of a Chrysanthemum crop to the enviroment. III, Effects of radiation and temperature on dry matter partitioning and photosynthesis. *Annals of Botany, Oxford*, 44: 289-300, 1979.

ALBERDA, TH. Actual and potencial production of agricultural crops. *Netherlands Journal of Agricultural Science, Wageningen*, 10: 325-333, 1962.

ALEXANDER, A.G. & BIDDULPH, O. Photosynthetic Action Spectra of *Saccharum* species. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15., Durban, 1974. *Proceedings*. Durban, Hayne & Gibson, 1974. p. 966-983.

ALLEN, R.J.; KIDDER, G. & GASCHO, G.J. Predicting ions of sugar cane per acre using solar radiation, temperature and percent plant cane, 1971 through 1976. *Proceedings of the New Science American Society of Sugar Cane Technologists*, 7: 18-22, 1978.

- ALLEN, L.; YOCUM, C.S.; LEMOM, E.R. Photosynthesis under field conditions. VII. Radiant energy exchanges within a corn crop canopy and implications in water use efficiency. *Agronomy Journal*, Madison, 36: 253-9, 1964.
- ANDERSON, M.C. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *Journal of Applied Ecology*, Oxford, 3: 41-54, 1966.
- ARAGÃO, O.P. & PEREIRA, J.R. Comportamento da cana-de-açúcar sob diferentes regimes de irrigação. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, 93(3): 162-79, 1979.
- BACCHI, O.O.S. & SOUZA, J.A.G.L. Minimum threshold temperature for sugarcane growth. In: CONGRESS OF THE INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16^o, São Paulo, 1977. *Proceedings*, São Paulo, 1978, p. 1733-41.
- BAKER, D.N.; HESKETH, J.D.; DUNCAN, W.G. Simulation of growth and yield in cotton. I. Gross photosynthesis, respiration, and growth. *Crop Science*, Madison, 12: 431-5, 1972.

BARBIERI. V. & LEE, G. F. Efeitos do florescimento na germinação da cana-de-açúcar. Relatório anual da Seção de Irrigação e climatologia do IAA, PLANALSUCAR, Coordenadoria Regional Sul, 1984.

BARBIERI, V. & MANIERO, M.A. Efeitos da profundidade de plantio na germinação da cana-de-açúcar. In: INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL. PLANALSUCAR. Relatório Anual da Seção de Irrigação e Climatologia. PLANALSUCAR, Coordenadoria Regional Sul, 1986.

BARBIERI, V. & VILLA NOVA, N.A. Evapotranspiração da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 2., Rio de Janeiro, 1981. Anais. Rio de Janeiro, STAB, 1981, v. 3., p. 37-52.

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

BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Espaçamento em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 2., Rio de Janeiro, 1981. Anais. Rio de Janeiro, STAB, 1981, v. 3., p. 512-22.

BARBIERI, V.; MANIEIRO, M.A.; MATSUOKA, S. O florescimento da cana-de-açúcar e suas implicações no manejo agrícola. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3., São Paulo, 1984. **Anais.** São Paulo, STAB, 1984. p. 273-6.

BARBIERI, V.; MANIERO, M.A.; PEREIRA, A.R. Espaçamento e Características Agroindustriais da Cana-de-Açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA STAB, 4., Recife, 1987. **RESUMO.** STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, 6(1): 8, set./out. 1987.

BEEVERS, H., 1970. Respiration in plants and its regulation. In: SETLIK, I., ed. **Prediction and measurement of photosynthetic productivity.** Wageningen, Pudoc., 1970. p. 209-14.

BORDEN, R.J. A search for guidance in the nitrogen fertilization of the sugarcane crop. Part III. The second ratoon crop. **Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, 50: 161-200, 1946.

BORDEN, R.J. & DENISON, F.C. A study of optimum crop length. **Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, 46: 119-37, 1946.

BULL, T.A. The taxonomic significance of quantitative morphological characters and physiological studies in *Saccharum*. In: CONGRESS OF THE INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12^o, San Juan, 1965. *Proceedings*, Amsterdam, Elsevier, 1967. p. 985-94.

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

BULL, T.A. & GLASZIOU, K.T. Sugar cane. In: EVANS, L.T., ed. *Crop physiology: Some case histories*. London, Cambridge University Press, 1975. p. 51-72.

BULL, T.A. & TOVEY, D.A. Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation. In: CONGRESS OF THE INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15^o, 1974. *Proceedings*. Durban, Hayne & Gibson, 1974. p. 1021-32.

CHANG J. *Climate and agriculture: an ecological survey*. Chicago, Aldine, 1968. 304 p.

CHANG, J.; CAMPBELL, B.R.; BRODIE, H.W.; BAVER, L.D.
Evapotranspiration research at the HSPA experiment
station. In: CONGRESS OF THE INTERNACIONAL SOCIETY OF
SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12^a, San Juan, 1965.
Proceedings, Amsterdam, Elsevier, 1967. p. 10-34.

CURRY, R.B. & CHEN, L.H. Dynamic simulation of plant growth
- Part II. Incorporation of actual daily weather and
partitioning of net photosynthate. Transactions of the
ASAE, St. Joseph, 14: 1170-5, 1971.

DAVIDSON, J.L. & PHILIP, J.R. Light and pasture growth. In:
Climatology and Microclimatology. Proceeding of Canberra
Symposium. 1956. UNESCO, Paris, p. 181-7, 1958.

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

DUNCAN, W.G., 1973. SIMAIZ, a model for simulating corn
growth and yield. In: The Application of Systems Methods
to Crop Production. Proceeding of Symp. at Mississippi
State University, 1973.

DUNCAN, W.G. Maize. In: EVANS, L.T., ed. **Crop physiology: some case histories.** London, Cambridge University Press, 1975. p. 23-50.

DUNCAN, W.G.; LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A.; HANAU, R. A model for simulating photosynthesis in plant communities. **Hilgardia**, Berkeley, **38**: 181-205, 1967.

FICK, G.W.; LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Sugar beet. In: EVANS, L.T., ed. **Crop physiology: some case histories.** London, Cambridge University Press, 1975. p. 259-95.

FICK, G.W.; WILLIAMS, W.A.; LOOMIS, R.S. Computer simulation of dry matter distribution during sugar beet growth. **Crop Science**, Madison, **13**: 413-7, 1973.

GASCHO, G.J. & SHIGH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D. & PEET, M.N. **Crop-water relations.** New York, John Wiley, 1983. Cap. 14, p. 445-79.

GATES, D.M. **Biophysical ecology.** Berlin, Springer-Verlag, 1980. 211p.

GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A.; HATCH, M.D.; WHITEMAN, P.C.
Physiology of sugar-cane. VII. Effects of temperature,
photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature
changes on growth and ripening. **Australian Journal of
Biological Sciences**, East Melbourne, 18: 53-66, 1965.

GLEGG, M.D.; BIGGS, W.; EASTIN, J.D.; MARANVILLE, J.W.;
SULLIVAN, C.V. Light transmission in field communities of
sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, 66: 471-6, 1974.

GOSNELL, J.M. Some effects of increasing age on sugarcane
growth. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF
SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 13th, Taipei, 1968. **Proceedings**.
Amsterdam, Elsevier, 1969. p. 499-513.

HARTT, C.E. & BURR, G.O. Factors affecting photosynthesis in
sugar cane. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF
SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12th, San Juan, 1965.
Proceedings. Amsterdam, Elsevier, 1967. p. 590-609.

HEEMST, H.D.J.van. Crop 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.

- HEILMAN, J.L.; KAMEMASU, E.T.; PAULSEN, G.M. Estimating dry matter accumulation in soybean. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, **55**: 2196-201, 1977.
- HODGES, T.; KANEMASU, E.T. Modeling daily dry matter production of winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, **69**: 974-8, 1977.
- HODGES, T.; KANEMASU, E.T.; TEARE, I.D. Modeling dry matter accumulation and yield of grain sorghum. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, **59**: 803-18, 1979.
- HOLT, D.A.; BULA, R.J.; MILES, G.E.; SCHREIBER, M.M.; PEART, R.M. **Environmental, physiology, modeling and simulation of alfalfa growth. I. Conceptual development of SIMED.** West Lafayette, Purdue University Agricultural Experiment Station, 1975. (Research Bulletin, 905).
- HUNT, W.F. & LOOMIS, R.S. Respiration modeling and hypothesis testing with a dynamic model of sugar beet growth. **Annals of Botany**, London, **44**: 5-17, 1979.
- IDE, B.Y. Comportamento climático e o rendimento agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, em seis safras. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3., **Anais.** São Paulo, STAB, 1984. p. 63-5

IRVINE, J.E. Photosynthesis and stomatal behavior in sugarcane leaves as affected by light intensity and low air flow rates. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, **24**: 436-40, 1971.

JAGER, J.M. 'PUTU' a dynamic seasonal maize crop growth model. In: Final Report Guelph Project, CCIBP, University of Guelph. p. 306-20, 1974.

JAGER, J.M. & KING, K.M. Calculation of photosynthesis rate of a maize crop from environmental variables. In: Final Report Guelph Project, CCIBP, Univ. of Guelph. p. 321-40, 1974.

KEULEN, H. van. Simple model of potential crop production. In: KEULEN, H. van & WOLF, J., ed. *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Wageningen, PUDOC, 1986. p. 41-60.

LEME, E.J.A.; MANIERO, M.A.; GUIDOLIN, J.C. Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar. *Cadernos Planalsucar*, Piracicaba, (2): 3-22, 1984.

LEME, E.J.A.; SACARDUA, R.; ROSENFELD, U. Consumo de água da cana de açúcar irrigada por sulcos de infiltração. *Saccharum*, São Paulo, **18**: 29-43, 1982.

LOOMIS, R.S. Dynamics of development of photosynthetic systems, summary. In: SETLIK, I., ed. **Prediction and measurement of photosynthetic productivity**. Wageningen, Pudoc, 1970. p. 137-41.

LOOMIS, R.S.; RABBINGE, R.; NG, E. Explanatory models in crop physiology. **Annual Review of Plant Physiology**, Stanford, 30: 339-67, 1979.

MACHADO, E.C.; SANTOS, B.G.; CAMARGO, M.B.P.; BARBIERI, V.; MAGALHÃES, A.C.N. Análise de crescimento de duas variedades de cana-de-açúcar com e sem irrigação. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE LATINO-AMERICANA DE FISILOGIA VEGETAL, 9., Viçosa, 1983. **Resumos**. Viçosa, UFV, 1983. p. 42.

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

MACKINNON, J.C.; GARTLEY, C.H.; WILKIE, K.I. Energy efficiency of forage maize production in an Atlantic Canadian environment. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, 15: 503-14, 1978.

MANIERO, M.A. Aplicação do método de graus-dia em cana-de-açúcar. Piracicaba, 1980. 76p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

MCCREE, K.J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as functions of dry weight, photosynthetic rate, and temperature. *Crop Science*, Madison, **14**: 509-14, 1974.

MCCREE, K.J. An equation for the rate of respiration of white clover plants growth under controlled conditions. In: SETLIK, I., ed. *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. Wageningen, Pudoc, 1970. p. 221-9.

MCLEAM, F.G.; MCDAVID, C.R.; SINGH, Y. Preliminary results of net assimilation rate studies in sugarcane. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 13^o, Taipei, 1968. *Proceedings*. Amsterdam, Elsevier, 1969. **13**: 849-58.

MECHLIA, N.B. & CARROLL, J.J. Agroclimatic Modeling for the simulation of phenology yield and quality of crop production. I. Citrus Repose formulation. *International Journal of Biometeorology*, Heidelberg, **33**: 36-51, 1989.

MEDINA, E.; SAN JOSÉ, 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 José, 20: 302-6, 1970.**

MEEK, D.N.; HATFIELD, J.L.; HOWELL, T.A.; IDSO, S.B.; REGINATTO, R.J. A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. **Agronomy Journal, Madison, 76: 939-46, 1984.**

MONSI, M. & MURATA, Y. Development of photosynthetic systems as influenced by distribution of matter. In: SETLIK, I. ed. **Prediction and measurement of photosynthetic productivity.** Wageningen, Pudoc, 1970. p. 115-29.

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

MONTEITH, J.L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany, Oxford, 29: 17-37, 1965.**

- NICKELL, L.G. Agricultural aspects of Transplanting and spacing. **Reports**, Hawaiian Sugar Technologists, 1967. p. 147-55.
- PANOL, F.Y. Sugarcane yield models for production simulation. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15^o, Durban, 1974. **Proceedings**. Durban, Hayne & Gibson, 1974. p. 871-83.
- PENNING DE VRIES, F.W.T. The cost of maintenance processes in plants cells. **Annals of Botany**, Oxford, 39: 77-92, 1975a.
- PENNING DE VRIES, F.W.T. Use of assimilates in higher plants. In: COOPER; J.P., ed. **Photosynthesis and productivity in different environment**. London, Cambridge University Press, 1975b. p. 459-80.
- PEREIRA, A.R. Balanço de carbono: Uso de modelos e simulação. **Anais do Sebiagri V**. ESALQ/USP, Piracicaba, SP. p. 191-207, 1987.
- PEREIRA, A.R. Aspectos fisiológicos da produtividade vegetal. **O Agrônomo**, Campinas, 40(3): 203-9, 1988.

- PEREIRA, A.R. & ARRUDA, H.V. **Ajuste prático de curvas na pesquisa biológica.** Campinas, Fundação Cargill, 1987. 50 p.
- PEREIRA, A.R.; BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatic conditioning of flowering induction in sugarcane. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, **29**: 103-10, 1983.
- RICHARDS, F.I. The quantitative analysis of growth. In: STEWART, F.C., ed. **Analysis of Growth: behaviour of plants and their organs.** New York, Academic Press, 1969. p. 3-76. (Plant Physiology, 5A).
- RICKMAN, R.W.; RAMIG, R.E.; ALLMARAS, R.R. Modelling dry matter accumulation in dry land winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, **67**: 283-9, 1975.
- RIPOLI, T.C.C. & VILLA NOVA, N.A. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar: novos desafios. STAB. **Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, **11**(1): 28-31. set./out. 1992.
- ROSENFELD, U. Período crítico de deficiência hídrica para cana planta em cultura de cana-de-açúcar. (*Saccharum* spp). Piracicaba, 1989. 89 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

ROSENFELD, U. & LEME E.J.A. Produtividade da cana-de-açúcar irrigada por aspersão. Estudos de época de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3., São Paulo, 1984. *Anais*. São Paulo, STAB, 1984. p 77-84.

ROSTRON, H. Radiant energy interception, root growth, dry matter production and apparent yield potential of two sugarcane varieties. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15^o, Durban, 1974. *Proceedings*. Durban, Hayne & Gibson, 1974. p. 1001-10.

SAEKI, T. Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Botanical Magazine, Tokyo*, 73: 55-63, 1960.

SAEKI, T. Light relations in plant communities. In: EVANS, L.T. ed. *Environmental control of plant growth*. Canberra, Academic Press, 1963. p. 79-94.

SAN JOSÉ, J.J. & MEDINA, E. Análisis de la productividad de caña de azúcar. I. Crecimiento, desarrollo de la superficie foliar y contenido de clorofila de caña de azúcar 'PR 980'. *Turrialba, St. Joseph*, 20: 143-8, 1970.

SCARDUA, R. O clima e a irrigação na produção agro-industrial da cana-de-acucar. Piracicaba, 1985. 122p. (Livre-Docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

SHIBLES, R.M. & WEBER, C.R. Leaf area, solar radiation interception and dry-matter production by soybeans. *Crop Science*, Madison, 5: 575-7, 1965.

SPLINTER, W.E. Modelling of plant growth for yield prediction. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, 14: 243-53, 1974.

STANHILL, G. & FUCHS, M. The relative flux density of photosynthetically active radiation. *Journal of Applied Ecology*, Oxford, 14: 317-22, 1974.

THOMPSON, G.D. The relationship of potential evapotranspiration of sugarcane to environmental factors. In: CONGRESS OF THE INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12^a, San Juan, 1965. *Proceedings*, Amsterdam, Elsevier, 1967. p. 3-9

THORNLEY, J.H.M. Respiration, growth and maintenance in plants. *Nature*, London, 227: 304-5, 1970.

- THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology.** London, Academic Press, 1976. 318 p.
- THORNLEY, J.H.M. & HESKETH, J.D. Growth and respiration in cotton bolls. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, **9**: 315-7, 1972.
- VANDERLIP, R.L. & ARKIN, G.F. Simulating accumulation and distribution of dry matter in grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, **69**: 917-23, 1977.
- WALDRON, J.C.; GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The physiology of sugar-cane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. **Australian Journal of Biological Sciences**, East Melbourne, **20**: 1043-52, 1967.
- WANN, M. & RAPER, C.D. A dynamic model for plant growth. Adaptation for vegetative growth of soybeans. **Crop Science**, Madison, **19**: 461-7, 1979.
- WATSON, D.J. The physiological basis of variation in yield. **Advances in Agronomy**, New York, **4**: 101-45, 1952.

WHITEMAN, P.C.; BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. The physiology of sugar-cane. VI. Effects of temperature, light, and water on sit germination and early growth of *Saccharum* spp. **Australian Journal of Biological Sciences**, East Melbourne, **16(2)**: 416-28, 1963.

WIT, C.T.de; BROUWER, R.; PENNING DE VRIES, F.W.T. The simulation of photosynthetic systems. In: SETLIK, I., ed. **Prediction and measurement of photosynthetic**. Wageningen, Pudoc., 1970. p. 47-70.

YOCUM, C.S.; ALLEN, L.H.; LEMON, E.R. Photosynthesis under field conditions. VI. Solar radiation balance and photosynthesis efficiency. **Agronomy Journal**, Madison, **56**: 249-53, 1964.

YOON, C.N. Growth Studies on Sugarcane. **The Malaysian Agricultural Journal**, Kuala Lumpur, **48(2)**: 47-79, 1971.

Tab. 6 Conjunto de resultados obtidos no desenvolvimento do modelo proposto.

MES	DIAS SEM DIAS	T(OC)	GD	Cc(t)	Cn(t)	C(i)	IAF	C(IAF)	F	1-F	Qo/N	N	CBC	CBn	CBC
4	30	30	54	1.062	0.873	1.000	0.070	0.038	0.337	0.663	64.3	11.44	886	376	837
5	31	61	138	0.805	0.662	0.926	0.231	0.121	0.400	0.600	55.3	10.88	746	314	1543
6	30	91	186	0.654	0.538	0.755	0.364	0.185	0.351	0.649	51.7	10.59	673	282	1420
7	31	122	236	0.752	0.618	0.685	0.543	0.265	0.473	0.527	53.2	10.71	698	293	2037
8	31	153	293	0.734	0.603	0.650	0.801	0.368	0.485	0.515	58.7	11.18	797	336	2960
9	30	183	358	0.938	0.771	0.630	1.162	0.491	0.479	0.521	67.8	11.82	960	409	5755
10	31	214	462	1.248	1.026	0.616	1.831	0.667	0.438	0.562	73.9	12.48	1094	469	12455
11	30	244	598	1.231	1.012	0.608	2.635	0.809	0.552	0.448	77.7	13.08	1198	515	14004
12	31	275	746	1.266	1.041	0.605	3.175	0.875	0.536	0.464	77.9	13.40	1230	529	16697
1	31	306	892	1.195	0.982	0.603	3.414	0.898	0.550	0.450	78.0	13.27	1221	525	15785
2	29	334	1017	1.328	1.092	0.602	3.498	0.906	0.512	0.488	76.6	12.75	1153	495	15647
3	31	365	1150	1.204	0.990	0.602	3.536	0.909	0.510	0.490	72.2	12.15	1044	446	14257
4	30	395	1272	1.027	0.844	0.601	3.550	0.910	0.559	0.441	64.3	11.44	886	376	9493
5	31	426	1352	0.867	0.713	0.601	3.554	0.911	0.443	0.557	56.3	10.88	746	314	7798
6	30	456	1405	0.681	0.560	0.601	3.556	0.911	0.360	0.640	51.7	10.59	673	282	5743

Tab 7 Conjunto de resultados obtidos no desenvolvimento do modelo proposto.

mes	t	n(dias)	Cr(t)	Cr(i)	CrtxCri	CR	MS	MSCr	MST	MST/mes	MSL/mes	RESP(%)	PALHA
4	20.7	30	0.2873	1.0000	0.0066	0.9934	659	596	596	596	596	10	0
5	17.8	61	0.1924	1.0000	0.0044	0.9956	1215	1132	1654	1058	1058	13	0
6	16.1	91	0.1521	1.0000	0.0035	0.9965	1118	1060	2549	895	895	20	0
7	17.2	122	0.1771	1.0000	0.0041	0.9959	1604	1504	3296	747	1310	18	563
8	17.0	153	0.1722	1.0000	0.0040	0.9960	2331	2199	4663	1367	1917	18	550
9	19.3	183	0.2367	1.0000	0.0054	0.9942	4532	4148	7490	2827	3530	22	702
10	22.8	214	0.3841	0.9473	0.0084	0.9919	9807	8634	12235	4745	5680	42	935
11	22.6	244	0.3737	0.8730	0.0075	0.9935	11026	9981	17782	5547	6469	41	922
12	23.0	275	0.3949	0.7988	0.0073	0.9944	13147	12034	24785	7003	7951	40	948
1	22.2	306	0.3535	0.7318	0.0060	0.9959	12429	11650	32840	8055	8950	28	895
2	23.7	334	0.4351	0.6789	0.0068	0.9958	12321	11596	39711	6872	7867	36	995
3	22.3	365	0.3585	0.6268	0.0052	0.9971	11226	10723	46401	6689	7591	32	902
4	20.3	395	0.2718	0.5826	0.0036	0.9982	7475	7265	50538	4137	4908	34	769
5	18.5	426	0.2119	0.5553	0.0027	0.9987	6140	6015	54109	3572	4221	31	649
6	16.4	456	0.1585	0.5379	0.0020	0.9991	4522	4460	56722	2613	3122	31	510

Tab.8 Valores da radiação no topo da atmosfera (cal/ cm².dia)
para as latitudes Norte e Sul.

LAT.NOR	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN
LAT.SUL	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	883	916	927	898	867	816	825	866	904	922	873	870
-2	901	927	929	890	850	796	807	853	901	929	889	890
-4	919	937	929	880	833	776	787	839	896	934	903	909
-6	935	946	928	869	814	754	767	825	891	939	917	927
-8	951	953	926	857	795	732	747	810	884	942	929	944
-10	965	960	924	844	775	710	725	793	876	945	940	961
-12	979	966	919	830	754	686	703	776	868	946	951	976
-14	991	970	914	815	732	662	680	758	858	946	960	990
-16	1003	973	908	799	710	638	656	739	847	945	968	1004
-18	1013	975	901	782	687	613	632	719	835	942	976	1016
-20	1023	976	892	764	663	587	607	698	822	939	982	1027
-22	1031	976	882	746	638	561	582	677	808	935	987	1038
-24	1039	975	872	726	613	534	556	655	793	929	991	1047
-26	1045	973	860	706	588	507	530	632	777	922	994	1055
-28	1050	969	847	684	561	480	503	609	760	914	996	1063
-30	1054	965	834	662	534	452	476	585	743	906	997	1069
-32	1057	959	819	640	507	425	448	560	724	896	997	1074
-34	1060	953	803	616	480	396	420	534	704	885	996	1079
-36	1061	945	786	592	452	368	392	509	684	873	994	1082
-38	1061	936	768	567	423	340	364	482	663	860	991	1085
-40	1060	926	750	542	395	311	336	456	641	846	987	1086
-42	1059	916	730	516	366	283	308	428	618	831	982	1087
-44	1056	904	710	489	337	255	280	401	595	815	976	1087
-46	1053	891	688	462	308	227	252	373	570	798	969	1086
-48	1049	878	666	434	279	199	224	345	545	780	962	1084
-50	1044	863	643	406	250	172	196	317	520	761	953	1082

Tab. 9. Valores do comprimento do dia para as latitudes Norte e Sul. (horas)

LAT. NOR	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN
LAT. SUL	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
-2.00	12.10	12.06	12.01	11.95	11.91	11.89	11.89	11.93	11.98	12.04	12.09	12.11
-4.00	12.21	12.12	12.02	11.91	11.82	11.77	11.79	11.86	11.97	12.08	12.18	12.23
-6.00	12.31	12.18	12.03	11.86	11.73	11.65	11.68	11.80	11.95	12.12	12.27	12.34
-8.00	12.42	12.25	12.04	11.82	11.64	11.54	11.57	11.73	11.94	12.15	12.36	12.46
-10.00	12.53	12.31	12.06	11.77	11.54	11.42	11.46	11.66	11.92	12.19	12.45	12.58
-12.00	12.63	12.37	12.07	11.73	11.45	11.30	11.35	11.59	11.91	12.23	12.54	12.70
-14.00	12.74	12.44	12.08	11.68	11.35	11.18	11.24	11.51	11.89	12.27	12.63	12.82
-16.00	12.86	12.50	12.09	11.63	11.26	11.05	11.13	11.44	11.87	12.32	12.73	12.94
-18.00	12.97	12.57	12.10	11.58	11.16	10.93	11.01	11.37	11.86	12.36	12.82	13.07
-20.00	13.09	12.64	12.12	11.53	11.06	10.80	10.89	11.29	11.84	12.40	12.92	13.20
-22.00	13.21	12.71	12.13	11.48	10.95	10.66	10.77	11.21	11.82	12.45	13.02	13.33
-24.00	13.33	12.78	12.14	11.42	10.84	10.53	10.64	11.13	11.80	12.49	13.13	13.47
-26.00	13.46	12.86	12.16	11.37	10.73	10.38	10.51	11.05	11.79	12.54	13.24	13.61
-28.00	13.60	12.93	12.17	11.31	10.62	10.23	10.37	10.96	11.77	12.59	13.35	13.76
-30.00	13.73	13.01	12.18	11.25	10.50	10.08	10.23	10.87	11.75	12.64	13.47	13.91
-32.00	13.88	13.10	12.20	11.19	10.37	9.92	10.08	10.78	11.72	12.69	13.59	14.07
-34.00	14.03	13.18	12.22	11.13	10.24	9.75	9.92	10.68	11.70	12.74	13.72	14.24
-36.00	14.19	13.28	12.23	11.06	10.10	9.57	9.76	10.58	11.68	12.80	13.85	14.42
-38.00	14.36	13.37	12.25	10.99	9.96	9.38	9.58	10.47	11.66	12.86	14.00	14.61
-40.00	14.55	13.48	12.27	10.91	9.80	9.18	9.40	10.35	11.63	12.93	14.15	14.81
-42.00	14.74	13.59	12.29	10.83	9.63	8.96	9.20	10.23	11.60	12.99	14.31	15.03
-44.00	14.95	13.70	12.31	10.75	9.46	8.72	8.99	10.10	11.57	13.07	14.48	15.26
-46.00	15.17	13.83	12.33	10.66	9.26	8.47	8.76	9.96	11.54	13.14	14.67	15.51
-48.00	15.42	13.96	12.36	10.56	9.06	8.19	8.50	9.81	11.51	13.23	14.87	15.79
-50.00	15.69	14.11	12.38	10.45	8.83	7.88	8.23	9.64	11.47	13.32	15.09	16.10
-22.30	13.23	12.72	12.13	11.47	10.94	10.64	10.75	11.20	11.82	12.45	13.04	13.35

Tab.10 Valores do Carboidrato maximo para um dia claro
(CBc) (kg CH₂O/ha dia)

LAT. NOR	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN
LAT. SUL	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	1048	1083	1094	1064	1031	977	987	1030	1071	1089	1038	1034
-2	1068	1095	1096	1055	1012	955	966	1016	1067	1097	1055	1056
-4	1088	1106	1097	1044	993	932	945	1001	1062	1103	1071	1078
-6	1106	1116	1096	1032	973	908	922	985	1056	1108	1086	1098
-8	1124	1124	1094	1019	951	883	899	968	1049	1112	1100	1117
-10	1140	1132	1091	1005	929	858	875	950	1040	1115	1113	1135
-12	1155	1138	1087	989	906	831	849	930	1031	1116	1125	1153
-14	1169	1144	1082	973	882	804	823	910	1028	1117	1136	1169
-16	1183	1148	1075	955	857	776	797	889	1009	1116	1145	1184
-18	1195	1151	1068	937	831	748	769	867	996	1114	1154	1199
-20	1206	1153	1059	917	804	718	741	844	982	1111	1161	1212
-22	1216	1153	1049	897	776	688	712	820	967	1107	1168	1224
-24	1225	1153	1038	875	748	657	682	795	951	1101	1173	1235
-26	1233	1151	1025	853	718	626	652	770	934	1095	1178	1245
-28	1240	1148	1012	829	688	594	621	743	915	1087	1181	1255
-30	1246	1145	997	805	657	562	589	716	896	1078	1183	1263
-32	1250	1139	982	779	626	529	557	687	875	1068	1184	1270
-34	1254	1133	965	753	594	496	524	658	854	1057	1184	1276
-36	1257	1126	947	725	561	462	491	628	831	1045	1183	1282
-38	1259	1118	928	697	528	428	458	598	808	1031	1181	1286
-40	1260	1108	907	668	494	394	424	567	783	1017	1178	1290
-42	1260	1097	886	638	460	359	390	535	757	1001	1174	1293
-44	1259	1086	864	607	425	325	355	502	731	984	1170	1295
-46	1258	1073	840	575	390	291	321	469	703	966	1164	1296
-48	1256	1059	816	543	355	256	287	435	675	947	1157	1297
-50	1253	1045	790	510	319	222	252	401	645	927	1150	1297

Tab.11. Valores do carboidrato maximo produzido em dias nublados (CBn) (kg CH₂O/ha.dia).

LAT.NOR	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
LAT.SUL	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	449	465	470	456	441	416	420	440	459	468	444	442
-2	458	470	471	452	433	406	411	434	457	471	452	452
-4	466	475	471	447	424	396	402	427	455	474	459	462
-6	475	479	471	442	415	385	392	420	452	476	466	471
-8	482	483	470	436	405	374	381	412	449	478	472	479
-10	490	487	469	429	395	363	371	404	445	479	477	487
-12	496	489	467	422	385	351	359	396	441	480	483	495
-14	503	492	464	415	374	339	348	387	436	480	487	502
-16	508	493	461	407	363	327	336	377	431	479	491	509
-18	514	495	457	399	351	314	324	368	425	478	495	515
-20	518	495	453	390	339	302	312	357	419	477	498	521
-22	523	495	449	381	327	288	299	347	412	474	501	526
-24	526	495	443	371	315	275	286	336	404	472	503	531
-26	530	494	438	361	302	261	273	324	397	469	505	535
-28	533	492	432	350	289	248	259	312	388	465	506	539
-30	535	490	425	339	275	234	245	300	380	461	507	542
-32	537	488	418	328	261	219	231	288	370	456	507	545
-34	538	485	410	316	247	205	217	275	361	451	506	548
-36	539	481	402	304	233	191	203	262	351	445	506	549
-38	539	477	393	292	219	176	189	249	340	439	504	551
-40	539	472	384	279	204	162	174	235	329	432	503	552
-42	539	467	374	266	189	147	160	221	318	424	500	553
-44	538	461	364	252	175	133	145	207	306	417	498	553
-46	536	455	353	239	160	118	131	193	294	408	495	553
-48	535	449	342	225	145	104	116	179	281	400	491	553
-50	533	442	331	210	130	90	102	164	268	390	487	552

Tab. 12 Dados climáticos

Araras-SP

ANO	MES	DIAS	Tmax	Tmin	Tmed	GD	n(horas)
1974	1	31	28.76	18.47	23.62	168.45	5.00
	2	28	31.47	18.51	24.99	216.69	8.80
	3	31	28.61	18.60	23.61	173.76	5.10
	4	30	26.79	15.44	21.12	98.71	6.30
	5	31	25.68	12.21	18.95	67.87	8.10
	6	30	23.39	11.82	17.61	37.66	5.80
	7	31	25.69	11.45	18.57	64.37	8.70
	8	31	27.43	12.20	19.82	87.58	7.10
	9	30	30.17	14.95	22.56	150.83	7.60
	10	31	28.95	13.42	21.19	119.67	6.10
	11	30	30.14	17.68	23.91	177.42	8.80
	12	31	27.09	18.95	23.02	155.62	3.60
1975	1	31	28.81	18.59	23.70	171.00	5.80
	2	28	29.61	18.43	24.02	186.62	4.80
	3	31	30.77	14.80	22.79	158.27	7.20
	4	30	27.76	14.44	21.10	100.12	7.10
	5	31	25.59	12.09	18.84	66.14	7.30
	6	30	26.00	10.76	18.38	62.99	7.30
	7	31	24.65	8.44	16.54	42.29	7.90
	8	31	30.29	12.27	21.28	125.73	8.50
	9	30	29.79	11.66	20.73	118.84	7.30
	10	31	28.98	13.52	21.25	120.87	6.70
	11	30	27.49	15.05	21.27	108.59	4.50
	12	31	28.98	16.38	22.68	148.31	5.80
1976	1	31	29.35	17.87	23.61	168.32	5.50
	2	29	27.80	17.66	22.73	146.81	4.40
	3	31	28.81	17.93	23.37	166.48	5.80
	4	30	29.16	14.61	21.89	119.84	7.10
	5	31	27.09	9.57	18.33	73.10	5.10
	6	30	26.59	8.24	17.42	60.32	8.00
	7	31	25.47	7.88	16.68	49.17	7.40
	8	31	26.32	12.28	19.30	73.96	7.90
	9	30	25.24	13.61	19.43	69.86	4.80
	10	31	27.64	14.59	21.12	110.38	6.40
	11	30	28.61	16.88	22.75	143.95	7.30
	12	31	26.01	18.36	22.19	129.74	4.50

Tab 13 Dados climáticos

Araras- SP

ANO	MES	DIAS	Tmax	Tmin	Tmed	GD	n(horas)
1977	11	30	28.61	16.88	22.75	143.95	7.30
	12	31	26.01	18.36	22.19	129.74	4.50
	1	31	30.20	19.30	24.75	202.50	4.60
	2	28	30.80	18.10	24.45	199.95	10.10
	3	31	30.50	17.70	24.10	189.21	5.70
	4	30	26.78	14.89	20.84	90.77	6.00
	5	31	24.70	10.60	17.65	49.35	6.50
	6	30	24.80	11.90	18.35	53.77	5.80
	7	31	26.80	11.16	18.98	76.75	8.00
	8	31	28.10	12.40	20.25	97.46	7.30
	9	30	27.70	14.00	20.85	106.45	6.70
	10	31	29.50	15.70	22.60	148.54	7.10
1978	11	30	28.50	17.20	22.85	146.35	4.20
	12	31	26.80	16.10	21.45	112.18	5.60
	1	31	29.90	18.00	23.95	178.50	6.90
	2	28	30.30	17.40	23.85	181.78	8.10
	3	31	29.90	16.60	23.25	165.03	6.60
	4	30	27.70	13.60	20.65	96.76	8.40
	5	31	24.20	10.90	17.55	44.80	6.10
	6	30	23.10	9.60	16.35	28.90	7.80
	7	31	25.00	10.00	17.50	50.63	7.20
	8	31	25.60	9.50	17.55	53.81	7.90
	9	30	27.00	12.20	19.60	84.83	6.90
	10	31	30.50	15.50	23.00	161.46	8.20
1979	11	30	28.20	16.10	22.15	128.98	7.10
	12	31	28.60	16.90	22.75	148.85	7.20
	1	31	28.30	16.20	22.25	131.52	7.60
	2	28	29.80	17.70	23.75	178.37	7.40
	3	31	28.80	16.10	22.45	142.36	7.50
	4	30	27.70	13.60	20.65	93.42	7.60
	5	31	25.30	12.40	18.85	64.03	6.20
	6	30	24.90	8.52	16.71	43.60	7.60
	7	31	23.50	8.30	15.90	30.85	7.60
	8	31	27.60	11.60	19.60	86.40	7.60
	9	30	26.40	12.90	19.65	81.01	5.90
	10	31	29.40	16.40	22.90	154.95	7.70
	11	30	28.50	16.10	22.30	133.37	7.70
	12	31	28.70	18.30	23.50	170.50	5.20

Tab. 14 Dados climáticos

Araras-SP

ANO	MES	DIAS	Tmax	Tmin	Tmed	GD	n(horas)
1980	1	31	28.50	17.40	22.95	148.99	6.90
	2	29	28.40	18.00	23.20	161.20	5.90
	3	31	30.80	17.70	24.25	193.86	8.80
	4	30	27.50	15.30	21.40	103.57	7.20
	5	31	26.50	12.70	19.60	81.15	7.40
	6	30	22.50	7.20	14.85	19.85	7.80
	7	31	25.80	9.74	17.77	58.72	7.50
	8	31	26.90	12.00	19.45	79.74	6.80
	9	30	26.80	10.80	18.80	75.02	6.90
	10	31	29.70	14.60	22.15	140.52	8.30
	11	30	29.10	13.90	21.50	121.59	9.10
	12	31	28.80	16.50	22.65	146.99	6.90
1981	1	31	28.90	17.80	23.35	160.55	5.70
	2	28	31.10	14.00	22.55	155.55	8.90
	3	31	29.70	13.40	21.55	130.17	7.50
	4	30	28.20	11.40	19.80	86.70	8.20
	5	31	26.80	10.80	18.80	75.02	8.20
	6	30	23.00	8.00	15.50	25.00	6.40
	7	31	23.00	7.40	15.20	24.84	7.60
	8	31	26.50	11.10	18.80	70.37	7.80
	9	30	30.40	14.90	22.65	153.76	7.70
	10	31	26.90	14.00	20.45	95.17	6.10
	11	30	29.40	17.90	23.65	169.51	7.30
	12	31	28.00	18.10	23.05	156.55	5.00
1982	1	31	28.00	17.00	22.50	136.36	5.90
	2	28	30.20	18.10	24.15	190.65	7.80
	3	31	27.80	18.20	23.00	155.00	4.90
	4	30	27.00	13.60	20.30	87.65	8.80
	5	31	24.20	10.50	17.35	43.49	7.60
	6	30	24.50	12.70	18.60	53.71	5.30
	7	31	24.30	10.10	17.20	43.32	8.50
	8	31	26.90	12.00	19.45	79.74	7.40
	9	30	27.90	12.70	20.30	99.94	8.10
	10	31	28.30	14.40	21.35	118.30	5.10
	11	30	29.80	18.20	24.00	180.00	7.10
	12	31	26.90	17.70	22.30	133.45	4.70

Tab. 15 Dados climáticos

Araras-SP

ANO	MES	DIAS	Tmax	Tmin	Tmed	GD	n(horas)
1983	1	31	28.00	18.40	23.20	156.00	5.30
	2	28	29.80	18.20	24.00	186.00	6.80
	3	31	28.40	17.40	22.90	152.41	6.90
	4	30	26.60	16.60	21.60	103.54	6.80
	5	31	25.60	14.90	20.25	83.67	5.60
	6	30	23.40	13.00	18.20	42.06	4.30
	7	31	26.30	12.90	19.60	79.69	6.30
	8	31	26.80	11.00	18.90	73.52	9.00
	9	30	23.70	12.70	18.20	45.78	4.50
	10	31	27.20	15.70	21.45	114.08	5.70
	11	30	29.00	16.70	22.85	147.56	7.90
	12	31	27.60	18.10	22.85	150.35	4.50
1984	1	31	31.40	18.70	25.05	211.50	8.80
	2	29	33.10	19.40	26.25	255.75	10.20
	3	31	29.90	17.00	23.45	170.15	7.60
	4	30	27.90	16.20	22.05	117.28	6.90
	5	31	27.80	14.90	21.35	115.40	7.50
	6	30	26.90	11.70	19.30	78.17	9.10
	7	31	27.00	11.90	19.45	83.15	9.80
	8	31	25.30	12.50	18.90	62.45	8.20
	9	30	26.20	13.20	19.70	80.17	8.30
	10	31	30.60	16.20	23.40	170.89	9.40
	11	30	29.10	17.10	23.10	154.01	7.10
	12	31	28.20	18.00	23.10	158.10	6.10
1985	1	31	28.08	17.90	22.99	149.71	5.30
	2	28	30.20	18.80	24.50	201.50	6.10
	3	31	29.30	18.30	23.80	0.00	7.10
	4	30	28.70	16.50	22.60	0.00	7.50
	5	31	25.90	11.90	18.90	0.00	8.50
	6	30	23.80	8.70	16.25	0.00	8.00
	7	31	24.80	7.94	16.37	0.00	9.00
	8	31	28.10	11.50	19.80	0.00	8.70
	9	30	28.40	13.80	21.10	0.00	8.00
	10	31	32.00	15.70	23.85	0.00	9.70
	11	30	30.00	17.30	23.65	0.00	7.80
	12	31	30.20	18.10	24.15	0.00	9.10
1986	1	31	30.20	18.90	24.55	203.05	8.40
	2	28	29.20	19.50	24.35	177.80	4.40
	3	31	29.10	18.00	23.55	172.05	6.40
	4	30	28.70	16.40	22.55	139.62	9.10
	5	31	26.50	14.20	20.35	91.05	6.20
	6	30	25.30	9.60	17.45	50.91	7.50
	7	31	24.20	9.50	16.85	40.53	8.00
	8	31	25.80	12.00	18.90	68.33	7.50
	9	30	27.60	13.40	20.50	97.35	7.20
	10	31	29.40	14.70	22.05	137.03	8.80
	11	30	29.90	17.10	23.50	165.95	7.60
	12	31	27.50	18.00	22.75	147.25	4.00