

UM MODELO MATEMÁTICO-FISIOLÓGICO PARA SIMULAR O ACÚMULO
DE MATÉRIA SECA NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

(SACCHARUM SP)

EDUARDO CARUSO MACHADO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: DR. HILTON SILVEIRA PINTO

Dissertação apresentada ao Instituto de Biologia da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Mestre em Biologia.

CAMPINAS
Estado de São Paulo - Brasil
janeiro de 1981

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais, Hyppolito e Gracia

À minha esposa, Celina

Aos meus filhos, Carlos Eduardo, Renata e Ricardo

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar minha gratidão às seguintes pessoas e Instituições que tornaram possível a execução deste trabalho:

- Ao Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto, pela segura orientação;
- Ao Dr. Antônio Roberto Pereira, pelo apoio e sugestões concedidas durante a execução deste trabalho;
- À Maria Ester Godoy Pereira, pela colaboração nas correções dos textos e pelo esmero nos trabalhos de datilografia;
- Aos colegas e funcionários da Seção de Fisiologia do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo;
- Aos integrantes da Prê-banca,
 - Dr. Antonio Roberto Pereira,
 - Dr. Antônio Celso Novaes Magalhães e
 - Dr. William Henry Stubblebine,pelas valiosas sugestões;
- À Universidade Estadual de Campinas, pela oportunidade de frequentar o Curso de Pós-graduação;
- Ao Instituto Agronômico de Campinas, pelas facilidades oferecidas para a execução deste trabalho;
- À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio econômico para o desenvolvimento dos trabalhos experimentais, através do Projeto Bioconversão - Convênio FINEP/CODETEC/IAC;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida.

SIMBOLOGIA USADA

- A - densidade de fluxo de radiação solar global absorvida pela dossel vegetativo
- AD_a - água disponível no solo
- AD_m - disponibilidade máxima de água no solo
- A_f - densidade de fluxo de radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel vegetativo
- AFE - área foliar específica
- A_i - densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima absorvida pelo dossel vegetativo
- C - peso da matéria seca dos colmos
- DC - fator de distribuição de matéria seca para os colmos
- DF - fator de distribuição de matéria seca para as folhas
- EF - eficiência fotossintética
- F - peso da matéria seca das folhas
- $f(j)$ - fator de ajustamento da taxa de fotossíntese relacionado com uma condição ambiental ou fisiológica
- FOT_b - taxa de fotossíntese bruta diária
- FOT_h - taxa de fotossíntese bruta horária
- $FOT_{max,d}$ - taxa de fotossíntese bruta máxima diária
- $FOT_{max,h}$ - taxa de fotossíntese bruta máxima horária
- I - densidade de fluxo de radiação solar global incidente sobre uma superfície plana horizontal
- I^* - densidade de fluxo do balanço de radiação solar global
- IAF - índice de área foliar
- I_f - densidade de fluxo de radiação solar fotossinteticamente ativa incidente sobre uma superfície plana horizontal
- I_f^* - densidade de fluxo do balanço de radiação solar fotossinteticamente ativa
- I_i - densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima incidente sobre uma superfície plana horizontal
- I_i^* - densidade de fluxo do balanço de radiação solar infra-vermelho próxima

K	- coeficiente de extinção da radiação solar líquida
MS	- matéria seca
P	- peso da matéria seca total
R	- densidade de fluxo de radiação solar global refletida pela superfície da cultura
RAF	- razão de área foliar
R_c	- taxa de respiração de crescimento
R_f	- densidade de fluxo de radiação solar fotossinteticamente ativa refletida pela superfície da cultura
R_i	- densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima refletida pela superfície da cultura
R_m	- taxa de respiração de manutenção
r_m	- coeficiente de manutenção
$r_m(M)$	- fator de ajustamento do coeficiente de manutenção relacionado com a idade da planta
$r_m(T_a)$	- fator de ajustamento do coeficiente de manutenção relacionado com a temperatura do ar
R_t	- taxa de respiração total diária
T	- densidade de fluxo de radiação solar global transmitida, através do dossel vegetativo, até o nível do solo
TAL	- taxa de assimilação líquida
TCC	- taxa de crescimento da cultura
TCF	- taxa de crescimento das folhas
TCR	- taxa de crescimento relativo
T_f	- densidade de fluxo de radiação solar fotossinteticamente ativa transmitida, através do dossel vegetativo, até o nível do solo
T_i	- densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima transmitida, através do dossel vegetativo, até o nível do solo
t_i	- tempo em dias
α	- coeficiente de absorção da radiação solar líquida
ΔS	- quantidade de substrato produzido pela fotossíntese em um espaço de tempo, Δt
ΔS_c	- parte do substrato, produzido pela fotossíntese, que é utilizado no processo de crescimento e na respiração de crescimento

- ΔS_m - parte do substrato, produzido pela fotossíntese, que é utilizado para prover de energia a manutenção dos processos metabólicos das células
- ΔS_r - parte do substrato, produzido pela fotossíntese, que é utilizado para prover energia a biossíntese
- Δt - intervalo de tempo
- ϵ_c - eficiência de conversão do processo construtivo da respiração
- ρ - coeficiente de reflexão da radiação solar
- τ - coeficiente de transmissão da radiação solar líquida

ÍNDICE

	Página
1. RESUMO	1
2. INTRODUÇÃO	4
3. REVISÃO DA LITERATURA	7
4. MATERIAL E MÉTODO	13
4.1. Campo Experimental	13
4.2. Balanço de Radiação Solar de Ondas Curtas	14
4.3. Análise Quantitativa do Crescimento	19
4.4. Desenvolvimento Conceitual do Modelo Matemático-Fisiológico	24
4.4.1. Fundamento matemático geral do modelo	25
4.4.2. Equação para estimar a taxa de fotossíntese bruta	
diária	28
4.4.2.1. Estimativa dos parâmetros e fatores de ajusta-	
mentos da equação para a estimativa de	
FOT _b	28
4.4.3. Equação para estimar a taxa de respiração total	
diária	42
4.4.3.1. Respiração de crescimento e eficiência de	
conversão do processo construtivo (ϵ_c)	45
4.4.3.2. Respiração de manutenção e coeficiente de	
manutenção	48
4.4.4. Fator de distribuição de matéria seca para as folhas	
(DF)	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1. Balanço de Radiação Solar de Ondas Curtas	52
5.2. Análise Quantitativa do Crescimento	61
5.3. Modelo Matemático-Fisiológico	82
5.3.1. Comportamento teórico das taxas de fotossíntese bruta,	
líquida e de respiração em função do índice de	
área foliar	82
5.3.2. Estimativa das perdas respiratórias durante o crescimento	
da cana-de-açúcar	82

	Página
5.3.3. Simulação do acúmulo de matéria seca	84
6. CONCLUSÕES	90
6.1. Balanço de Radiação Solar de Ondas Curtas	90
6.2. Análise Quantitativa do Crescimento	91
6.3. Modelo Matemático-Fisiológico	93
7. SUMMARY	94
8. LITERATURA CITADA	97
- APÊNDICE I	110

1. RESUMO

No presente trabalho, desenvolveu-se um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar, a partir de informações meteorológicas.

O modelo consiste de uma série de equações que descrevem quantitativamente, cada uma delas, um comportamento fisiológico da planta em resposta à variação das condições ambientais. A maior parte dos parâmetros e fatores usados no desenvolvimento das equações foi obtida a partir da adaptação de resultados de pesquisas disponíveis na literatura.

A estimativa da produção líquida de matéria seca, em bases diárias, foi feita pelo balanço entre fluxos de ganho e perdas de matéria seca, representados pela fotossíntese e respiração, respectivamente.

As taxas de fotossíntese total e de respiração total foram estimadas pelo produto da taxa potencial máxima por uma série de fatores de ajustamentos, representando uma estimativa do efeito que cada condição ambiental e/ou fisiológica exerce sobre os processos fisiológicos considerados.

Para estimar a taxa de fotossíntese diária da cultura, foram consideradas: a curva de resposta fotossíntese:radiação solar, a densidade de fluxo de radiação solar incidente, a distribuição da radiação solar no dossel vegetativo, a reflexão da radiação solar pela superfície da cultura, a área foliar, a idade da planta e da folha, a temperatura do

ar e a água disponível no solo.

A fração interceptada e a distribuição da radiação solar no dossel vegetativo foram determinadas, experimentalmente, através do balanço de radiação solar global e infra-vermelho próxima, em um campo experimental localizado na Estação Experimental de Piracicaba do Instituto Agrônomo.

As determinações dos fluxos radiantes de ondas curtas foram feitos com um piranômetro espectral da Eppley e com oito tubos solarímetros ELTEC-JE. Quatro destes tubos solarímetros, cobertos com filtros de gelatina Kodak 88-A, mediram a radiação em comprimentos de onda acima de 700nm.

Para a estimativa da respiração total, em bases diárias, consideraram-se os efeitos da temperatura, idade da planta e, indiretamente, os efeitos dos mesmos fatores envolvidos no cálculo da taxa de fotossíntese.

A taxa de respiração total foi separada em dois componentes, isto é, a respiração de crescimento e de manutenção. O coeficiente de manutenção e a eficiência de conversão, considerados na equação da respiração, foram estimados teoricamente usando-se conceitos bioquímicos, como proposto por PENNING DE VRIES (1975a).

A distribuição da produção líquida de matéria seca entre os diversos órgãos da planta, foi definida pela razão entre a taxa de crescimento do órgão e a taxa de crescimento da planta inteira.

As taxas de crescimentos dos diferentes órgãos e da planta inteira foram determinadas experimentalmente utilizando-se a técnica da análise quantitativa do crescimento, com coletas de material em intervalos de 21 dias, a partir do 86º dia do plantio.

A variação temporal do peso da matéria seca total, das folhas e da área foliar foram descritas pela função logística,

$$f(x) = \frac{A}{1 + \exp(-n - p.XT)}$$

A aplicação do modelo proposto permitiu as seguintes con-

clusões:

(i) O comportamento teórico das taxas de fotossíntese total, líquida e de respiração em função do índice de área foliar, foi consistente com os dados experimentais. A taxa de fotossíntese líquida inicialmente aumenta com o índice de área foliar, estabiliza-se brevemente e depois diminui vagarosamente.

(ii) A respiração de crescimento foi maior que a respiração de manutenção até ao redor dos 180 dias, invertendo-se após este período.

(iii) As perdas relativas da respiração total (R_t) sobre a fotossíntese total (FOT_b) aumentaram acentuadamente com a idade da cultura (de 25% aos 60 dias, até 70% aos 500 dias). O aumento da relação R_t/FOT_b é devido principalmente à crescente importância da respiração de manutenção em função do aumento do peso da matéria seca total.

(iv) A aplicação do modelo para simular o acúmulo de matéria seca, mostrou um comportamento teórico consistente com os resultados obtidos experimentalmente, embora, nas fases inicial e final do desenvolvimento da cultura, o modelo subestime ligeiramente os resultados e na fase intermediária superestime.

2. INTRODUÇÃO

A crise internacional de energia e a evolução das necessidades energéticas dos países industrializados levaram tanto as entidades de pesquisas como as agências financiadoras de projetos a um exame detalhado dos recursos naturais existentes, das necessidades energéticas do país e das possíveis fontes alternativas de energia. À medida que os combustíveis fósseis vão sendo exauridos, a busca de fontes alternativas de energia torna-se premente. É imperativo que as fontes alternativas sejam renováveis, ou seja, não se esgotem num futuro próximo. A bioconversão da energia solar através da fotossíntese efetuada pelas comunidades vegetais se enquadra perfeitamente dentro de tal critério.

A fotossíntese é o processo fundamental através do qual o gás carbônico do ar é convertido em carboidrato, que é o material básico para a biossíntese de amido, celulose, proteínas, etc. A utilização principal de tais compostos é a alimentação dos seres vivos. Por outro lado, os produtos fotossintetizados podem também ser transformados em combustíveis líquidos através do processo de fermentação. Tais combustíveis são obtidos a partir de várias espécies vegetais destacando-se, para as condições tropicais, a cana-de-açúcar.

A produção agrícola é resultante das interações entre as plantas e o ambiente. A natureza de tais interações tem sido intensamente estudada, principalmente sob condições ambientais controladas. Conseqüentemente, grandes quantidades de informações, para tais condições ambi-

entais, já são disponíveis a respeito dos principais processos fisiológicos das plantas, permitindo a elaboração de modelos matemáticos que descrevem adequadamente tais processos.

Um modelo matemático nada mais é do que a representação da relação entre duas ou mais variáveis através de uma equação ou conjunto de equações, ou seja, um modelo matemático é a formalização do conhecimento que se tem a respeito do comportamento de um sistema sob condições conhecidas.

A fotossíntese, por exemplo, tem sido objeto principal de tais modelos, principalmente por sua importância e implicações no crescimento e produção dos vegetais.

Com a confiança adquirida na simulação da fotossíntese o objetivo principal passou a ser a simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura em função de variáveis ambientais. Um modelo de simulação procura imitar o comportamento fisiológico da cultura em resposta aos estímulos ambientais ao longo da estação de crescimento. Assume-se, em tais modelos, que as plantas reagem segundo relações simples que podem ser descritas matematicamente. A validade das relações adotadas é que irá ditar a utilidade do modelo desenvolvido. O problema se torna, então, em descobrir as melhores relações para funções reais desconhecidas. Isto é feito comparando-se resultados experimentais com aqueles produzidos pelo modelo.

É evidente que um modelo deve ser suficientemente simples para permitir sua manipulação e entendimento, mas deve ser também suficientemente complexo para permitir extrapolação de conclusões (SHIMIZU, 1975).

A tentativa de elaboração de um modelo desta natureza oferece, segundo THORNLEY (1976), uma série de vantagens pois: (i) informações a respeito de diferentes processos fisiológicos podem ser reunidos em um único modelo, para se ter idéia da planta como um todo; (ii) um modelo resume convenientemente uma grande quantidade de informações; (iii) a base matemática para as hipóteses assumidas permite progresso no senti-

do de se compreender quantitativamente a natureza das interações ambiente-planta; (iv) a modelagem estimula novas idéias; (v) a elaboração de um modelo ajuda a detectar áreas onde o conhecimento é limitado; (vi) modelos permitem interpolações, extrapolações e previsão.

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca de uma cultura de cana-de-açúcar.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Um modelo matemático é uma representação esquemática simplificada de um sistema real. Em geral, consiste de uma série de equações que representam quantitativamente as relações e hipóteses assumidas a respeito do sistema real (THORNLEY, 1976). Quando se consideram os sistemas biológicos, a complexidade é tal, que quase sempre seus modelos representam uma simplificação ou abstração do sistema real (LOOMIS *et alii*, 1971; VAN KEULEN *et alii*, 1975; THORNLEY, 1976; LOOMIS *et alii*, 1979).

As equações matemáticas que compõem o modelo não representam necessariamente seu conteúdo biológico, mas expressam quantitativamente os resultados das pesquisas, permitindo interpretações que levam a compreender as interações ambiente-planta.

A elaboração de um modelo matemático tem, como início, a enunciação objetiva de suas finalidades, e requer um conhecimento detalhado do sistema a ser modelado. A avaliação dos fundamentos e hipótese é feita comparando-se os resultados da simulação com aqueles obtidos no sistema real.

Muitos modelos têm sido desenvolvidos através da associação da produção econômica da cultura com as variáveis climáticas, usando-se a técnica de regressão múltipla, sendo frequentemente utilizados em previsão de produção. Tais modelos estatísticos começaram com FISHER (1924) analisando a influência da chuva sobre a produção de trigo em Rothamsted, Inglaterra. Estes modelos oferecem, no entanto, poucas oportunidades para

se compreender as relações causa-efeito nas respostas das plantas ao ambiente. Nestes casos, as variáveis, por exemplo, a precipitação, temperatura, radiação solar, etc., são integradas para o período de cultivo e relacionadas estatisticamente com a produção final. Os trabalhos desenvolvidos por RUNGE e ODELL (1958), PANOL (1974), RUNGE e BENCI (1978), SHAW (1978) e THOMPSON (1978) são exemplos desta categoria de modelos.

A desvantagem principal em tais equações de regressão é que os efeitos das variáveis são sempre aditivos, embora na natureza haja interações entre precipitação, radiação solar e temperatura. Existe ainda o perigo de que tais relações sejam usadas fora dos limitantes para os quais foram determinadas. Em tal situação, extrapolações podem conduzir a resultados imprecisos.

Os índices biometeorológicos, uma combinação das variáveis ambientais, são também enquadrados na categoria de modelos estatísticos.

Mais recentemente, modelos matemáticos baseados nos processos fisiológicos foram desenvolvidos visando-se simular o crescimento e desenvolvimento das principais culturas. Tais modelos são denominados matemáticos-fisiológicos e tiveram seus primórdios na simulação da fotossíntese.

Os primeiros modelos de simulação da fotossíntese tiveram como objetivo principal estimar a produção primária potencial de uma comunidade vegetal. Assim, de WIT (1959) propôs um modelo para calcular a fotossíntese de uma comunidade vegetal em função da radiação solar incidente. Esse autor considerou que a cobertura vegetal era completa durante todo período de cultivo. Porém, como tal condição raramente ocorre em condições normais de plantio, mormente para culturas anuais, ALBERDA (1962) corrigiu tal deficiência, considerando o percentual de cobertura vegetal. NICHIPOROVICH (1968) também avaliou o potencial da produção fotossintética em plantas com metabolismo do tipo C4 em função da resposta da taxa de fotossíntese à radiação solar interceptada durante todo desenvolvimento da cultura.

Os modelos acima foram desenvolvidos considerando-se a absorção total da radiação solar pela cultura. Entretanto, como a relação

entre a taxa de fotossíntese e a radiação absorvida é não-linear, tendendo a um valor assintótico, e a penetração da radiação solar no dossel vegetativo depende da distribuição vertical da área foliar, parece mais adequado estimar-se a taxa de fotossíntese por camada do dossel vegetativo. A fotossíntese total da cultura é, portanto, representada pela somatória da fotossíntese em cada camada. Os modelos desenvolvidos por SAEKI (1960), MONTEITH (1965), DUNCAN *et alii* (1967), KUROIWA (1970), EDMEADES e DAYNARD (1979) apresentam tal característica. No entanto, tais modelos consideram a fotossíntese como função apenas da radiação solar. Modelos mais completos, que consideram os efeitos da temperatura, deficiência hídrica, idade da planta e da folha, concentração de CO_2 , etc., são apresentados por de WIT *et alii* (1970), FICK *et alii* (1973), JAGER e KING (1974), HOLT *et alii* (1975), VAN KEULEN *et alii* (1975), ACOCK *et alii* (1979), ENGLISH *et alii* (1979) e muitos outros.

A existência de vários modelos para um único processo fisiológico reflete a pluralidade de soluções para um mesmo problema. É evidente que cada modelo apresenta não só a visão que seu autor teve do processo, mas também o objetivo para o qual foi desenvolvido. Por exemplo, os modelos de SAEKI (1960) e NICHIPOROVICH (1968) estimam a taxa de fotossíntese da cultura em relação à radiação solar absorvida, com base somente no índice de área foliar, enquanto os modelos de DUNCAN *et alii* (1967) e KUROIWA (1970) consideram também o ângulo de inclinação solar, ângulo de inserção foliar e a distribuição vertical das folhas. Se o objetivo for a identificação de um tipo ideal de arquitetura foliar, para uma dada cultura, num dado local, os modelos de DUNCAN *et alii* (1967) e KUROIWA (1970) devem ser os preferidos. Se, pelo contrário, se quiser simular apenas o total de material fotossintetizado, num determinado intervalo de tempo, os modelos de SAEKI (1960) e de NICHIPOROVICH (1968) são mais simples e de utilização mais fácil.

Enquanto que, para a fotossíntese, existe uma abundância de informações, o mesmo não ocorre para a respiração. Alguns autores consideram que a respiração é proporcional ao peso da matéria seca e/ou ao índice de área foliar (DAVIDSON e PHILIP, 1958; SAEKI, 1960; MONTEITH, 1965), enquanto outros consideram-na proporcional à taxa de fotossíntese (FICK *et alii*, 1973 e 1975; BULL e TORVEY, 1974).

Para algumas culturas, verificou-se que a respiração aumenta assintoticamente com o índice de área foliar (LUDWIG *et alii*, 1965; McCREE e TROUGHTON, 1966; KING e EVANS, 1967). Assim, McCREE (1970, 1974) propôs que a respiração de uma comunidade seja considerada como a soma de dois termos, isto é, a respiração associada com o crescimento proporcional à fotossíntese, e a respiração de manutenção proporcional ao peso do material vivo. Isto não implica na existência de dois processos independentes, mas apenas de uma maneira de se quantificar a liberação de energia pela respiração. Na respiração de manutenção, parte dos carboidratos são consumidos para prover energia para a reposição de compostos degradados durante as atividades metabólicas, bem como para os processos de transportes, manutenção do gradiente iônico através das membranas e integridade das membranas (BEEVERS, 1970; McCREE, 1970, 1974; PENNING DE VRIES, 1975 a, b). Em síntese, a respiração de manutenção provê a energia necessária para manter as funções vitais das plantas. A respiração de crescimento corresponde ao consumo de uma certa quantidade de carboidratos, produzidos pela fotossíntese, para prover a energia requerida na conversão dos fotossintetizados nos diversos constituintes das plantas, tais como proteínas, celuloses, lipídeos, etc. Equações que permitem tais estimativas são apresentadas por THORNLEY (1970, 1976) e HESKETH *et alii* (1971), e testadas experimentalmente por BAKER *et alii* (1972) e THORNLEY e HESKETH (1972) para a cultura do algodão.

O modelo para respiração proposto por McCREE (1970, 1974) tem sido utilizado nos modelos de crescimento desenvolvidos por de WIT *et alii* (1970), JAGER e KING (1974), MACKINNON *et alii* (1978), ACOCK *et alii* (1979), HODGES *et alii* (1979), HUNT e LOOMIS (1979) e WANN e RAPER (1979).

Baseado em conceitos bioquímicos da síntese de materiais celulares e da energia necessária para a manutenção dos processos metabólicos, PENNING DE VRIES (1975 a,b) desenvolveu um modelo para a respiração onde, conhecendo-se a composição química da planta, é possível estimar-se a eficiência de conversão sofrida pelos produtos fotossintetizados.

Um dos pontos críticos na elaboração de um modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento de uma cultura é a distribuição dos fotossintetizados entre os diversos órgãos da planta (LOOMIS, 1970).

Há, portanto, necessidade de se conhecer as relações sítio de produção: sítio de consumo (WAREING e PATRICK, 1975) visto que as variações relativamente pequenas na taxa de distribuição dos produtos fotossintetizados podem acarretar grandes diferenças na produção econômica final (MONSI e MURATA, 1970). RICHARDS (1969) sugere que, em geral, há uma relação entre a taxa de crescimento do órgão considerado e a taxa de crescimento da planta inteira. HOLT *et alii* (1975) propuseram que a taxa de crescimento de um órgão qualquer seja estimada através da taxa de translocação de produtos fotossintetizados para o órgão considerado. Embora conceitualmente a proposição de HOLT *et alii* (1975) seja correta, poucas são as informações disponíveis a respeito da translocação para os diversos órgãos da planta. Este fato justifica a utilização das relações alométricas descrita por RICHARDS (1969) nos modelos de crescimento proposto por CURRY e CHEN (1971), JAGER (1974), VANDERLIP e ARKIN (1977), ACOCK *et alii* (1979), ENGLISH *et alii* (1979) e HODGES *et alii* (1979), embora se reconheça que tal relação seja específica para a variedade considerada e as condições ambientais existentes durante sua determinação (LOOMIS *et alii*, 1979).

Uma vez escolhidos os modelos para a fotossíntese, respiração e distribuição dos fotossintetizados, pode-se elaborar um modelo de crescimento e desenvolvimento de uma cultura. É evidente que o conjunto de equações que constituem o modelo incluem uma série de fatores e constantes que devem ser determinados experimentalmente. Entretanto, os processos fisiológicos ocorrem simultaneamente e com interações, tornando-se difícil a determinação dos fatores e constante. Normalmente, tais parâmetros são obtidos comparando-se os resultados do modelo com aqueles de análise de crescimento. Faz-se, então, um ajuste do modelo até se conseguir os resultados desejados.

Inúmeros são os modelos de crescimento e desenvolvimento disponíveis na literatura e sem a intenção de listar todos, pode-se citar os seguintes: para a cultura de milho - de WIT *et alii* (1970), CURRY e CHEN (1971), DUNCAN (1973, 1975), SPLINTER (1974), MACKINNON *et alii* (1978); girassol - ENGLISH *et alii* (1979); sorgo - VANDERLIP e ARKIN (1977), HODGES *et alii* (1979); soja - HEILMAN *et alii* (1977), WANN e RAPER (1979); trigo - RICKMAN *et alii* (1975), HODGES e KANEMASU (1977); beterraba açucareira -

FICK *et alii* (1973, 1975); alfafa - HOLT *et alii* (1975); algodão - BAKER *et alii* (1972); crisântemo - CHARLES EDWARDS e ACOCK (1977), ACOCK *et alii* (1970); fumo - WANN *et alii* (1978); pastagem - PALTRIDGE (1970), ROSE *et alii* (1972), VAN KEULEN *et alii* (1975).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Campo Experimental

Os trabalhos foram realizados em uma área experimental de 1,5 ha localizada na Estação Experimental de Piracicaba - Instituto Agronômico do Estado de São Paulo. Utilizou-se para este estudo a variedade de cana - de-açúcar NA 56-79.

A cultura foi plantada em 28/03/1978 com as linhas de plantio orientadas no sentido leste-oeste, em espaçamento entre ruas de 1,40 m.

O solo da área experimental foi classificado como latossol vermelho-amarelo orto. A análise química de fertilidade apresentou os seguintes resultados: 1,8% de matéria orgânica; pH igual a 5,2; 0,2, 2,6 e 0,6 e.mg/100 ml de TFSA de Al^{+++} , Ca^{++} e Mg^{++} , respectivamente; 44 e 9 μ g/ml de TFSA de K e P, respectivamente.

A cultura recebeu os tratos culturais recomendados e a adubação de plantio consistiu da aplicação de 150 kg de P_2O_5 /ha, 280 kg de K_2O /ha, 40 kg de N/ha e 240 kg de torta de mamona/ha. A adubação de cobertura foi de 240 kg de N/ha.

Os dados climáticos foram obtidos em um Posto Meteorológico localizado a 100 metros do ensaio.

A disponibilidade de água no solo foi calculada levando-se em conta os primeiros 90 cm de profundidade, através das seguintes equações:

$$AD_a = (U_a - U_{pmp}) h \quad e \quad (1)$$

$$AD_{max} = (U_{cc} - U_{pmp}) h \quad , \quad (2)$$

onde AD_a é a água disponível atual em mm, U_a o conteúdo de água no solo em $cm^3 \cdot cm^{-3}$, U_{pmp} o conteúdo de água no solo no ponto de murchamento permanente em $cm^3 \cdot cm^{-3}$, U_{cc} o conteúdo de água na capacidade de campo em $cm^3 \cdot cm^{-3}$, h a profundidade considerada do solo em mm e AD_{max} a água disponível máxima em mm.

Os valores do conteúdo de água no solo foram obtidos através de coletas semanais nas profundidades de 10, 30, 50, 70 e 90 cm. Nessas amostras, com três repetições cada uma, determinou-se o peso úmido e o peso seco, após secagem a 105°C durante 24 horas.

Os valores do conteúdo de água no ponto de murchamento permanente e na capacidade de campo foram obtidos, para cada profundidade considerada, de curvas de retenção de água elaboradas para este solo, pelo método da placa de pressão de Richards para amostras indeformadas. A água disponível durante o período de cultivo é apresentada na fig. 1.

4.2. Balanço de Radiação Solar de Ondas Curtas (285-2800 nm)

A densidade de fluxo de radiação solar global de ondas curtas (I) que atinge a superfície da cultura foi medida com um piranômetro espectral da Eppley Laboratory Inc., instalado a aproximadamente 100 metros da cultura em estudo. As medidas foram feitas com uma hemisfera WG-7, permitindo a passagem de radiação em comprimentos de ondas de 285 até 2800 nm. Os sinais emitidos foram registrados continuamente por um potenciômetro da Kipp e Zonen, modelo BD-7.

As densidades de fluxo de radiação global de ondas curtas e infra-vermelho próxima (comprimento de onda entre 700 e 2800 nm), refletidas pela superfície da cultura — R e R_i , respectivamente — foram medidas com dois tubos solarímetros ELTEC-JE, posicionados a 1,5 metros acima da superfície da cultura e com seus elementos sensores voltados para baixo. O elemento ativo destes solarímetros possuem 200 junções de cobre-constantan e uma área útil de 60 cm^2 , com uma sensibilidade espectral entre 300 a 2700 nm.

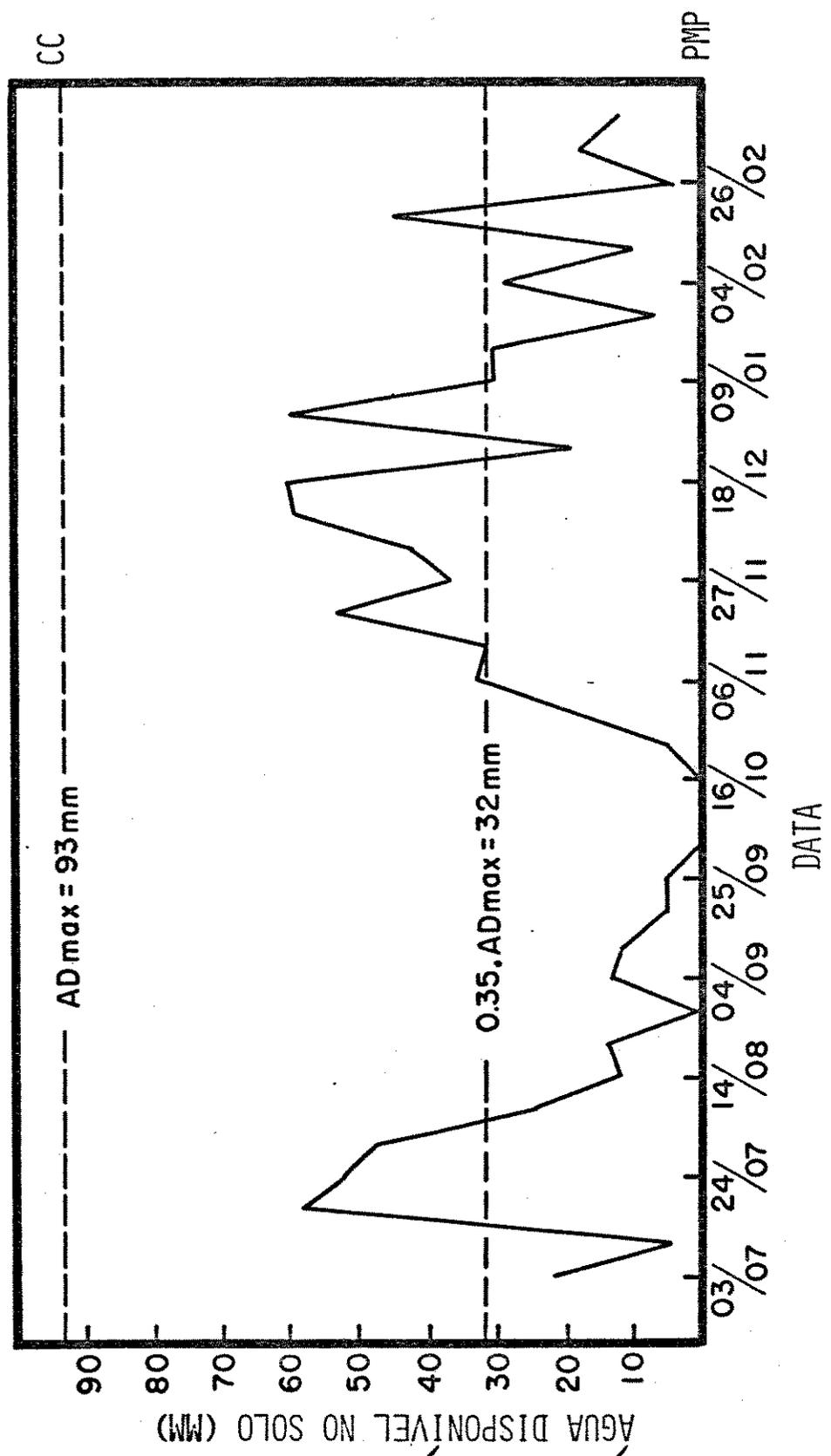


FIG. 1. Disponibilidade hídrica, a cada 7 dias, considerando-se os níveis de retenção máxima. Piracicaba - SP - 1978/1979.

O sensor destinado a medir a densidade de fluxo de radiação solar refletida na região da infra-vermelho próxima (R_i) foi coberto com filtros de gelatina Kodak-88-A permitindo, segundo as especificações do fabricante, somente a passagem de radiação com comprimentos de ondas acima de 700 nm. Conseqüentemente o sensor, coberto com filtros, mediu a radiação com comprimentos de ondas entre 700 e 2700 nm.

As medidas das densidades de fluxo de radiação solar, global e infra-vermelho próxima, transmitidas — T e T_i respectivamente — através do dossel vegetativo, até o nível do solo, foram feitas com seis tubos solarímetros ELTEC-JE. Estes sensores foram dispostos a 10 cm do solo e distribuídos de forma a amostrarem toda a área compreendida entre uma linha de plantio e a outra. Três destes tubos mediam a radiação global transmitida, e os outros três, cobertos com filtros de gelatina Kodak 88-A, mediam a radiação solar em comprimentos de ondas acima de 700 nm.

Os sinais emitidos pelos tubos solarímetros foram medidos com um potenciômetro da Leeds e Northrup, modelo 8690-2, acoplado a uma chave seletora de oito canais.

Todas as observações foram feitas em intervalos de 10 minutos, no período compreendido entre as 10:00 e 17:00 horas, em um dia claro (10/04/1979), na fase em que a cultura possuía seu índice de área foliar máximo.

A radiação fotossinteticamente ativa (I_f) é aquela compreendida entre 400 e 700 nm. Assim, a utilização de sensores com e sem filtros permitiram, por diferença, estimar aproximadamente os valores da radiação fotossinteticamente ativa refletida e transmitida pelo dossel vegetativo.

A densidade de fluxo de radiação solar incidente na superfície da cultura, compreendida entre 700 e 3000 nm e abaixo de 700 nm foram estimadas como sendo, respectivamente, 54 e 46% da radiação solar global de ondas curtas, baseando-se nos trabalhos de SANTOS *et alii* (1976) e DOMENACK (1980):

$$I_f = 0,46 \cdot I \quad e \quad (3)$$

$$I_i = 0,54 \cdot I \quad , \quad (4)$$

onde I_f é a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, I a densidade de fluxo de radiação global de ondas curtas em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ e I_i a densidade de fluxo de radiação infra-vermelho próxima em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.

Considerando o albedo da superfície foliar igual para as radiações direta e difusa, o balanço de radiação global de ondas curtas (I^*) pode ser descrito por:

$$I^* = I - R \quad , \quad (5)$$

onde I^* é a densidade de fluxo de radiação solar global líquida em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ e R a densidade de fluxo de radiação global refletida em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.

Sendo $\rho = R/I$, por definição, a expressão (5) pode ser representada por,

$$I^* = I (1 - \rho) \quad , \quad (6)$$

onde ρ é o albedo da superfície.

De maneira semelhante, pode-se ter,

$$I_i^* = I_i - R_i \quad \text{ou} \quad (7)$$

$$I_i^* = I_i (1 - \rho_i) \quad , \quad (8)$$

onde I_i^* é a densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima líquida em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, I_i a densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima incidente em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, R_i a densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima refletida em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ e ρ_i a refletividade da copa para os referidos comprimentos de onda.

Portanto, as equações (5) e (7) representam os balanços de radiação solar global e infra-vermelho próxima, considerando-se conjuntamente as radiações direta e difusa.

O balanço de radiação solar fotossinteticamente ativa pode ser estimado pela seguinte equação:

$$I_f^* = I^* - I_i^* \quad , \quad (9)$$

onde I_f^* é a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa líquida em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.

A estimativa da radiação fotossinteticamente ativa refletida (R_f) em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ é dada por:

$$R_f = R - R_i \quad , \quad (10)$$

Analogamente, a radiação fotossinteticamente ativa transmitida (T_f) através do dossel vegetativo em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ é dada por:

$$T_f = T - T_i \quad , \quad (11)$$

onde T é a radiação solar global transmitida e T_i a radiação infra-vermelho próxima transmitida.

Conhecendo-se as densidades de fluxo de radiação solar incidente, refletida e transmitida, estimou-se a fração absorvida, pelas seguintes equações:

$$A = I - (R + T) \quad , \quad (12)$$

$$A_i = I_i - (R_i - T_i) \quad e \quad (13)$$

$$A_f = A - A_i \quad , \quad (14)$$

onde A é a radiação solar global absorvida pelo dossel vegetativo em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, A_i a radiação infra-vermelho próxima absorvida em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ e A_f a radiação fotossinteticamente ativa absorvida em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.

Os valores dos coeficientes de reflexão (ρ), transmissão (τ) e absorção (α) foram definidos pelas seguintes equações:

$$\rho = R/I \cdot 100 \quad , \quad (15)$$

$$\tau = T/I^* \cdot 100 \quad e \quad (16)$$

$$\alpha = A/I^* \cdot 100 \quad . \quad (17)$$

A atenuação da radiação solar através do dossel vegetativo foi obtida pelo modelo proposto por MONSI e SAEKI (1953), análogo à lei de BEER, que descreve a transmissão de um raio de luz em um meio homogêneo, ou seja:

$$\frac{I_z}{I^*} = \exp (-K \cdot IAF) \quad , \quad (18)$$

onde I_z representa a densidade de fluxo de radiação solar que chega a um plano horizontal (z) abaixo de uma superfície foliar com um índice IAF e K o coeficiente de extinção da radiação solar.

Este modelo é aplicável às radiações global, fotossinteticamente ativa e infra-vermelho próxima.

4.3. Análise Quantitativa do Crescimento

A análise de crescimento é um método para estimar a produção fotossintética líquida, possibilitando estudos de distribuição da matéria seca produzida entre as diversas partes das plantas (KVET *et alii*, 1971). Neste tipo de análise, o crescimento é definido como o incremento do peso da matéria seca em intervalos consecutivos de tempo. Dois tipos de determinações são necessárias para sua execução: o peso da matéria seca (MS) total ou de suas partes e a dimensão do aparelho fotossintetizador, ambos, em intervalos consecutivos de tempo, durante o período de crescimento das plantas.

As variações no peso de MS e na área foliar (AF) com o tempo são utilizadas para a estimativa de vários índices fisiológicos.

No presente trabalho, a estimativa do peso de MS e da AF foram obtidas através de amostras compostas de plantas coletadas em intervalos de 21 dias, a partir do 86º dia após o plantio. Cada amostra, do tipo destrutiva, foi constituída por todas plantas — cortadas ao nível do solo — contidas em 2 metros de linha de plantio, com seis repetições. Neste caso, cada amostra correspondia a 2,8 m² de terreno. Em seguida, no laboratório de campo, efetuaram-se as medidas necessárias.

Como o material colhido representava um volume grande para a secagem, nas estufas disponíveis, adotou-se o critério de sub-amostras. No laboratório, separaram-se as folhas e os colmos com bainhas e determinou-se o peso da matéria fresca (MF) de cada amostra separadamente. Em seguida, de cada amostra, retirou-se uma sub-amostra de 20% e determinou-se o peso de MF de cada uma. Estas sub-amostras foram submetidas a secagem em estufas com circulação forçada de ar à temperatura de 70°C, por um período de 7 dias consecutivos. Após a secagem, determinou-se o peso de MS de cada sub-amostra.

O peso de MS dos colmos de cada amostra (C) em g . m⁻² de terreno foi estimado através do produto do peso de MF da amostra (C_f) pela razão entre o peso de MS (C_s) e o peso de MF da sub-amostra (C_{fs}), ou seja,

$$C = C_f \frac{C_s}{C_{fs}} \quad (19)$$

O peso de MS das folhas das amostras foi estimado da mesma maneira, ou seja,

$$F = F_f \frac{F_s}{F_{fs}} \quad (20)$$

onde F é o peso de MS das folhas das amostras em g . m⁻² de terreno, F_f o peso de MF das folhas da amostra em g . m⁻² de terreno, F_s o peso de MS das folhas da sub-amostra em g e F_{fs} o peso de MF das folhas da sub-amostra em g.

O peso de MS total (P) foi estimado pela soma dos pesos secos das folhas mais colmos, ou $P = C + F$.

A área foliar da amostra foi determinada pelo produto do peso de MS das folhas e área foliar específica (AFE), dada pela relação área foliar/peso de MS das folhas. Para determinar a AFE, colheram-se 20 plantas adicionais e estimou-se a sua área foliar total pela soma das áreas foliares individuais. A área individual foi estimada pelo produto: comprimento do limbo x maior largura do limbo x 0,7, onde o fator 0,7 foi obtido através de comparações com valores de área foliar obtidos com um integrador eletrônico. Em seguida, as folhas das 20 plantas foram submetidas a secagem em estufa com circulação forçada de ar a 70°C, durante 7 dias. A AF de cada amostra foi estimada pela seguinte equação:

$$AF = F \frac{AF_{20}}{F_{20}}, \quad (21)$$

onde AF é a área foliar da amostra em dm^2 de folhas $\cdot \text{m}^{-2}$ de terreno, AF_{20} a área foliar de 20 plantas em dm^2 , F o peso de MS das folhas da amostra em $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ de terreno e F_{20} o peso de MS das folhas das 20 plantas em g.

Na análise de crescimento são utilizados basicamente dois processos para a estimativa dos índices fisiológicos: o integral e o diferencial. No processo integral, define-se os índices fisiológicos com valores médios correspondentes a duas coletas consecutivas (WATSON, 1952). RADFORD (1967), por sua vez, discute a alternativa do uso do processo diferencial, que consiste em procurar funções matemáticas que descrevam as variações do peso da matéria seca da planta e da dimensão do aparelho fotossintetizador, em função do tempo. Neste caso, os índices fisiológicos são calculados a partir dessas funções de crescimento, obtendo-se valores instantâneos.

Neste trabalho, adotou-se o processo diferencial, baseando-se nos seguintes fatos (RADFORD, 1967; KVET *et alii*, 1971): (i) não há necessidade de se assumir que o crescimento em si seja de um determinado tipo, mas apenas que a função se ajuste à variação da biomassa e da AF, em

função do tempo; (ii) pequenos erros de amostragem são ajustados estatisticamente; (iii) as amostragens não necessitam ser realizadas em intervalos regulares e em grande frequência; (iv) um grande número de informações pode ser representado por uma única expressão matemática.

A variação do peso da matéria seca total, peso da matéria seca das folhas e do índice de área foliar (IAF), com o tempo, foram ajustadas à função logística,

$$F(XT) = \frac{A}{1 + \exp(-n - p.XT)}, \quad (22)$$

onde A, n e p são parâmetros da equação e $XT = (t_i - t_1)/(t_2 - t_1)$, considerando que t_i é o tempo em que se deseja estimar o valor desconhecido e $t_2 - t_1$ o intervalo entre duas coletas.

Os dados obtidos experimentalmente foram ajustados a essa função através do método de regressão assintótica proposto por STEVENS (1951).

Os índices fisiológicos determinados foram:

(i) Taxa de Crescimento da Cultura (TCC) - peso de MS acumulada por unidade de área de terreno num dado instante, em g de MS . m⁻² de terreno . dia⁻¹. Para a determinação dos valores instantâneos da TCC empregou-se a derivada de 1ª ordem em relação ao tempo (RADFORD, 1967), dada por:

$$TCC = \frac{dP}{dt} = \frac{-P_{\max} B \exp(A + B.t_i)}{[1 + \exp(A + B.t_i)]^2}, \quad (23)$$

onde P_{\max} é o peso de MS total máximo atingido em g de MS . m⁻² de terreno, $A = (p.t_i/t_2 - t_1) - n$ e $B = p/t_2 - t_1$.

(ii) Taxa de Crescimento Relativo (TCR) - é o acúmulo do peso de MS das plantas por unidade de seu próprio peso, num dado instante, em g de MS . g⁻¹ de MS . dia⁻¹. Para determinar os valores instantâneos da TCR empregou-se também a equação proposta por RADFORD (1967):

$$TCR = \frac{1}{P} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{B \exp(A + B \cdot t_i)}{1 + \exp(A + B \cdot t_i)}, \quad (24)$$

onde os símbolos já foram definidos anteriormente.

(iii) Índice de Área Foliar (IAF) - área foliar (considerando apenas uma página) por unidade de área de terreno em m^2 de folhas $\cdot m^{-2}$ de terreno.

(iv) Taxa de Assimilação Líquida (TAL) - é a variação do peso de MS acumulada por unidade de área foliar num dado instante, em g de MS $\cdot m^{-2}$ de folhas $\cdot dia^{-1}$. Para estimar os valores instantâneos da TAL foi empregada a seguinte equação (RADFORD, 1967):

$$TAL = \frac{1}{IAF} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{1 + \exp(A_1 + B_1 \cdot t_i)}{IAF_{max}} \cdot \frac{-P_{max} \cdot B \cdot \exp(A + B \cdot t_i)}{[1 + \exp(A + B \cdot t_i)]^2}, \quad (25)$$

onde A_1 e B_1 são os coeficientes da equação para IAF e os outros símbolos têm os mesmos significados que os já definidos.

(v) Razão de Área Foliar (RAF) - relação entre a área foliar (AF) e o peso de MS total (P) da cultura num dado instante, em dm^2 folhas/g de MS total:

$$RAF = \frac{AF}{P} \quad (26)$$

(vi) Eficiência Fotossintética (EF) - relação entre a energia acumulada pela matéria seca (1 grama de MS equivale a 4200 calorias) e a energia disponível (radiação solar) num período considerado,

$$EF (\%) = \frac{\overline{TCC} \times \Delta H}{I} \times 100, \quad (27)$$

onde \overline{TCC} é a taxa de crescimento média da cultura para um período de 30 dias, ΔH o valor energético de 1 grama de matéria seca e I a densidade de fluxo de radiação solar média para um período de 30 dias.

4.4. Desenvolvimento Conceitual do Modelo Matemático-Fisiológico

O modelo matemático para a simulação do acúmulo de MS de cana-de-açúcar foi desenvolvido baseando-se nos conhecimentos das interações entre os processos fisiológicos e o ambiente. Consiste de uma série de equações que descrevem quantitativamente o comportamento fisiológico das plantas em resposta à variação das condições ambientais. Não foi intenção, no desenvolvimento desse modelo, descrever detalhadamente os processos fisiológicos, mas procurar simular adequadamente o acúmulo de MS. A maior parte das estimativas dos fatores e constantes das equações que compõem o modelo foram obtidos a partir da adaptação de resultados disponíveis na literatura.

O ganho energético pelo sistema foi representado pelo acúmulo da energia fixada em forma de CH_2O , através da conversão fotossintética de fração da radiação solar absorvida pelas folhas. Da fração da radiação solar que é interceptada pelas folhas certas quantidades são absorvida, refletida e transmitida. Estas frações foram determinadas experimentalmente neste trabalho.

A taxa de fotossíntese bruta foi estimada a partir da resposta da taxa de fotossíntese à densidade de fluxo de radiação solar incidente, em cada camada de folhas do dossel. Para tanto, conjugou-se um modelo de distribuição da radiação solar com uma equação que relaciona taxa de fotossíntese:radiação solar em cada camada de folhas.

A perda de energia pelo sistema foi representada pela respiração. Esta foi considerada como composta por dois componentes, isto é, a respiração de crescimento e a de manutenção (McCREE, 1970, 1974).

O acúmulo de MS foi então estimada pelo balanço de ganhos e perdas de energia, em forma de MS, em bases diárias.

Tanto para as estimativas da taxa de fotossíntese como de respiração foram considerados os efeitos das condições meteorológicas e fisiológicas das plantas sobre esses processos.

A estimativa das taxas de fotossíntese e respiração, em bases diárias, foi feita pelo produto da taxa máxima potencial por uma série de fa-

tores de ajustamentos, que variam de 0,0 a 1,0. Os fatores de ajustamentos representam uma estimativa do efeito que cada condição meteorológica e/ou estado fisiológico da planta exercem sobre estes processos (JAGER, 1974; JAGER e KING, 1974; HOLT *et alii*, 1975).

Somente em condições ótimas, a taxa desses processos pode atingir o valor máximo potencial. Quando qualquer fator ambiental (temperatura, radiação solar, disponibilidade de água no solo e de nutrientes, etc.) ou estado fisiológico (idade da planta e de folhas, maturação, etc.) que tem influência sobre um processo fisiológico estiver em nível abaixo do ótimo, a sua taxa será reduzida proporcionalmente ao grau da limitação. Quando mais que um elemento estiver abaixo do ótimo, o decréscimo será proporcional ao produto dos fatores de ajustamentos correspondentes, isto é,

$$E_a = E_{\max} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdots f_j$$

sendo $0 \leq f_j \leq 1$,

onde E_a é a taxa atual do processo fisiológico considerado, E_{\max} é a taxa máxima potencial e f_j é o fator de ajustamento correspondente a um elemento j .

A taxa máxima possível é expressa em termos relativos, isto é, em g de MS, produzida ou respirada, por g de MS do órgão envolvido por dia. Essa taxa relativa é posteriormente multiplicada pelo peso total do órgão por m^2 de terreno. O resultado final é, portanto, expresso em g de MS $\cdot m^{-2}$ de terreno $\cdot dia^{-1}$.

Para simular o crescimento da cultura, é necessário conhecer a relação entre o incremento diário de MS total e o incremento de área foliar. Esta relação é definida, neste trabalho, pela razão entre as taxas de crescimento das folhas (TCF) e da cultura (TCC) (RICHARDS, 1969; MONSI e MURATA, 1970; KVET *et alii*, 1971). A TCF e a TCC foram determinadas experimentalmente neste trabalho.

4.4.1. Fundamento matemático geral do modelo

O crescimento de uma comunidade vegetal, quando definido pe-

lo acúmulo de MS com o tempo, \bar{e} o resultado de todas interações das plantas com o ambiente. O acúmulo de MS (ΔP) de uma comunidade de peso P_1 no tempo t_1 , que em condições favoráveis cresce, passa a ter um peso P_2 no tempo t_2 , \bar{e} dado por:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (28)$$

A taxa de fotossíntese bruta da comunidade por unidade de área de terreno por dia (FOT_b) \bar{e} dada pela seguinte equação:

$$FOT_b = FOT_d \cdot F \quad (29)$$

onde FOT_d \bar{e} a taxa de fotossíntese bruta por unidade de área ou peso foliar e F \bar{e} a dimensão do aparelho fotossintetizador por unidade de área de terreno.

O acúmulo de MS (ΔP) pode ser estimado pelo balanço entre os ganhos devido a FOT_b e as perdas devido a respiração total (R_t), isto \bar{e} :

$$\Delta P = FOT_b - R_t \quad (30)$$

A FOT_b e R_t são controladas pelas condições ambientais e pelo estado fisiológico das plantas.

Para estimar a FOT_b \bar{e} necessário conhecer a quantidade de folhas presentes a cada intervalo de tempo (veja eq. 29). Ou seja, deve-se saber que fração da MS produzida em cada intervalo de tempo \bar{e} destinada para a formação e expansão do aparelho fotossintetizador e, portanto, qual será a nova dimensão deste sistema. O material fotossintetizado em cada Δt que \bar{e} destinado ao sistema fotossintetizador \bar{e} definido, então, por um fator de distribuição. Neste trabalho, o fator de distribuição (DF) \bar{e} definido pela razão entre o incremento diário de MS nas folhas (ΔF) e o incremento de MS total diário (ΔP), isto \bar{e} :

$$DF = \frac{\Delta F}{\Delta P} \quad (31)$$

Uma das maneiras de se determinar DF é através da técnica da análise de crescimento (RICHARDS, 1969; MONSI e MURATA, 1970; KVET *et alii*, 1971). Como o incremento de MS nada mais é que a taxa de crescimento, o DF utilizado em relação à idade da cultura em dias é:

$$DF = \frac{TCF}{TCC} \quad (32)$$

onde TCF é a taxa de crescimento das folhas em g de MS $\cdot m^{-2}$ de terreno $\cdot dia^{-1}$ e TCC a taxa de crescimento da cultura em g de MS $\cdot m^{-2}$ de terreno $\cdot dia^{-1}$.

Desta forma, a nova dimensão do aparelho fotossintetizador em cada intervalo de tempo (Δt) é dada por:

$$F_i = (\Delta P_{i-1} \cdot DF) + F_{i-1} \quad (33)$$

onde F_i é a dimensão do aparelho fotossintetizador no i -ésimo intervalo de tempo, ΔP_{i-1} é o acúmulo de MS no intervalo $(i-1)$ e F_{i-1} é a dimensão do aparelho fotossintetizador no intervalo $(i-1)$.

JAGER (1974) sugere que um modelo instantâneo é a resolução matemática de uma equação que descreve um processo fisiológico num dado instante, por exemplo, a solução da equação (29). Este mesmo autor também sugere que um modelo dinâmico é o arranjo seqüencial de modelos instantâneos, de forma a traçar o desenvolvimento de um sistema. Assim, a estimativa da quantidade total de MS acumulada até um tempo t_n qualquer é encontrada integrando-se todas as quantidades estimadas pelos modelos instantâneos em cada intervalo de tempo (Δt), como é indicado a seguir:

$$P_n = P_0 + \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (34)$$

onde P_n é o peso total da MS acumulada até o tempo t_n , P_0 é o peso de MS

no tempo t_0 e ΔP_i é o peso de MS líquida produzida no i -ésimo intervalo de tempo.

A fig. (2) ilustra esquematicamente as bases do modelo de crescimento.

4.4.2. Equação para estimar a taxa de fotossíntese bruta diária

A taxa de fotossíntese bruta diária (FOT_b) em g de $CH_2O \cdot m^{-2}$ de terreno $\cdot dia^{-1}$ foi estimada pela seguinte equação:

$$FOT_b = FOT_{max,d} \cdot F \cdot f(I) \cdot f(IAF) \cdot f(M) \cdot f(IF) \cdot f(T) \cdot f(DH) \quad , \quad (35)$$

onde FOT_b é a produção fotossintética bruta em g de $CH_2O \cdot m^{-2}$ de terreno $\cdot dia^{-1}$, $FOT_{max,d}$ a taxa de fotossíntese máxima em g de $CH_2O \cdot g^{-1}$ de MS de folhas $\cdot dia^{-1}$, F o peso de MS das folhas em g de MS $\cdot m^{-2}$ de terreno, $f(I)$ o fator de ajustamento densidade de fluxo de radiação solar global, $f(IAF)$ o fator de ajustamento índice de área foliar, $f(M)$ o fator de ajustamento idade da planta, $f(IF)$ o fator de ajustamento idade da folha, $f(T)$ o fator de ajustamento temperatura do ar e $f(DH)$ o fator de ajustamento disponibilidade hídrica.

4.4.2.1. Estimativa dos parâmetros e fatores de ajustamentos da equação para a estimativa de FOT_b

Taxa de fotossíntese bruta máxima diária, $FOT_{max,d}$

Freqüentemente utiliza-se a equação que descreve a hipérbole retangular para relacionar a variação da taxa de fotossíntese em função da densidade de fluxo de radiação solar (SAEKI, 1960; MONTEITH, 1965; THORNLEY, 1976). Para este modelo, a curva de resposta associando esses dois elementos foi assim ajustada, adaptando-se os valores medidos por BULL (1969, 1971) em folhas individuais de plantas jovens de cana-de-açúcar. Os valores apresentados pelo autor, expressos em mg de $CO_2 \cdot dm^{-2}$ de área foliar $\cdot h^{-1}$, foram transformados para g de $CH_2O \cdot dm^{-2} \cdot h^{-1}$, adotando-se o seguinte procedimento:

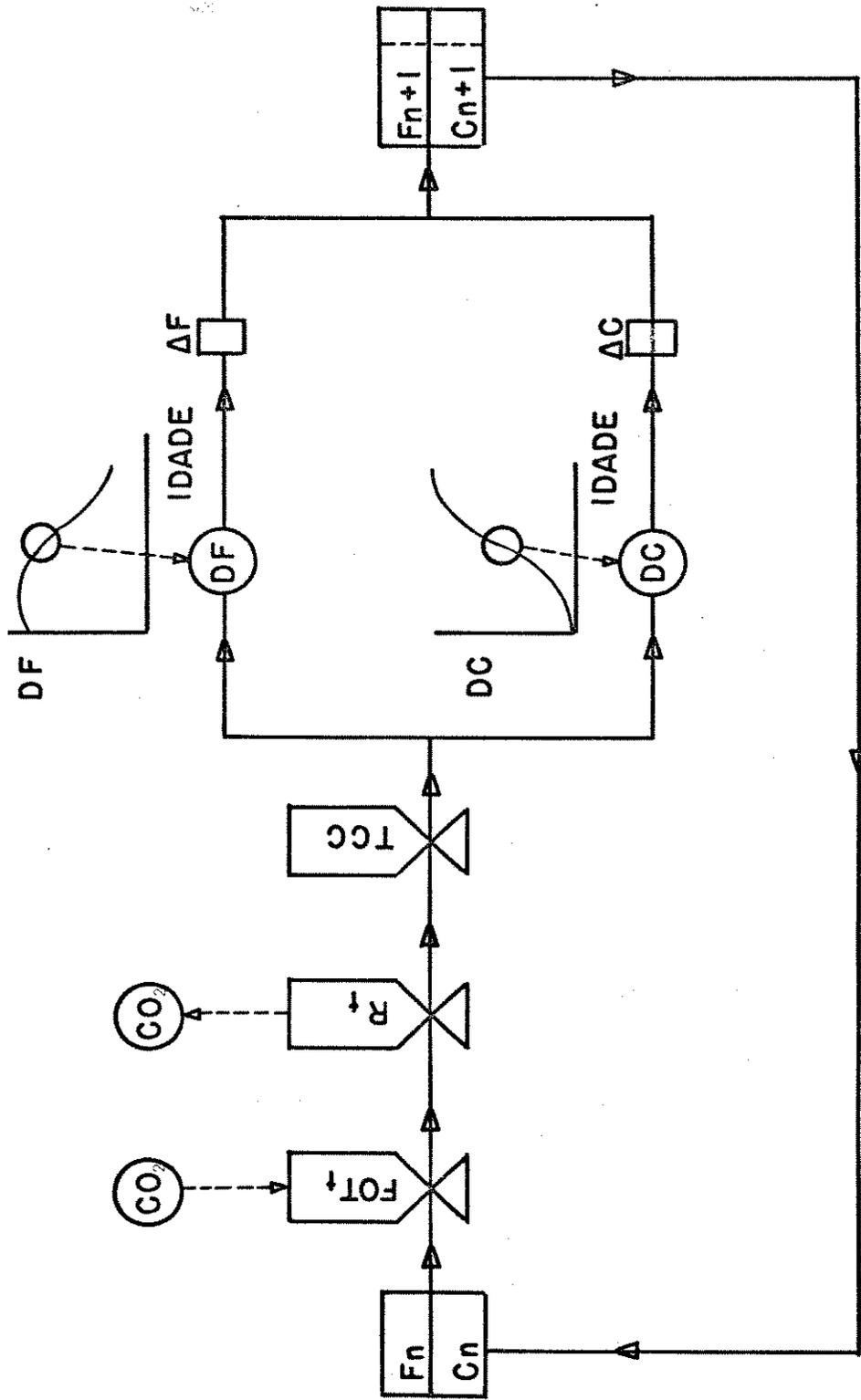


FIG. 2. Esquema simplificado do modelo de produção de matéria seca em cana-de-açúcar, onde F_n e C_n representam a dimensão do aparelho fotossintetizador e do colmo no tempo t_n , F_{n+1} e C_{n+1} representam a dimensão do aparelho fotossintetizador e do colmo no tempo t_{n+1} ; DF e DC representam os fatores de distribuição de matéria seca para as folhas e colmos, respectivamente; TCC a taxa de crescimento da cultura; FOT_b a taxa de fotosíntese bruta e R_t a taxa de respiração total da cultura.

$$\begin{aligned} \text{taxa de fotossíntese em} & \frac{\text{mg CO}_2}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}} \cdot \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \cdot \frac{33 \text{ g CH}_2\text{O}}{44 \text{ g CO}_2} = \\ \text{taxa de fotossíntese em} & \frac{\text{g CH}_2\text{O}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}} \cdot 0,068 \end{aligned}$$

A fig. (3) representa graficamente a curva de resposta taxa de fotossíntese: densidade de fluxo de radiação solar, a qual foi ajustada à seguinte equação:

$$FOT_{\text{max},h} = \frac{9,474 \cdot 10^{-2} \cdot I}{1 + 8,207 \cdot 10^{-1} \cdot I} \quad (36)$$

onde $FOT_{\text{max},h}$ é a taxa de fotossíntese bruta máxima horária em folhas individuais em $\text{g de CH}_2\text{O} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ em função da densidade de fluxo de radiação solar I , em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.

Por ser tratar do estabelecimento de modelo, cujos resultados teóricos e práticos serão comparados posteriormente, os parâmetros da eq. (36) foram obtidos a partir dos trabalhos de BULL (1969, 1971), embora na literatura haja uma grande variação desses valores.

A taxa de fotossíntese bruta máxima diária ($FOT_{\text{max},d}$) em folhas individuais de cana-de-açúcar foi estimada combinando-se a eq. (36) com a variação horária da densidade de fluxo de radiação solar máxima incidente no período de um dia (SAEKI, 1960) admitindo-se um total diário de $700 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$. Como a intensidade de radiação solar incidente sobre uma superfície plana horizontal varia com a inclinação do Sol, a taxa de fotossíntese, que é uma função de I , também varia. Então, a $FOT_{\text{max},d}$ foi estimada pela somatória das taxas de fotossíntese horárias, ou seja:

$$FOT_{\text{max},d} = \sum_{i=1}^h FOT_{\text{max},h} = 0,554 \text{ g CH}_2\text{O} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$$

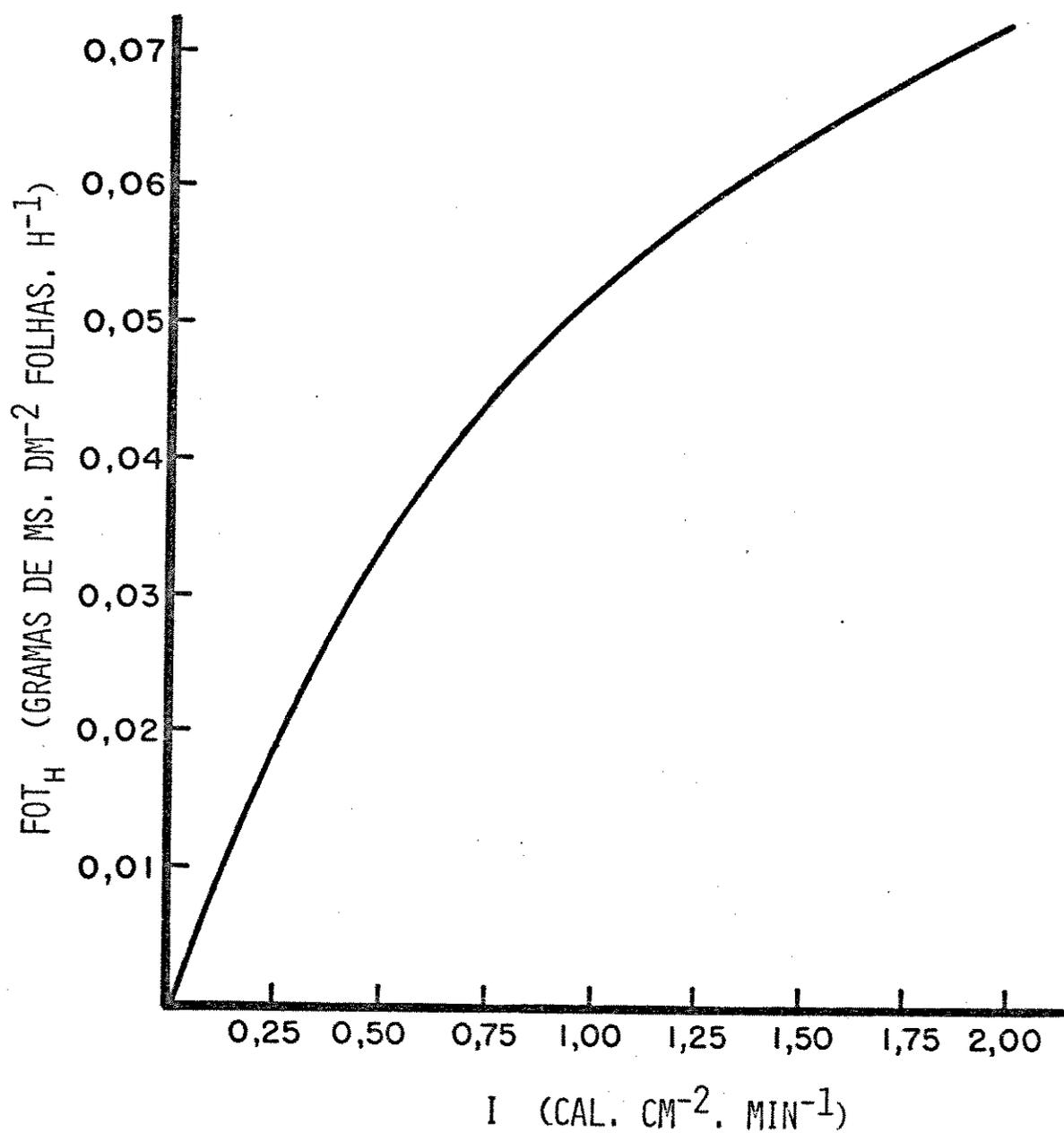


FIG. 3. Resposta da taxa de fotossíntese horária (FOT_h) em função da densidade de fluxo de radiação solar (I), em folhas individuais de cana-de-açúcar.

Para expressar a $FOT_{max,d}$ em termos relativos, isto é, em g de CH_2O produzidos por g de MS de folhas por dia, multiplica-se a $FOT_{max,d}$ pela área foliar específica: $0,554 \text{ g de } CH_2O \cdot dm^{-2} \cdot dia^{-1} \times AFE$ em $dm^2 \cdot g^{-1}$ de MS de folhas.

Fator de ajustamento densidade de fluxo de radiação solar, $f(I)$

O fator de ajustamento densidade de fluxo de radiação solar incidente sobre as folhas de uma comunidade vegetal é definido pela razão entre a taxa de fotossíntese diária (FOT_d) para um determinado nível de radiação solar e o valor da $FOT_{max,d}$ estimado para o nível máximo de radiação solar,

$$f(I) = \frac{FOT_d}{FOT_{max,d}} \quad (37)$$

A exemplo do procedimento adotado para estimar a $FOT_{max,d}$, pela combinação da eq. (36) com a variação da radiação solar máxima, estimou-se a taxa de fotossíntese diária em níveis mais baixos de radiação solar incidente (SAEKI, 1960). Os resultados encontrados são apresentados na fig. (4) e ajustado à equação da hipérbole retangular seguinte:

$$FOT_d = \frac{1,5622 \cdot 10^{-3} \cdot I (1-\rho)}{1 + 1,4054 \cdot 10^{-3} \cdot I (1-\rho)}, \quad (38)$$

onde FOT_d é a taxa de fotossíntese bruta em g de $CH_2O \cdot dm^{-2}$ de folhas $\cdot dia^{-1}$, I a densidade de fluxo de radiação solar global em $cal \cdot cm^{-2} \cdot dia^{-1}$ e ρ o coeficiente médio de reflexão das folhas.

Assim, substituindo-se FOT_d que aparece na eq. (37) pelo valor definido na eq. (38), e utilizando-se o valor $0,554 \text{ g de } CH_2O \cdot dm^{-2} \cdot dia^{-1}$ para $FOT_{max,d}$, tem-se que:

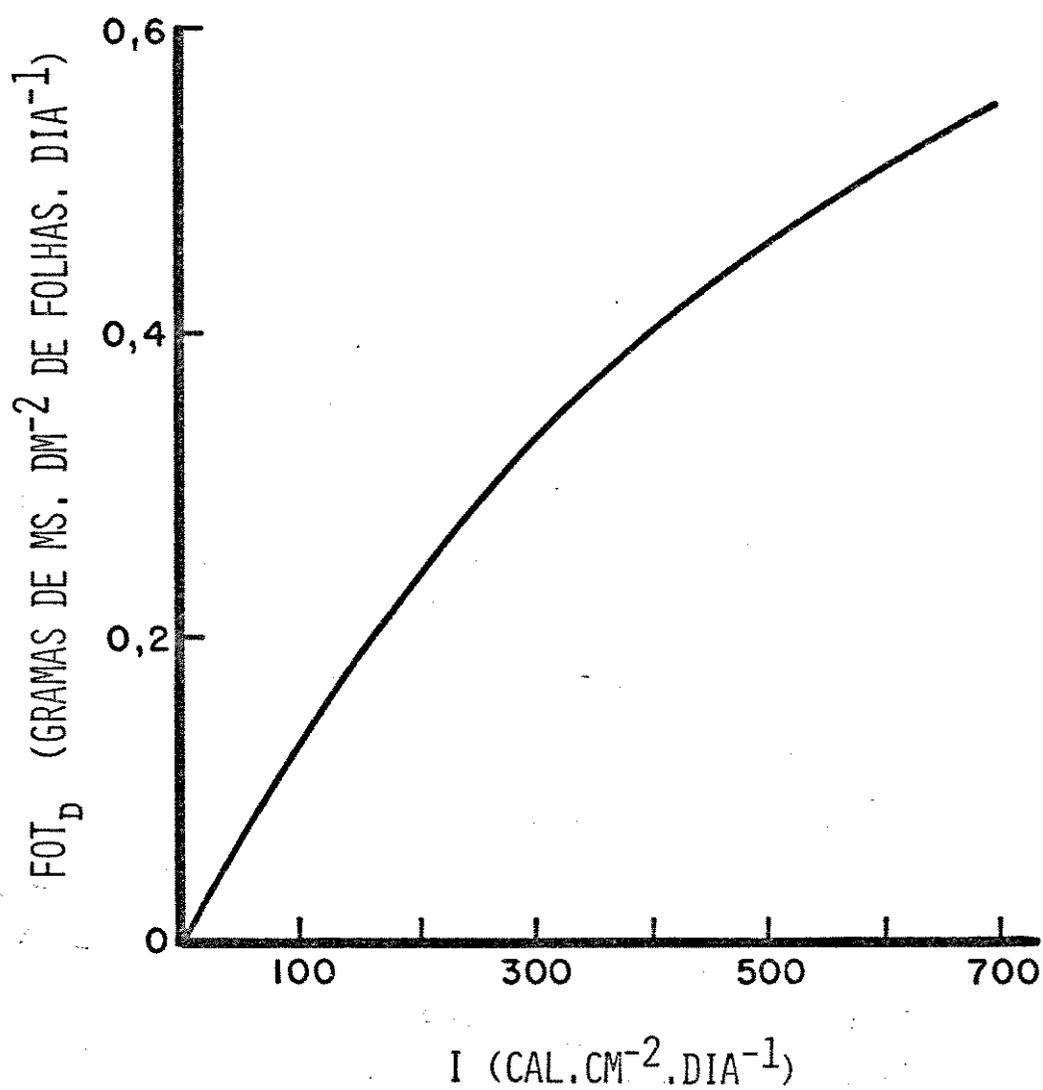


FIG. 4. Resposta da taxa de fotossíntese diária (FOT_D) em função da densidade de fluxo de radiação solar diária (I), em folhas individuais de cana-de-açúcar.

$$f(I) = \frac{1,5622 \cdot 10^{-3} \cdot I (1 - \rho)}{1 + 1,4054 \cdot 10^{-3} \cdot I (1 - \rho)} \cdot \frac{1}{0,554} \quad (39)$$

Fator de ajustamento índice de área foliar, f(IAF)

A radiação solar ao penetrar no dossel vegetativo é absorvida e, portanto, a intensidade com a qual incide sobre as folhas inferiores é menor. Conseqüentemente, a taxa de fotossíntese nestas folhas também é menor, quando comparadas às superiores do dossel. Apesar disso, a taxa de fotossíntese total de uma comunidade aumenta com o índice de área foliar (IAF). Todavia, em razão do autossombreamento, há um declínio na taxa de fotossíntese média por unidade de área foliar. Este declínio é compensado, até determinado limite, pelo contínuo incremento no IAF.

A redução na taxa de fotossíntese por unidade de área foliar é definido por $f(\text{IAF})$, o qual é calculado pela razão,

$$f(\text{IAF}) = \frac{\overline{\text{FOT}}_d}{\text{FOT}_d} \quad (40)$$

onde $\overline{\text{FOT}}_d$ é a taxa de fotossíntese bruta média das folhas de uma comunidade em relação a um determinado IAF e FOT_d (eq. 38) é a taxa de fotossíntese bruta para folhas individuais que recebem a radiação sem qualquer obstáculo.

MONSI e SAEKI (1953) propuseram um modelo em que a radiação solar ao penetrar no dossel de uma comunidade é atenuada em função do IAF, segundo a lei de BEER (eq. 18). Desta forma, substituindo-se o valor de I da eq. (38) pelo seu valor na eq. (18) e integrando-a com respeito a IAF, obtém-se uma estimativa da taxa de fotossíntese total da comunidade. Então a $\overline{\text{FOT}}_d$ pode ser estimada por :

$$\overline{\text{FOT}} = \int_0^{\text{IAF}} \frac{b \cdot I^* \cdot \exp(-K \cdot \text{IAF})}{1 + a \cdot I^* \cdot \exp(-K \cdot \text{IAF})} \cdot d\text{IAF} \cdot \frac{1}{\text{IAF}}$$

ou

$$\overline{\text{FOT}}_d = \frac{b}{a} \left\{ \text{IAF} + \frac{1}{K} \cdot \ln \left[\frac{a \cdot I^* + 1}{a \cdot I^* + \exp(K \cdot \text{IAF})} \right] \right\} \cdot 1/\text{IAF} \quad (41)$$

Como na eq. (41) existe um divisor por IAF, isto resulta em um valor da taxa de fotossíntese média por unidade de área foliar (\overline{FOT}_d). Assim, achando-se a razão entre a \overline{FOT}_d (eq. 41), calculada para diversos IAF, e a FOT_d de folhas individuais (eq. 38), pode-se construir uma curva que representa a variação na fotossíntese média por unidade de área foliar em função do IAF (fig. 5). Esta curva foi ajustada a uma equação exponencial negativa (eq. 42). Novamente, por ser o presente modelo uma aproximação elaborada para cana-de-açúcar, admitiu-se que até um IAF = 1,0 o efeito do autossombreamento é desprezível, conforme descrito por MONSI (1968). Neste caso:

$$f(\text{IAF}) = 1,14 \cdot \exp(-0,14 \cdot \text{IAF}) \quad , \quad (42)$$

para IAF > 1 .

Fator de ajustamento idade da planta, f(M)

A cana-de-açúcar emite continuamente novas folhas através de sua vida e, concomitantemente, há senescência de folhas mais velhas (GLAZIOU *et alii*, 1965; HARTT e BURR, 1965). As folhas presentes no colmo, normalmente de 8 a 11, possuem, durante o desenvolvimento da planta, aproximadamente a mesma idade em função da posição relativa ocupada no colmo. Em razão dessa característica é possível determinar a taxa de fotossíntese em folhas de mesma idade, porém em plantas com idades diferentes. Assim, pode-se avaliar isoladamente o efeito da idade da planta sobre a taxa fotossíntese.

Vários autores (HARTT e BURR, 1965; KORTSCHAK e FORBES, 1969; BULL, 1969, 1971) mediram a taxa de fotossíntese em plantas de idades diferentes e encontraram em todos os casos que ela decresce acentuadamente com a idade da planta.

O fator de ajustamento idade da planta foi descrito pela eq. (43) e fig. (6) adaptando-se às medidas da taxa de fotossíntese em folhas individuais em plantas de diferentes idades, efetuadas por HARTT e BURR (1965).

$$f(M) = \frac{1}{8,34 \cdot 10^{-1} + 2,75 \cdot 10^{-3} \cdot t_i} \quad , \quad (43)$$

onde t_i é a idade da planta em dias contados a partir do plantio, sendo que para t_i menor de 60 dias, $f(M) = 1,0$.

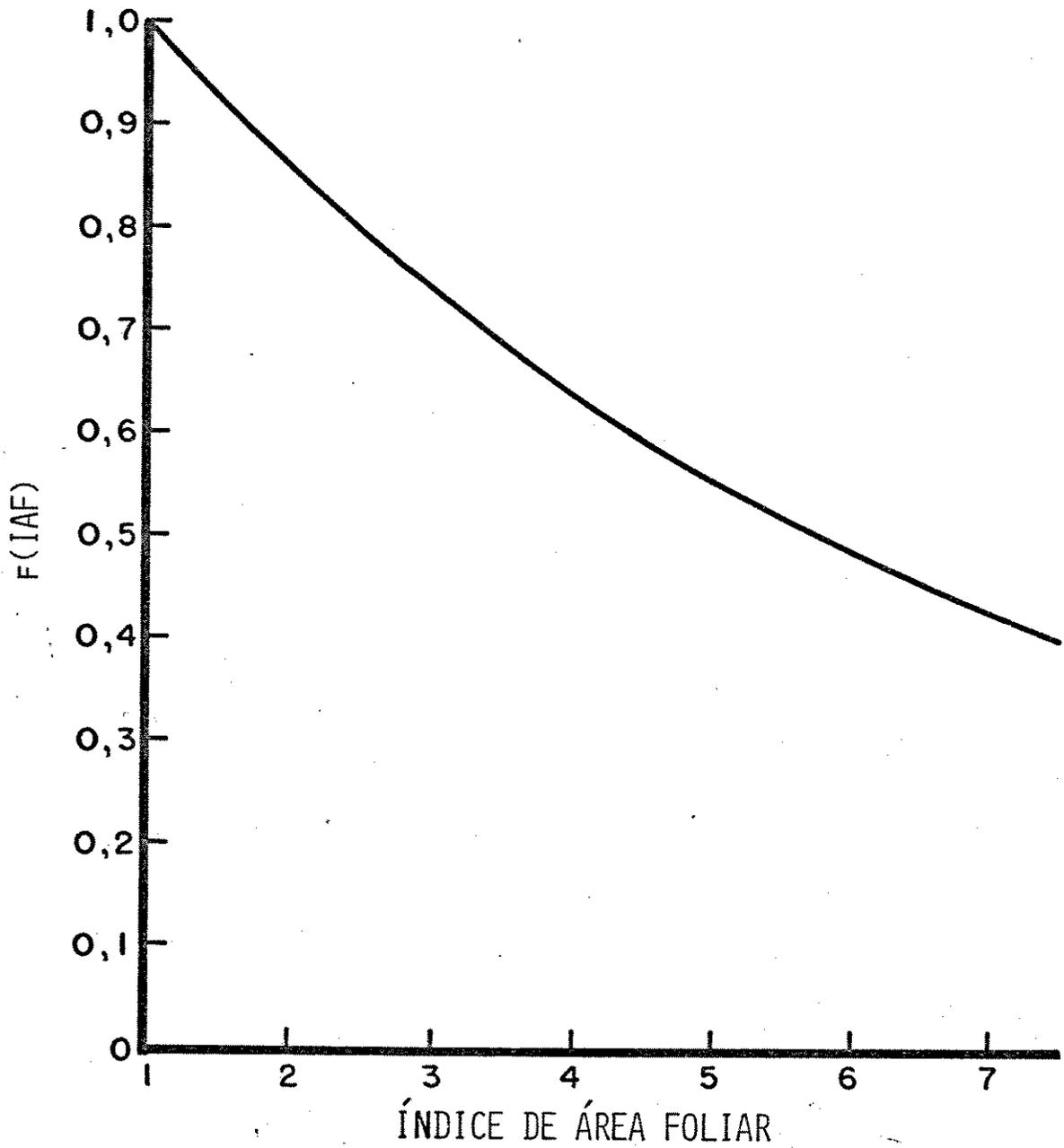


FIG. 5. Efeito do índice de área foliar sobre o fator área foliar $f(\text{IAF})$ usado para calcular a taxa de fotossíntese.

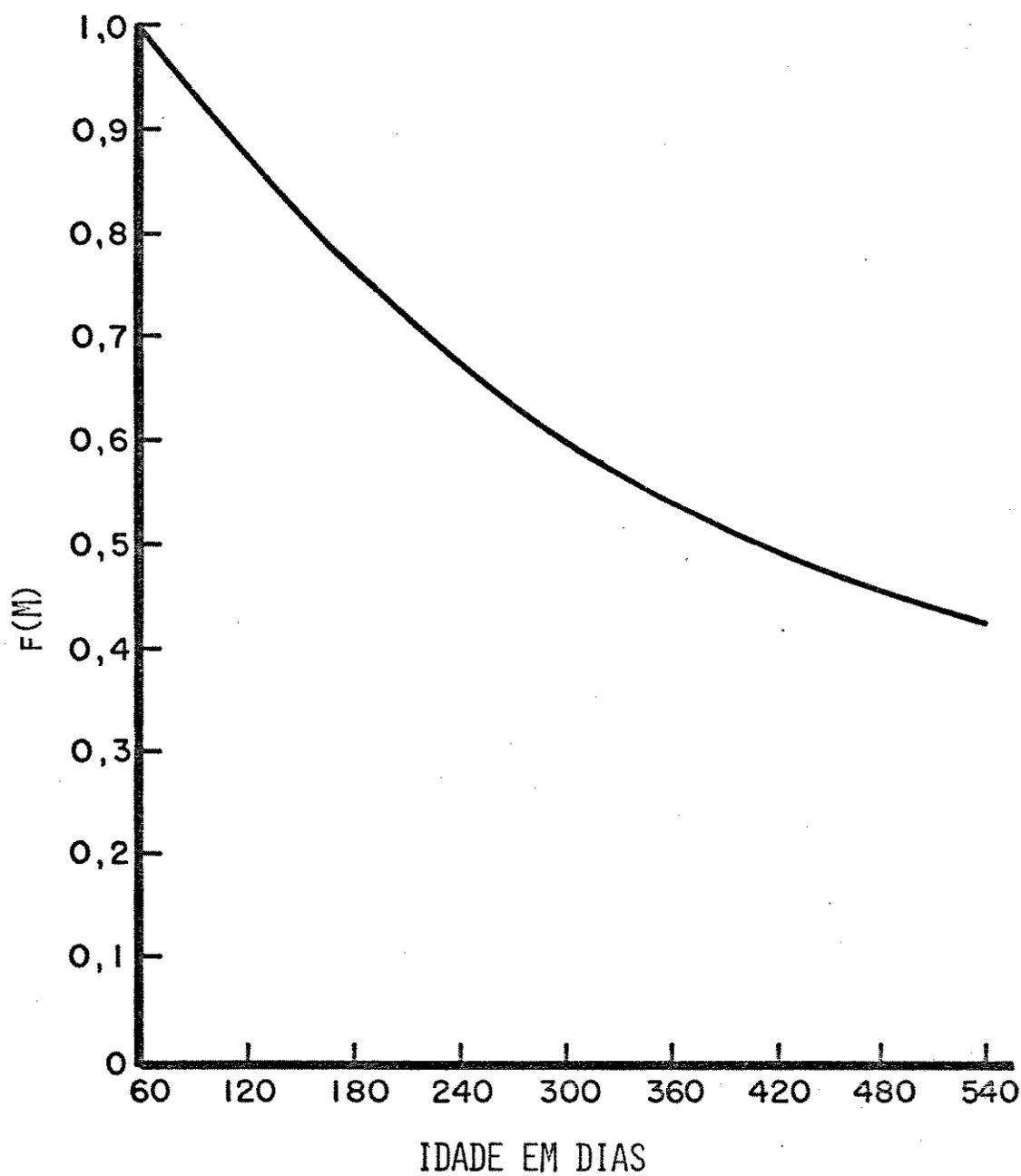


FIG. 6. Efeito da idade da planta sobre o fator $f(M)$ usado para calcular a taxa de fotossíntese.

Fator de ajustamento idade da folha, f(IF)

Em planta de cana-de-açúcar a taxa de fotossíntese é máxima no momento em que as folhas atingem o estágio de expansão total (HARTT e BURR, 1965; WALDRON *et alii*, 1967; BULL, 1969, 1971). Nas outras fases do desenvolvimento foliar a fotossíntese é menor. Como as diversas folhas presentes nos colmos apresentam diferentes idades e, portanto, diferentes potenciais fotossintéticos, deve-se introduzir um fator de ajustamento associado com a idade das folhas. Essas folhas, no entanto, durante o desenvolvimento das plantas, apresentam aproximadamente a mesma idade em função da sua posição relativa no colmo (HARTT e BURR, 1965). Admitte-se, então, nesta primeira aproximação, um valor único para o fator de ajustamento $f(IF)$.

A estimativa de $f(IF)$ foi feita tomando-se como referência as medidas da taxa de fotossíntese em folhas individuais de diversas idades e em várias variedades, efetuadas por HARTT e BURR (1965). O seu valor foi obtido pela razão entre a fotossíntese média de todas as folhas da planta e a fotossíntese da folha que apresentou a maior taxa. Assim, o valor de $f(IF) = 0,85$.

Fator de ajustamento temperatura do ar, f(T)

A temperatura ótima para a fotossíntese em plantas do tipo C_4 ocorre ao redor de 30°C (SINGH e LAL, 1935; EL-SHARKAWI e HESKETH, 1964; HOFSTRA e HESKETH, 1969; DOWNTON, 1971; BIRD *et alii*, 1977) e decresce rapidamente abaixo de 20°C.

A taxa de fotossíntese em plantas de cana-de-açúcar aproximadamente dobra a cada aumento de 10°C, em temperaturas variando de 15 a 30°C, segundo medidas efetuadas por GLOVER (1974) em plantas inteiras.

O efeito instantâneo da temperatura do ar sobre a fotossíntese é apresentado na fig. (7), construída com base em resultados encontrados na literatura (SINGH e LAL, 1935; WALDRON *et alii*, 1967; HOFSTRA e HESKETH, 1969; GLOVER, 1974). Verifica-se nesta fig. (7) que o efeito da temperatura é apresentado de maneira relativa, isto é, entre 30 e 35°C, o fator é 1,0 (fotossíntese máxima), de 0 a 12°C o fator é 0,0 e entre 12 e 30°C, o fator é descrito pela seguinte equação:

$$f_i(T_i) = -0,587 + 0,0532 \cdot T_i \quad , \quad (44)$$

onde $f_i(T_i)$ é o fator de ajustamento instantâneo da fotossíntese e T_i a temperatura do ar num dado instante.

Como a temperatura do ar oscila constantemente durante o dia, o seu efeito sobre a taxa de fotossíntese também varia.

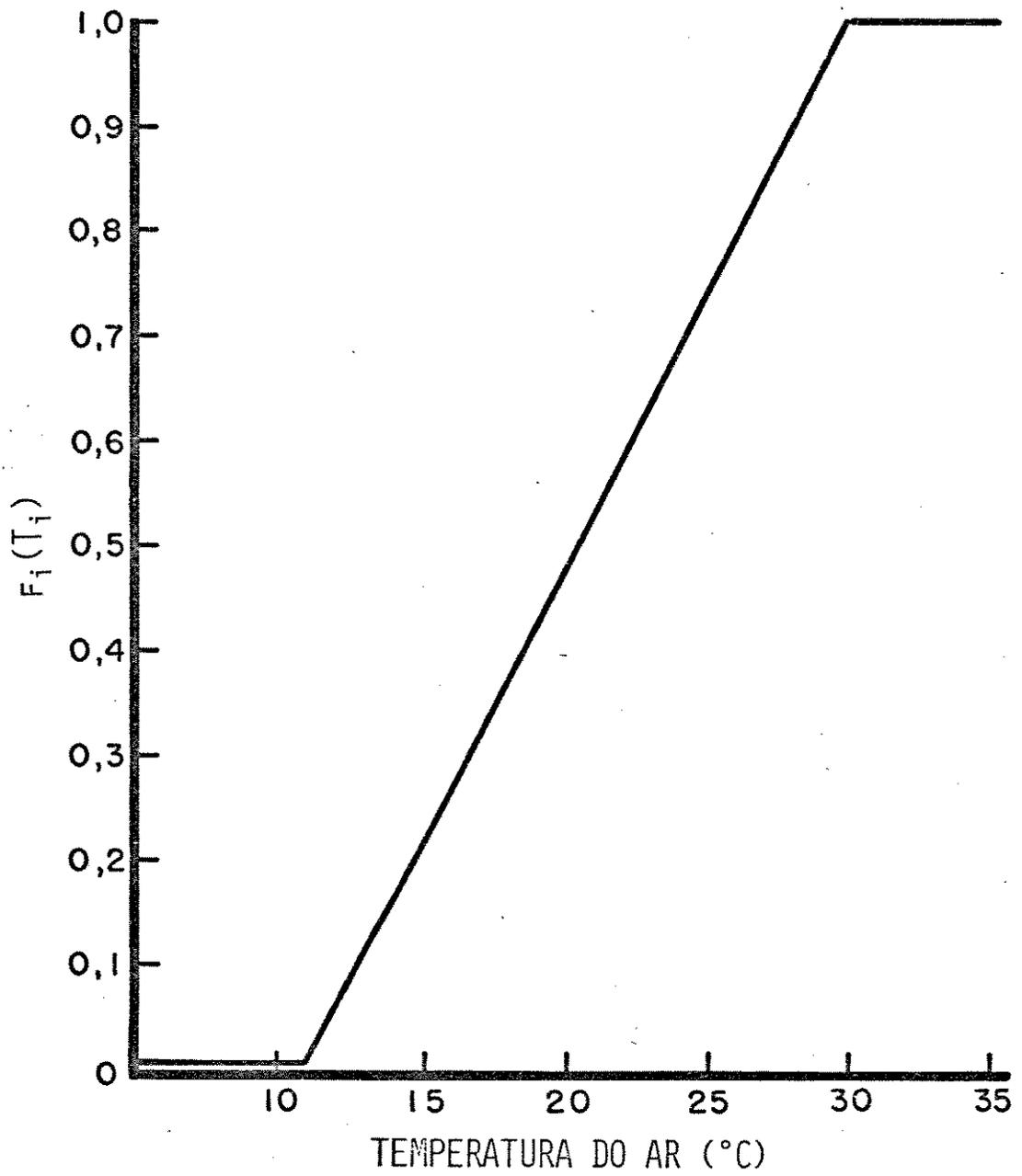


FIG. 7. Efeito da temperatura do ar no fator temperatura instantânea $f_i(T_i)$ sobre a taxa de fotossíntese instantânea.

Considerando, também, que este modelo se presta a estimar a taxa de fotossíntese diária, deve-se encontrar um fator de ajustamento para avaliar o efeito da temperatura em bases diárias. Para tal, procedeu-se da seguinte maneira:

(i) Estimou-se a taxa de fotossíntese instantânea em intervalos de 1 hora em função da variação da temperatura instantânea, durante o período de um dia. Esta estimativa foi feita para dias típicos em todos os meses do ano.

Utilizou-se no cálculo a eq. (36), fixando-se arbitrariamente uma densidade em fluxo de radiação solar igual a $1,0 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, a fim de se computar somente o efeito da temperatura do ar sobre a fotossíntese. A equação seguinte resume o procedimento usado,

$$FOT_i(T_i) = \frac{9,474 \cdot 10^{-2} \cdot I}{1 + 8,207 \cdot 10^{-1} \cdot I} \cdot f_i(T_i) ,$$

onde $FOT_i(T_i)$ é a taxa de fotossíntese instantânea em função da temperatura instantânea T_i e $f_i(T_i)$ o fator de ajustamento instantâneo da fotossíntese em relação à temperatura instantânea.

(ii) A produção fotossintética total, em função da temperatura instantânea, no período de um dia foi estimada pela somatória das taxas de fotossíntese instantânea,

$$FOT_d(T_i) = \sum_{i=1}^h FOT_i(T_i) ,$$

onde $FOT_d(T_i)$ é a taxa de fotossíntese diária em função da oscilação da temperatura instantânea do ar durante o dia em g de $\text{CH}_2\text{O} \cdot \text{dm}^{-2}$ de folhas $\cdot \text{dia}^{-1}$.

(iii) Uma vez conhecida a produção fotossintética, procurou-se uma relação matemática que reproduzisse o efeito da temperatura do ar, mas neste caso, em bases diárias. Assim comparou-se os resultados obtidos, como foi descrito em (i) e (ii), com os obtidos através de várias equações que relacionavam o fator de ajustamento baseado somente nas temperaturas máxima e mínima do ar. A equação que relacionou ambas estimativas foi,

$$F(T) = 0,7042 \cdot f_i(T_{\max}) + 0,4695 \cdot f_i(T_{\min}) \quad , \quad (45)$$

onde $f(T)$ é o fator de ajustamento da fotossíntese em relação à temperatura do ar, $f_i(T_{\max})$ o fator de ajustamento instantâneo em relação à temperatura máxima do ar e $f_i(T_{\min})$ o fator de ajustamento instantâneo em relação à temperatura mínima do ar.

Fator de ajustamento disponibilidade hídrica, $f(DH)$

A fotossíntese de cana-de-açúcar diminui com o decréscimo da disponibilidade de água (ASHTON, 1956; HARTT e BURR, 1965; BULL, 1969).

ASHTON (1956) verificou ainda que a taxa de fotossíntese não decrescia antes que o conteúdo de água disponível no solo atingisse um determinado valor abaixo da capacidade de campo. Este autor não determinou precisamente qual a tensão em que a umidade do solo começa a ser limitante ao processo da fotossíntese. Entretanto, ele sugere que este ponto deve corresponder ao valor no qual o conteúdo de água disponível seja ao redor de 0,4 do conteúdo máximo de água no solo. Abaixo desse valor, a taxa de fotossíntese decresce progressivamente.

SUMAYO *et alii* (1977) demonstraram que as taxas de fotossíntese e transpiração, em sorgo, reduzem quando a disponibilidade de água no solo era menor que 35% da disponibilidade máxima. Baseado nesses resultados, HODGES *et alii* (1979) apresentaram, em seu modelo de crescimento de sorgo, um fator de ajustamento da fotossíntese relacionado com a disponibilidade de água no solo.

No modelo aqui desenvolvido, admite-se que a queda na taxa de fotossíntese é proporcional à queda do conteúdo de água disponível no solo, quando esta for menor que 35% da água disponível máxima. O fator de ajustamento utilizado foi obtido pela seguinte equação:

$$f(DH) = \frac{AD_a}{0,35 \cdot AD_{\max}} \quad , \quad (46)$$

onde AD_a é a água disponível no perfil de 90 cm e AD_{\max} a água disponí-

vel máxima no perfil de 90 cm. A condição para o uso dessa eq. (46) é: $AD_a < 0,35 \cdot AD_{max}$. Para $AD_a > 0,35 \cdot AD_{max}$, $f(DH) = 1$.

4.4.3. Equação para estimar a taxa de respiração total diária

Nas primeiras tentativas de se quantificar a taxa de respiração, em comunidades vegetais, vários autores assumiam-na proporcional ao peso da matéria seca e/ou ao índice de área foliar (DAVIDSON e PHILIP, 1958; SAEKI, 1960; MONTEITH, 1965). Como a taxa de fotossíntese, por unidade de área foliar, diminui progressivamente com o aumento do índice de área foliar (IAF), concluía-se existir um IAF ótimo, no qual a taxa de fotossíntese líquida seria máxima, e qualquer incremento no IAF além daquele ótimo resultaria num decréscimo na assimilação líquida. Posteriormente, foi demonstrado experimentalmente que a taxa de respiração total de uma comunidade vegetal aumenta assintoticamente com o IAF, isto é, a taxa de respiração, por unidade de área foliar, diminui progressivamente no sentido das folhas mais externas para as mais internas do dossel (LUDWIG *et alii*, 1965; MCCREE e TROUGHTON, 1966; KING e EVANS, 1967; ROBSON, 1973). Assim, as taxas de fotossíntese bruta e líquida e de respiração aumentam com o IAF até o ponto em que praticamente toda a radiação solar é absorvida, para depois permanecerem praticamente constantes (MCCREE e TROUGHTON, 1966).

MCCREE (1970, 1974) propôs, para fins de modelagem, que a respiração de uma comunidade vegetal pode ser considerada como a soma de dois termos, isto é, a respiração associada com o crescimento, proporcional à fotossíntese, e a respiração de manutenção, proporcional ao peso de MS, como expressa a eq. (47):

$$R_t = k \cdot FOT_b + c \cdot P \quad (47)$$

onde R_t é a taxa de respiração total, FOT_b é a taxa de fotossíntese bruta, P é o peso da MS da planta, c e k constantes.

Isto não implica na existência de dois processos independentes, mas apenas uma maneira de interpretar e quantificar o consumo de carboidratos pela respiração. Assim, na eq. (47) o termo $(k \cdot FOT_b)$ corresponde à quantidade de energia necessária (em g equivalentes de CH_2O) para a biossíntese de novos materiais (HUNT e LOOMIS, 1979). O termo $(c \cdot P)$ corresponde à quantidade de energia (em g equivalentes de CH_2O) necessária para a manutenção dos processos fisiológicos e para as atividades metabólicas dos tecidos (MCCREE, 1970, 1974; BEEVERS, 1970; PENNING DE VRIES, 1975 a,b; HUNT e LOOMIS, 1979; WILSON *et alii*, 1980).

A relação entre respiração, fotossíntese e crescimento é melhor compreendida através da análise feita por THORNLEY (1970, 1976).

THORNLEY assume que todo CO_2 assimilado é convertido em glicose que juntamente com os sais mineirais são os únicos substratos usados para a respiração e crescimento (acúmulo de material estrutural e de reservas).

A quantidade total de substrato produzido (ΔS) pela fotossíntese bruta (FOT_b) em um intervalo de tempo (Δt) é:

$$\Delta S = \text{FOT}_b \cdot \Delta t \quad (48)$$

Parte do substrato produzido é utilizado para fornecer energia aos processos de manutenção das células (ΔS_m) e parte para o processo de crescimento (ΔS_c), representado por:

$$\Delta S = \Delta S_c + \Delta S_m \quad (49)$$

ΔS_m corresponde a uma parte do substrato (ΔS) que é consumido, pela respiração, cuja energia resultante (em equivalente de CH_2O) é utilizada para a manutenção. Somente uma fração de ΔS_c é consumida para prover a energia necessária para que o restante de ΔS_c seja transformado em celulose, proteína e outros compostos constituintes das plantas. Assim,

$$\Delta S_c = \Delta S_r + \Delta P \quad (50)$$

onde ΔS_r é a parte consumida pela respiração para prover energia à biossíntese de novos materiais e ΔP é o incremento de MS.

Assim, pelas eqs. (49) e (50), tem-se:

$$\Delta S = \Delta S_r + \Delta S_m + \Delta P \quad (51)$$

A eficiência com a qual certa fração de ΔS_c é convertida em biomassa é:

$$\epsilon_c = \frac{\Delta P}{\Delta S_r + \Delta P} \quad \text{ou} \quad (52)$$

$$\Delta S_r \cdot \epsilon_c + \epsilon_c \cdot \Delta P = \Delta P \quad (\div \Delta t) \quad ,$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \left(\frac{\epsilon_c}{1 - \epsilon_c} \right) \cdot \frac{\Delta S_r}{\Delta t} \quad , \quad (53)$$

onde ϵ_c é a eficiência do processo construtivo do crescimento e $\Delta P/\Delta t$ é o incremento líquido de MS ou taxa de crescimento da cultura (TCC).

A quantidade de substrato requerido para a manutenção, quando expresso por unidade de CO_2 liberado (ou equivalente em CH_2O) por unidade de peso de MS (P) por unidade de tempo (Δt), define um coeficiente de respiração de manutenção (r_m) em g de CH_2O respirada $\cdot \text{g}^{-1}$ de MS total $\cdot \text{dia}^{-1}$,

$$r_m = \frac{\Delta S_m}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P} \quad . \quad (54)$$

A taxa de respiração total é dada, então, por dois termos: o que representa o consumo de substrato para fornecer energia para a manutenção dos processos metabólicos e o termo que corresponde ao substrato consumido para prover da energia necessária ao processo de biossíntese de novos materiais. Assim,

$$R_t = \frac{\Delta S_m}{\Delta t} + \frac{\Delta S_r}{\Delta t} \quad , \quad (55)$$

onde R_t é a taxa de respiração total.

Pelas eqs. (48) e (51), tem-se:

$$\text{FOT}_b = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta S_m}{\Delta t} + \frac{\Delta S_r}{\Delta t} + \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad . \quad (56)$$

Combinando-se as eqs. (56) com (53) e (54), tem-se:

$FOT_b = r_m \cdot P + \Delta S_r / \Delta t + (\epsilon_c / 1 - \epsilon_c) \Delta S_r / \Delta t$, e desenvolvendo-se:

$$\begin{aligned} FOT_b &= r_m \cdot P + \Delta S_r / \Delta t (1 + \epsilon_c / 1 - \epsilon_c) = \\ &= r_m \cdot P + \Delta S_r / \Delta t (1 / 1 - \epsilon_c) , \end{aligned}$$

como das eqs. (54) e (55), tem-se que:

$$\Delta S_r / \Delta t = R_t - r_m \cdot P \quad , \text{ tem-se que:}$$

$$\begin{aligned} FOT_b &= r_m \cdot P + (R_t - r_m \cdot P) (1 / 1 - \epsilon_c) = \\ &= r_m \cdot P - r_m \cdot P (1 / 1 - \epsilon_c) + R_t (1 / 1 - \epsilon_c) = \\ &= r_m \cdot P (-\epsilon_c / 1 - \epsilon_c) + R_t (1 / 1 - \epsilon_c) \quad , \text{ então,} \end{aligned}$$

$$R_t = (FOT_t + \epsilon_c / 1 - \epsilon_c \cdot r_m \cdot P) (1 - \epsilon_c) \text{ e finalmente que:}$$

$$R_t = FOT_t (1 - \epsilon_c) + \epsilon_c \cdot r_m \cdot P \quad , \quad (57)$$

onde R_t é a taxa de respiração total em g de MS $\cdot m^{-2}$ de terreno $\cdot dia^{-1}$, FOT_b é a taxa de fotossíntese total em g de $CH_2O \cdot m^{-2}$ de terreno $\cdot dia^{-1}$, r_m o coeficiente de respiração de manutenção em g de $CH_2O \cdot g^{-1}$ de MS total $\cdot dia^{-1}$, P o peso em g de MS total $\cdot m^{-2}$ de terreno e ϵ_c a eficiência de conversão.

A eq. (57) corresponde à forma original da eq. (46) proposta por McCREE (1970, 1974) e será usada neste trabalho para estimar a taxa de respiração total em cana-de-açúcar.

A seguir, serão propostos os valores estimados de ϵ_c e r_m .

4.4.3.1. Respiração de crescimento e eficiência de conversão do processo construtivo (ϵ_c)

O consumo respiratório para suprir energia à biossíntese (ΔS_r) pode ser estimado a partir do conhecimento da taxa de fotossíntese bruta (FOT_b) e da eficiência de conversão do processo construtivo da respiração (ϵ_c), como foi demonstrado por THORNLEY (1970, 1976).

Por outro lado, PENNING DE VRIES (1975a) demonstrou que, a partir do conhecimento da composição química da biomassa e dos processos bioquímicos envolvidos em sua síntese, é possível estimar ϵ_c . Para esta finalidade, ele calculou a eficiência da conversão da glicose em cada um dos principais compostos componentes da biomassa (proteínas, amino-ácidos, celulose, lignina, lipídeos, etc.), isto é, o peso de cada composto formado a partir de 1 g de glicose. Desta forma, com o conhecimento da eficiência de conversão de cada composto, bem como da composição química das plantas em estudo, pode-se estimar o valor médio da eficiência global de conversão do processo construtivo da respiração (ϵ_c).

Então, a biossíntese total pode ser estimada a partir do conhecimento do suprimento de substrato, pela fotossíntese total e da composição química da biomassa.

Há evidências experimentais que os valores que caracterizam a conversão da glicose em cada uma das principais frações da biomassa são independentes da temperatura da deficiência hídrica e da espécie vegetal, sendo determinados somente pela composição do substrato e dos produtos finais (PENNING DE VRIES, 1975a; WILSON *et. alii*, 1980).

No presente trabalho, o ϵ_c de cana-de-açúcar foi estimado, conseqüentemente, a partir da sua composição química média (tabela 1) com o auxílio dos valores de conversão da glicose em cada um dos principais compostos que formam a sua biomassa. Os valores de conversão da glicose usados são os apresentados por PENNING DE VRIES (1975a) na tabela 20.1 e figuras 20.1 e 20.2, de seu trabalho.

Desta forma, combinando-se os valores da composição química com os valores de conversão da glicose, estimou-se que 1,27g de glicose são necessários para formar 1 g de matéria seca em cana-de-açúcar. Conseqüentemente, ϵ_c é igual a 0,79 (1 g MS total/1,27 g de glicose).

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

COMPOSTOS	a/ COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA $(\frac{\text{g da fração química}}{\text{g de biomassa}} \times 100)$	b/ 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
Lipídeo	0,8	0,330	0,02
Lignina	7,0	0,465	0,15
TOTAL			1,27 <u>c/</u>

a/ Fonte: VALSECHI e OLIVEIRA, 1964 - Quadro VII

b/ Fonte: PENNING DE VRIES, 1975a - Tabela 20.1 e figs. 20.1 e 20.2

c/ Necessidade total de glicose em g de glicose/g de biomassa.

4.4.3.2. Respiração de manutenção e coeficiente de manutenção

O processo de respiração além da sua importância na fase ativa do crescimento, é também relevante para a manutenção das funções vitais das plantas (BEEVERS, 1970; PENNING DE VRIES, 1975a, b).

O coeficiente de respiração de manutenção (r_m) varia bastante com a temperatura (McCREE, 1970, 1974; THORNLEY e HESKETH, 1972; PENNING DE VRIES, 1975a, b; RYLE *et alii*, 1976; PENNING DE VRIES *et alii*, 1979) e parece também variar com a idade da planta (EVANS, 1975; HUNT e LOOMIS, 1979; ACOCK *et alii*, 1979).

PENNING DE VRIES *et alii* (1979) encontraram um r_m máximo para milho de $0,007\text{g de CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ de MS total $\cdot \text{dia}^{-1}$, McCREE (1974) de $0,0054\text{g de CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ de MS total $\cdot 12\text{ h}^{-1}$ para sorgo e STOUT e SMITH (1950) de $0,0047\text{g de CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ de MS total $\cdot \text{dia}^{-1}$, para beterraba açucareira. Para outras várias espécies, encontram-se na literatura referências sobre seus valores de r_m . Entretanto, para cana-de-açúcar, parece não haver referências. Desta forma, assume-se que o valor máximo de $r_m = 0,007\text{g de CH}_2\text{O g de MS total} \cdot \text{dia}^{-1}$, baseando-se em valores encontrados em plantas do tipo C_4 (McCREE, 1974; PENNING DE VRIES *et alii*, 1979).

Neste trabalho, a estimativa de r_m , para cada intervalo de tempo, é obtida considerando-se os efeitos da temperatura e idade da planta, isto é:

$$r_m = r_{m,\max} \cdot r_m(T_a) \cdot r_m(M) \quad (58)$$

onde r_m é o coeficiente de manutenção em $\text{g de CH}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1}$ de MS total $\cdot \text{dia}^{-1}$, $r_{m,\max}$ é o coeficiente de manutenção máximo em $\text{g de CH}_2\text{O} \cdot \text{g}^{-1}$ de MS total $\cdot \text{dia}^{-1}$, $r_m(T_a)$ o fator de ajustamento temperatura do ar e $r_m(M)$ o fator de ajustamento idade da planta.

Fator de ajustamento idade da planta, $r(M)$

MEDINA *et alii* (1970), medindo a respiração em cana-de-açúcar, observaram que a taxa de respiração específica total diminuiu acentua-

damente com a idade da planta, mesmo durante o período em que a taxa de crescimento da cultura ($TCC = dP/dt$, eq. 23) permaneceu constante. Neste período em que a TCC permaneceu constante, pode-se assumir que a respiração de crescimento também tenha sido constante, pois se:

$$R_t = FOT_t(1 - \epsilon_c) + r_m \cdot \epsilon_c \cdot P \quad e$$

$$FOT_t = \frac{dP}{dt} + R_t \quad , \quad (59)$$

considerando-se que $dP/dt = \Delta P/\Delta t$, substituindo-se a eq. (59) em (57) e dividindo-se ambos os termos por ϵ_c , tem-se,

$$R_t/\epsilon_c = (1 - \epsilon_c/\epsilon_c) dP/dt + R_t/\epsilon_c - R_t \cdot \epsilon_c/\epsilon_c + r_m \cdot P$$

e finalmente,

$$R_t = \left(\frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \right) \frac{dP}{dt} + r_m \cdot P \quad . \quad (60)$$

Então, se dP/dt permaneceu constante, o produto $(1 - \epsilon_c/\epsilon_c) \cdot dP/dt$, que representa a respiração de crescimento, também permaneceu constante. Conseqüentemente, se a respiração específica total diminuiu neste período, esta queda provavelmente deveu-se à variação no valor de r_m .

Baseado em resultados encontrados no trabalho de MEDINA *et alii* (1970), admitiu-se que o decréscimo de r_m com a idade da planta, em cana-de-açúcar, seja descrito por,

$$r_m(M) = 1 - 0,0023 (t_i - 175) \quad , \quad (61)$$

onde $r_m(M)$ é o fator de ajustamento idade da planta e t_i o tempo em dias após o plantio, sendo que para $t_i < 175$ dias, $r_m(M) = 1$.

Fator de ajustamento temperatura do ar, $r(T_a)$

De acordo com HOFSTRA e HESKETH (1969), a taxa de respira-

ção total aumenta com a temperatura. Em cana-de-açúcar, ela aumenta com um $Q_{10} \approx 2$ para temperaturas entre 20 e 30°C (GLOVER, 1973). Este aumento na taxa de liberação de CO_2 parece estar relacionado tanto com a respiração de crescimento como com a de manutenção (HUNT e LOOMIS, 1979).

A taxa de fotossíntese total também aumenta com a temperatura (HOFSTRA e HESKETH, 1969). Como a respiração de crescimento é proporcional à fotossíntese $(1 - \epsilon_c) FOT_b$, na eq. 57 e ϵ_c parece não variar com a temperatura (PENNING DE VRIES, 1975a) a variação na respiração de crescimento reflete somente a dependência da fotossíntese à temperatura (McCREE, 1970, 1974; PENNING DE VRIES, 1975a; HUNT e LOOMIS, 1979).

Por outro lado, demonstrou-se que o r_m varia com a temperatura com um $Q_{10} \approx 2$ em várias espécies como milho, sorgo, trevo, algodão e beterraba açucareira (McCREE, 1970, 1974; PENNING DE VRIES, 1975a, b; RYLE *et alii*, 1976; PENNING DE VRIES *et alii*, 1979).

O r_m adotado, $0,007g$ de $CH_2O \cdot g^{-1}$ de MS total $\cdot dia^{-1}$, somente é atingido em temperaturas iguais ou acima de 30°C. Conseqüentemente, ele deve ser corrigido por um fator de ajustamento temperatura do ar, para temperaturas inferiores. Baseando-se nos resultados encontrados na literatura (McCREE, 1970, 1974; RYLE *et alii*, 1976; PENNING DE VRIES *et alii*, 1979), estimou-se que:

$$r_m(T_a) = 0,051 \cdot T_a - 0,53 \quad , \quad (62)$$

onde $r_m(T_a)$ é o fator de ajustamento temperatura do ar e T_a a temperatura média do ar no período de um dia, a qual é dada por: $T_a = T_{mim} + T_{max}/2$.

4.4.4. Fator de distribuição de matéria seca para as folhas (DF)

Uma vez definido qual o incremento líquido de matéria seca através das estimativas da fotossíntese e da respiração, deve-se definir como se processa a divisão do material produzido entre os diferentes órgãos da planta.

O desenvolvimento da área foliar é de importância primária

no cálculo de fotossíntese, pois determina a superfície de intercepção da radiação solar. Uma rápida formação da superfície fotossintetizadora acarreta uma maior taxa de crescimento. Neste aspecto, MONSI e MURATA (1970) demonstraram, com o auxílio de um modelo simples de distribuição de matéria seca, as grandes diferenças na produção encontrada, variando-se os fatores de distribuição. O desenvolvimento do aparelho fotossintetizador determina o crescimento de toda a planta, e ele por sua vez é determinado pela taxa de fotossíntese líquida e pela distribuição de matéria seca.

Para este trabalho, assume-se que o fator de distribuição de matéria seca para as folhas seja descrito por:

$$DF = \frac{TCF}{TCC}$$

onde DF é o fator de distribuição de matéria seca para as folhas, TCF é a taxa de crescimento das folhas em g de MS . m⁻² de terreno . dia⁻¹ e TCC a taxa de crescimento da cultura em g de MS . m⁻² de terreno . dia⁻¹.

O acúmulo de matéria seca nas folhas e na planta inteira foram descritas pela função logística (eq. 22) e a taxa de crescimento é dada pela derivada de 1.^a ordem (RADFORD, 1967), então,

$$DF = \frac{-F_{\max} B_1 \exp(A_1 + B_1 \cdot t_i)}{\{1 + \exp(A_1 + B_1 \cdot t_i)\}^2} \cdot \frac{\{1 + \exp(A_2 + B_2 \cdot t_i)\}^2}{-P_{\max} B_2 \exp(A_2 + B_2 \cdot t_i)}, \quad (63)$$

onde A₁, B₁ e A₂, B₂ são constantes para as folhas e para as plantas inteiras, respectivamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Balanço de Radiação Solar de Ondas Curtas

Os balanços de radiação solar global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa são apresentados nas tabelas 2, 3 e 4. Nessas tabelas também são apresentados os valores da radiação absorvida e transmitida pelo dossel vegetativo. A partir desses resultados foram elaboradas as figuras e análises das relações entre radiação solar e o dossel vegetativo.

Comportamento da radiação refletida

A fração da radiação refletida pelas culturas é uma característica microclimatológica importante, para o cálculo do balanço de energia, já que permite a estimativa da radiação líquida disponível às plantas.

O coeficiente de reflexão de uma cultura depende de sua geometria, do ângulo de inclinação do sol e das propriedades radiativas de seus componentes (MONTEITH, 1973; ROSS, 1975).

O coeficiente de reflexão de várias culturas apresenta um comportamento parecido em relação à inclinação do sol. Entretanto, seus valores podem ser diferentes em função das características particulares de cada cultura, bem como das condições de manejo. De um modo geral, são encontrados coeficientes de reflexão, em várias culturas, variando entre

Tabela 2- Balanço de radiação solar global de ondas curtas (em $ly \cdot min^{-1}$) sobre o dossel vegetativo da cultura de cana-de-açúcar, variedade NA-56-79, observado em 10/04/1979. Piracicaba - SP.

HORAS	a/		R		I*		T		b/	
	I	$ly \cdot min^{-1}$	$ly \cdot min^{-1}$	ρ	$ly \cdot min^{-1}$	ρ	$ly \cdot min^{-1}$	$ly \cdot min^{-1}$	τ	α
			$ly \cdot min^{-1}$	%	$ly \cdot min^{-1}$	%	$ly \cdot min^{-1}$	$ly \cdot min^{-1}$	%	%
12:00	1,39		0,23	16,5	1,16	23,3	0,27	0,89	76,7	
12:30	1,34		0,22	16,4	1,12	18,8	0,21	0,91	81,2	
13:00	1,25		0,22	17,6	1,03	15,5	0,16	0,87	84,5	
13:30	1,25		0,23	18,4	1,02	13,7	0,14	0,88	86,3	
14:00	1,23		0,23	18,7	1,00	14,0	0,14	0,86	86,0	
14:30	1,20		0,22	18,3	0,98	12,2	0,12	0,86	87,8	
15:00	0,98		0,19	19,4	0,79	12,7	0,10	0,69	87,3	
15:30	0,79		0,16	20,2	0,63	12,7	0,08	0,55	87,3	
16:00	0,65		0,14	21,5	0,51	11,8	0,06	0,45	88,2	
16:30	0,47		0,12	25,5	0,35	14,3	0,05	0,30	85,7	
17:00	0,32		0,08	25,0	0,24	12,5	0,03	0,21	87,5	
Média	0,99		0,19	19,8	0,80	15,0	0,12	0,68	85,0	

a/ I é a densidade de fluxo de radiação solar global de ondas curtas, R a densidade de fluxo de radiação global de ondas curtas refletidas, I* a densidade de fluxo de radiação global líquida, T a densidade de fluxo de radiação global transmitida, A a densidade de fluxo de radiação global absorvida e ρ o coeficiente de reflexão.

b/ Os coeficientes de transmissão (τ) e absorção (α) foram calculados em relação à radiação líquida (I*).

Tabela 3- Balanço de radiação solar infra-vermelho próxima (em $ly \cdot min^{-1}$) sobre o dossel vegetativo da cultura de cana-de-açúcar, variedade NA-56-79, observado em 10/04/1979. Piracicaba - SP.

HORAS	I_i $ly \cdot min^{-1}$	R_i $ly \cdot min^{-1}$	ρ_i %	I_i^* $ly \cdot min^{-1}$	T_i $ly \cdot min^{-1}$	τ_i %	$b/$ $ly \cdot min^{-1}$	A_i $ly \cdot min^{-1}$	α_i %
12:00	0,75	0,21	28,0	0,54	0,22	40,7	0,32	0,32	59,3
12:30	0,73	0,20	27,4	0,53	0,16	30,2	0,37	0,37	69,8
13:00	0,67	0,21	31,3	0,46	0,15	32,7	0,31	0,31	67,4
13:30	0,67	0,21	31,3	0,46	0,12	26,1	0,34	0,34	73,9
14:00	0,66	0,21	31,8	0,45	0,12	26,7	0,33	0,33	73,3
14:30	0,65	0,20	30,8	0,45	0,11	24,4	0,34	0,34	75,6
15:00	0,53	0,17	32,1	0,36	0,09	25,0	0,27	0,27	75,0
15:30	0,43	0,14	32,6	0,29	0,06	20,7	0,23	0,23	79,3
16:00	0,35	0,13	37,1	0,22	0,05	22,7	0,17	0,17	77,3
16:30	0,26	0,10	38,5	0,16	0,04	25,0	0,12	0,12	75,0
17:00	0,18	0,07	38,8	0,11	0,02	18,2	0,09	0,09	81,8
Média	0,53	0,17	32,1	0,37	0,10	27,0	0,26	0,26	70,3

a/ I_i é a densidade de fluxo de radiação solar infra-vermelho próxima, R_i a densidade de fluxo de radiação infra-vermelho próxima refletida, I_i^* a densidade de fluxo de radiação líquida infra-vermelho próxima, T_i a densidade de fluxo de radiação infra-vermelho próxima transmitida, A_i a densidade de fluxo de radiação infra-vermelho absorvida e ρ_i o coeficiente de reflexão.

b/ Os coeficientes de transmissão (τ_i) e absorção (α_i) foram calculados em relação à radiação líquida (I_i^*).

Tabela 4- Balanço de radiação solar fotossinteticamente ativa (em $ly \cdot min^{-1}$) sobre o dossel vegetativo da cultura de cana-de-açúcar, variedade NA-56-79, observado em 10/04/1979. Piracicaba - SP.

HORAS	a/		b/					
	I_f $ly \cdot min^{-1}$	R_f $ly \cdot min^{-1}$	ρ_f %	I_f^* $ly \cdot min^{-1}$	T_f $ly \cdot min^{-1}$	τ_f %	A_f $ly \cdot min^{-1}$	α_f %
12:00	0,64	0,02	3,1	0,62	0,05	8,1	0,57	91,9
12:30	0,61	0,02	3,3	0,59	0,05	8,5	0,54	91,5
13:00	0,58	0,01	1,7	0,57	0,01	1,8	0,56	98,2
13:30	0,58	0,02	3,4	0,56	0,02	3,6	0,54	96,4
14:00	0,57	0,02	3,5	0,55	0,02	3,6	0,53	96,4
14:30	0,55	0,02	3,6	0,53	0,01	1,9	0,52	98,1
15:00	0,45	0,02	4,4	0,43	0,01	2,3	0,42	97,7
15:30	0,36	0,02	5,6	0,34	0,02	5,9	0,32	94,1
16:00	0,30	0,01	3,3	0,29	0,01	3,4	0,28	96,6
16:30	0,21	0,02	9,5	0,19	0,01	5,3	0,18	94,7
17:00	0,14	0,01	7,1	0,13	0,01	7,7	0,12	92,3
Média	0,45	0,02	4,4	0,43	0,02	4,5	0,41	95,5

a/ I_f é a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa, R_f a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa refletida, I_f^* a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa transmitida, T_f a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa absorvida e ρ_f o coeficiente de reflexão.

b/ Os coeficientes de transmissão (τ_f) e absorção (α_f) foram calculados em relação à radiação líquida (I_f^*).

0,02 e 0,07 para a radiação fotossinteticamente ativa, entre 0,15 e 0,35 para a radiação global e entre 0,30 e 0,60 para a radiação infra-vermelho próxima (CHANG, 1961; YOCUM *et alii*, 1964; TAKASU *et alii*, 1971; MONTEITH, 1973; ROSS, 1975; SANTOS, 1978; DOMENACK, 1980).

No presente trabalho, os valores de R , R_i e R_f (tabelas 2, 3 e 4) para a cultura de cana-de-açúcar, no período das 12:00 às 17:00 horas, apresentaram um comportamento semelhante (fig. 8A). Ou seja, nestas regiões do espectro, há um valor mínimo ao redor das 12:00 horas, elevando-se lentamente até cerca de 16:00 horas e depois rapidamente para um máximo cerca de 16:30 horas. Entretanto, eles diferem nos valores absolutos encontrados (fig. 8 B). Os valores médios diários de refletividade encontrados para a cultura de cana-de-açúcar foram de 19,8%, 32,1% e 4,4% para as radiações global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa (fig. 8).

O coeficiente de reflexão médio para a radiação global encontrado neste trabalho foi pouco maior que os encontrados, em cana-de-açúcar, por CHANG (1961) e BRADLEY (1968) citado por MONTEITH (1973), que foram respectivamente 16 e 15%. No entanto, o seu comportamento geral em função da variação do ângulo de inclinação do sol foi semelhante ao encontrado por CHANG (1961) em cana-de-açúcar e aos encontrados para outras culturas (TAKASU *et alii*, 1971; BLAINE e BAKER, 1972; LEMEUR e ROSEMBERG, 1975).

A razão R_i/R média foi igual a 0,9 e R_f/R foi igual a 0,1, mostrando que cerca de 90% da radiação refletida encontra-se na faixa do infra-vermelho e apenas 10% na faixa da radiação fotossinteticamente ativa. A fig. (8B) mostra o mesmo fato em valores absolutos, sendo esta uma indicação de que a cana-de-açúcar apresenta uma elevada tendência ao aproveitamento da radiação fotossintética.

Comportamento da radiação transmitida e absorvida

A penetração e distribuição da radiação solar através do dossel vegetativo são dados essenciais para a compreensão das suas interações com os processos fisiológicos das plantas.

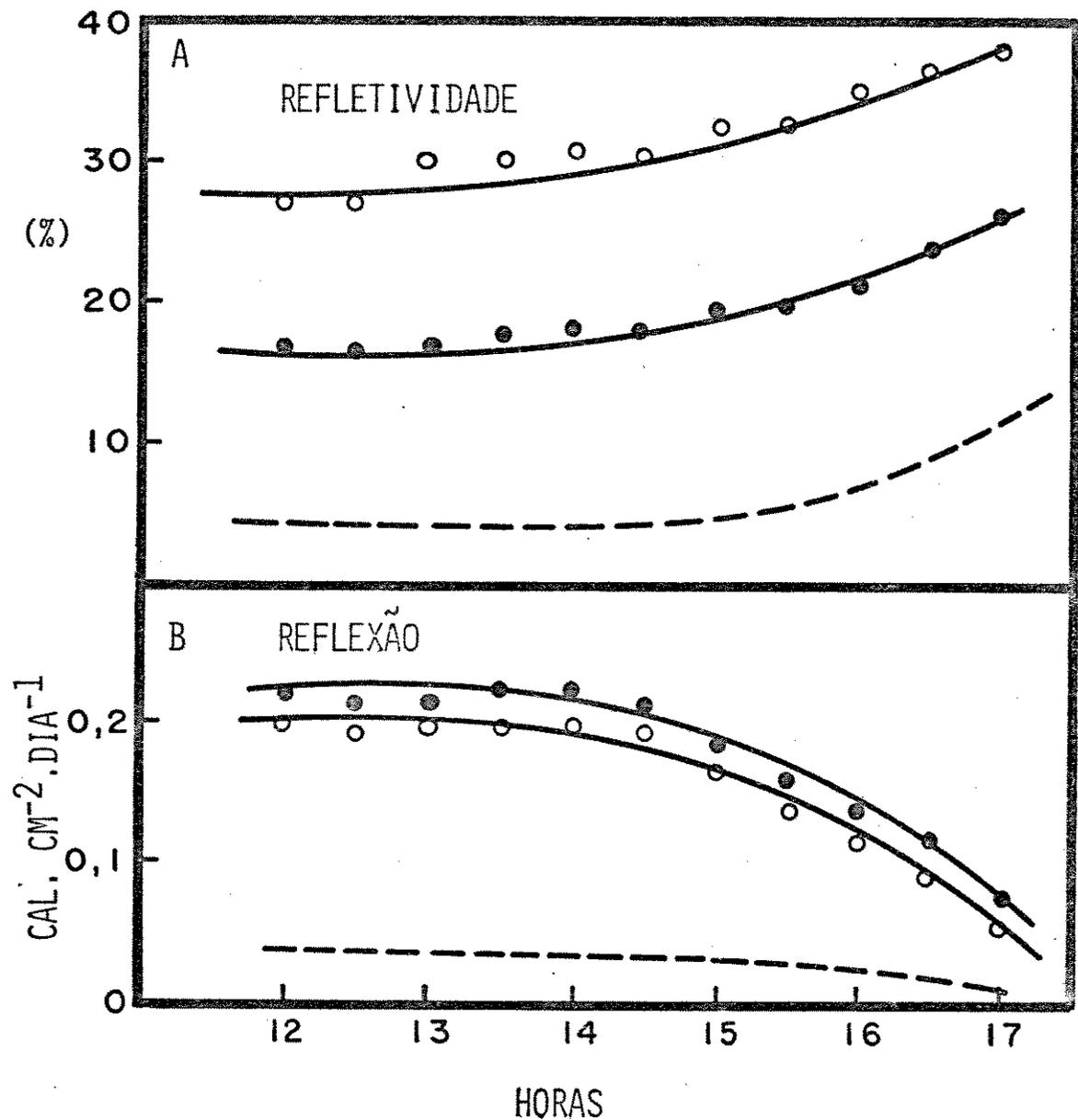


FIG. 8.(A) Variação do coeficiente de reflexão da radiação solar global (—●—), infra-vermelho próximo (—○—) e fotossinteticamente ativa (- - -) e;
 (B) densidade de fluxo de radiação solar global (—●—), infra-vermelho próximo (—○—) e fotossinteticamente ativa (- - -) refletidas por uma comunidade de cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Valores observados em 10/04/1979 em Piracicaba - SP.

A transmissão da radiação solar global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa, durante o período considerado, bem como os respectivos coeficientes de transmissão são apresentados na fig.(9). Analisando-se esta figura, observa-se que o coeficiente de transmissão nas faixas do espectro consideradas foi máximo ao redor das 12:00 horas, diminuindo sensivelmente até ao redor das 15:00 horas e permanecendo praticamente constante até o final do período.

Os valores médios obtidos para a transmissividade foram 15% na faixa da radiação global, 27% na faixa do infra-vermelho e 4% na faixa fotossinteticamente ativa, em relação à radiação líquida, nas respectivas faixas do espectro.

Vários autores (SAEKI, 1960; SAEKI, 1963; ALLEN *et alii*, 1964; YOCUM *et alii*, 1964) sugerem que a transmissão da radiação solar em uma cultura pode ser descrita pela lei de BEER (eq. 18). Muitos dos autores citados definem o valor do coeficiente de extinção (K) com medidas feitas às 12:00 horas. Entretanto, verifica-se que o coeficiente de transmissão varia com o ângulo de inclinação do sol (fig. 9A), o que, conseqüentemente, implica em uma variação do K, conforme também observado por ANDERSON (1966) e GLEGG *et alii* (1974).

O K mínimo ocorreu ao redor das 12:00 horas, e sua variação durante o período considerado foi entre 0,4 e 0,6, entre 0,2 e 0,4 e entre 0,6 a 1,0 para a radiação global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa, respectivamente. Comportamento semelhante de K foi relatado por GLEGG *et alii* (1974) na cultura de sorgo.

Os valores médios de K foram de 0,525, 0,351 e 0,881, para a radiação global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa, respectivamente.

Com o auxílio do K médio e da eq. (18), foram estimados, para cada região do espectro, a quantidade relativa de radiação transmitida em cada nível do dossel vegetativo, considerando-se o IAF acumulado (fig. 10). Pode-se verificar que a radiação infra-vermelho penetra mais do que a fotossinteticamente ativa e, conseqüentemente, a sua proporção aumenta conforme

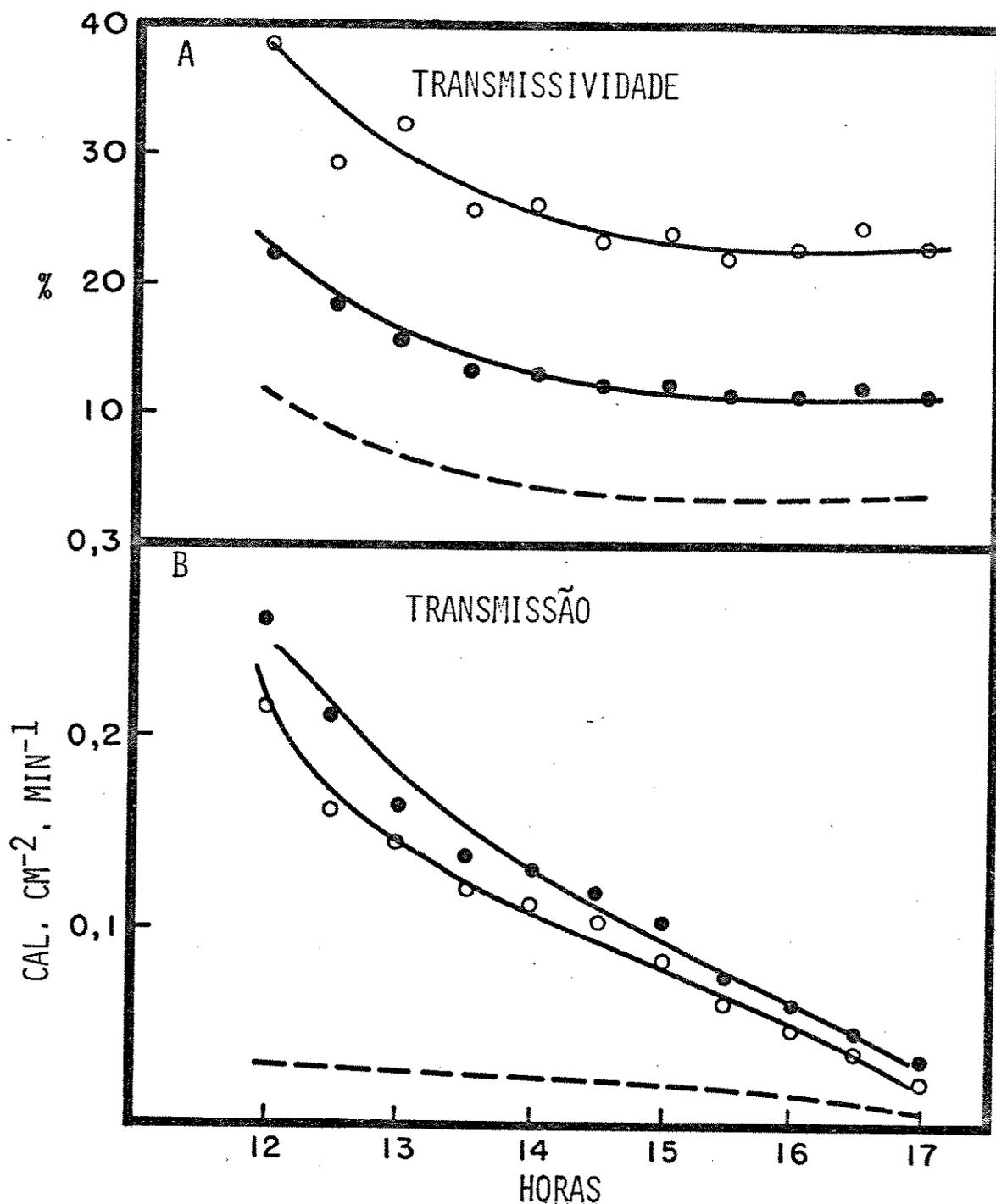


FIG. 9. (A) Variação média horária do coeficiente de transmissão da radiação solar global (—●—), infra-vermelho próxima (—○—) e fotossinteticamente ativa (- - -) e; (B) densidade de fluxo de radiação solar global (—●—), infra-vermelho próxima (—○—) fotossinteticamente ativa (- - -) transmitidas através do dossel vegetativo de uma cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Valores obtidos em 10/04/1979 em Piracicaba - SP.

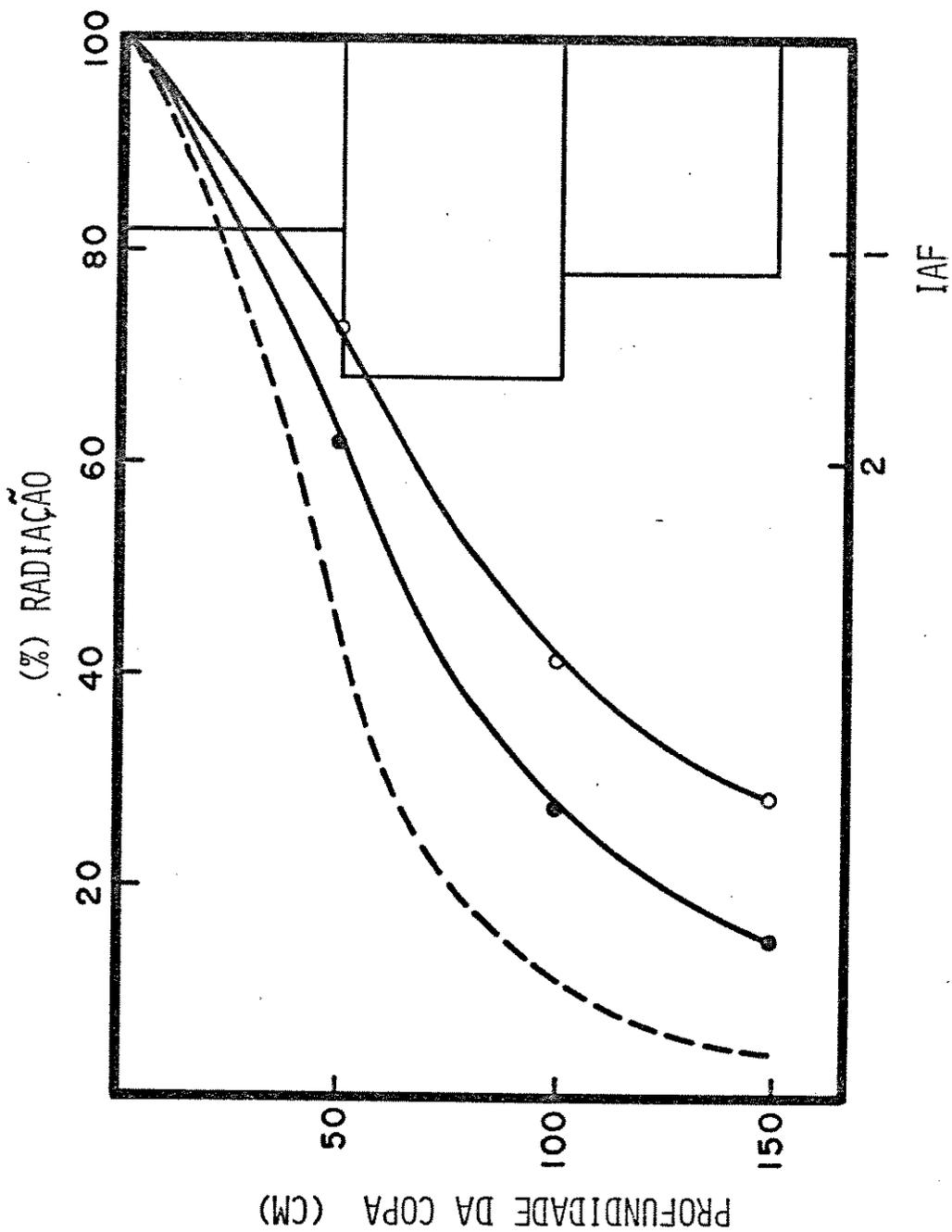


FIG. 10. Percentagem de radiação solar global (—●—), infra-vermelho próxima (—○—) e fotossinteticamente ativa (- - -) transmitidas através do dossel vegetativo de uma cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79 em 10/04/1979 em Piracicaba - SP.

a radiação penetra no dossel. Comportamentos semelhantes foram observados na cultura de milho (YOCUM *et alii*, 1964; SANTOS, 1978; DOMENACK, 1980) e na cultura de soja (KUMURA, 1968).

A radiação absorvida pela cultura de cana-de-açúcar, nas regiões espectrais consideradas, durante o período das 12:00 às 17:00 horas é apresentada na fig. (11). A diferença entre as curvas de absorção de radiação global e infra-vermelho próxima dá uma estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida. As contribuições relativas das radiações fotossinteticamente ativa e infra-vermelho próxima para a radiação total absorvida foram de 60% e 40%, respectivamente.

Os valores mínimos dos coeficientes de absorção ocorreram aproximadamente às 12:00 horas (fig. 12), para depois aumentarem sensivelmente até por volta das 15:00 horas. A partir deste horário, eles apresentaram pequenas variações. Os coeficientes médios de absorção, para o período considerado, foram 85, 70 e 96% em relação à radiação líquida global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa, respectivamente. Valores semelhantes, para a faixa fotossinteticamente ativa, foram relatados por ROSTRON (1974), para duas variedades de cana-de-açúcar. Para a radiação global, MEDINA e SAN JOSÉ (1970) fizeram observações de valores próximos aos reportados.

5.2. Análise Quantitativa do Crescimento

Acúmulo de matéria seca e desenvolvimento da área foliar

O acúmulo de matéria seca total (P) na cultura de cana-de-açúcar apresentou uma curva sigmóide característica, sendo os dados experimentais ajustados à função logística,

$$P = \frac{5.389,5}{1 + \exp(5,6609 - 0,01874 \cdot t_i)}$$

onde t_i é o tempo em dias após o plantio (fig. 13). Esta função é válida somente para o 86º dia em diante.

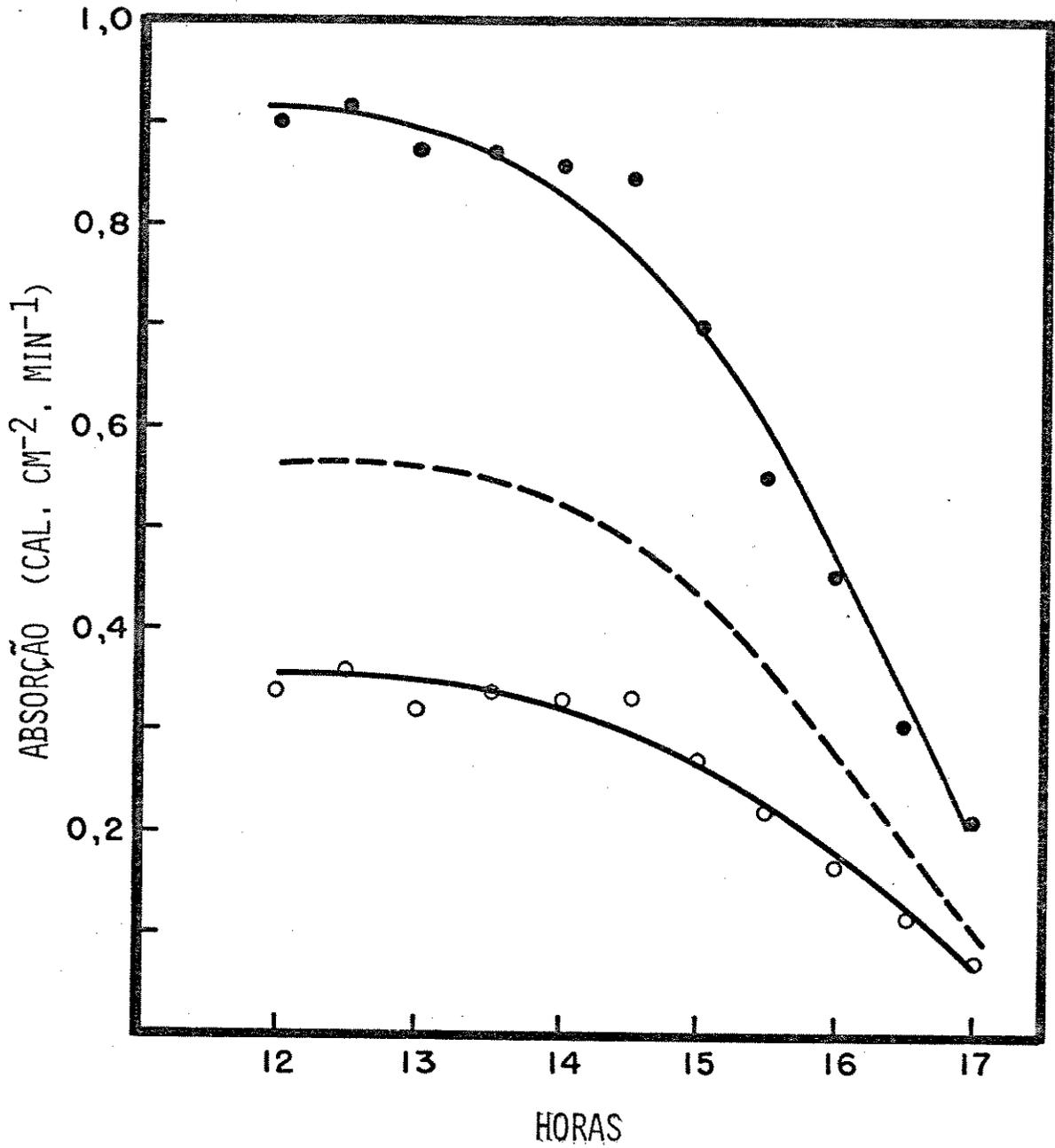


FIG. 11. Radiação solar global (—●—), infra-vermelha próxima (—○—) e fotossinteticamente ativa (- - -) absorvida por uma cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79, em 10/04/1979 em Piracicaba - SP.

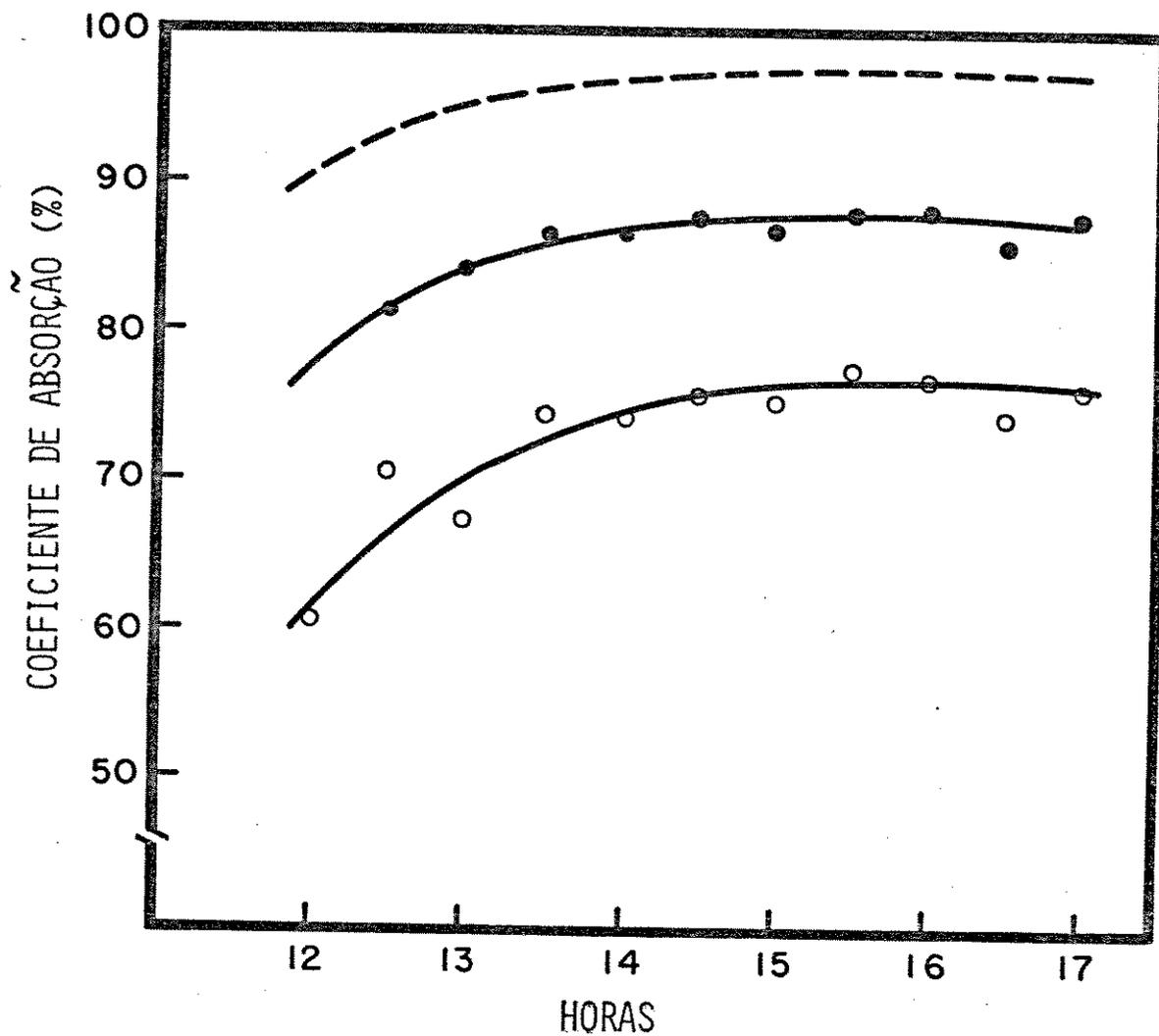


FIG. 12. Variação média horária do coeficiente de absorção da radiação solar global (—●—), infra-vermelho próxima (—○—) e fotossinteticamente ativa (- - -) em uma cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79 em 10/04/1979 em Piracicaba - SP.

Desde que esta função é contínua, pode-se estimar os valores de P para qualquer instante de tempo dentro do período considerado.

Com base nas observações, o processo de crescimento da cana-de-açúcar foi dividido, de uma maneira empírica, em três fases: (i) na fase inicial, compreendida entre o plantio e o 200º dia, o crescimento foi lento; (ii) uma fase, compreendida entre 200º e 400º dia, o crescimento foi rápido e acompanhado de um acúmulo grande de matéria seca (MS). O incremento no peso neste período correspondeu a 75% de toda a MS produzida e (iii) uma fase, entre o 400º e 500º dia, com o crescimento novamente lento e o incremento de MS representou somente 11% do peso total acumulado.

O peso máximo atingido, no final da colheita, foi de 5.260 g de MS . m⁻² de terreno.

O acúmulo de MS nas folhas (F) em função do tempo (fig. 14) também foi descrito pela função logística, ou,

$$F = \frac{370,8}{1 + \exp(3,9615 - 0,02494 \cdot t_i)}$$

Esta função somente é válida para o 86º dia em diante.

A área foliar específica (AFE) praticamente não variou durante o período experimental, e o seu valor foi igual a 1 dm² de folhas . g⁻¹ de MS de folhas. Desta forma, a mesma equação que descreveu o acúmulo de MS nas folhas pode ser usada para estimar o desenvolvimento do Índice de área foliar (IAF) com o tempo. Assim, quando o resultado considerado for peso de MS, a dimensão será g de MS . m⁻² de terreno e quando for IAF, será dm² de folhas . m⁻² de terreno.

O desenvolvimento do Índice de área foliar (IAF) e o acúmulo de MS nas folhas foram lentos no período entre o plantio e o 100º dia. Entre o 100º e 250º dia, a acumulação líquida de MS foi rápida e correspondeu a 75% do peso máximo atingido; após o 250º dia, foi decrescendo até que cessou, ao redor do 300º dia após o plantio (fig. 14).

As plantas de cana-de-açúcar emitiram continuamente novas folhas durante o seu desenvolvimento. O número de folhas presentes por

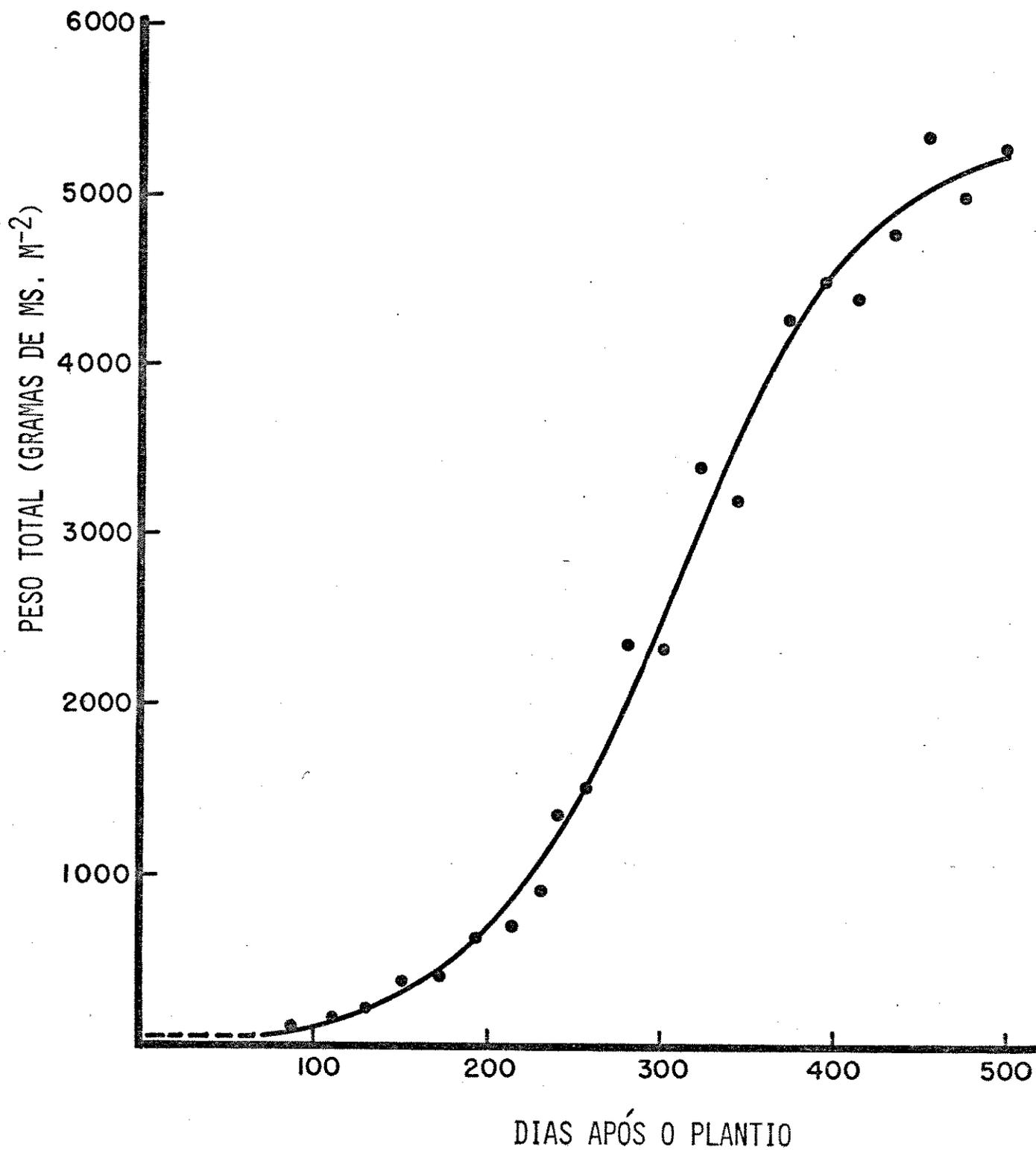


FIG. 13. Curva teórica e valores observados do acúmulo de matéria seca total (P) na cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79, em função do tempo. Piracicaba - SP, 1978/79.

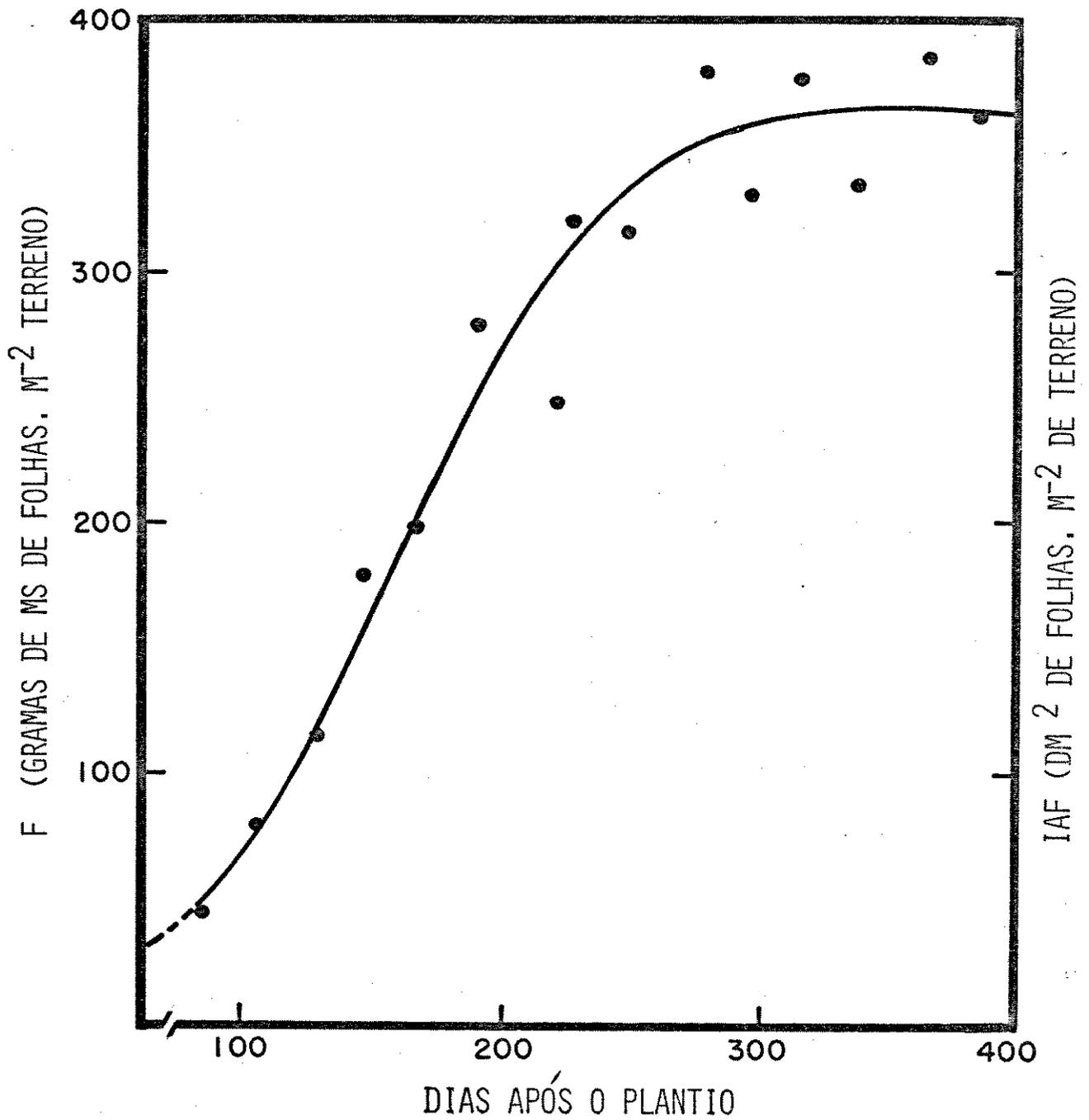


FIG. 14. Curva teórica e valores observados do acúmulo de matéria seca nas folhas (F) e desenvolvimento do índice de área foliar (IAF) em cana-de-açúcar, var. NA 56-79, em função do tempo. Piracicaba - SP, 1978/79.

colmo foi o resultado líquido do balanço entre as taxas de emissão e de senescência, assim é que até os 300 dias o balanço foi positivo e, conseqüentemente, o número de folhas aumentou (fig. 15).

O aumento do IAF e do peso da MS até o 300º dia, ocorreu em função tanto do aumento do número de folhas por colmo, como da dimensão de cada folha (figs. 14 e 15). Entre o 300º e o 400º dia, não houve praticamente nenhum ganho ou perda de MS nas folhas, isto é, tanto o peso como o IAF permaneceram estáveis. Todavia, a taxa de emissão de novas folhas continuou, só que desta feita, contrabalançada pela taxa de senescência das folhas mais velhas, isto é, o número de folhas por colmo permaneceu o mesmo (fig. 15).

A área foliar máxima foi de 370 dm² de folhas . m⁻² de terreno, e o peso seco máximo foi 370 g de MS de folhas . m⁻² de terreno.

O desenvolvimento dos colmos foi semelhante ao do peso de MS total. O crescimento inicialmente foi lento, depois rápido e em seguida houve uma diminuição na quantidade de matéria seca acumulada.

A distribuição de MS entre os colmos e as folhas em função do tempo é apresentada na fig. (16). Ao redor do 100º dia, a contribuição das folhas, em relação ao peso da MS total, foi alta (60%), diminuindo sensivelmente com o desenvolvimento da cultura (fig. 16). Esse comportamento demonstra que cada vez maior fração de MS produzida passa a ser destinada ao crescimento dos colmos, com conseqüente redução na parcela destinada ao crescimento e substituição de folhas.

População de colmos

Um rápido aumento no número de colmos até os 125 dias (19 colmos/m²) foi seguido por um acentuado declínio até ao redor dos 225 dias após o plantio (9 colmos/m²), após o que a população se estabilizou (fig. 17). Comportamentos semelhantes no perfilhamento em diversas variedades de cana-de-açúcar foram relatados para diversos locais, como nas Guianas (McLEAM *et alii*, 1968), Havaí (BORDEN, 1942, 1946), Austrália (BULL e GLASZIOU, 1975) e África do Sul (THOMPSON e DU TOIT, 1965 e GOSNELL, 1968).

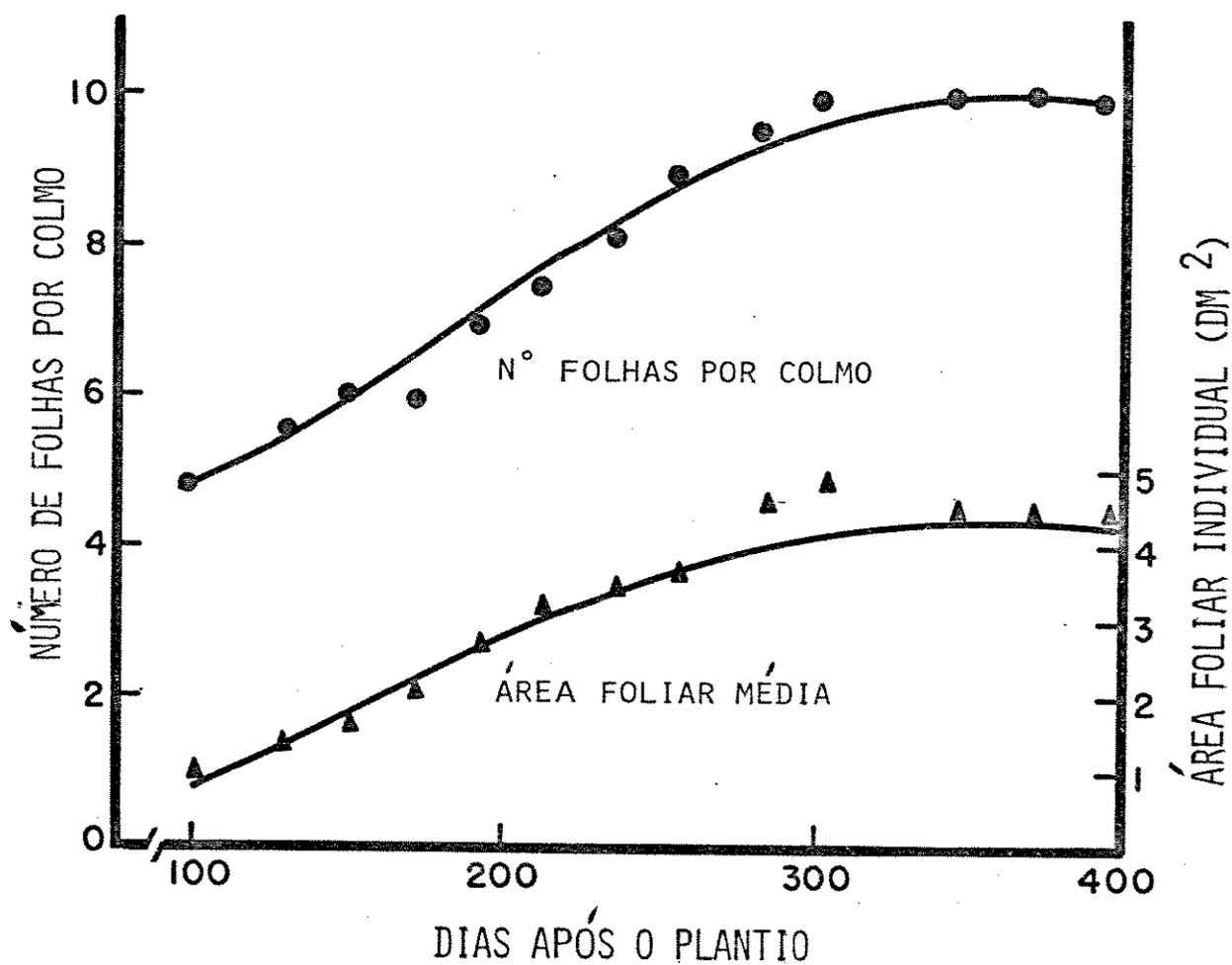


FIG. 15. Comportamento do desenvolvimento do número de folhas por colmo e da área foliar individual média em cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP, 1978/79.

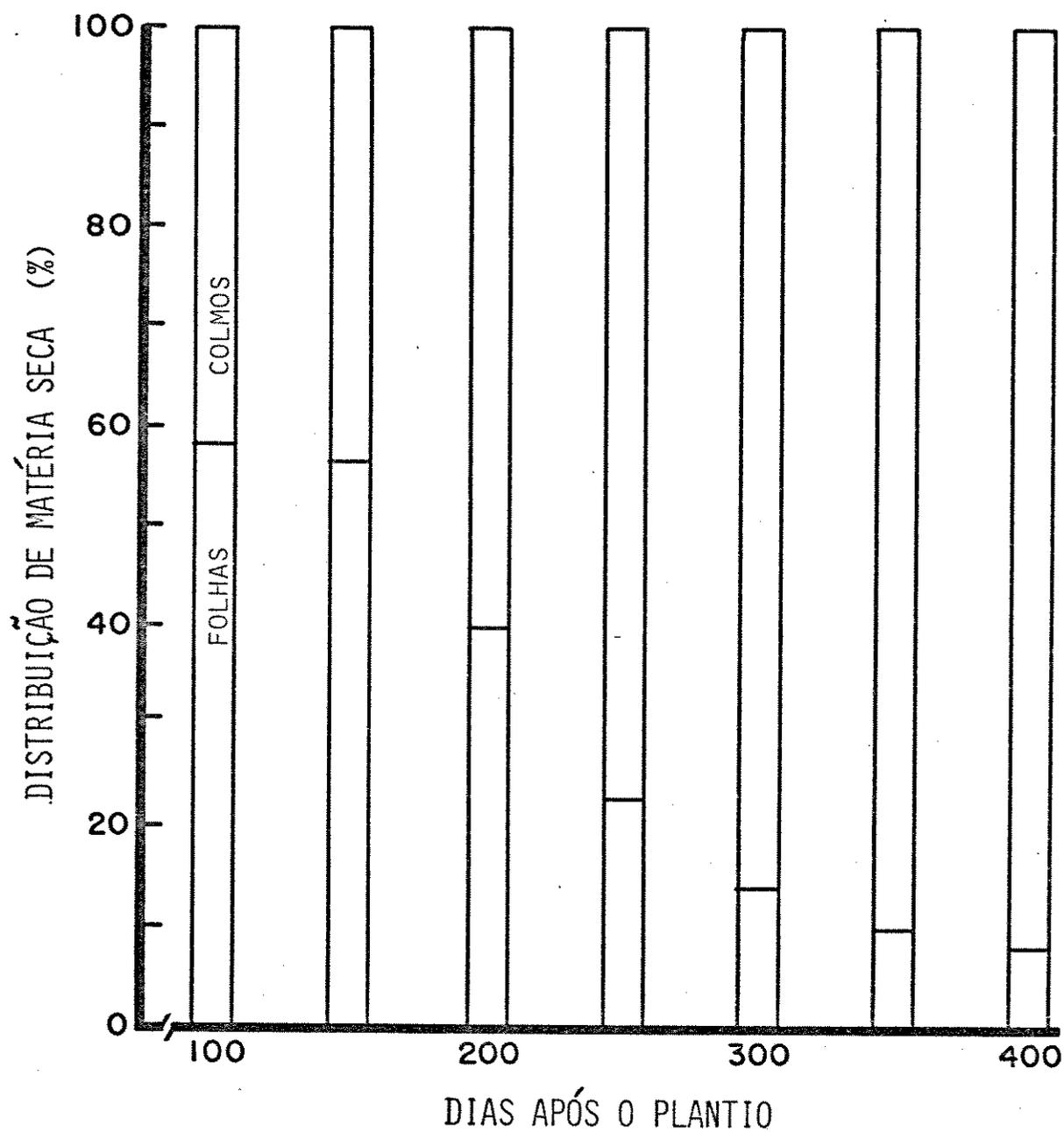


FIG. 16. Distribuição comparativa da matéria seca entre folhas e colmos, durante o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP. 1978/79.

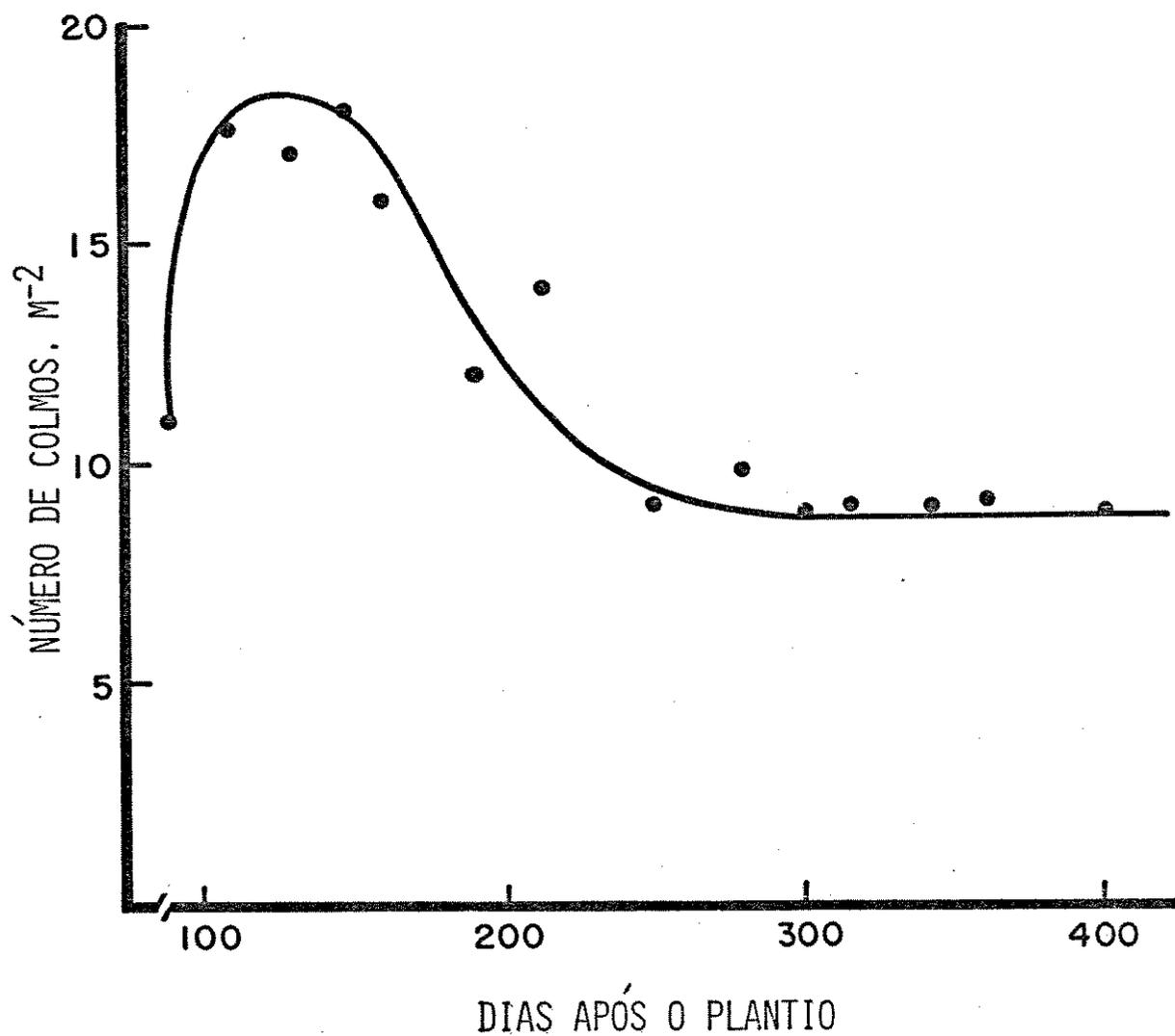


FIG. 17. Variação da população de colmos durante o crescimento da cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP. 1978/79.

THOMPSON e DU TOIT (1965) e GOSNELL (1968) encontraram que o perfilhamento, em culturas de cana-de-açúcar irrigadas e não irrigadas, comportou-se de maneira semelhante. Desta forma, os autores sugeriram que o rápido declínio que ocorreu no número de colmos, provavelmente, não foi causado pela deficiência hídrica. Por outro lado, NICKELL (1975) encontrou que uma redução de 50% da radiação solar provocou uma acentuada queda no número de perfilhos, em cana-de-açúcar. No presente trabalho, verificou-se que a população de colmos caiu acentuadamente no período em que o valor do IAF praticamente dobrou (Figs. 14 e 17). O contínuo aumento no número de colmos nos estádios iniciais do desenvolvimento da cultura, atingindo um número bem acima daquele que sobreviveu, pode ter sido um reflexo da pequena área foliar presente nos colmos novos, conforme também sugerido por THOMPSON e DU TOIT (1965) e GOSNELL (1968). Já no período subsequente (125 a 225 dias), parece que a mortalidade dos colmos ocorreu, principalmente, em função da competição e do progressivo sombreamento que as folhas das plantas mais desenvolvidas exerciam sobre as menos desenvolvidas (figs. 14 e 17), conforme também observado por NICKELL (1975).

Embora este comportamento do perfilhamento pareça ser ineficiente, BULL e GLASZIOU (1975), sugeriram que isto provavelmente seja uma resposta indireta da seleção, pois ele favorece o estabelecimento da cultura e um crescimento inicial mais rápido, até que ocorra o fechamento das copas.

Verificou-se, assim, que o índice de área foliar, número de folhas por colmo, e o acúmulo de matéria seca, não sofreram solução de continuidade no crescimento em função da queda brusca que ocorreu no número de perfilhos (figs. 13, 14 e 17).

Taxa de crescimento da cultura

O comportamento da taxa de crescimento da cultura (TCC) durante o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar é apresentado na fig. (18). A TCC inicialmente foi baixa, depois aumentou até atingir um máximo ao redor dos 300 dias, para em seguida diminuir progressivamente.

Conceitualmente a TCC varia em função tanto do IAF como da

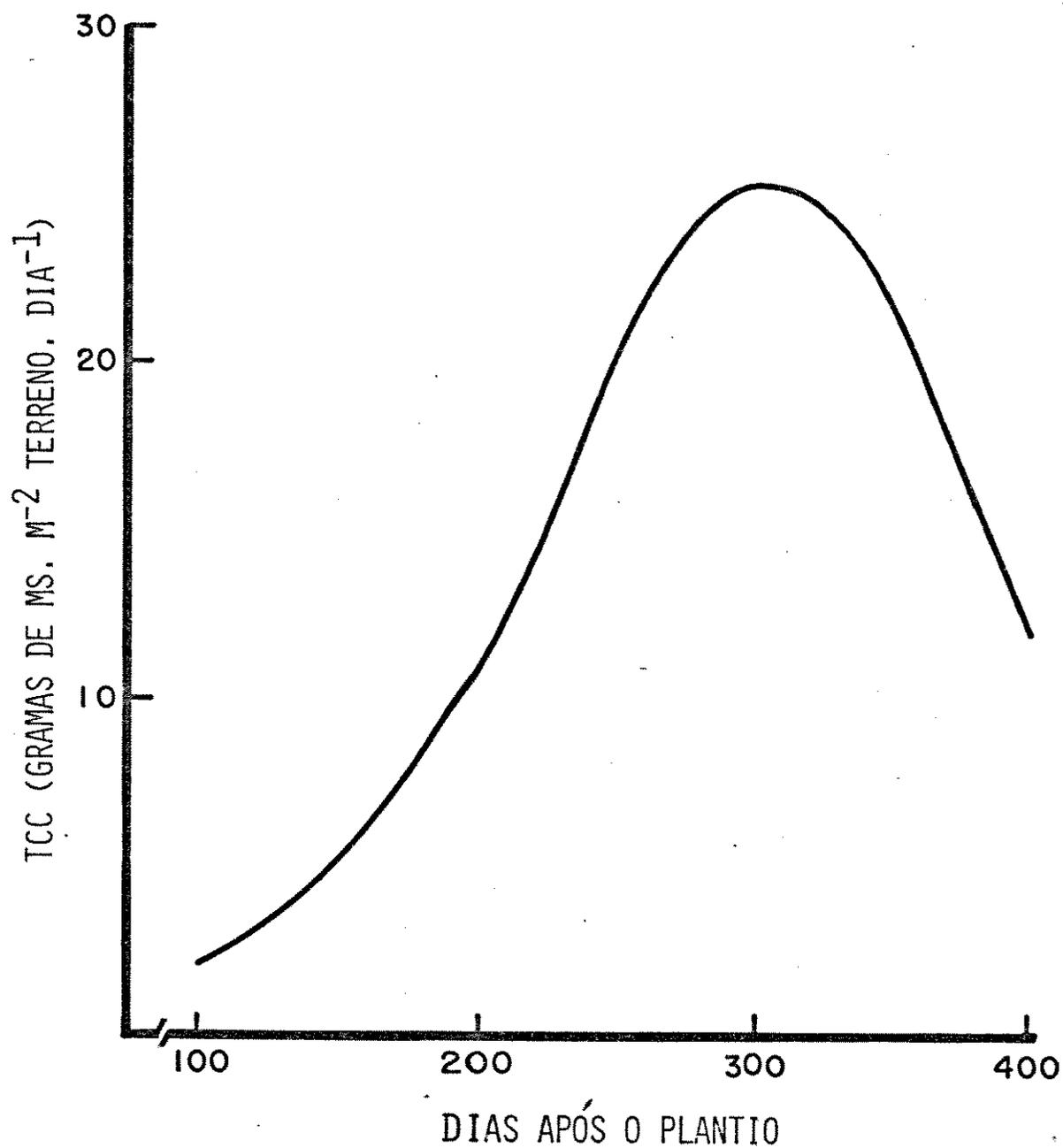


FIG. 18. Comportamento da taxa de crescimento da cultura (TCC) na cultura da cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP 1978/1979.

taxa de assimilação líquida (TAL), isto é,

$$TCC = TAL \cdot IAF$$

Comparando-se as curvas que descrevem o comportamento da TCC, IAF e TAL (figs. 14, 18 e 19A), observa-se que: (i) até o 200º dia, a TCC aumentou em função, principalmente, do IAF, pois a TAL variou pouco neste período. Ou seja, durante a fase inicial, a TCC aumentou em função ao aumento da superfície de interceptação da radiação solar. Este fato foi descrito anteriormente para diversas culturas, como a soja (SHIBLES e WEBER, 1965), trigo (PUCKRIDGES e DONALD, 1967), milho (WILLIAMS *et alii*, 1965; SILVA *et alii*, 1974) e cana-de-açúcar (SAN JOSÉ e MEDINA, 1970); (ii) entre os 200 e 300 dias após a emergência, o aumento da TCC ocorreu em função tanto do IAF como da TAL, pois ambos aumentaram e (iii) a variação da TCC, no período entre 300 e 400 dias após o plantio, ocorreu devido principalmente à variação na TAL, já que o IAF permaneceu constante neste período. A TCC máxima ($25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), encontrada ao redor dos 300 dias, foi devido à combinação do IAF e TAL máximos.

BULL e GLAZIOU (1975) citam que a TCC* média em cana-de-açúcar, em condições excepcionais, pode atingir valores da ordem de 40 g de MS. $\cdot \text{m}^{-2}$ de terreno $\cdot \text{dia}^{-1}$, com uma produção de 150 toneladas de MS $\cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Entretanto, comparando-se vários trabalhos de análise de crescimento, verifica-se que a TCC média através de toda a estação de crescimento da cana-de-açúcar raramente atinge tal valor, variando normalmente entre 10 e $22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ (BORDEN e DENISON, 1942; GOSNELL, 1969; SAN JOSÉ e MEDINA, 1970 e ROSTRON, 1974). Os valores máximos registrados por períodos curtos, na fase mais ativa da cultura, variam entre 37 e $46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ (STEWART, 1970; SAN JOSÉ e MEDINA, 1970).

A TCC média registrada neste trabalho ($12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) foi menor que as encontradas por BORDEN e DENISON (1942), SAN JOSÉ e MEDINA (1970) e ROSTRON (1974) ($22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), provavelmente porque os en-

(*) A $\overline{TCC} = P_f - P_i / N \cdot A$, onde P_i é o peso da matéria seca após a emergência, P_f o peso da matéria seca na colheita final, N o número de dias da emergência à colheita e A a área de terreno.

saios experimentais destes autores foram conduzidos sob irrigação. Esta prática proporciona um estabelecimento mais rápido do IAF (WATSON, 1952), o que pode elevar o valor da TCC média (WILLIAMS, *et alii*, 1965; SHIBLES e WEBER, 1965).

BULL (1971) e BULL e GLASZIOU (1975), comparando o comportamento da TCC de cana-de-açúcar com a TCC de várias espécies dos tipos C_3 e C_4 , sugeriram que as maiores produções finais encontradas em cana-de-açúcar são mais relacionadas com o longo período em que as culturas permanecem no campo, com o sistema fotossintetizador ativo, do que propriamente com a superioridade de sua TCC. Por exemplo, no caso presente verifica-se no período entre os 200 e 360 dias que a TCC média foi $23g \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$. Este valor não é muito alto, entretanto uma TCC média desta ordem é raramente encontrada por períodos tão longos (160 dias) em outras espécies vegetais.

Taxa de assimilação líquida (TAL)

A taxa de assimilação líquida (TAL) apresentou valores menores no período compreendido entre os 100 e 150 dias após o plantio, depois aumentou até atingir um máximo ($7g$ de MS $\cdot m^{-2}$ de folhas $\cdot dia^{-1}$) ao redor dos 300 dias e em seguida diminuiu progressivamente (fig. 19A).

A TAL é o resultado do balanço entre o material produzido, pela fotossíntese e as perdas respiratórias. Então, torna-se difícil determinar, pela técnica da análise de crescimento, se sua variação é devido à variação na taxa de fotossíntese ou na taxa de respiração ou ainda de ambas. Todavia, WATSON (1952) sugeriu ser razoável admitir que a TAL decresça com a diminuição da razão de área foliar (RAF = área foliar/peso de MS total), considerando que o material fotossintetizado é produzido, principalmente, pelas folhas e que a respiração se processa em todos órgãos da planta. Entretanto, neste trabalho, no período entre o 150º e o 300º dia, apesar da RAF ter diminuído de 0,46 para 0,15 dm^2 de folhas $\cdot g^{-1}$ de MS (fig. 20), a TAL aumentou de 4 para 7 g de MS $\cdot m^{-2}$ de folhas $\cdot dia^{-1}$ (fig. 19A).

A taxa de fotossíntese máxima potencial, em cana-de-açúcar,

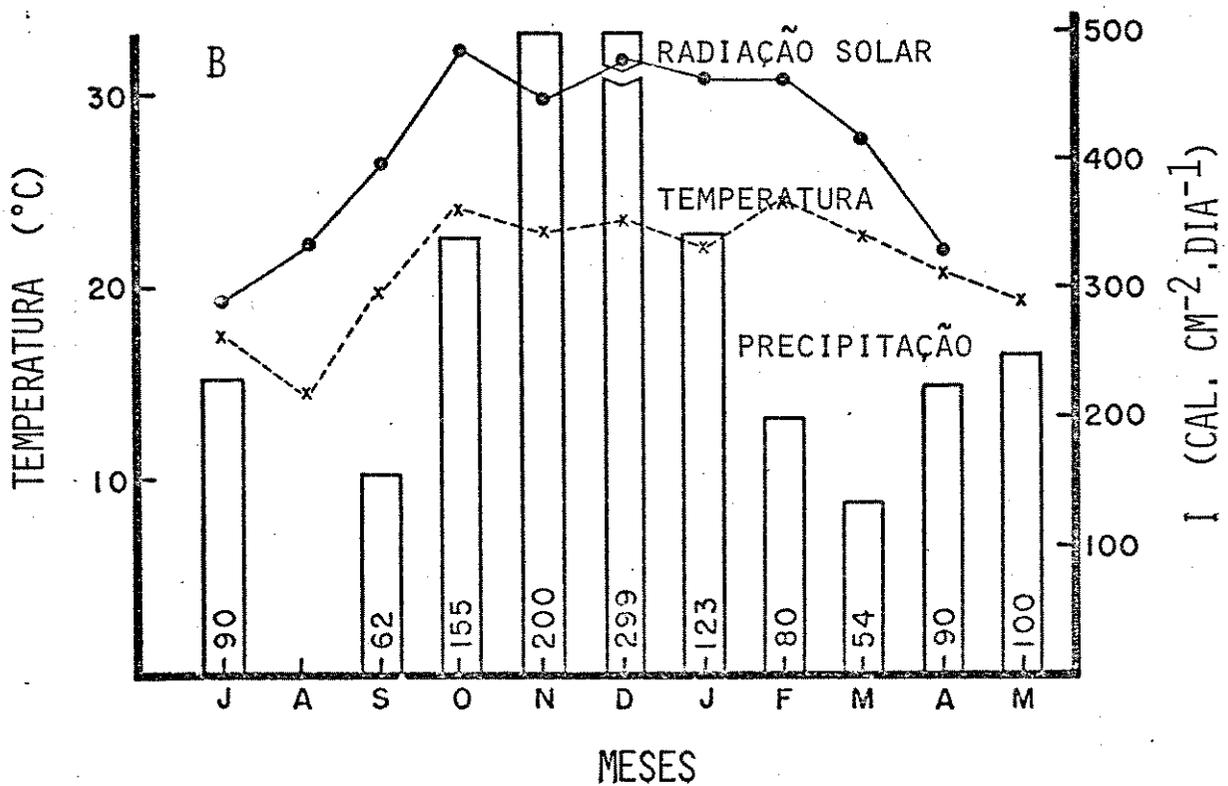
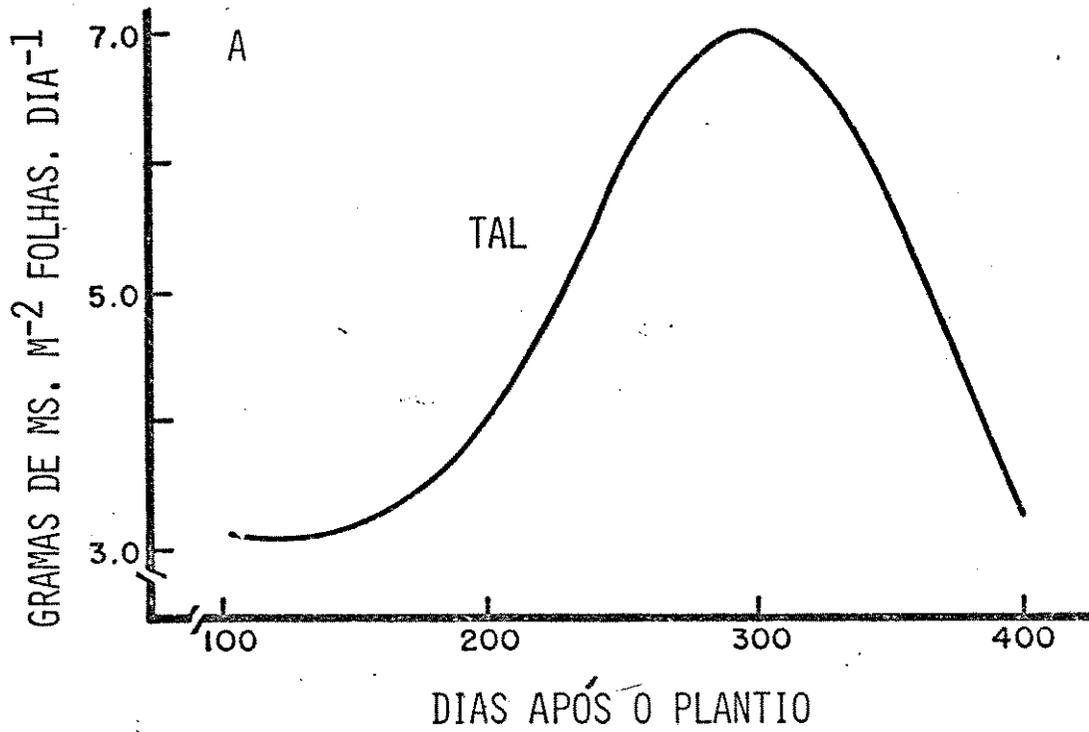


FIG. 19. Comportamento da taxa de assimilação líquida (TAL) na cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79 (A), relacionada com a radiação solar, temperatura média e precipitação pluviométrica (B). Piracicaba - SP. 1978/79.

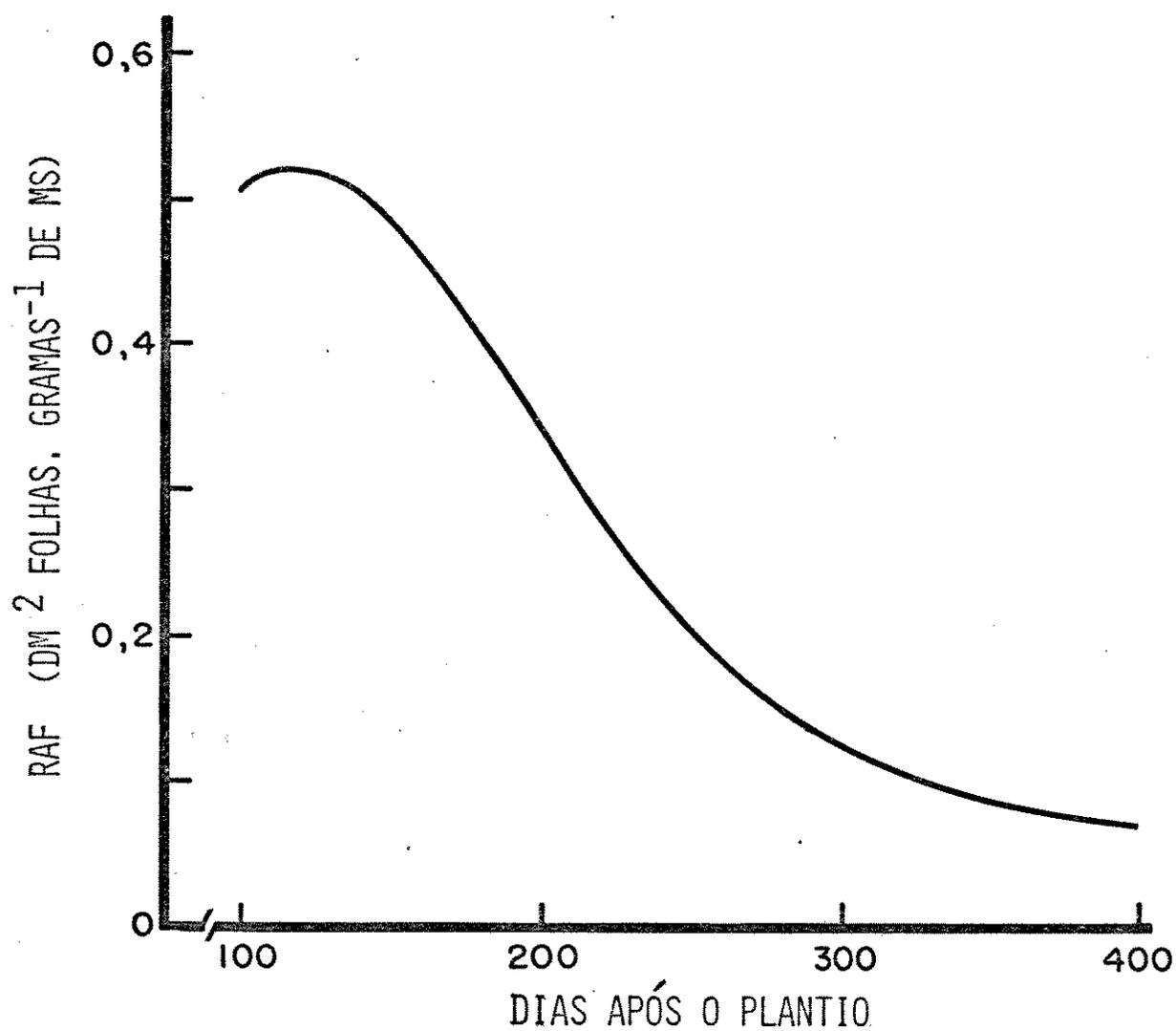


FIG. 20. Comportamento da razão de área foliar (RAF) na cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79, Piracicaba - SP. 1978/79.

diminui com a idade da planta (HARTT e BURR, 1965; KORTSCHAK e FORBES, 1969; BULL, 1969, 1971). Por outro lado, BULL (1971) observou que a taxa de fotossíntese no verão foi duas vezes maior que no inverno, sugerindo assim que ela foi fortemente dependente da variação estacional na precipitação, temperatura e, principalmente, na radiação solar. Então, a importância do decréscimo da eficiência fotossintética com a idade é, em parte, minimizada. Desta forma, baseando-se nas pesquisas citadas e nos resultados encontrados neste trabalho, parece que o aumento da TAL, no período considerado, foi devido a um aumento da taxa de fotossíntese em resposta às melhores condições climáticas (fig. 19 A,B). Verifica-se assim (fig. 19 A,B), que a variação da TAL apresentou uma tendência no seu comportamento relacionada com a variação da precipitação, temperatura e radiação solar. WATSON (1952) e KVET *et alii* (1971) citam que em várias espécies vegetais são encontradas relações entre a variação da TAL com os elementos climáticos.

Em adição à análise feita acima, a variação da TAL pode ser interpretada como uma resposta do aparelho fotossintetizador ao aumento da demanda por fotossintetizados, devido às exigências do rápido crescimento dos colmos. Neste aspecto NEALES e INCOLL (1968) em sua revisão propõem que a atividade do sítio de consumo (sink) pode influenciar a taxa de fotossíntese (sítio de produção ou 'source').

Taxa de crescimento relativo (TCR)

A variação da taxa de crescimento relativo (TCR) com o tempo é apresentada na fig. (21).

Conceitualmente, a TCR é dada pelo produto da variação da TAL e da razão de área foliar (RAF), como segue,

$$TCR = TAL \times RAF$$

Os valores máximos atingidos pela TCR foram registrados no início do desenvolvimento da cultura até aproximadamente os 100 dias, em consequência da relação favorável entre a área foliar e o peso de MS total (figs. 15 e 20). Apesar da TAL ter aumentado no período subsequente até

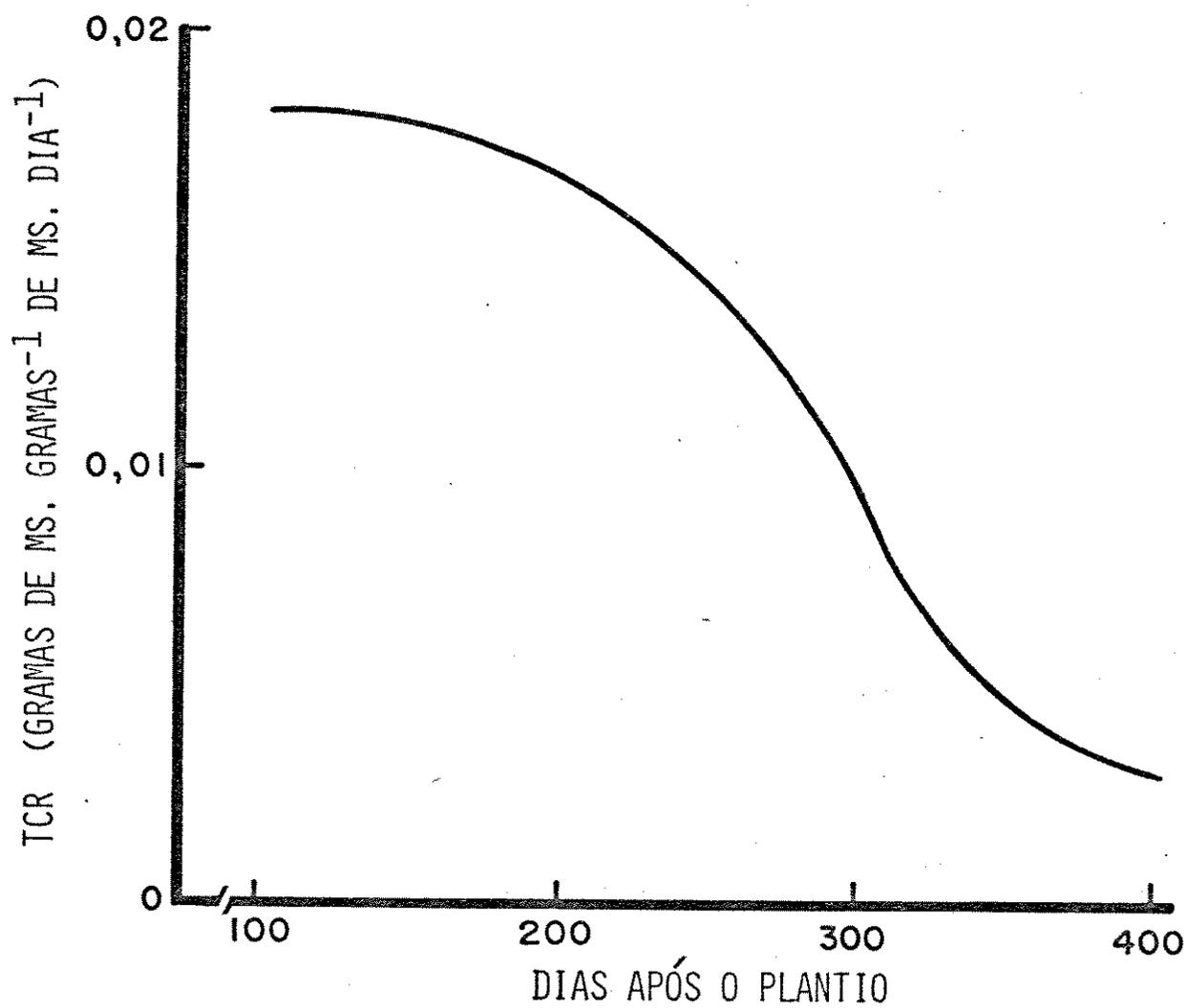


FIG. 21. Comportamento da taxa de crescimento relativo na cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP. 1978/79.

os 330 dias, este aumento não foi o suficiente para evitar uma queda acentuada da TCR. Este comportamento deve ser esperado desde que a RAF diminui muito nesta fase, como resultado do aumento acentuado do peso de tecidos não assimilatórios (fig. 20).

O comportamento da TCR aqui encontrado, embora com valores menores, foi semelhante ao descrito por SAN JOSÉ e MEDINA (1970).

Eficiência fotossintética (EF)

Toda matéria orgânica acumulada pelas plantas é devido à fotossíntese (NICHIPOROVICH, 1968) de forma que um dos critérios mais adequados para avaliar a produtividade biológica, de uma comunidade vegetal, é determinar a eficiência fotossintética (NICHIPOROVICH, 1968; LOOMIS *et alii*, 1971; COOPER, 1975). A radiação solar é o fator primeiro que determina a produção potencial, todavia, esta pode ser limitada pela eficiência na disponibilidade de elementos nutritivos e de água e pela temperatura (NICHIPOROVICH, 1968). Assim é que em condições ótimas de clima e solo, as plantas do tipo C₄ podem atingir uma eficiência fotossintética média (\overline{EF})* da ordem de 5 a 6% (NICHIPOROVICH, 1968; ROSTRON, 1974; COOPER, 1975).

A EF no período inicial de cultivo ao redor de 100 dias foi baixa (0,4 e 0,9% em relação à radiação global e fotossinteticamente ativa, respectivamente), depois aumentou até atingir um máximo ao redor dos 300 dias após o plantio (2,3 e 5,0% em relação à radiação solar global e fotossinteticamente ativa, respectivamente) e em seguida diminuiu progressivamente (fig. 22). Isto é, a tendência geral no comportamento da EF foi relacionado com o crescimento da cultura e com os parâmetros climáticos.

A EF média foi de 2,8% em relação à radiação fotossinteticamente ativa, sendo inferior às registradas por BURR *et alii* (1957) e ROSTRON (1974), que foram respectivamente 4 e 5%, sob condições adequadas de cultivo e irrigação.

(*) $\overline{EF} = P \cdot \Delta H / I_f$, onde P é o peso de MS total acumulada através do período de cultivo, ΔH o valor energético de MS e I_f a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa incidente.

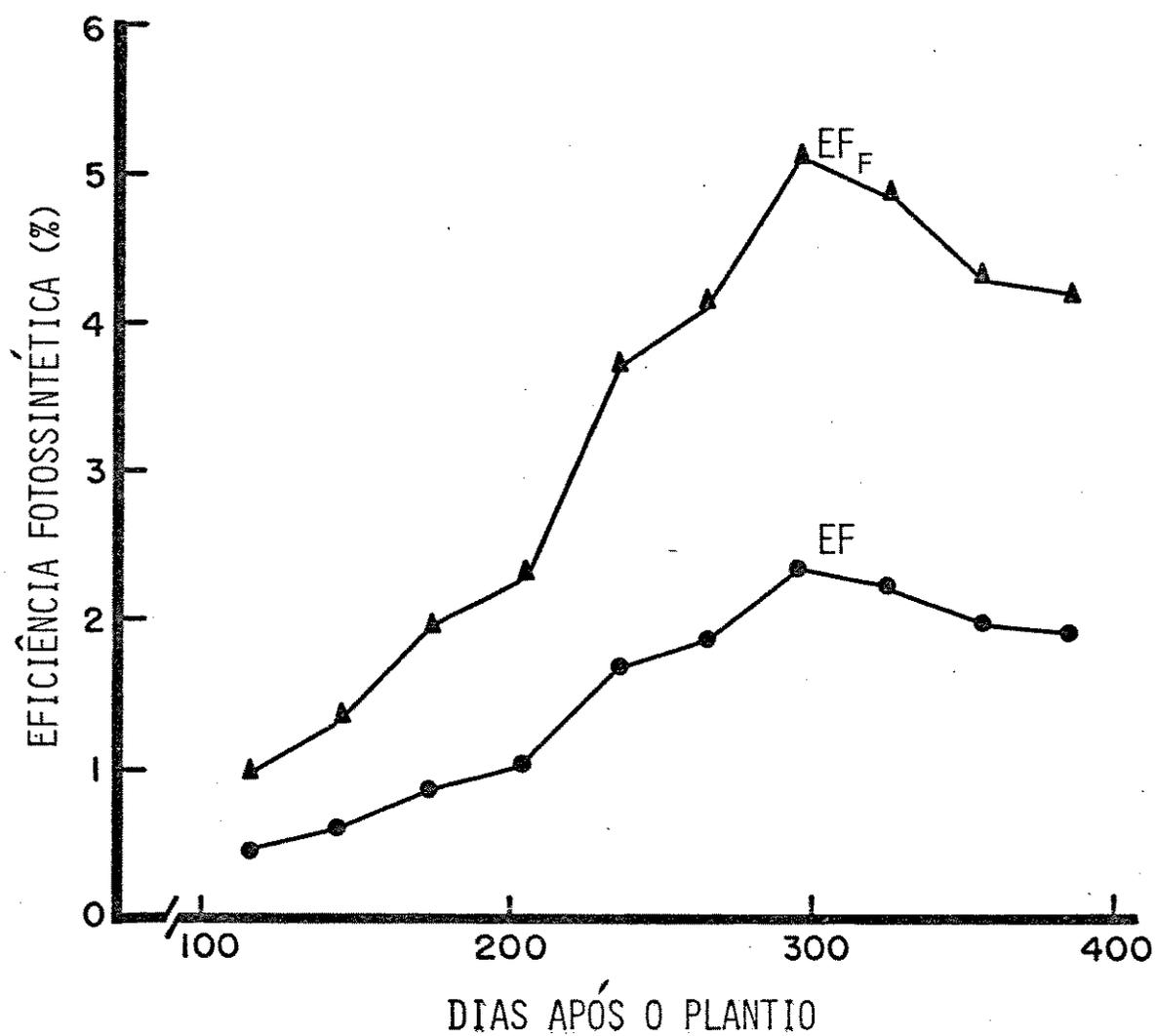


FIG. 22. Eficiência fotossintética média, em períodos de 30 dias, em relação à radiação solar global (EF) e fotossinteticamente ativa (EF_f) para a cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP. 1978/79.

Para fins de análise, dividindo-se o período de cultivo em duas partes: (i) do plantio aos 220 dias e (ii) de 220 a 400 dias após o plantio, observa-se que a EF média foi respectivamente 1,1 e 4,0%.

Verificou-se neste e em outros trabalhos (SHIBLES e WEBER, 1965; WILLIAMS *et alii*, 1965; COOPER, 1975), que a taxa de produção nas fases iniciais de uma cultura é uma função da radiação solar interceptada pelas folhas. Assim, as baixas precipitações e temperaturas que ocorreram no 1º período, provavelmente, retardaram o estabelecimento de um alto IAF na fase inicial de cultivo (WATSON, 1952), o que provocou uma influência negativa na expressão da EF.

No 2º período considerado o IAF foi alto e as condições climáticas mais adequadas e a EF média atingiu um valor razoável em torno de 4%.

Desta forma, é razoável admitir que a adoção de práticas mais adequadas de fertilização (LOOMIS e GERAKI, 1975), estudos sobre população de plantas (WATSON, 1952; THOMPSON e DU TOIT, 1965; WILLIAMS, *et alii*, 1965) e de práticas de irrigação (GOSNELL, 1968; DEMÉTRIOS, 1978) poderiam proporcionar um desenvolvimento mais rápido do IAF e, em decorrência, elevar a eficiência fotossintética global.

5.3. Modelo Matemático-Fisiológico

Para se ter uma noção da possibilidade do modelo matemático-fisiológico ser operacional, alguns resultados simulados são discutidos e comparados com resultados experimentais.

5.3.1. Comportamento teórico das taxas de fotossíntese bruta, líquida e de respiração em função do Índice de área foliar

A ilustração das respostas das taxas de fotossíntese bruta, líquida e de respiração em função do IAF, utilizando-se dos modelos propostos com fatores de ajustamento adequados, é apresentado na figura (23).

Considerou-se nestes cálculos uma comunidade hipotética constando de plantas com 300 dias de idade, $P = 296$ g/planta, $F = 40$ g/planta, nas seguintes condições: $T_{\max} = 31^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$, $I = 500$ cal. cm^{-2} . dia^{-1} e $f(\text{DH}) = 1$.

Conhecendo-se o peso de MS pode-se manipular teoricamente o número de plantas/ m^2 (variação de 2,5 a 18 plantas/ m^2) de forma a obter-se arranjos com vários IAF (variação de 1 a 7).

Os resultados encontrados na simulação são consistentes com os obtidos experimentalmente por vários autores (LUDWIG *et alii*, 1965; McCREE e TROUGHTON, 1966; KING e EVANS, 1967; McCREE, 1970, 1974; ROBSON, 1973).

O incremento da FOT_b com o IAF é cada vez menor (fig. 23). Como a respiração de crescimento é proporcional à FOT_b , seu incremento também é cada vez menor. Por outro lado, a respiração de manutenção aumenta proporcionalmente com a população de plantas/ m^2 . Assim, verifica-se que a fotossíntese líquida aumenta inicialmente, atinge um máximo, estabiliza-se brevemente e depois diminui vagarosamente em IAF altos.

5.3.2. Estimativa das perdas respiratórias durante o crescimento da cana-de-açúcar

A partir dos valores diários da taxa de crescimento da cultura, do peso da matéria seca e das T_{\max} e T_{\min} , o modelo de simulação da respiração (eq. 57) permite avaliar o comportamento da respiração total,

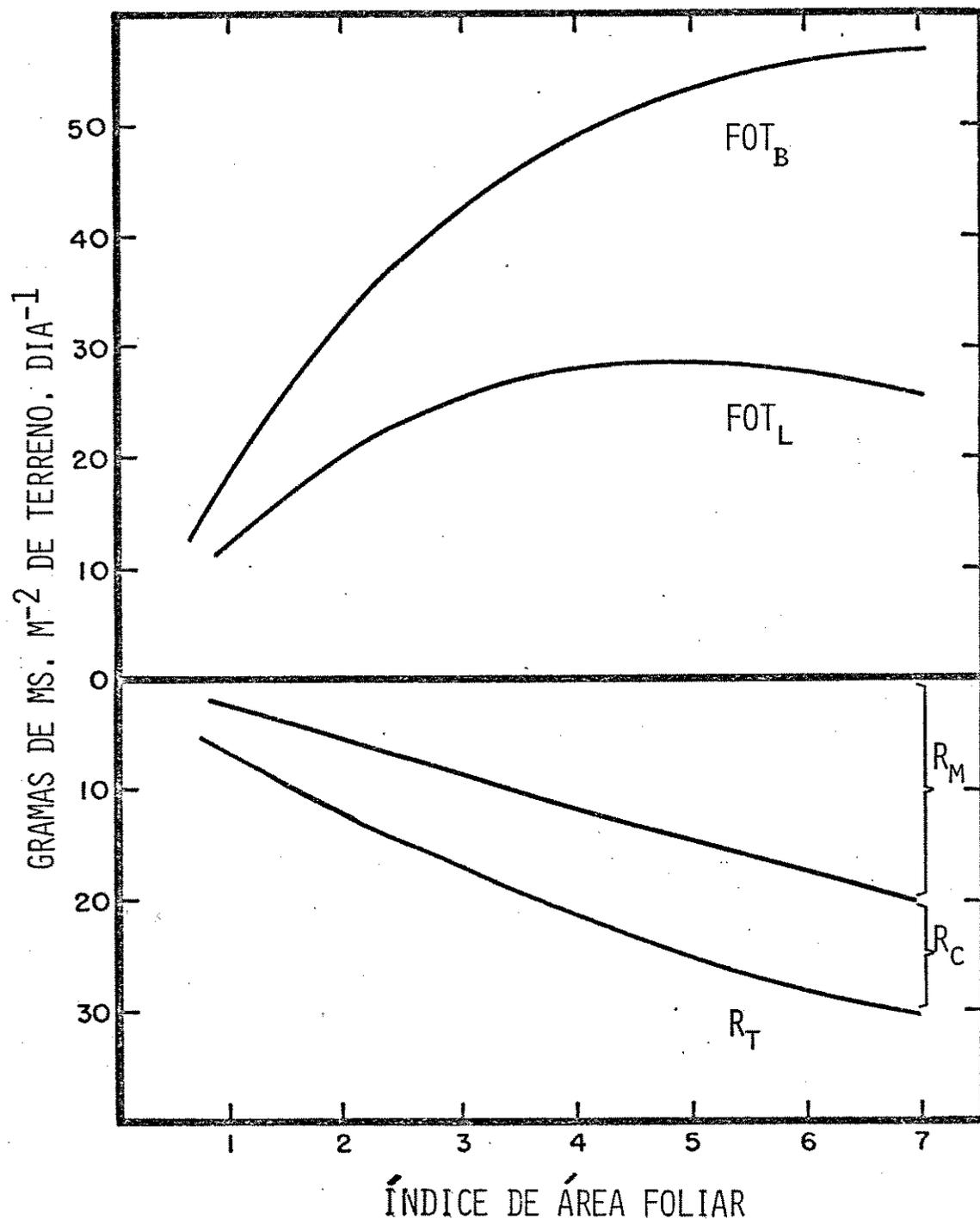


FIG. 23. Relação teórica entre a taxa de fotossíntese bruta (FOT_B), taxa de fotossíntese líquida (FOT_L), taxa de respiração de crescimento (R_C) e de manutenção (R_M) em relação à variação do índice de área foliar (IAF) para a cultura de cana-de-açúcar. As estimativas foram feitas assumindo-se que: $T_{max} = 30^{\circ}C$, $T_{min} = 20^{\circ}C$ e $I = 500 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

bem como dos seus dois componentes, ou seja, a respiração de crescimento (R_c) e de manutenção (R_m), durante o período de cultivo.

As figs. (24) e (25) ilustram o comportamento diário de R_t , R_c e R_m . Até os 180 dias após o plantio, a maior parte da respiração foi associada com R_c , após este período, R_m torna-se quantitativamente mais importante em função do aumento do peso da matéria seca (figs. 24 e 25). Este comportamento de R_m , encontrado a partir da simulação, parece ser razoável, desde que com o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, a RAF diminuiu bastante (fig. 20), ou seja, há um maior acúmulo de matéria seca nos órgãos não fotossintetizantes. Resultados semelhantes aos encontrados aqui foram relatados para a cultura de beterraba açucareira, também através de simulação (HUNT e LOOMIS, 1979).

Após os 320 dias, a taxa de respiração total diminuiu em função tanto de R_c como de R_m (figs. 24 e 25). A R_c sofreu uma redução, entre os 300 e 400 dias, de 46% em função da queda que ocorreu na taxa de fotossíntese bruta, e a R_m diminuiu em 26% em função das quedas na temperatura do ar e no valor do coeficiente de manutenção (R_m) com a idade da planta.

A fig. (26) mostra a importância relativa das perdas respiratórias sobre a fotossíntese bruta (R_t/FOT_b), no período compreendido entre os 60 e 400 dias após o plantio das plantas. Inicialmente, a R_t representou aproximadamente 25% da FOT_b , depois aumentou progressivamente até que ao redor dos 400 dias representou 50% de perdas, em relação a todo material fotossintetizado (fig. 26). Esta porcentagem de perdas pode atingir valores ao redor de 70% perto da maturação das plantas (não apresentado na fig. 26). O aumento da relação R_t/FOT_b é devido principalmente à importância crescente da R_m com a idade da planta (figs. 24 e 25). Estes resultados simulados (R_t/FOT_b) são coerentes com os medidos por MEDINA *et alii* (1970) e os estimados por GLOVER (1973), durante o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar.

5.3.3. Simulação do acúmulo de matéria seca

Utilizando-se os modelos propostos para a estimativa das

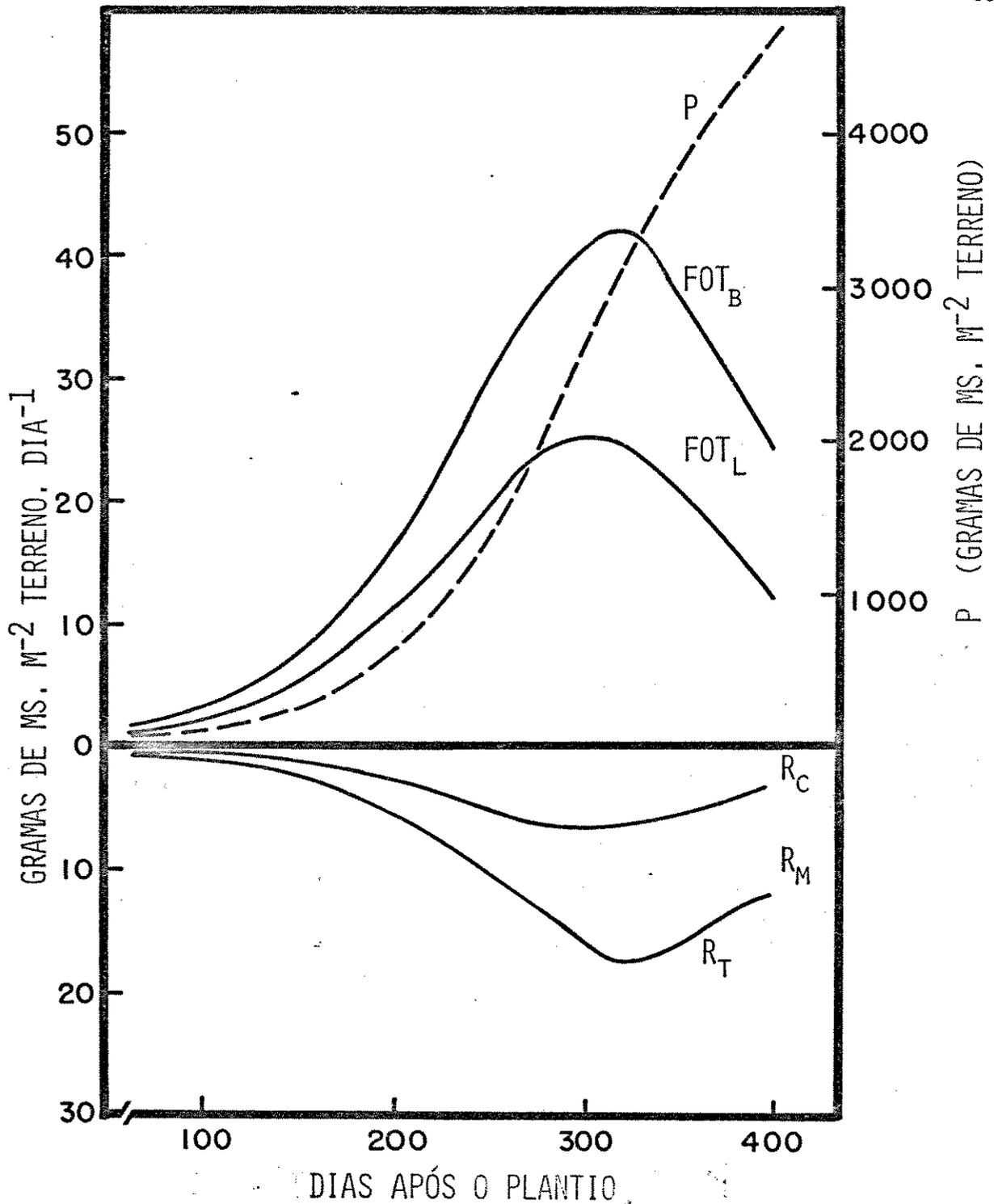


FIG. 24. Simulação da respiração de crescimento (R_C) e de manutenção (R_M) em relação à taxa de fotossíntese bruta (FOT_B), líquida (FOT_L) e peso da matéria seca (P) durante o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP. 1978/79.

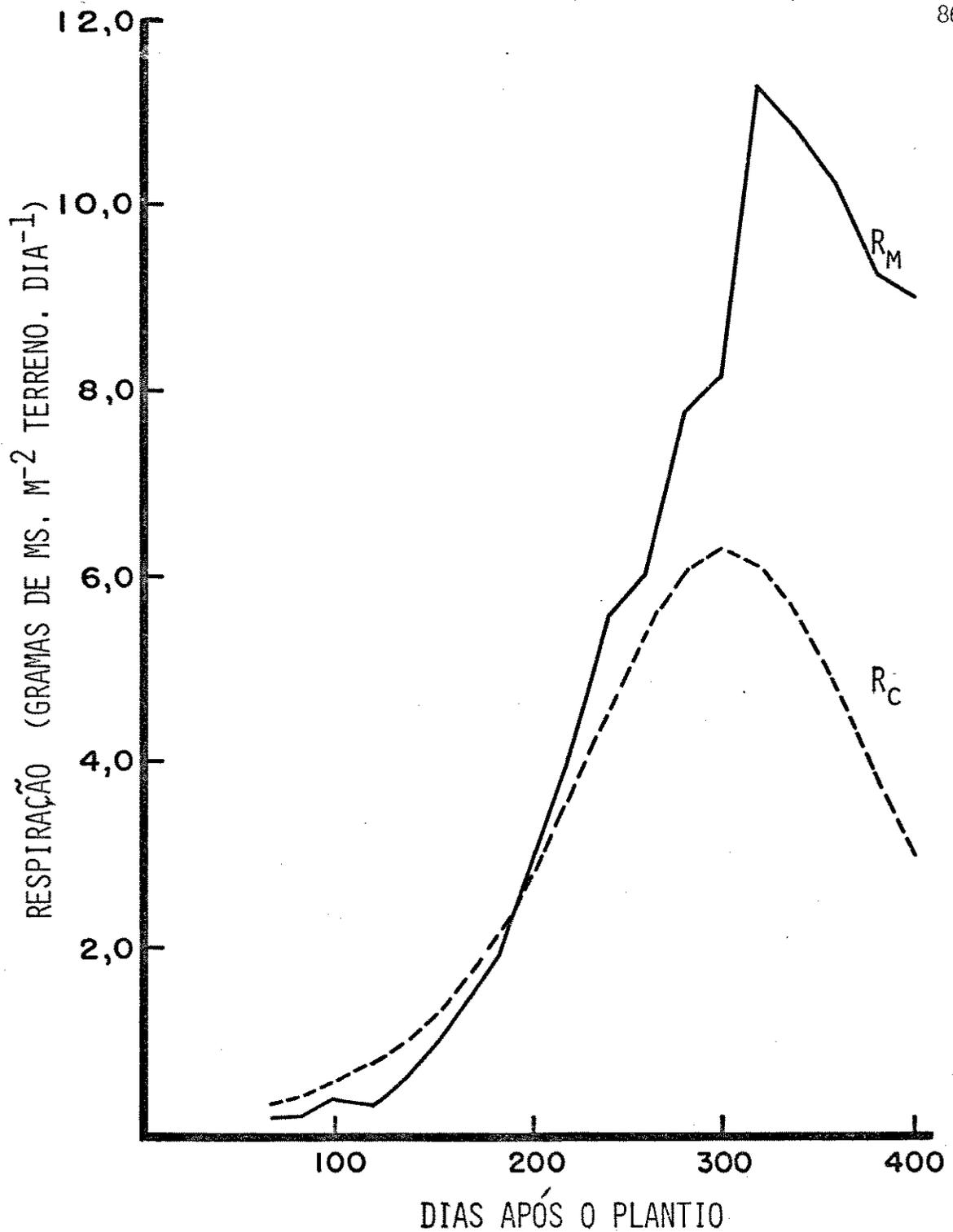


FIG. 25. Respiração de crescimento (- - -) e de manutenção (—), estimados pelo modelo de respiração, durante o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP 1978/1979.

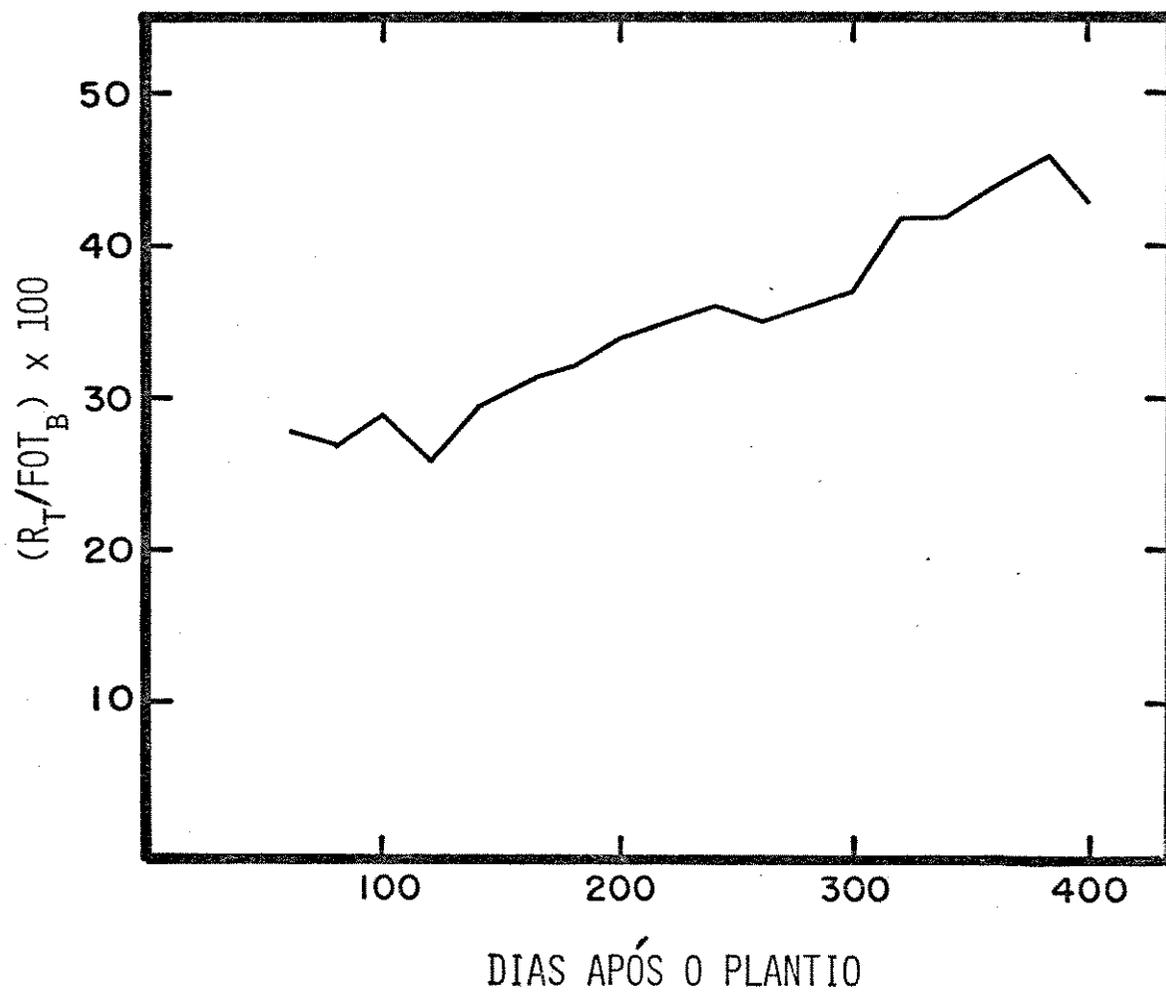


FIG. 26. Simulação da respiração total expressa como porcentagem de perdas em relação à taxa de fotossíntese bruta, durante o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79. Piracicaba - SP. 1978-79.

taxas de fotossíntese e de respiração, com o auxílio dos dados meteorológicos medidos durante a experimentação, procedeu-se a simulação do acúmulo de matéria seca para a cultura de cana-de-açúcar. A simulação foi feita para os meses de setembro a fevereiro, já que somente para estes meses havia todos os dados meteorológicos e de umidade do solo (veja apêndice I).

Os resultados teóricos da simulação e os medidos no campo são apresentados comparativamente na fig. (27).

Os resultados encontrados na simulação apresentaram um comportamento consistente em relação aos obtidos experimentalmente. Entretanto nas fases inicial e final, o modelo subestimou os valores encontrados experimentalmente, enquanto que na fase intermediária, do desenvolvimento da cultura, superestimou. Evidencia-se, desta forma, que os vários parâmetros e relações adotadas no desenvolvimento do modelo devem ser revistos com mais detalhes visando-se um melhor ajustamento entre a curva teórica e experimental.

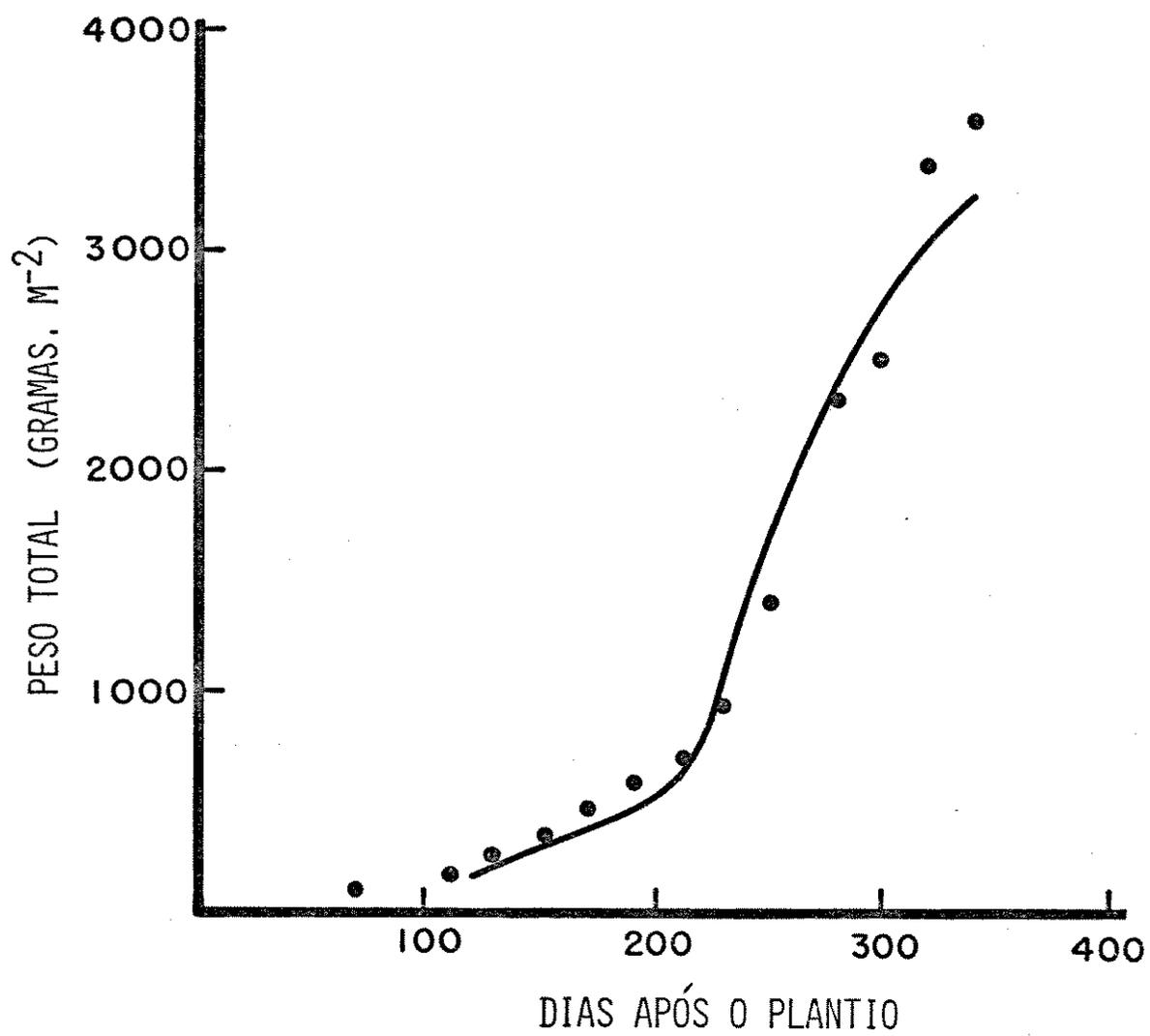


FIG. 27. Acúmulo de peso seco medido (●) e simulado (linha) para a cultura de cana-de-açúcar, var. NA 56-79, Piracicaba - SP. 1978/79.

6. CONCLUSÕES

6.1. Balanço de Radiação Solar de Ondas Curtas

(i) Os coeficientes de reflexão da radiação solar global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa, tiveram um comportamento semelhante em relação ao ângulo de inclinação do sol. Ou seja, seus valores mínimos ocorreram por volta das 12:00 h, aumentando com o ângulo de inclinação solar.

(ii) Os valores médios dos coeficientes de reflexão foram 19,8, 32,1 e 4,4% com uma amplitude, respectivamente, de 16,4 a 25,0 % para a radiação global, de 28,0 a 38,8% para a infra-vermelho próxima e de 3,1 a 7,1 para a fotossinteticamente ativa.

(iii) A razão média entre a radiação infra-vermelho próxima refletida e radiação global refletida foi 0,9 ($R_i/R = 0,9$) e entre a radiação fotossinteticamente ativa refletida e radiação global refletida foi 0,1 ($R_f/R = 0,1$), indicando que a cana-de-açúcar tem um alto aproveitamento da radiação fotossinteticamente ativa.

(iv) Os coeficientes de transmissão da radiação solar global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa, apresentaram um comportamento semelhante em relação ao ângulo de inclinação do sol. Eles tiveram um valor máximo ao redor das 12:00 h, decrescendo com o aumento do ângulo de inclinação solar.

(v) Os valores médios dos coeficientes de transmissão foram

15,0, 27,0 e 4,5% em relação à radiação global líquida, infra-vermelho próxima líquida e fotossinteticamente ativa líquida. Ou seja, a transmissividade do dossel vegetativo para os comprimentos de onda acima de 700 nm é bem superior à da região correspondente à fotossinteticamente ativa.

(vi) Os coeficientes de extinção (K) da radiação global, infra-vermelho próxima e fotossinteticamente ativa variaram com o ângulo de inclinação solar.

(vii) Os valores médios dos coeficientes de extinção foram 0,52, 0,35 e 0,88 com uma amplitude, respectivamente, de 0,4 a 0,6 para a radiação global líquida, de 0,2 a 0,4 para a infra-vermelho próxima líquida e de 0,6 a 1,0 para a fotossinteticamente ativa líquida.

(viii) Os valores médios dos coeficientes de absorção foram 85, 72 e 96% em relação à radiação global líquida, infra-vermelho próxima líquida e fotossinteticamente ativa líquida, respectivamente.

(ix) As contribuições relativas da radiação fotossinteticamente ativa e infra-vermelho próxima, para a radiação total absorvida foram, respectivamente, 60 e 40%. Este resultado também é mais um indicativo do alto aproveitamento da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura de cana-de-açúcar.

6.2. Análise Quantitativa do Crescimento

(i) O acúmulo de matéria seca total (P) apresentou uma curva de crescimento sigmoideal, ajustável à seguinte função logística:

$$P = \frac{5.389,5}{1 + \exp(5,6609 - 0,01874 \cdot t_i)}$$

a qual é válida para o 86º dia após o plantio em diante.

(ii) O acúmulo de matéria seca nas folhas (F) apresentou uma curva de crescimento sigmoideal, ajustável à seguinte função logística:

$$F = \frac{370,8}{1 + \exp(3,9615 - 0,02494 \cdot t_i)}$$

a qual é válida para o 86º dia até o 400º dia após o plantio.

(iii) O índice de área foliar (IAF) aumentou em função tanto do aumento do número de folhas por colmo como da dimensão da área foliar média, sendo que o máximo valor atingido foi 3,7.

(iv) A um rápido aumento do número de colmos, até os 125 dias (19 colmos/m²) seguiu-se um rápido declínio, até os 225 dias (9 colmos/m²), após o que a população permaneceu estável.

(v) A queda do número de colmos/m² não provocou declínio no peso de matéria seca total e das folhas.

(vi) A taxa de crescimento da cultura (TCC) média foi de 12g de matéria seca . m⁻² de terreno . dia⁻¹, atingindo um máximo de 25g . m⁻² . dia⁻¹.

(vii) A variação da taxa de crescimento da cultura com o tempo foi devido tanto à variação no índice de área foliar como na taxa de assimilação líquida (TAL). Sendo que o valor máximo verificado para a taxa de crescimento da cultura foi devido à combinação do índice de área foliar máximo com a taxa de assimilação máxima.

(viii) A taxa de assimilação líquida apresentou uma tendência no seu comportamento relacionada com a variação da precipitação, temperatura e radiação solar.

(ix) O valor máximo verificado para a taxa de assimilação líquida foi de 7g de matéria seca . m⁻² de folhas . dia⁻¹.

(x) A taxa de crescimento relativo (TCR) diminuiu com a idade da planta.

(xi) A razão de área foliar (RAF) diminuiu acentuadamente com a idade da planta, mostrando que cada vez maior fração da matéria seca produzida foi destinada ao crescimento dos colmos.

(xii) A eficiência fotossintética média foi de 2,8% em relação à radiação fotossinteticamente ativa, sendo que a eficiência máxima foi de 5%.

6.3. Modelo Matemático-Fisiológico

(i) O comportamento teórico das taxas de fotossíntese bruta, líquida e de respiração em função do índice de área foliar, encontrado a partir da simulação, apresentaram resultados consistentes com os obtidos experimentalmente. A taxa de fotossíntese líquida inicialmente aumenta com o índice de área foliar, atinge um máximo, estabiliza-se brevemente e depois diminui vagarosamente em altos índices de área foliar.

(ii) A respiração de crescimento foi maior que a respiração de manutenção até ao redor dos 180 dias, invertendo-se após este período.

(iii) As perdas relativas da respiração total (R_t) sobre a fotossíntese bruta (FOT_b) aumentaram acentuadamente com a idade da cultura (de 25%, aos 60 dias, até 70%, aos 500 dias). O aumento da relação R_t/FOT_b é devido principalmente à crescente importância da respiração de manutenção em função ao aumento do peso de matéria seca total.

(iv) A aplicação do modelo para simular o acúmulo de matéria seca, mostrou um comportamento teórico consistente com os resultados obtidos experimentalmente, embora nas fases inicial e final do desenvolvimento da cultura, o modelo subestime ligeiramente os resultados e na fase intermediária superestime. Evidenciando que os vários parâmetros e fatores de ajustamento adotados devem ser revistos visando-se um melhor ajustamento entre a curva gerada teoricamente e a experimental.

7. SUMMARY

A physiological model was developed to simulate the dry matter accumulation in the sugar-cane, using meteorological data.

The model consists of a series of equations which describe quantitatively the physiological behaviour of the plant due to the variation of the environmental conditions. Most of the parameters and factors used to develop the equations were obtained from research data available in the literature, and from the results obtained in the present experiment.

The estimate of the daily dry matter net production was done by the balance between its gains and losses, represented by photosynthesis and respiration, respectively.

The rates of gross photosynthesis and respiration were estimated as the product of their maximum potential rate by a series of limiting factors. These factors represent an estimate of the effect that each environmental and/or physiological condition has on the physiological processes under consideration.

The photosynthetic rate of the crop was calculated from the light-photosynthetic function, radiant flux density, radiation distribution within the canopy, radiation reflected by the crop surface, leaf area, age of the plant and leaf, air temperature and available soil moisture.

The radiation intercepted by the crop and the radiation distribution within the canopy were determined experimentally by the balance of the global and near infra-red radiation made in a sugar-cane plantation,

located in the Experimental Station of Piracicaba of the Instituto Agronômico. Solar radiation was measured by an Eppley pyranometer and solar radiation transmitted and reflected by the crop was measured with 8 tube solarimeter ELTEC-JE.

Considering that total plant respiration is the sum of growth and maintenance respiration, their relative contributions are discussed. The respiration was calculated considering the effects of temperature and plant age. The same limiting factors used to calculate the crop photosynthetic rate were indirectly used to estimate the crop respiration rate.

The distribution of net dry matter production among the different plant organs, was defined as the ratio between the organ growth rate and the plant growth rate. These rates were determined experimentally using the quantitative growth analysis method, with material sampling once every 21 days, starting 86 days after planting.

The increase in the plant and leaf dry matter accumulation, as well as, the leaf area could be described by the logistic function,

$$f(x) = \frac{A}{1 + \exp(-n - p.XT)}$$

where A, n and p are parameters of the equation and XT the time after planting.

The performance of the model was tested by comparing the values estimated by it with experimental data. From such comparison the following conclusions could be drawn:

(i) The theoretical behaviour of the gross and net photosynthesis and respiration in function of the leaf area index, was consistent with experimental data; the net photosynthesis rate increased initially with leaf area index, remained constant and then decreased slowly.

(ii) The growth respiration was greater than the maintenance respiration to about 180 days after planting, after this period the maintenance became greater than growth respiration.

(iii) The relative losses of total respiration (R_t) to the total photosynthesis (FOT_b) increased markedly with the crop age (from 25% at 60 days after planting to 70% at 500 days after planting). The increase in the relation R_t/FOT_b was mainly due to the increasing importance of the maintenance respiration in function of the increase in the total dry weight.

(iv) The application of the model to simulate the crop dry matter accumulation indicated a theoretical behaviour consistent with the experimental data obtained in this study. However in the initial and final phases of the crop development, the model underestimated the experimental production, and in the intermediate phase the results were overestimated.

8. LITERATURA CITADA

- ACOCK, B., CHARLES-EDWARDS, D.A. e SAWYER, S., 1979. Growth response of a Chrysanthemum crop to the environment. III, Effects of radiation and temperature on dry matter partitioning and photosynthesis. *Ann. Bot.* 44: 289-300.
- ALBERDA, TH., 1962. Actual and potential production of agricultural crops. *Neth. J. agric. Sci.* 10: 325-333.
- ALLEN, L.H., YOCUM, C.S. e LEMOM, E.R., 1964. Photosynthesis under field conditions. VII. Radiant energy exchanges within a corn crop canopy and implications in water use efficiency. *Agron. J.* 36: 253-259.
- ANDERSON, M.C., 1966. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *J. appl. Ecol.* 3: 41-54.
- ANDERSON, M.C., 1970. Radiation climate, crop architecture and photosynthesis. In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. SETLIK, I. (ed.). Wageningen, Pudoc. p. 71-78.
- ASHTON, F.M., 1956. Effects of a serie of cycles of alternating low and high soil water contents on rate of apparent photosynthesis in sugar cane. *Plant Physiol.* 31: 266-274.
- ASLAM, M., LOWE, S.B. e HUNT, L.A., 1977. Effect of leaf age on photosynthesis and transpiration of cassava (*Manihot esculenta*). *Can. J. Bot.* 55: 2288-2295.

- BAKER, D.N., HESKETH, J.D. e DUNCAN, W.G., 1972. Simulation of growth and yield in cotton. I. Gross photosynthesis, respiration, and growth. *Crop Sci.* 12: 431-435.
- BIRD, I.F., CORNELIUS, M.J. e KEYS, A.J., 1977. Effects of temperature on photosynthesis by maize and wheat. *J. Exp. Bot.* 28: 519-524.
- BLAINE, L.B. e BAKER, D.G., 1972. Reflected radiation from a soybean crop. *Agron. J.* 64: 277-280.
- BORDEN, R.J., 1942. A search for guidance in the nitrogen fertilization of the sugar cane crop. Part I - The plant crop. *Hawaiian Planters' Record* 46: 191-238.
- BORDEN, R.J. e DENISON, F.C., 1942. A study of optimum crop length. *Hawaiian Planters' Record* 46: 119-137.
- BORDEN, R.J., 1946. A search for guidance in the nitrogen fertilization of the sugarcane crop. Part III. The second ratoon crop. *Hawaiian Planters' Record* 50: 161-200.
- BEEVERS, H., 1970. Respiration in plants and its regulation. In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. SETLIK, I. (ed.) Wageningen - Pudoc. p. 209-214.
- BULL, T.A., 1969. Photosynthesis efficiencies and photorespirations in Calvin cycle and C_4 - dicarboxylic acid plants. *Crop Sci.* 9: 726-729.
- BULL, T.A., 1971. The C_4 pathway related to growth rates in sugarcane. In: Photosynthesis and Photorespiration. HATCH, M.D., OSMOND, C.B., e SLATYER, R.O. (eds) - Canberra - Australia. John Wiley, Inc., p. 68-75.
- BULL, T.A. e GLASZIOU, K.T., 1975. Sugar cane. In: Crop Physiology: Some Case Histories. EVANS, L.T. (ed.). Cambridge University Press. p. 51-72.
- BULL, T.A. e TOVEY, D.A., 1974. Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol.* 15: 1021-1032, Durban, South Africa.
- BURR, G.O., HARTT, C.E., BRODIE, H.W., TANIMOTO, T., KORTSCHAK, H.P., TA-

- KAHASHI, D., ASHTON, F.M. e COLEMAN, R.E., 1957. The sugarcane plant. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 8: 275-308.
- CHANG, J., 1961. Microclimate of sugar-cane. *Hawaiian Planters' Record* 56: 195-223.
- CHARLES-EDWARDS, D.A. e ACOCK, B., 1977. Growth response of a Chrysanthemum crop to the environment. II. A mathematical analysis relating photosynthesis and growth. *Ann. Bot.* 41: 49-58.
- COOPER, J.P., 1975. Control of photosynthetic production in terrestrial systems. In: Photosynthesis and Productivity in Different environments. COOPER, J.P. (ed.). Cambridge University Press. p. 593-621.
- COWAN, I.R., 1968. The interception and absorption of radiation in plant stands. *J. appl. Ecol.* 5: 367-379.
- CURRY, R.B. e CHEN, L.H., 1971. Dynamic simulation of plant growth - Part II. Incorporation of actual daily weather and partitioning of net photosynthate. *ASAE Trans.* 14: 1170-1175.
- DAVIDSON, J.L. e PHILIP, J.R., 1958. Light and pasture growth. In: Climatology and Microclimatology. Proc. Canberra Symp. 1956. UNESCO, Paris, p. 181-187.
- DEMÉTRIO, V.A., 1978. Efeito da água do solo e temperatura ambiente no rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). Piracicaba, SP, ESALQ - USP (Tese de Doutorado), 98 p.
- DOMENACK, C.M.R., 1980. Balanço de radiação solar de ondas curtas em três densidades de plantio do milho (*Zea mays*, L. Var. Cargill 501). Piracicaba, SP, ESALQ - USP. (Tese de Magister Scientiae), 80 p.
- DOWNTON, W.J.S., 1971. Adaptive and evolutionary aspects of C₄ photosynthesis. In: Photosynthesis and Photorespiration. HATCH, M.D., OSMOND, C.B. e SLATYER, R.O. (eds.). Canberra, Australia. John Wiley, Inc. pp. 3-17.
- DUNCAN, W.G., LOOMIS, R.S., WILLIAMS, W.A. e HANAU, R., 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia* 38: 181-205.

- DUNCAN, W.G., 1973. SIMAIZ, a model for simulating corn growth and yield. In: The Application of Systems Methods to Crop Production. Proc. of Symp. at Mississippi State University, Mississippi State, Miss., June 7-8, 1973.
- DUNCAN, W.G., 1975. Maize. In: Crop Physiology - Some Case Histories. EVANS, L.T. (ed.). Cambridge University Press, London, p. 23-50.
- EDMEADES, G.O. e DAYNARD, T.B., 1979. The relationship between final yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants. *Can. J. Plant Sci.* 59: 585-601.
- EL-SHARKAWY, M. e HESKETH, J.D., 1964. Effects of temperature and water deficit on leaf photosynthetic rates of different species. *Crop Sci.* 4: 514-518.
- ENGLISH, S.D., McWILLIAM, J.R., SMITH, R.C.G. e DAVIDSON, J.L., 1979. Photosynthesis and partitioning of dry matter in Sunflower. *Aust. J. Plant Physiol.* 6: 149-164.
- EVANS, L.T., 1975. Beyond photosynthesis - the role of respiration, translocation and growth potential in determining. In: Photosynthesis and Productivity in Different Environments. COOPER, J.P. (ed.). Cambridge University Press, London. p. 501-507.
- FICK, G.W., WILLIAMS, W. A. e LOOMIS, R.S., 1973. Computer simulation of dry matter distribution during sugar beet growth. *Crop Sci.* 13: 413-417.
- FICK, G.W., LOOMIS, R.S. e WILLIAMS, W.A., 1975. Sugar beet. In: Crop Physiology - Some Case Histories. EVANS, L.T. (ed.). Cambridge University Press, London. p. 259-295.
- FISHER, R.A., 1924. The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. *Phil. Trans. Roy. Soc. London B.* 213: 89-142.
- GLASZIOU, K.T., BULL, T.A., HATCH, M.D. e WHITEMAN, P.C., 1965. Physiology of sugar-cane. VII. Effects of temperature, photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature changes on growth and ripening. *Aust. J. Biol. Sci.* 18: 53-66.

- GLEGG, M.D., BIGGS, W., EASTIN, J.D., MARANVILLE, J.W. e SULLIVAN, C. Y., 1974. Light transmission in field communities of sorghum. *Agron. J.* 66: 471-476.
- GLOVER, J., 1973. The dark respiration of sugar-cane and the loss of photosynthate during the growth of a crop. *Ann. Bot.* 37: 845-852.
- GLOVER, J., 1974. The rate of apparent photosynthesis of whole sugarcane plants. *Ann. Bot.* 38: 909-920.
- GOSNELL, J.M., 1968. Some effects of increasing age on sugarcane growth. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol.* 13: 499-513, Taiwan.
- HARTT, C.E. e BURR, G.O., 1965. Factors affecting photosynthesis in sugar cane. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol.* 12: 590-609, Puerto Rico.
- HEILMAN, J.L., KANEMASU, E.T. e PAULSEN, G.M., 1977. Estimating dry matter accumulation in soybean. *Can. J. Bot.* 55: 2196-2201.
- HESKETH, J.D. e MOSS, D.N., 1963. Variation in response of photosynthesis to light. *Crop. Sci.* 3: 107-110.
- HESKETH, J.D., BAKER, D.N. e DUNCAN, W.G., 1971. Simulation of growth and yield in cotton: respiration and the carbon balance. *Crop Sci.* 11: 394-398.
- HODGES, T. e KANEMASU, E.T., 1977. Modeling daily dry matter production of winter wheat. *Agron. J.* 69: 974-978.
- HODGES, T., KANEMASU, E.T. e TEARE, I.D., 1979. Modeling dry matter accumulation and yield of grain sorghum. *Can. J. Plant Sci.* 59: 803-818.
- HOFSTRA, G. e HESKETH, J.D., 1969. Effects of temperature on the gas exchange of leaves in the light and dark. *Planta* 85: 288-237.
- HOLT, D.A., BULA, R.J., MILES, G.E., SCHREIBER, M.M. e PEART, R.M., 1975. Environmental, Physiology, Modeling and Simulation of Alfafa Growth. I. Conceptual development of SIMED. Purdue Univ. Agric. Expt. Sta. Res. Bull. 905, West Lafayette, In.
- HUNT, W.F. e LOOMIS, R.S., 1979. Respiration modeling and hypothesis

- testing with a dynamic model of sugar beet growth. *Ann. Bot.* 44: 5-17.
- IRVINE, J.E., 1967. Photosynthesis in sugarcane varieties under field conditions. *Crop Sci.* 7: 297-300.
- IRVINE, J.E., 1971. Photosynthesis and stomatal behavior in sugarcane leaves as affected by light intensity and low air flow rates. *Physiol. Plant.* 24: 436-440.
- JAGER, J.M., 1974. 'PUTU' a dynamic seasonal maize crop growth model. In: Final Report Guelph Project, CCIBP, Univ. of Guelph. p. 306-320.
- JAGER, J.M. e KING, K.M., 1974. Calculation of photosynthesis rate of a maize crop from environmental variables. In: Final Report Guelph Project, CCIBP, Univ. of Guelph. p. 321-340.
- KING, R.W. e EVANS, L.T., 1967. Photosynthesis in artificial communities of wheat, lucerne, and subterranean clover plants. *Aust. J. Biol. Sci.* 20: 623-635.
- KORTSCHAK, H.P. e FORBES, A., 1969. The effects of shade and age on the photosynthesis rate of sugarcane. In: Progress in Photosynthesis Research vol. I. METZNER, H. (ed.). Tübingen. p. 383-387.
- KUMURA, A., 1968. Changes in intensity and spectral composition of radiation penetrating through leaf canopy and photosynthetic response of leaf to light quality. In: Photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III Experiments, p. 17-21. Toquio.
- KUROIWA, S., 1970. Total photosynthesis of a foliage in relation to inclination of leaves. In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. SETLIK, I. I. (ed.) Wageningen, Pudoc. p. 79-89.
- KVET, J., ONDOK, J.P., NECAS, J. e JARVIS, P. G., 1971. Methods of Growth Analysis. In: Plant Photosynthetic Production - Manual of Methods. SESTAK, Z., CATSKY, J. e JARVIS, P.G. (eds.) Haia, Dr. W. Junk N. V. Publishers. p. 343-391.
- LEMEUR, R. e ROSEMBERG, N.J., 1975. Reflectant induced modification of soybean canopy radiation balance. II. A quantitative and qualitative

- analysis of radiation reflected from a green soybean canopy. *Agron. J.* 67: 301-306.
- LOOMIS, R.S., 1970. Dynamics of development of photosynthetic Systems - Summary. In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. SETLIK, I. (ed.). Wageningen - Pudoc, p. 137-141.
- LOOMIS, R.S., WILLIAMS, W.A. e HALL, A.E., 1971. Agricultural Productivity. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 22: 431-468.
- LOOMIS, R.S. e GERAKIS, P.A., 1975. Productivity of agricultural ecosystems. In: Photosynthesis and Productivity in Different Environments. COOPER, J. P. (ed.) - Cambridge University Press - London - p. 145-172.
- LOOMIS, R.S., RABBING, R. e NG, E., 1979. Explanatory models in crop physiology. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 30: 339-367.
- LUDWIG, L.J., SAEKI, T. e EVANS, L.T., 1965. Photosynthesis in artificial communities of cotton plants in relation to leaf area. I. Experiments with progressive defoliation of mature plants. *Aust. J. Biol. Sci.* 18: 1103-1118.
- MACKINNON, J.C., GARTLEY, C.H. e WILKIE, K.I., 1978. Energy efficiency of forage maize production in an Atlantic Canadian environment. *J. appl. Ecol.* 15: 503-514.
- MCCREE, K.J. e TROUGHTON, J.H., 1966. Non-existence of an optimum leaf area index for the production rate of white clover under constant conditions. *Plant Physiol.* 41: 1615-1622.
- MCCREE, K.J., 1970. An equation for the rate of respiration of white clover plants growth under controlled conditions. In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. SETLIK, I.(ed.). Wageningen, Pudoc. p. 221-229.
- MCCREE, K.J., 1974. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as functions of dry weight, photosynthetic rate, and temperature. *Crop Sci.* 14: 509-514.
- MCLEAM, F.G., McDAVID, C.R. e SINGH, Y., 1968. Preliminary results of net assimilation rate studies in sugarcane. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane*

Technol. 13: 849-858 - Taiwan.

- MEDINA, E. e SAN JOSÉ, J.J., 1970. Análisis de la productividad de caña de azúcar. II. Intercepción de luz y distribución vertical del área foliar en caña de azúcar var. 'PR 980'. *Turrialba* 20: 149-152.
- MEDINA, E., SAN JOSÉ, J.J. e SEQUERA, P.E., 1970. 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* 20: 302-306.
- MONSI, M. e SAEKI, T., 1953. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. *Jap. J. Bot.* 14: 22-52.
- MONSI, M., 1968. Mathematical models of plant communities. In: Functioning of Terrestrial Ecosystems at the Primary Production Level. ECKARDT, F.E. (ed.) - Paris - Unesco p. 131-149.
- MONSI, M. e MURATA, Y., 1970. Development of photosynthetic systems as influenced by distribution of matter. In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. SETLIK, I. (ed.) - Wageningen - Pudoc p. 115-129.
- MONTEITH, J.L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.* 29: 17-37.
- MONTEITH, J.L., 1973. Principles of Environmental Physics. MONTEITH, J. L. (ed.). Edward Arnold (Publishers) Limited - London.
- NEALES, T.F. e INCOLL, L.D., 1968. The control of leaf photosynthesis rate by the level of assimilate concentration in the leaf: A review of the hypothesis. *Bot. Rev.* 34: 107-125.
- NICHIPOROVICH, A.A., 1967. Aims of research on the photosynthesis of plants as a factor in productivity. In: Photosynthesis of Productive Systems. Nichiporovich, A.A. (ed.) - Israel - Wiener Brindery Ltd. p. 3-36.
- NICHIPOROVICH, A.A., 1968. Evaluation of productivity by study of photosynthesis as a function of illumination. In: Functioning of Terres-

- trial Ecosystems at the Primary Production Level. ECKARDT, E.F. (ed.) - Paris - UNESCO p. 261-270.
- NICKELL, L.G., 1975. Ecophysiology of Sugar Cane. In: Ecophysiology of Tropical Crops. ALVIM, P.T. (coord.) - Manaus, CEPLAC p. 1-52.
- PALTRIDGE, G.W., 1972. Experiments on a mathematical model of a pasture. *Agric. Meteorol.* 10: 39-54.
- PANOL, F.Y., 1974. Sugarcane yield models for production simulation. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol.* 15: 871-883, Durban, South Africa.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., 1975a. Use of assimilates in higher plants. In: Photosynthesis and Productivity in Different Environment. COOPER; J. P. (ed.) - Cambridge University Press - London . p. 459-480.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., 1975b. The cost of maintenance processes in plants cells. *Ann. Bot.* 39: 77-92.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., WITLAGE, J.M. e KREMER, D., 1979. Rates of respiration and of increase in structural dry matter in young wheat, ryegrass and maize plants in relation to temperature, to water stress and to their sugar content. *Ann. Bot.* 44: 595-609.
- PUCKRIDGE, D.W. e DONALD, C. M., 1967. Competition among wheat plants sown at a wide range of densities. *Aust. J. Agric. Res.* 18: 193-211.
- RADFORD, P.F., 1967. Growth analysis formulae - their use and abuse. *Crop Sci.* 7: 171-175.
- RICHARDS, F.I., 1969. The quantitative analysis of growth. In: Plant Physiology. A Treatise. VA. Analysis of Growth: Behaviour of Plants and Their Organs. STEWART, F.C. (ed.), Academic Press, p. 3-76.
- RICKMAN, R.W., RAMIG, R.E. e ALLMARAS, R.R., 1975. Modelling dry matter accumulation in dry land winter wheat. *Agron. J.* 67: 283-289.
- ROBSON, M.J., 1973. The growth and development of simulated swards of perennial ryegrass. II. Carbon assimilation and respiration in a seedling sward. *Ann. Bot.* 37: 501-518.

- ROSE, C.W., BEGG, J.E., BYRNE, G.F., TORSSELL, B.W.R. e GONCZ, J.H., 1972. A simulation model of growth-field relationships for *Townsville stylo* (*Stylosanthes humilis* H.B.K.) pasture. *Agric. Meteorol.* 10: 161-183.
- ROSS, J., 1975. Radiative transfer in plant communities. In:Vegetation and the Atmosphere. Volume 1 - Principles. MONTEITH, J.L. (ed.). Academic Press - London. p. 13-55.
- ROSTRON, H., 1974. Radiant energy interception, root growth, dry matter production and apparent yield potential of two sugarcane varieties. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol.* 15: 1001-1010 - Durban - South Africa.
- RUNGE, E.C.A. e ODELL, R.T., 1958. The relation between precipitation, temperature, and the yield of corn on the Agronomy South Farm, Urbana, Illinois. *Agron. J.* 50: 448-454.
- RUNGE, E.C.A. e BENCI, J.F., 1978. Modeling corn production under variable soil and climatic conditions. Proceedings of the 1978 Lacie Corn-Soybean Seminar. Nasa, Texas. p. 153-173.
- RYLE, G.J.A., COBBY, J.M. e POWELL, C.E., 1976. Synthetic and maintenance respiratory losses of $^{14}\text{CO}_2$ in unculm barley and maize. *Ann. Bot.* 40: 571-586.
- SAEKI, T., 1960. Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Bot. Mag.* 73: 55-63.
- SAEKI, T., 1963. Light relations in plant communities. In:Environmental Control of Plant Growth. EVANS, L.T. (ed.). Canberra - Australia, Academic Press. p. 79-94.
- SAN JOSÉ, J.J. e MEDINA, E., 1970. 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* 20: 143-148.
- SANTOS, J.M., DECICO, A., OLIVEIRA, A.S. e REICHARDT, K., 1976. Balanço de radiação em campos cultivados com milho Piranão. In: Anais da XI Reunião Brasileira de Milho e Sorgo. Piracicaba. SP p. 507-515.

- SANTOS, J.M., 1978. Estudos de balanço de radiação solar em áreas cultivadas com milho (*Zea mays* L.) var. Piranão. Piracicaba - SP, ESALQ-USP (Tese de Livre-Docência) 114 p.
- SHAW, R.H., 1978. Modeling crop yields using climatic data. Proceedings of 1978 Lacie Corn-Soybean Seminar. NASA, TEXAS. p. 129-143.
- SHIBLES, R.M. e WEBER, C.R., 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry-matter production by soybeans. *Crop Sci.* 5: 575-577.
- SHIMIZU, T., 1975. Simulação em computador digital. Edgard Blücher, ed. da Universidade São Paulo, São Paulo, 107 p.
- SILVA, W.J., MONTOJOS, J.C. e PEREIRA, A.R., 1974. Análise de crescimento em dois híbridos simples de milho avaliada em duas densidades de população. *Ciência e Cultura* 26: 360-365.
- SINGH, B.N. e LAL, K.N., 1935. Limitations of Blackman's law of limiting factors and Harder's concept of relative minimum as applied to photosynthesis. *Plant Physiol.* 10: 245-268.
- SPLINTER, W.E., 1974. Modelling of plant growth for yield prediction. *Agric. Meteorol.* 14: 243-253.
- STEVENS, W.L., 1951. Asyntotic regression. *Biometrics* 7: 247-267.
- STEWART, G.A., 1970. High potencial productivity of the tropis for cereal crops, grass forage crops and beef. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 36: 85-101.
- STOUT, M. e SMITH, C.H., 1950. Studies on the respiration of sugar beets as affected by bruising, mechanical harvesting, severing into top and botton halves, chemical treatment, nutrition and variety. *Proc. Ann. Soc. Sugar Beet Tech.* 6: 670-679.
- SUMAYAO, C., KANEMASU, E.T. e HODGES, T., 1977. Soil maisture effects on Transpiration and net carbon dioxide exchange of sorghum. *Agric. Meteorol.* 18: 401-408.
- TAKASU, K., SEO, T. e OHTAKI, E., 1971. Albedos of some vegetation covers. In: Photosynthesis and Utilization do Solar Energy - Level III Experiments, p. 6-9. Toquio.

- THOMPSON, G.D. e DU TOIT, J.L., 1965. The effects of row spacing on sugarcane in Natal. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol.*, 12: 103-112, Puerto Rico.
- THOMPSON, L.M., 1978. A crop/weather model for corn. Proceedings of 1978 Lacie Corn-Soybean Seminar - NASA, TEXAS. p. 181-194.
- THORNLEY, J.H.M., 1970. Respiration, growth and maintenance in plants. *Nature* 227: 304-305.
- THORNLEY, J.H.M. e HESKETH, J.D., 1972. Growth and respiration in cotton bolls. *J. appl. Ecol.* 9: 315-317.
- THORNLEY, J.H.M., 1976. Mathematical Models in Plant Physiology. A quantitative approach to problems in plant and crop physiology. Academic Press, London. 318 p.
- VALSECHI, O. e OLIVEIRA, E.N., 1964. A cana-de-açúcar como matéria-prima. In: *Cultura e Adubação da Cana-de-açúcar*. Instituto Brasileiro de Potassa (ed.) São Paulo, p. 319-368.
- VAN KEULEN, H., LOUWERSE, W., SIBMA, L. e ALBERDA, TH., 1975. Crop simulation and experimental evaluation - A case study. In: *Photosynthesis and Productivity in Different Environments*. COOPER, J.P. (ed)-Cambridge University Press, London, p. 623-643.
- VANDERLIP, R.L. e ARKIN, G.F., 1977. Simulating accumulation and distribution of dry matter in grain sorghum. *Agron. J.* 69: 917-923.
- WALDRON, J.C., GLASZIOU, K.T. e BULL, T.A., 1967. The physiology of sugar-cane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. *Aust. J. Biol. Sci.* 20: 1043-1052.
- WANN, M., RAPER, C.D. e LUCAS, H.L., 1978. A dynamic model for plant growth. A simulation of dry matter accumulation for tobacco. *Photosynthetica* 12: 121-136.
- WANN, M. e RAPER, C.D., 1979. A dynamic model for plant growth. Adaptation for vegetative growth of soybeans. *Crop Sci.* 19: 461-467.
- WAREING, P.F. e PATRICK, J., 1975. Source-sink relations and the partition of assimilates in the plants. In: *Photosynthesis and Pro-*

- dictivity in Different Environment. COOPER, J.P. (ed.) - Cambridge University Press - London - p. 481-499.
- WATSON, D.J., 1952. The physiological basis of variation in yield. *Adv. in Agronomy* 4: 101-145.
- WILLIAMS, W.A., LOOMIS, R.S. e LEPLEY, C.R., 1965. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation to interception of solar radiation. *Crop Sci.* 5: 211-215.
- WILSON, D.R., van BAVEL, C.H.M. e MCCREE, K.J., 1980. Carbon balance of water-deficient grain sorghum plants. *Crop Sci.* 20: 153-159.
- WIT, C.T. de, 1959. Potential photosynthesis of crop surfaces. *Neth. J. agric. Sci.* 7: 141-149.
- WIT, C.T. de, BROUWER, R. e PENNING DE VRIES, F.W.T., 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. SETLIK, I. (ed.). Wageningen - Pudoc. p. 47-70.
- YOCUM, C.S., ALLEN, L.H. e LEMON, E.R., 1964. Photosynthesis under field conditions. VI. Solar radiation balance and photosynthesis efficiency. *Agron. J.* 56: 249-253.
- ZELICH, I., 1971. Photosynthesis, Photorespiration and Plant Productivity. Academic Press, London, 374 p.

APÊNDICE I

DADOS METEOROLÓGICOS - ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE
PIRACICABA - SP

1978/1979

Mês de setembro de 1978

DIA	IDADE DA ^{a/} CULTURA	T _{max}	T _{min}	I	CHUVAS	AD _a
	dias	°C	°C	ly.min ⁻¹	mm	mm
1	157	22,2	12,6	242	4,9	
2	158	27,2	12,4	256	3,1	
3	159	27,8	12,7	396	-	
4	160	27,2	13,9	360	-	13
5	161	15,2	15,2	17	5,3	
6	162	25,1	15,9	324	30,1	
7	163	24,9	18,2	305	-	
8	164	24,1	17,8	312	5,6	
9	165	24,2	15,2	-	-	
10	165	24,9	12,9	505	-	
11	167	25,1	8,1	526	-	11
12	168	27,2	11,9	476	-	
13	169	27,9	11,3	471	-	
14	170	27,8	12,9	327	-	
15	171	25,0	17,8	236	1,5	
16	172	30,1	18,9	384	1,7	
17	173	23,1	17,1	206	9,8	
18	174	28,1	13,9	491	-	5
19	175	30,1	12,4	497	-	
20	176	30,3	14,2	435	-	
21	177	29,3	15,8	308	-	
22	178	30,4	14,2	477	-	
23	179	29,9	15,2	497	-	
24	180	29,8	16,1	543	-	
25	181	30,1	15,7	503	-	5
26	182	30,9	15,9	500	-	
27	183	29,8	13,3	482	-	
28	184	28,9	13,2	441	-	
29	185	29,2	13,9	477	-	
30	186	30,1	15,1	519	-	

a/ T_{max} é a temperatura máxima, T_{min} a temperatura mínima, I a densidade de fluxo de radiação solar global e AD_a a água disponível no solo.

Mês de outubro de 1978

DIA	IDADE DA ^{a/}	T _{max}	T _{min}	I	CHUVAS	AD _a
	CULTURA					
	dias	°C	°C	ly.min ⁻¹	mm	mm
1	187	32,0	12,6	513	-	
2	188	32,4	14,5	491	-	0
3	189	32,3	19,5	523	-	
4	190	33,2	13,5	474	-	
5	191	34,0	14,7	494	-	
6	192	31,0	16,8	-	-	
7	193	32,7	15,7	583	-	
8	194	32,6	17,4	592	-	
9	195	32,6	12,3	545	-	0
10	196	23,6	19,8	147	-	
11	197	29,8	16,8	470	2,0	
12	198	32,2	17,3	574	-	
13	199	34,9	19,2	480	-	
14	200	27,9	18,5	256	13,5	
15	201	30,8	16,9	465	-	
16	202	31,2	16,8	428	-	0
17	203	30,1	16,6	554	0,3	
18	204	33,0	15,6	516	-	
19	205	28,2	18,5	424	65,0	
20	216	27,9	18,8	549	-	
21	207	28,1	13,4	636	-	
22	208	30,0	11,4	623	-	
23	209	31,9	23,0	591	-	5
24	210	30,4	16,5	597	-	
25	211	34,3	17,5	580	-	
26	212	35,3	18,5	568	-	
27	213	33,1	23,8	329	-	
28	214	30,2	19,2	459	23,8	
29	215	28,4	19,6	297	8,9	
30	216	31,8	21,2	462	41,5	
31	217	29,2	21,3	304	-	

Mês de novembro de 1978

DIA	IDADE DA ^{a/} CULTURA	T _{max}	T _{min}	I	CHUVAS	AD _a
	dias	°C	°C	ly.min ⁻¹	mm	mm
1	218	29,2	21,0	495	3,2	
2	219	27,4	19,7	620	-	
3	220	29,2	18,2	384	-	
4	221	27,2	20,4	199	5,4	
5	222	20,4	19,3	96	4,2	
6	223	25,8	12,9	468	26,7	33
7	224	30,2	13,9	591	-	
8	225	30,4	14,8	594	-	
9	226	31,1	16,1	519	-	
10	227	26,9	18,2	346	3,2	
11	228	24,8	18,4	236	48,1	
12	229	22,3	16,9	222	10,4	
13	230	27,9	14,4	-	0,4	32
14	231	27,9	14,2	584	-	
15	232	29,8	12,7	589	-	
16	233	18,9	16,2	106	-	
17	234	27,8	16,7	399	35,2	
18	235	30,2	16,5	497	3,2	
19	236	32,6	20,6	560	1,6	
20	237	31,2	20,4	419	0,2	53
21	238	30,3	20,5	562	-	
22	239	31,9	20,7	506	-	
23	240	31,2	21,3	433	-	
24	241	29,3	20,1	529	-	
25	242	31,4	15,4	528	-	
26	243	31,3	17,8	496	-	
27	244	26,3	23,1	154	59,2	37
28	245	28,9	17,7	650	-	
29	246	30,1	14,4	633	-	
30	247	31,1	15,2	525	-	

Mês de dezembro de 1978

DIA	IDADE DA ^{a/} CULTURA	T _{max}	T _{min}	I	CHUVAS	AD _a
	dias	°C	°C	ly.min ⁻¹	mm	mm
1	248	31,8	17,8	621	-	
2	249	33,0	18,7	600	-	
3	250	29,9	18,2	503	2,8	
4	251	30,8	20,3	601	-	43
5	252	32,3	21,1	558	-	
6	253	31,1	20,8	375	-	
7	254	26,4	20,1	-	31,2	
8	255	26,1	18,6	237	55,4	
9	256	24,9	19,4	211	12,3	
10	257	29,3	20,6	546	10,2	
11	258	26,9	16,7	554	-	59
12	259	27,1	17,3	586	-	
13	260	30,1	15,9	598	-	
14	261	29,1	16,7	402	-	
15	262	30,4	19,0	435	51,9	
16	263	29,2	20,6	436	6,4	
17	264	27,2	18,7	618	7,6	
18	265	25,8	18,5	500	-	60
19	266	27,1	15,0	523	-	
20	267	29,7	13,9	655	-	
21	268	31,3	15,2	617	-	
22	269	31,9	16,5	518	-	
23	270	31,4	18,4	554	-	
24	271	31,3	16,0	-	-	
25	272	30,9	19,5	-	-	
26	273	29,2	20,7	-	-	19
27	274	23,3	16,3	185	95,4	
28	275	23,4	16,4	164	5,2	
29	276	26,9	17,9	243	10,2	
30	277	30,1	18,4	489	7,5	
31	278	31,8	18,8	583	3,1	

Mês de janeiro de 1979

DIA	IDADE DA ^{a/} CULTURA	T _{max}	T _{min}	I	CHUVAS	AD _a
	dias	°C	°C	ly.min ⁻¹	mm	mm
1	279	30,1	20,4	386	-	
2	280	29,2	19,3	323	2,8	60
3	281	27,2	20,3	329	16,4	
4	282	25,4	20,6	236	3,2	
5	283	27,1	17,6	-	1,1	
6	284	25,6	15,3	586	-	
7	285	27,2	14,1	606	-	
8	286	27,8	13,6	627	-	
9	287	27,1	14,2	578	-	31
10	288	29,0	13,7	615	-	
11	289	29,9	15,3	401	-	
12	290	26,4	16,2	283	8,9	
13	291	24,2	16,5	554	-	
14	292	29,1	16,4	633	-	
15	293	29,9	14,2	600	-	31
16	294	29,1	14,5	578	-	
17	295	30,2	15,5	632	-	
18	296	29,2	15,4	595	-	
19	297	29,3	16,0	548	-	
20	298	24,0	16,8	228	-	
21	299	23,2	18,7	133	17,5	
22	300	27,2	17,4	442	-	7
23	301	30,1	15,1	496	-	
24	302	30,2	15,1	546	-	
25	303	30,2	16,5	379	-	
26	304	30,2	16,4	555	14,5	
27	305	30,4	18,8	493	-	
28	306	30,2	20,6	332	-	
29	307	31,3	19,8	132	10,5	
30	308	28,7	15,1	514	47,9	
31	309	27,9	15,1	500	-	

Mês de fevereiro de 1979

DIA	IDADE DA ^{a/} CULTURA	T _{max}	T _{min}	I	CHUVAS	AD _a
	dias	°C	°C	ly.min ⁻¹	mm	mm
1	310	28,9	15,9	483	-	
2	311	30,0	16,6	459	-	
3	312	31,1	16,4	545	-	
4	313	31,1	17,8	555	-	29
5	314	31,2	16,9	557	-	
6	315	31,1	17,8	526	-	
7	316	34,1	18,8	551	-	
8	317	33,2	20,5	560	-	
9	318	33,1	19,8	493	-	
10	319	30,2	19,6	369	0,8	
11	320	31,0	21,0	370	0,6	
12	321	30,3	20,6	343	2,8	0
13	322	25,4	20,1	244	37,2	
14	323	26,8	20,9	-	10,2	
15	324	28,2	17,2	448	11,9	
16	325	28,9	14,3	514	-	
17	326	27,9	14,8	317	-	
18	327	31,2	18,2	461	0,4	
19	328	32,1	18,9	528	0,9	45
20	329	35,9	20,2	412	-	
21	330	30,9	18,4	546	-	
22	331	29,9	18,5	277	4,8	
23	332	31,1	20,4	428	2,4	
24	333	31,3	18,6	491	-	
25	334	32,1	18,7	557	-	
26	335	33,2	18,2	490	-	
27	336	31,8	18,4	441	7,6	4
28	337	32,9	19,7	502	-	