

02.00459

TO COMPANY AND A

The periods a summary of the second sec

A Date has been been and a second second

AD AND Y TO TRANSFER DAY.

and the second s

SUMÁRIO

Resumo	5
Abstract	6
Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	11
I – Introdução	12
II – Material e Métodos	18
II.1 – Observações no sistema solo-planta-atmosfera	18
II.2 – Estimativas da resistência do dossel ao transporte de H ₂ O/CO ₂	21
II.3 – Modelagem dos fluxos de gases	23
III – Resultados e Discussão	31
III.1- A produção primária da cana-de-açúcar	31
III.1.2 - A queima de biomassa durante a colheita	34
III.1.3 - O ciclo 1998/1999	36
III.2 – As condições Climáticas durante o período de observações	40
III.2.1 – Fluxos de Radiação	40
III.2.2 – Precipitação	43
TII.2.3 – Temperatura e Umidade Relativa do Ar, e Velocidade do Vento	44
III.2.4 – Evapotranspiração Potencial	47
III.3 – Umidade do Solo sob o cultivo de cana-de-açúcar	49
III.3.1 – Características físicas do solo da cultura de cana-de-açúcar	49
III.3.2 – As variações de longo prazo na umidade do solo	50
III.4 – Fluxos de momento, calor sensível, calor latente e CO ₂	54
III.4.1 - Momento	54
III.4.2 – Fluxos de Calor Sensível e Calor Latente	56
III.4.3 – Fluxos de Dióxido de Carbono (CO ₂)	60

.

III.5 – Modelagem do sistema	solo-planta-atmosfera69	9
------------------------------	-------------------------	---

IV – Conclusões	81
Bibliografia	84
Apêndice	

RESUMO

Observações de longo prazo, entre os anos de 1997 e 1999, do balanço de energia, dióxido de carbono e umidade do solo, em cultivo de cana-de-açúcar, no município de Sertãozinho, S.P.(21°07'S, 48°11'W), foram conduzidas numa parcela contendo a variedade SP71-6180, circundada por uma uma área contínua de 2.000ha. Os fluxos de momento, calor sensível, calor latente e dióxido de carbono foram medidos através do método da covariância de vórtices, e a umidade do solo por meio de uma sonda de neutrons.

Fatores inicialmente positivos ao desenvolvimento da cultura, como as precipitações anômalas ocorridas nos meses de maio e junho de 1997, e o inverno mais ameno, com temperaturas aproximadamente 1°C acima da média climatológica, durante o episódio El Niño de 1997, permitiram a maior absorção de água do solo, ocasionando estresse hídrico mais acentuado no cultivo em relação ao ano de 1998, devido ao prolongado período sem chuvas significativas (90 dias).

O valor mínimo de umidade do solo na camada de 1,4m de profundidade foi de $0,265 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e ocorreu em outubro de 1997, quando a rebrota da cana-de-açúcar encontrava-se com 6 meses. Com o início da estação chuvosa e temperaturas do ar acima da média climatológica (2°C) durante o verão de 1998, o crescimento foi retomado, registrando-se as maiores taxas de fotossíntese do cultivo (60 µmolCO₂m⁻²s⁻¹).

Os fluxos observados foram comparados aos fluxos simulados pelo modelo de transferência no sistema solo-vegetação-atmosfera: *Simple Biosphere Model* (SiB2). O total simulado de evapotranspiração, obtido utilizando-se como forçantes os ciclos diários das variáveis meteorológicas, medidos sobre a plantação, foi de 1027mm, e 9% maior do que o observado. O total de CO₂ fixado na biomassa aérea da cana-de-açúcar ao final do ciclo 1998/1999 foi de 7,3 kgCO₂m⁻², e um coeficiente de variação de 30%; o total simulado de assimilação durante o mesmo período (9,9 kgCO₂m⁻²) foi 36% maior, e marginalmente superior à incerteza.

ABSTRACT

Long term observations of energy balance, carbon dioxide and soil moisture were undertaken in a sugarcane plantation (ratoon) in Sertãozinho (21°07'S, 48°11'W), State of São Paulo, Brasil, during the years 1997-1999.

The experimental site was established in a plantation of 2,000 ha, where the sugarcane variety SP71-6180 was planted. The eddy covariance method was used to measure the fluxes of energy and CO_2 , and a neutron probe provided the soil moisture data.

During October of 1997, which was an El Nino year, the 6 months regrowth vegetation was more stressed in comparison with the same period in 1998. Factors that enhanced the vegetative development as precipitation above the average in May and June of 1997, a mild winter (1°C above the average), induced a higher water consumption, which was limited, after a continuous dry period of 90 days, when the lowest soil moisture content was recorded (0.265m³m⁻³), in 1.4m layer depth.

However, after the beginning of 1998 summer precipitation, the vigorous growth restarded, when air temperatures above the average (2°C) and assimilation rates up to 60 μ molCO₂m⁻²s⁻¹ have been observed.

The sugarcane soil-vegetation-atmosphere system was modelled with SiB2 (*Simple Biosphere Model*), which utilized as driving forcings the meteorological variables measured on the top of a tower at the plantation area. The total evaporation simulated for the 1998/1999 cycle was 1,027mm, which was 9% greater than the observed. The measured above-ground biomass was 7.3kg CO₂m⁻², whose coefficient of variation was about 30%, and the simulated assimilation was 9.9kg CO₂m⁻², although 35% greater, it shows the same order as the observed value.

() (1) (0) E0)

LISTA DE FIGURAS

- Figura III.5 Ciclo anual dos totais diários de: (a) radiação solar incidente-Si; (b) radiação solar refletida-Sr; (c) saldo de radiação-Rn; (d) albedo da superfície (Sr/Si), observados sobre a cultura de cana-de-açúcar, entre 1997 e 1999......41

- Figura III.20 Totais diários dos balanço de CO₂ (gCO₂m⁻²), medidos sobre cultivo de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999......60

- Figura III.21 Ciclos diurnos médios observados sobre cultivo de cana-de-açúcar em outubro de 1998 e março de 1999 de: (a) fotossíntese líqüida (μmolCO₂m⁻²s⁻¹);
 (b) concentração de CO2 no ar (μmolmol⁻¹)......61
- Figura III.22 Relações observadas e estimadas, entre a fotossíntese líquida e a radiação fotossinteticamente ativa, sobre cultivo de cana-de-açúcar, em (a) outubro de 1998; (b) janeiro-março de 1999; (c) abril de 1999 e (d) maio de 1999.....63
- Figura III.23 Relação entre a condutância estomática do dossel (molCO₂ m⁻²s⁻¹) e a diferença na pressão de vapor (kPa), entre a superficie foliar e o ar do dossel, em cultivo de cana-de-açúcar, nos meses de outubro de 1998, e março de 1999.....64

- Figura III.27 Albedo do cultivo de cana-de-açúcar, observado e simulado, nos meses de: (a) outubro de 1998, (b) janeiro de 1999 e (c) maio de 1999......70

LISTA DE TABELAS

Tabela I.1 - Principais atividades agrícolas no Estado de São Paulo nos anos de 1983 e
1993 (Camargo et al., 1995)
Tabela I.2 - Evapotranspiração máxima (mm dia ⁻¹) de alguns cultivos agrícolas no
Brasil
Tabela I.3 - Evapotranspiração máxima (mm dia ⁻¹) observada em ecossistemas naturais
no Brasil
Tabela II.1- Tipos de sensores utilizados na torre micrometeorológica instalada sobre a
cultura de cana-de-açúcar em Sertãozinho-SP18
Tabela III.1 - Biomassa oxidada durante a queima (Folhas Secas e Ponteiros), e residuos
da colheita que permanecem no campo (variedade SP716180). Entre parênteses
encontram-se os percentuais em relação ao total exposto à queima
TABELA III.2 - Componentes da biomassa aérea (Médias±Desvio Padrão), de cana-de-
açúcar, variedade (SP71-6180), observados durante o ciclo 98/99, e massa em
equivalentes de carbono e nitrogênio (C, N)
TABELA III.3 - Parâmetros da equação (III.3); coeficiente de correlação (r ²) e erro
padrão (±S) dos ajustes obtidos. As unidades utilizadas foram (dias), (m) e
(kgm ⁻²)
Tabela III.4 - Totais mensais de precipitação observados sobre a cultura de cana-de-
açúcar, e normais climatológicas (1960-1990) da estação do IAC em Ribeirão
Preto-SP44
Tabela III.5 - Coeficientes da relação entre a fotossíntese líquida do cultivo de cana-de-
açúcar e o fluxo incidente de radiação fotossinteticamente ativa (equação
II.9)

I - INTRODUÇÃO

A superficie do Estado de São Paulo é de 248.255 km², e originalmente, na sua maior parte, era coberta pela Floresta Subcaducifólia Tropical, devido à predominância do clima semi-úmido, caracterizado por uma estação seca bem definida, cuja a influência é observada pela perda de folhas durante o inverno, e pelo aumento do número de espécies deciduas na direção do interior, atingindo de 30 a 50% do total (Alonso, 1977). O Cerrado aparece em manchas, ao longo da Depressão Paulista, e dissemina-se por quase todo o oeste do Estado.

A estrutura da Floresta natural é mal conhecida, pois em sua quase totalidade foi substituida pela agricultura que, em muitas áreas transformaram-se em pastagens ou capoeiras tão logo ocorreu a diminuição da fertilidade dos solos. De acordo com Troppmair (1987), ao final do século passado a vegetação nativa ocupava cerca de 81% da área do Estado; em 1920 este percentual era de 45%, e decresceu à 18% em 1952; 14% em 1962 e 8,5% em 1973.

A área utilizada na agricultura e pecuária em 1993, no Estado de São Paulo, foi de 176.261 km²; o equivalente a 71% da área total do estado (Camargo *et al.*, 1995). Neste ano, as áreas ocupadas por pastagens e cana-de-açúcar foram 59 % e 14% da área agrícola, respectivamente. Segundo os autores, que compararam as transformações ocorridas entre 1983 e 1993, quanto ao uso da terra (Tabela I.1), aproximadamente 2.825,5 milhões de hectares foram cedidos neste período pelas pastagens naturais (40,4%); café (17,5%); reflorestamento (7,2%) e (30,9%) de culturas anuais (arroz, feijão, algodão, amendoim e milho), tendo sido transformados principalmente em pastagens cultivadas (37,3%); laranja (28,2%); cana-de-açúcar (22,9%) e soja (8,4%).

A área de pastagem natural decresceu em parte, porque ao longo do tempo houve mudanças qualitativas na estrutura dos pastos, aumentando a proporção das pastagens cultivadas e também porque foram ocupadas por atividades agrícolas mais rentáveis que utilizam mais intensamente a terra. No Estado de São Paulo, qualquer

at showing the

Atividade	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)
	1983		1993	
Pastagem Cultivada	7.371.831	41,0	8.222.240	46,5
Pastagem Natural	2.882.612	16,0	2.237.585	12,7
Cana para Indústria	1.7333.500	9,6	2.353.240	13,3
Milho	1.166.000	6,5	1.189.000	6,7
Reflorestamento	1.064.407	5,9	953.390	5,4
Laranja	562.600	3,1	7999.230	4,5
Café	882.920	4,9	315.730	1,8
Soja	470.000	2,6	490.000	2,8
Total	16.107.651	89,6	16.572.538	93,7
Área Agrícola SP	17.977.289		17.686.807	

Tabela I.1 - Principais atividades agrícolas no Estado de São Paulo nos anos de 1983 e 1993 (Camargo et al., 1995).

expansão de área de atividades agrícolas que não ocorra por uso mais intenso da terra, será feita por substituição de outras atividades (Camargo et al., 1995).

Tais alterações no uso do solo, que ocorreram mais intensamente nos últimos 50 anos, promoveram impactos nos recursos naturais, como: a redução na biodiversidade; a introdução de espécies exóticas, que não apresentam um comportamento fisiológico similar à vegetação nativa; a erosão, compactação e perda de fertilidade dos solos.

O acúmulo de conhecimento dos processos de interação entre as diferentes superficies vegetadas e a atmosfera (Goulden *et al.*, 1996; Miranda *et al.*, 1997; Hollinger *et al.*, 1998; Meyers, 2001), e em particular no caso do desenvolvimento de uma área agrícola, em função do clima e solo (Dugas *et al.*, 1999; Grace *et al.*, 1998; Brunini *et al.*, 1999), possibilitam a adequação de modelos determinísticos (Sellers *et al.*, 1996; Baldocchi e Myers, 1998), que representam o dossel como uma única camada, ou várias, contendo folhas sombreadas e a pleno sol (Wang, 2000); ou através da eficiência quanto à utilização da radiação solar (Anderson *et al.*, 2000; Black e Ong, 2000)

Os modelos de transferência de gases no sistema solo-planta-atmosfera (TSVA), podem ser utilizados na forma prognostica, através de previsões ou possíveis cenários climáticos (Ogallo *et al.*, 2000); diagnostica (Hoogenboom, 2000), com base nas informações disponíveis, em determinado instante, e ou de maneira retrospectiva, através da análise dos efeitos da variabilidade interanual do clima (Lisson *et al.* 2000; Vallis *et al.*, 1996; van den Berg *et al.*, 2000).

As interações entre o solo, a vegetação e a atmosfera podem ser divididas em duas grandes categorias, conforme Shuttleworth e Nobre (1992). A primeira é indireta ou extrínseca aos agroecossistemas, e decorre da sua implantação, através da remoção da vegetação natural, aplicação de fertilizantes e a prática da queima na agricultura, que contribuem para a intensificação de efeitos em escala global, por meio da alteração nas concentrações de certos constituintes da atmosfera como o CO, N₂O, CH₄, que são gases do efeito estufa, além de aerossóis.

A segunda categoria é definida como intrínseca, pois a mudança do tipo de cobertura vegetal implica na alteração das trocas de energia, água e momento entre a vegetação e a atmosfera localmente, podendo atingir a escala regional, dependendo da extensão das alterações, que ao longo do tempo, tornar-se-iam fatores extrínsecos.

Do ponto de vista metodológico as interações intrínsecas dependem das características das superficies e ocorrem sob a forma de três processos principais (Sellers *et al.*, 1989). Em primeiro lugar, as trocas radiativas, que respondem às variações dos coeficientes de reflexão (albedo), e cuja influência na circulação regional tem sido objeto de vários estudos de simulação. Em seguida, as características aerodinâmicas (rugosidade), que ao serem modificadas, por exemplo transformando-se áreas de pastagens em reflorestamento (espécies arbóreas), alteraria a convergência horizontal de umidade, que atua na distribuição espacial da precipitação. Finalmente, a dependência da evaporação quanto à disponibilidade hídrica dos solos e ao controle fisiológico das plantas, que regulam as taxas de transferência de calor sensível e latente (Boaugeault, 1991, Betts *et al.*, 1996).

Os impactos ambientais em consequência da alteração da cobertura vegetal são abordados por Wallace (1995), como a redução de recarga do lençol freático em função

do reflorestamento de bacias hidrológicas no Reino Unido; ou a introdução de espécies arbóreas de rápido crescimento em regiões semi-áridas da Índia, que geraram polêmica sobre a sua sustentabilidade (Calder, 1992).

O gerenciamento dos recursos hídricos, cada vez mais limitados, requer informações sobre os processos que regulam as perdas evaporativas pela vegetação, e de como os diferentes climas, espécies vegetais, tipos de solo e a disponibilidade de água interagem nestes processos (Calder, 1992; Sene, 1994).

Como exemplo da compreensão destas interações, segundo Kabat e Feddes (1995) a melhoria na produção de batata nos Países Baixos foi obtida com o auxílio de um sistema de avaliação dos efeitos do solo e drenagem, decorrente das simulações que levaram em conta a combinação de 15 profundidades de drenagem e espaçamento, ao longo de trinta anos, para oito tipos de solo.

Além da caracterização do balanço de energia sobre determinada cobertura vegetal, a baixa densidade de estações meteorológicas e a disponibilidade das informações em certas regiões dificultam a aplicação deste tipo de abordagem. Neste sentido, os prognósticos gerados por modelos de previsão do tempo têm sido utilizados na estimativa da precipitação regional e temperatura, como apresentadas por Bárdossy (1997), que definiu padrões da circulação atmosférica através da análise multivariada; ou as características do tempo nas escalas regional e local obtidas por um modelo de mesoescala (MASS), alimentado pela saída do modelo de circulação geral da atmosfera (Russo e Zack, 1997).

No Brasil, as estimativas de evapotranspiração de cultivos agrícolas foram obtidas em milho, soja, feijão, trigo e pastagens (Tabela I.2). Com exceção das pastagens na Amazônia, nas quais os fluxos de calor sensível e latente foram medidos diretamente, sobre as outras culturas as estimativas foram obtidas através do balanço de energia ou de água no solo. Além das significativas diferenças na evapotranspiração entre as superficies, para uma mesma cultura, a discrepância é da ordem de 55%.

Ao contrário dos agrossistemas, sobre alguns ecossistemas naturais encontram-se as melhores caracterizações do ponto de vista micrometeorológico: como a floresta de terra firme na Amazônia; Cerrado (DF) e Pampas no sul do país (Tabela I.3); obtidas em

Culturas Soja	mm dia ⁻¹ 8,4 5,4	Período	Referências André e Viswanadhan (1983); Wisvanadhan e André (1983) Horie e Luchiari Jr. (1982)
Trigo Irrigado	3,6		Luchiari Jr e Riha (1991)
Milho	4,0		Brunini et al. (1995; 1999)
Feijão Irrigado	4,7		Libardi e Saad (1994)
Pastagens na Amazônia	2,0 3,5	Seco Úmido	Wright <i>et al.</i> (1992)

Tabela I.2 - Evapotranspiração máxima (mm dia⁻¹) de alguns cultivos agrícolas no Brasil.

Tabela I.3 – Evapotranspiração máxima (mm dia⁻¹) observada em ecossistemas naturais no Brasil.

Vegetação Cerrado	mm dia ⁻¹ 2,1 4,2	Período Seco Úmido	Referências Miranda et al. (1996)
Floresta Primária	3,9 3,5	Seco Úmido	Shuttleworth(1988) ;Fitzjarrald et al. (1988); Grace et al.(1995)
Pampas	3,9 1,2	Úmido Seco	Oliveira et al.(1996); Soares et al. (1996)

experimentos específicos, que demonstram claramente o papel da sazonalidade.

No Estado de São Paulo, apesar da abrangência espacial das pastagens (Tabela I.1), que segundo Camargo *et al.* (1995) ainda apresentam áreas contendo vegetação nativa (13%); e cana-de-açúcar, não foram detectadas medidas de campo dos fluxos de vapor de água, calor e CO₂, sobre estas superficies. A compreensão dos impactos decorrentes destas formas de uso da terra, ou como consequência da sua ampliação e ou substituição, só será possível através do acúmulo de informações básicas das interações em curso, que também subsidiarão outras áreas do conhecimento e atividades agrícolas.

A caracterização do balanço de energia da superficie é necessária na determinação da sua temperatura; do fluxo de vapor de água para a atmosfera e aquecimento. Nas pequenas escalas de tempo estes processos são responsáveis pela estabilidade atmosférica, altura da camada limite e precipitação convectiva. Nas escalas de tempo maiores o balanço local de água pode atuar significativamente, determinando a capacidade da superficie em fixar carbono (Baldocchi *et al.*, 2001).

Em superposição ao aumento secular do CO_2 atmosférico (280-368 ppm) observa-se a variabilidade inter-anual entre 0,5 e 3ppm ano⁻¹, que tem sido associada aos eventos El Niño/La Niña, durante os quais são detectadas secas e chuvas abundantes em diferentes regiões do globo, alterando o início e duração dos ciclos vegetativos (Baldocchi *et al.*, 2001).

A adoção de um programa observacional quase-continuo, e de longo prazo, abrangendo diferentes anos, para monitorar as densidades de fluxo de CO_2 , vapor de água e energia, entre a vegetação e a atmosfera, é fundamental para a compreensão das interações nas escalas de tempo sazonal e anual (Meyers, 2001).

Do ponto de vista da modelagem do crescimento da cana-de-açúcar no Brasil o trabalho pioneiro foi o de Machado (1981), e após 10 anos Barbieri (1993) utilizou o conceito de graus-dia; recentemente tem-se a análise de van den Berg *et al.* (2000) sobre as limitações quanto à absorção de água pelo sistema radicular da cana. Na revisão de O'Leary (2000) são citados os modelos mais utilizados na Austrália e África do Sul: APSIM; CANEGRO e QCANE. E Cheeroo-Nayamuth *et al.* (2000) reportaram a aplicação do APSIM nas ilhas Maurício, com bons resultados nas áreas irrigadas.

Este trabalho tem portanto, como objetivo, a observação dos fluxos de calor sensível, calor latente e dióxido de carbono sobre cana-de-açúcar, abrangendo todo o ciclo de crescimento do cultivo, e a investigação do papel da superficie nas interações entre a vegetação e atmosfera, nas escalas anual e interanual.

As parametrizações de superficie vegetada utilizadas nos modelos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera serão verificadas e adequadas ao cultivo de cana-de-açúcar, e os resultados das simulações relativas à assimilação de CO₂ serão comparados com os fluxos e dados originados da amostragem de biomassa aérea.

II - Material e Métodos

II.1 – Observações no sistema solo-planta-atmosfera

O sítio experimental foi instalado em 1996 na Usina Santa Elisa, localizada no município de Sertãozinho (21°07'S, 48°11'W), ao norte do Estado de São Paulo, em solo classificado como Latossolo Vermelho Escuro. No centro de uma área contínua de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) de aproximadamente 2.000 ha, um talhão de 36,2 ha foi escolhido, contendo a soca de cana-de-açúcar variedade SP71-6180, plantada num espaçamento de 1,4m entre linhas.

Em função do desenvolvimento da cultura, que atinge alturas de 3m, foi necessária a utilização de uma torre micrometeorológica de alumínio desmontável, de 10m de altura, para a fixação dos instrumentos que são listados na Tabela II.1.

Tabela II.1- Tipos de sensores utilizados na torre micrometeorológica instalada sobre a cultura de cana-de-açúcar em Sertãozinho-SP.

Sensor	Fabricante	altura (m)	Unidades
Radiação Solar Global Incidente	LI-Cor	10	MJm ⁻² , Wm ⁻²
Radiação Solar Global Refletida	LI-Cor	10	MJm ⁻² , Wm ⁻²
Saldo de Radiação	REBS	10	MJm ⁻² , Wm ⁻²
Velocidade e Direção do Vento	RM Young	10	ms ⁻¹ , graus
Temperatura & Umidade	IH-UK	10	°C, %
Temperatura do Solo	Campbell SI	-0,05;-0,10;-0,20	°C
Precipitação	Texas Inst.	10	Milímetros
IRGA (CO ₂ /H ₂ O)	LI-Cor 6262	12	µmolCO ₂ m ⁻² s ⁻¹
Anemômetro Sônico Tridim.	A1012R Gill Solent	12	Wm ⁻² , ms ⁻¹
Placas de Fluxo de Calor	REBS	-0,02	MJm ⁻² , Wm ⁻²

Os sensores convencionais foram conectados à um sistema de aquisição de dados (datalogger CR10X, Campbell), que os interrogava à cada 10 segundos, armazenando as médias à cada 10 minutos.

Os fluxos turbulentos de momento, vapor de água, calor sensível e CO_2 foram medidos por um sistema composto de um analisador de gás infravermelho e um anemômetro ultra-sônico tridimensional, descrito em Moncrieff *et al.* (1997a). Através do método de covariância de vórtices, o fluxo turbulento de qualquer escalar, por unidade de área de solo, pode ser expresso como:

$$F_c = \overline{w'\rho'c} \qquad (\text{II.1})$$

onde F_c é a densidade de fluxo (Wm⁻² ou µmolCO₂m⁻²s⁻¹) do escalar *c*, e o símbolo (*) indica o desvio em relação à média; w (m s⁻¹) é a velocidade vertical do vento e ρ_c é a densidade ou concentração do escalar *c*, que pode ser vapor de água (Pa), dióxido de carbono no ar (µmolmol⁻¹) ou a temperatura (K). A barra na equação (II.1) representa a média do produto sobre o intervalo de amostragem (30minutos).

O fechamento do balanço de energia da superficie foi obtido conforme o método descrito em Twine *et al.* (2000), através do cálculo da razão de Bowen (β), definida como a razão entre os fluxos turbulentos medidos pelo sistema de covariância de vórtices, de calor sensível (H) e calor latente (LE); e dos valores do saldo de radiação (Rn) e fluxo de calor no solo (G), como:

$$LE = (Rn - G) / (\beta + 1)$$
 (II.2a)
 $H = LE^*\beta$ (II.2b)

O conteúdo de água no solo foi medido semanalmente por uma sonda de neutrons (CPN, Boart Longyear Co., USA), através de tubos de alumínio instalados no centro de 5 entrelinhas alternadas de plantio, até a profundidade de 1,5m. A calibração da sonda foi obtida segundo a metodologia descrita em Cabral (1991), através da
abertura de trincheiras de 1,3m de profundidade, das quais amostras volumétricas de solo foram retiradas e a umidade determinada após secagem em estufa de ventilação forçada (100 °C), por 48 horas. As curvas características do solo foram obtidas no Laboratório de Física de Solos da Embrapa-Meio Ambiente, através da mesa de tensão, câmara de Richards e papel filtro (Klute, 1990; Campbell & Gee, 1990).

Os fluxos de CO₂ do solo foram estimados conforme Rocha *et al.* (2000), que determinaram as seguintes relações entre os fluxos, a temperatura e umidade (θ) do solo:

 $R_{solo} = EXP(0,0704 * T_{solo} - 0,2083)$, (úmido $\theta > 0,345m^3m^{-3}$) (II.3a)

 $R_{solo} = EXP(0,0285 * T_{solo} + 0,2269), (seco \theta < 0,345m^3m^{-3})$ (II.3b)

onde, R_{solo} é o fluxo de CO₂ do solo (µmolCO₂m⁻²s⁻¹), e T_{solo} é temperatura do solo (°C) medida em 0,05m de profundidade.

Nas colheitas de 1997, 1998 e 1999, avaliou-se a matéria seca (MS) dos componentes da biomassa aérea final (gMS m⁻²) de: colmos; folhas verdes e folhas secas; além da biomassa queimada e dos resíduos agrícolas que permanecem no solo. Na colheita de 1998, o número mínimo de amostras foi testado, através da coleta de 20 amostras aleatórias de 2m lineares.

Devido à necessidade de estimativas da altura da cana-de-açúcar; largura e comprimento da folha mais nova totalmente desenvolvida, que não foram sempre determinadas, estabeleceram-se relações gerais entre o índice de área foliar; a altura da cana-de-açúcar; largura e comprimento da folha mais nova totalmente desenvolvida; em função de componentes da biomassa aérea, amostragens foram obtidas em áreas da Usina Santa Elisa, que apresentavam outras variedades e diferentes estádios de cultivo.

A safra 1998/1999 teve início em 14 de abril de 1998 (dia do ano 104); à partir de 106 dias após o corte (DAC), quando foi realizada a primeira amostragem de biomassa aérea, à cada 30 dias aproximadamente, foram coletadas amostras de colmos, folhas secas e verdes, em 5 pontos aleatoriamente distribuídos pela plantação; em cada

qual, 2m lineares de cana, em linhas contíguas (1m de cada linha) eram cortados rente ao solo.

Em todas as amostragens, o peso fresco era obtido imediatamente após a coleta, por meio de uma balança digital (ACCULAB-USA), com capacidade de 30kg e resolução de 5g; e subamostras acima de 20% do peso total do material eram armazenadas em sacos de pano, sendo então transportadas para estufas de ventilação forçada à 80° C, até atingirem peso constante. Após a secagem, o material era moído e utilizado na análise dos teores de carbono e nitrogênio no Laboratório de Química Inorgânica da Embrapa-Meio Ambiente.

Durante as medições de área foliar, as folhas verdes eram armazenadas em sacos plásticos e rapidamente transportadas para o local em que se encontrava o medidor eletrônico de área (LI-Cor 3000), pois a rápida desidratação das folhas provocava grandes erros nas medidas.

Com o intuito de se interpolarem os dados obtidos durante o ciclo, equações como a de Richards foram ajustadas; tais equações têm sido utilizadas na descrição do crescimento da vegetação ao longo do tempo, e podem ser representadas, segundo France & Thornley (1984), pela seguinte forma geral:

$$y = y_{max} / (1 + EXP(a + b * x))^{1/c}$$
 (II.4)

II.2 – Estimativas da resistência do dossel ao transporte de H₂O/CO₂

A resistência aerodinâmica (\mathbf{r}_a) ao transporte de calor e vapor de água entre o dossel e a altura de referência, acima da vegetação, foi calculada através da seguinte equação:

$$r_a = \left(\frac{u}{{u_*}^2}\right) + \frac{1}{ku_*} \left[\ln\left(\frac{z_{0M}}{z_{0H}}\right) + \Phi_M - \Phi_H \right] \qquad (II.5)$$

onde u e u (ms^{-1}) são a velocidade do vento e de fricção, medidas pelo anemômetro sônico, k é a constante de von Kárman (0,41); Φ_M e Φ_H são as correções devido à instabilidade atmosférica para o transporte de momento e calor sensível (Paulson, 1970), e o valor da razão entre os comprimentos de rugosidade (z_{0M} / z_{0H}), que representa a correção devido à diferença entre a altura das fontes/sumidouros na vegetação, foi dado o valor 10 (Miranda *et al.*, 1997).

A resistência da camada limite da folha mais nova totalmente desenvolvida (r_b) foi calculada através da seguinte equação:

$$\mathbf{r}_{\mathbf{b}} = [0,0071 * (u_{\mathbf{b}}/L_{\mathbf{f}})^{0.5}]^{-1}$$
(II.6)

onde, u_{hc} (ms⁻¹) é a velocidade do vento na altura do dossel; L_f (m) é a largura da folha mais nova totalmente desenvolvida, e o coeficiente 0,0071 é utilizado no transporte de vapor de água (Boegh *et al.*, 1999).

Os fluxos medidos de vapor de água foram utilizados para calcular a resistência da cobertura vegetal, através da inversão da equação de Penman-Monteith:

$$r_{c} = \frac{\Delta \left(R_{n} - G - LE\right)r_{a} + \rho_{a}c_{p}VPD}{\gamma LE} - r_{a} \qquad (\text{II.7})$$

onde, LE (Wm⁻²) é o fluxo de vapor de água; Rn (Wm⁻²) é o saldo de radiação; G (Wm⁻²) é o fluxo de calor no solo; ρ_a (kgm⁻³) e c_p (Jkg⁻¹K⁻¹), são a densidade e o calor específico do ar; γ (K⁻¹) é a constante psicrométrica; Δ (PaK⁺¹) é derivada da curva da pressão de vapor de saturação em relação à temperatura, e VPD (Pa) é a diferença entre a pressão de vapor na temperatura da superficie da folha, e do ar do dossel (Grace *et al*, 1998; Thorgeirsson e Soegaard, 1999; Kabat *et al.*, 1997).

O balanço de CO₂ (Fco₂) por unidade de área de solo, medido pelo sistema de covariância de vórtices, pode ser representado como:

$$Fco_2 = A_n - R_{solo}$$
 (II.8)

onde, A_n é a fotossíntese líquida (µmolCO₂m⁻²s⁻¹) e R_{solo} é o fluxo de CO₂ do solo (µmolCO₂m⁻²s⁻¹) devido à atividade microbiana e respiração radicular, que foi estimado através das Equações II.3.

A razão entre as concentrações de CO_2 (µmolmol⁻¹) no interior das folhas (C_i) e do ar do dossel (C_a), desconsiderando-se os efeitos do fluxo de vapor de água (Grace *et al*, 1998), foi obtida através da seguinte expressão:

$$C_i/C_a = 1 - 1,6 A_n / (C_a g_c)$$
 (II.9)

onde, o valor de A_n foi obtido através da equação II.8, e g_c , que é a condutância da superfície vegetal, é a inversa de r_c (equação II.7).

A relação hiperbólica entre a fotossíntese líquida (A_n) e a radiação fotossinteticamente ativa (Q_i) , foi ajustada segundo a expressão:

$$A_n = A_{max} * \varepsilon * Q_1 / (A_{max} + \varepsilon * Q_1)$$
 (II.10)

onde, A_{max} é a fotossíntese máxima (µmolCO₂m⁻²s⁻¹), e ε é a eficiência aparente (µmolCO₂mol⁻¹quanta).

II.3 - Modelagem

O modelo SiB2 (Sellers *et al.*, 1996) foi utilizado na componente de modelagem deste trabalho, cujas equações empregadas nas estimativas dos fluxos de calor sensível, latente e CO₂, e as resistências associadas encontram-se no Apêndice.

The second second second

A second se

and the second of the second

service and the second s

O desempenho do modelo foi medido através do índice de concordância (Leuning et al., 1998), que é definido, como:

$$d = 1 - \left[\sum_{i=1}^{N} (Pi - Oi)^{2}\right] / \left[\sum_{i=1}^{N} (|P'i| + |O'i|)^{2}\right] (II.11)$$

onde, Pi e Oi representam os dados simulados e observados, respectivamente; e P'i e O'i, são os desvios em relação às médias do período analisado.

II.3.1 - O modelo de transferência radiativa

O esquema de transferência radiativa simula os fluxos de radiação solar (Wm^{-2}) absorvidos pelo dossel ($F_{\Lambda,\mu(c)}$) e solo ($F_{\Lambda,\mu(g)}$) como:

$$F_{\Lambda,\mu(c)} = V[1 - I \uparrow_{c} - I \downarrow g(1 - a_{S_{\Lambda,d}}) - e^{-KL_{T}/V}(1 - a_{S_{\Lambda,b}})]F_{\Lambda,\mu(0)}$$
(II.12a)

$$F_{\Lambda,\mu(g)} = \{(1-V)(1-a_{S_{\Lambda,\mu}}) + V[I \downarrow g(1-a_{S_{\Lambda,d}}) + e^{-KL\tau/V}(1-a_{S_{\Lambda,b}})]\}F_{\Lambda,\mu(0)}$$
(II.12b)

onde, V é a fração de cobertura de solo pelo dossel; $F_{\Lambda,\mu(0)}$ é radiação solar incidente no intervalo de comprimento de onda Λ (visível e infravermelho próximo) e na direção μ da componente difusa (d) ou direta (b). L_T é o índice de área foliar total; $a_{S\Lambda,\mu}$ é a reflectância do solo; e^{-KLT/V} é o fluxo do feixe direto que penetra no dossel (nulo para radiação difusa). O fluxo difuso que deixa o topo do dossel é representado por (I \uparrow_c) e o fluxo difuso que deixa a base do dossel é (I \downarrow_g).

O saldo de radiação (Wm⁻²) de onda longa absorvido pelo dossel ($F_{T,d (c)}$) e solo ($F_{T,d (g)}$) é dado por:

$$F_{T,d(c)} = F_{T,d(0)} V \delta_T - 2\sigma_s T_c V \delta_T + \sigma_s T_g V \delta_T$$
(II.13a)

a more than the second second the second sec

10-11 (V)

$$F_{T,d(g)} = F_{T,d(0)}(1 - V\delta_T) + \sigma_s T_c V \delta_T - \sigma_s T_g$$
(II.13b)

onde, a radiação termal incidente ($F_{T,d(0)}$) é toda difusa; σ_s é a constante de Stefan-Boltzman ($Wm^{-2}K^{-4}$) e V δ_T é a fração de radiação absorvida pelo dossel; Tc e Tg são as temperaturas (K) do dossel e solo respectivamente.

II.3.2 - O modelo de transferência turbulenta

No submodelo aerodinâmico são estimadas as resistências ao transporte de calor sensível, vapor de água e CO₂ entre o dossel/solo e o ar. A resistência da camada limite foliar (r_b) integrada entre a base (z_1) e o topo (z_2) do dossel é dada por:

$$r_{b} = \frac{C_{1}}{(u_{2})^{1/2}} = \left[\int_{z_{1}}^{z_{2}} \frac{L_{d}(u)^{1/2}}{p_{s}C_{s}} dz\right]^{-1}$$
(II.14)

onde, C_1 é coeficiente representativo do dossel; u_2 é a velocidade do vento (ms^{*1}) em z_2 ; C_s é o coeficiente de transferência de massa/calor (=90l_w^{1/2}); p_s é o fator de superposição foliar; e l_w é a largura característica das folhas (m).

A resistência aerodinâmica entre o solo e o ar do dossel (r_d) é obtida como:

$$r_{d} = \frac{C_{2}}{u_{2}} = \int_{z_{s}}^{h_{a}} \frac{1}{K_{s}} dz \qquad (\text{II.15})$$

onde, C_2 é o coeficiente da resistência entre o solo e o ar do dossel; K_s é o coeficiente de difusão turbulenta de calor e vapor de água, equivalente ao de momento (m²s⁻¹); e h_a é altura das fontes no dossel (m).

A resistência aerodinâmica aos transportes entre o dossel e o o nível de referência (z_m) acima é dada por:

$$r_a = \frac{C_3}{u_m} = \int_{ha}^{2m} \frac{1}{K_s} dz$$
 (II.16)

onde, C₃ é o coeficiente da resistência entre o ar do dossel e o nível de referência (z_m).

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 das equações acima são calculados para cada dia da simulação, em função da altura do dossel, do índice de área foliar e das dimensões características das folhas. As correções diabáticas das resistências baseiam-se na formulação de Paulson (1970).

II.3.3 - O modelo de fotossíntese e resistência da superfície vegetada

Neste submodelo são simuladas as resistências da superficie, que controlam a passagem de vapor de água e CO₂, entre as folhas e o ar (fotossíntese), e entre o solo e o ar, e neste caso depende do conteúdo de umidade do solo.

A taxa de fotossíntese é obtida como o mínimo de três taxas limitantes: a eficiência fotossintética da enzima Rubisco (w_e); a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) capturada pelos cloroplastos (w_e), e a capacidade em exportar ou utilizar os fotoassimilados produzidos, que nas plantas do tipo C₄ depende da enzima PEP-Carboxilase (w_s), expressas como:

$W_c = V_m$	(II.17a)
$\mathbf{w}_{e} = (\mathbf{F}_{\pi} \cdot \mathbf{n}) \in_{4} (1-\omega_{\pi})$	(II.17b)
$w_{\rm S} = V_{\rm m} c_{\rm i}/p$	(II.17c)

onde, V_m é a capacidade catalítica máxima da enzima Rubisco (molm⁺²s⁺¹); (F_n . n) é o fluxo de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) normal à superficie foliar; e_4 é a

eficiência fotossintética em relação ao CO₂ absorvido (molmol⁻¹); c_i e p são a pressão parcial de CO₂ no interior da folha e no ar (Pa); ω_{π} é o fator de espalhamento foliar da RFA.

Como a transição entre uma taxa limitante para outra não ocorre de forma abrupta, e o acoplamento destes três processos resulta em curvas suavizadas ao invés da superposição de retas, Collatz *et al.* (1992) descreveram este efeito através da combinação de duas equações quadráticas, descritas por:

$$\beta_{ce} w_{p}^{2} - w_{p}(w_{c} + w_{e}) + w_{e} w_{c} = 0 \qquad (II.18a)$$

$$\beta_{ps} A^{2} - A(w_{p} + w_{s}) + w_{p} w_{s} = 0 \qquad (II.18b)$$

onde, A é a taxa de assimilação bruta (molm⁻²s⁻¹); β são os coeficientes de acoplamento e variam entre 1 (sem acoplamento) e 0; w_p é o mínimo suavizado entre as taxas w_c e w_e (molm⁻²s⁻¹). A solução do sistema de equações (III.18) é dada pelas menores raízes.

A fotossíntese líquida (An) é obtida através da fotossíntese bruta (A) e da respiração foliar (R_d), estimadas como:

$$An = A - R_d$$
 (II.19a)
 $R_d = 0,025V_m$ (II.19b)

onde, a respiração foliar (R_d) é proporcional ao conteúdo de carboxilase (V_m) , que dependem exponencialmente da temperatura.

A condutância estomática é obtida através do modelo de Ball et al. (1987), que é representado por:

$$g_c = m * (A_n * h_s / C_s) + b$$
 (II.20)

and the second se

onde, A_n é a fotossíntese líquida; h_s é a umidade relativa na superfície foliar; C_s é a concentração de CO₂ na superfície foliar, e os coeficientes da relação linear utilizados são característicos das plantas do tipo C₄ (m=3; b=0.04).

A solução destas equações é obtida estimando-se a temperatura da superficie foliar, que depende da condutância estomática e é função da fotossíntese; portanto há a necessidade de um esquema iterativo. A assimilação da cobertura vegetal é estimada escalonando-se a assimilação das folhas no topo do dossel, assumindo-se que a diminuição da atividade fotossintética com a altura seja adequadamente representada pela extinção da radiação fotossinteticamente ativa, que depende fundamentalmente da quantidade de área foliar verde presente.

A estimativa de respiração das folhas (R_d) no modelo SiB2 é representada por um percentual da máxima capacidade fotossintética (2,5% de V_m) e varia exponencialmente com a temperatura. Como os processos de respiração dos colmos e raízes não são simulados (R_g), utilizou-se numa primeira aproximação a expressão dada por Choudhury (2000):

$$R_g = (1 - Y_g) \{ A - R_m(T) \}$$
 (II.21)

onde Y_g representa a eficiência na conversão em crescimento e depende do teor observado de nitrogênio nas folhas e colmos, e assumiu-se que R_m seja aproximadamente igual à respiração foliar (R_d) estimada pelo modelo SiB2.

II.3.4 - O transporte de água no solo

A variação temporal do conteúdo volumétrico de água ($\theta = m^3 m^{-3}$) armazenado na coluna de solo z (m) e a conservação de massa no sistema solo-raizes é satisfeita através da equação:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - S \qquad (II.22)$$

onde, q representa a densidade de fluxo de umidade e S é o volume de água extraído pelas raizes da vegetação. Através da definição de C(Ψ), que representa a capacidade diferencial de umidade, e é igual a tangente à curva característica do solo ($\theta - \Psi$), temse:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{d\Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = C(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t} \right) \qquad (\text{II.23})$$

Substituindo-se:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{C(\Psi)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{S(\Psi)}{C(\Psi)}$$
(II.24)

A equação (II.24) é conhecida como a equação de Darcy-Richards e representa o movimento vertical da água no solo. É integrada numericamente através de uma esquema implícito de diferenças finitas no qual a linearização de $K(\Psi)$ e $C(\Psi)$ é obtida explicitamente.

As condições iniciais são dadas pela distribuição do conteúdo de água no perfil de solo, e as condições de contorno são o conteúdo de água ou o potencial matricial nas camadas superior e inferior do perfil ao longo do tempo.

As estimativas dos fluxos de água no solo dependem das parametrizações da condutividade hidráulica (K(θ)), e do potencial da água no solo ($\Psi(\theta)$). As funções hidráulicas mais utilizadas nos esquemas de transferência solo-planta-atmosfera (Shao e Irannejad, 1999; Cuenca e Marht, 1996), são as funções de Clapp e Hornberger (1978), representadas como:

$$\Psi(\theta) = \Psi_{s} * W^{B} \qquad (II.25)$$
$$K(\theta) = K_{s} * W^{3+2B} \qquad (II.26)$$
$$W = (\theta / \theta_{s}) \qquad (II.27)$$

onde, Ψ_s (m) e K_s (ms⁻¹) representam os valores do potencial de água e a condutividade hidráulica no solo saturado, respectivamente; W é o grau de saturação; $\theta \in \theta_s$ são a umidade atual e de saturação (m³m⁻³), e B é um parâmetro que dependo do solo.

III - Resultados e Discussão

III.1- A produção primária da cana-de-açúcar

O processo de fotossíntese resulta numa conversão de energia solar em energia química, que é utilizada na realização de trabalho e armazenamento. A produção de organismos fotossintetizadores é definida como a biomassa (B_m) ou peso da matéria orgânica assimilada pela comunidade por unidade de área, e por unidade de tempo (Roberts *et al.*, 1987). Portanto, ao contrário da biomassa acumulada no dossel, o saldo da produção primária (A_n) é representada pela seguinte taxa:

$$A_n = \Delta B_m + d_i \qquad (III.1)$$

onde, ΔB_m é a variação da biomassa ao longo do tempo, e o termo d_i representa o decaimento devido à senescência, decomposição, pastejo ou ataque de insetos.

Na safra 1996/1997 foram amostradas três linhas de 10m cada uma, obtendo-se $(8,3\pm1,1)$ kgm⁻² de colmos e um baixo coeficiente de variação de 13%; entretanto, a produção medida pela Usina, que representa o valor correto, foi de 10,8 kgm⁻², ou seja 23% maior, o que demonstrou a necessidade de um melhor esquema amostral.

Durante a colheita de 1998, avaliou-se a representatividade do tamanho da amostra à ser utilizado, através de 20 repetições aleatórias de 2m lineares à volta da torre; separadas em folhas verdes, folhas secas e colmos. Com base nestas amostras foram calculados os valores médios máximos e mínimos, obtidos combinando-se o número de amostras. Os resultados apresentados na Figura III.1, indicaram que o peso de matéria seca das folhas verdes e folhas secas obtidos com 5 amostras encontraram-se no intervalo de confiança do valor médio (95%). Como a distribuição da matéria seca dos colmos indicou a necessidade de mais pontos, decidiu-se pela manutenção de cinco pontos, mas amostrados em 1m linear em linhas paralelas, o que permitiu a duplicação do número de amostras e minimizou o efeito de falhas, uma vez que se há falha num



max ---- média = min ---- 95%

Figura III.1 – Valores médios de matéria seca (kgm⁻²), máximos e mínimos, em função do número de amostras de: (a) folhas secas ; (b) folhas verdes e (c) colmos de cana-de-açúcar. O valor médio para o total de amostras (20) e o respectivo intervalo de confiança (95%), são indicados.



ponto, na linha adjacente deverá ocorrer a compensação, através de um maior crescimento.

Como a área da Usina apresenta diferentes variedades, em distintos estádios de desenvolvimento, tornou-se possível a determinação de relações empíricas que associam componentes da biomassa com a altura do dossel; e a largura e comprimento da folha mais nova totalmente desenvolvida (+3). Tais estimativas foram obtidas devido à ausência de medições na vegetação ao longo do ciclo de crescimento, e são necessárias nos cálculos das resistências aerodinâmicas entre a vegetação e a atmosfera.

Na Figura III.2 encontram-se os dados relativos às dimensões (m) da folha mais nova desenvolvida, e as estimativas obtidas à partir do peso fresco dos colmos (PFC em kgm⁻²). Segundo Robertson *et al.*, (1998), a folha de número 10 foi a maior observada, e a maior área atingida em torno da folha 18.



Figura III.2 – Medidas (obs) e Estimativas (est) da largura (L) e comprimento (C) da folha (+3), em função do massa fresca dos colmos da cana-de-açúcar.

A relação (Figura III.3) entre a altura dos colmos (m) e o peso seco dos colmos (PSC em kgm⁻²) foi obtida como:

Altura = $0,18 + 1,32*PSC - 0,244*PSC^2$ (r²=0,985 e σ =±0,12m) (III.2)



Figura III.3 – Relação entre a altura dos colmos (m) e seu peso seco (kgm⁻²), e as estimativas obtidas segundo a equação III.2.

Durante as amostragens da biomassa de folhas verdes e secas foram medidas as respectivas áreas foliares, obtendo-se a área foliar específica de 6,548 m² (área foliar) kg^{-1} (matéria seca).

III.1.2 - A queima de biomassa durante a colheita

Nas colheitas das safras 1996/1997, 1997/1998 e 1998/1999 foi avaliada a oxidação de biomassa durante a queima do cultivo e a quantidade de resíduos que permanecem no campo. Na Tabela III.1 encontram-se os valores médios obtidos em equivalentes de CO₂.

Tabela III.1 - Biomassa oxidada durante a queima (Folhas Secas e Ponteiros) e resíduos da colheita que permanecem no campo (variedade SP716180). Entre parênteses encontram-se os percentuais em relação ao total exposto à queima.

Safra	Folhas Secas	Ponteiros	Resíduos		
		KgCO ₂ m ⁻²	1		
1996/1997	1,110±0,277	0,319±0,089 (45%)	0,385±0,108		
1997/1998	0,830±0,183	0,230±0,043 (24%)	0,728±0,136		
1998/1999	0,854±0,344	0,688±0,151 (59%)	0,470±0,106		

As folhas secas foram totalmente oxidadas e os ponteiros, que representam as pontas dos colmos contendo as folhas verdes, foram parcialmente oxidados, como indicam os percentuais dos ponteiros efetivamente queimados. A parcela que não é oxidada, é cortada, e permanece no solo da plantação sendo decomposta ao longo do tempo.

Na colheita de 1999 o teor de cinzas depositado foi estimado entre (0,048 - 0,005) kgm⁻² e o valor médio foi de $(0,025 \pm 0,012)$ kgm⁻², representando aproximadamente 3% da biomassa oxidada.

De acordo com a metodologia do IPCC (1996) nas estimativas da emissão de CO e CH₄ devido à queima de biomassa são considerados percentuais de 6% e 0,5%, respectivamente, em relação ao conteúdo de carbono da biomassa oxidada. Portanto, dos valores equivalentes de CO₂ que se encontram na Tabela III.1, um total de 6,5% foi emitido na forma de CO e CH₄ e o restante na forma de CO₂.

Segundo os dados da Usina Santa Elisa, a produtividade deste talhão na safra 1994/1995 foi de 132,1 tha⁻¹ (2°corte). Os valores de produtividade medidos pela Usina

nas três safras da Tabela III.1 foram: $107,8tha^{-1}$ (4° corte); $99,13tha^{-1}$ (5° corte) e $106,47tha^{-1}$ (6° corte, 100 dias mais longo), respectivamente. Como a produtividade decresce ao longo do tempo a hipótese de que todo o CO₂ emitido seria absorvido na safra seguinte, tornando o balanço nulo, não parece correta. Tal hipótese só seria factível considerando-se todo o ciclo da cultura, desde a implantação até a reforma, e se o novo sistema radicular acumulasse biomassa suficiente para compensar a diminuição observada na produtividade.

III.1.3 - O ciclo 1998/1999

O 5° corte da área ocorreu no dia 14 de abril de 1998 (dia do ano 104); a primeira estimativa de biomassa aérea foi realizada no dia 30 de julho de 1998 (dia do ano 211), ou 106 dias após o corte (DAC). As amostragens subseqüentes ocorreram à intervalos aproximados de 30 dias, conforme os dados apresentados na Tabela III.2

As análise realizadas nos laboratório da Embrapa-Meio Ambiente, das frações de carbono e nitrogênio contidas nos componentes da biomassa aérea permitiram o cálculo dos equivalentes em carbono e nitrogênio, ao longo do ciclo 98/99 na plantação de cana-de-açúcar.

Baseando-se somente na biomassa das folhas verdes observada, não é possível a determinação da quantidade total de folhas novas, que cresceram entre as amostragens. Sob a hipótese de que não tenha ocorrido decaimento das folhas secas entre as amostragens realizadas, a variação temporal de biomassa das folhas verdes deve ser igual à biomassa num dado instante, mais a variação na biomassa de folhas secas.

À partir desta hipótese, foi possível calcular a biomassa das folhas novas, ou que cresceram entre as amostragens; e estimar-se o índice de área foliar (IAF) dessa biomassa. O menor valor da razão entre o IAF de folhas novas e o IAF das folhas verdes observado em cada amostragem, foi 0,25 aos 169 DAC; e o máximo foi 0,78 aos 232 DAC, os valores posteriores foram 0,68. Portanto, potencialmente, cerca de 75% da

36

TABELA III.2 - Componentes da biomassa aérea (Médias±Desvio Padrão), de cana-deaçúcar, variedade (SP716180), observados durante o ciclo 98/99, e massa em equivalentes de carbono e nitrogênio (C, N).

	DAC		Colmos		Folhas Verdes			Folhas Secas		
Datas		Biomassa	C	N	Biomassa	С	N	Biomassa	С	N
		gm ⁻²	gCm ⁻²	gNm ⁻²	Gm	gCm ⁻²	gNm ⁻²	gm ⁻²	gCm ⁻²	gNm ⁻²
30/07/98	106	25,64 ±6,80	10,29	0,33	52,06 ±13,80	20,90	0,66	0,00	0,00	0,00
27/08/98	134	53,50 ±20,40	22,14	0,44	103,00 ±32,00	45,14	1,28	0,00	0,00	0,00
01/10/98	169	97,60 ±31,60	41,56	0,55	145.80 ±35,30	64,57	1,46	0,00	0,00	0,00
06/11/98	205	236,00 ±59,50	96,64	1,77	231.00 ±49,80	102,52	3,19	32,30 ±15,80	13,57	0,24
04/12/98	232	700,00 ±130,00	291,34	3,71	276,00 ±21,10	118,90	3,31	203,00 ±39,80	88,10	0,75
08/01/99	267	1163,00 ±238,80	488,46	4,54	321,00 ±46,80	140,02	3,92	377,00 ±76,00	163,24	2,15
23/02/99	313	2247,30 ±269,80	921,62	6,07	370.80 ±41,81	159,41	4,71	574,80 ±77,20	243,43	2,36
25/05/99	405	3167,00 ±885,70	1350,73	7,60	372,10 ±117,70	161,08	3,50	537,00 ±215,50	232,84	1,88

área foliar verde correspondeu à folhas novas, com até 30 dias de crescimento. Na Austrália, segundo Robertson *et al.* (1998) foram observadas 3,7 folhas em expansão, cuja área seria aproximadamente 1,9 vezes a área da folha mais nova totalmente expandida.

Os valores da concentração de nitrogênio da Tabela III.2, similares aos encontrados na Austrália por Wood *et al.*, (1996), foram em média 1,3% da matéria seca das folhas verdes, e diminuiram nas amostragens realizadas em outubro de 1998, e ao final do ciclo, em maio de 1999 (0,9%). Com base na estimativa de fotossíntese máxima de folhas de milho e sorgo, apresentada por Choudhury (2000), estas variações não seriam suficientes para a redução apreciável da fotossíntese máxima.
Ao final do ciclo o total de carbono assimilado pela biomassa aérea na forma de CO_2 foi estimado em 7,3kg CO_2 m⁻² e uma incerteza dada pelos coeficientes de variação da ordem de 30%. As amostragens foram realizadas em rebrotas (soca) e a biomassa associada ao sistema radicular não foi medida; o que implicaria numa subestimativa da biomassa total da ordem de 20% conforme o trabalho de Ball-Coelho *et al.* (1992).

As folhas secas (Tabela III.2) só foram observadas à partir da amostragem realizada em 06/11/1998, aos 205 DAC, e o índice de área foliar na amostragem anterior foi 1; segundo Robertson *et al.* (1998) a senescência foi detectada após a expansão total de 7 folhas, quando então 0,91 folhas senescem para cada nova folha totalmente expandida.

Com base nos dados da Tabela III.2, Figuras III.2 e III.3 foram obtidos os ajustes da equação (II.4) para a variação temporal dos pesos de matéria seca dos colmos (PSC), folhas verdes (PSFV) e secas (PSFS); e comprimento e largura da folha número (+3) em função do peso fresco dos colmos, cujos coeficientes são apresentados na Tabela III.3.

Estimativas do crescimento diário para o ciclo 98/99, dos colmos e folhas, e do índice de área foliar associado às folhas verdes, encontram-se na Figura III.4, e foram utilizadas no modelo de transferência solo-planta-atmosfera SiB2 (Sellers *et al.*, 1996).

Na Figura III.4 observa-se o rápido crescimento inicial da cana-de-açúcar, e a estabilização dada pelo patamar no caso da altura dos colmos e índice de área foliar. Do ponto de vista ecológico é vantajoso um rápido crescimento inicial, que maximiza a captura de radiação, e depois um período em que a produção destina-se a repor o material senescente (Machado, 1987; Bonnet, 1998).

TABELA III.3 - Parâmetros da equação (II.4), coeficiente de correlação (r^2) e erro padrão ($\pm \sigma$) dos ajustes obtidos.

Y	Ymáx	a	В	С	X	r ² ±σ
PSC ⁽¹⁾	3,292	7,705	-0,0272	0,941	DAC ⁽³⁾	0,999 ±0.071
PSFV ⁽¹⁾	0,379	5.099	-0,025	1,38	DAC ⁽³⁾	0,998 ±0,010
PSFS ⁽¹⁾	0,563	8,205	-0,039	0,318	DAC ⁽³⁾	0,995 ±0,031
Largura ⁽²⁾	0,0383	15,58	-1,95	19,8	PFC ⁽¹⁾	0,937 ±0,003
Comprimento ⁽²⁾	1,467	0,00	-0,71	1,00	PFC ⁽¹⁾	0,960 ±0,090

As unidades utilizadas foram: ⁽¹⁾ (kgm^2) , ⁽²⁾ (m); ⁽³⁾ (dias)



Figura III.4 – Estimativas do peso seco dos colmos ($PSC=kgm^{-2}$); altura dos colmos (m) e índice de área foliar verde ($IAF=m^2m^{-2}$) da plantação de cana-de-açúcar, em função no número de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/1999.

III.2 - As condições climáticas durante o período de observações

O período de observações teve início em janeiro de 1997 e prolongou-se até maio de 1999. Durante o ano de 1997 e o verão de 1998 registrou-se a ocorrência do fenômeno El Niño (Silva Dias & Marengo, 1999), caracterizado na região sudeste do Brasil pelas precipitações anômalas e temperaturas mais elevadas durante o inverno.

Os valores médios são comparados às normais climatológicas (1960-1991) da estação do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) em Ribeirão Preto, distante aproximadamente 30km do sítio experimental.

III.2.1 - Fluxos de Radiação

O ciclo anual dos totais diários de radiação solar incidente (Si), refletida (Sr), saldo de radiação (**Rn**), e albedo da superfície (Sr/Si) são apresentados nas Figuras III.5. Durante o inverno os valores de Si medidos (Figura III.5a) foram da ordem de 13MJm⁻², e no verão foram medidos valores acima de 25 MJ m⁻². Entretanto, devido à nebulosidade observaram-se no verão períodos com totais inferiores à 20MJm⁻², durante vários dias, como em torno do dia 36 em 1998, e aproximadamente dia 21 em 1999.

Os totais diários observados do saldo de radiação sobre a cultura de cana-deaçúcar encontram-se na Figura III.5c. O ciclo anual segue a marcha dos totais de Si (Figura III.5a) e a relação linear entre **Rn** e Si foi obtida como:

$$\mathbf{Rn} = 0,75 * \mathbf{Si} - 1.8, r^2 = 0,87$$
 (III.3)

A série temporal dos totais de Sr é apresentada na Figura III.5b; o intervalo de variação dos valores medidos encontrou-se entre 1 e 5 MJm⁻², observados após, e antes das colheitas, respectivamente, e são indicadas pela letra "q" na figura. Com base nos totais de Sr e Si foram calculados os valores do albedo médio da superficie (Sr/Si), que se encontram na Figura III.5d.

A variação do albedo ao longo do tempo permite de certa forma acompanhar o crescimento da cana-de-açúcar. Após as colheitas, durante cerca de 60 dias, a reflexão

HE2.1 Part I Training an

and the second second



Figura III.5 – Ciclo anual dos totais diários de: (a) radiação solar incidente-Si; (b) radiação se albedo da superfície (Sr/Si), observados sobre a cultura de cana-de-açúcar, entre 1997 e 1999

±



da superficie é dominada pelo solo descoberto e linhas de plantio contendo resíduos. Em seguida, observa-se o aumento da reflexão, que decorre inicialmente do crescimento do dossel, pois em ambos os anos, 1997 e 1998, as colheitas ocorreram nos dias do ano 100 e 104, respectivamente; o período de 60 dias indica que em torno do dia do ano 161 (10 de junho), em pleno inverno, a plantação apresentava significativos sinais de crescimento.

Os valores do albedo da superficie (Figura III.5d) registrados antes das colheitas indicam que 1998 teria apresentado um maior desenvolvimento, e 1999 o menor. Entretanto, a produção obtida pela Usina Santa Elisa nestes três anos foi de: 107,8 (1997); 99,13 (1998) e 106,47 (1999) tha⁻¹. A menor reflexão da superficie registrada em 1999 deveu-se à ocorrência do "tombamento" da cana no mês de fevereiro, em função das intensas chuvas, o que não foi observado em 1998, e parcialmente em 1997.

O ciclo diário dos componentes de radiação (médias de 30min), é apresentado nas Figuras III.6; para três dias em março, com a plantação plenamente desenvolvida; e três dias em maio, que representam o período com o solo descoberto, do ano de 1998. Os fluxos de calor no solo (Figura III.6a), que eram de aproximadamente 60 Wm⁻², após o corte, atingiram 140Wm⁻²; o albedo (Figura III.6b) mudou de 0,25 para 0,12, que são os valores característicos do albedo da plantação madura e solo.



Dia do Ano (1998)

Figura III.6 – Ciclos diurnos observados em março e maio de 1998, sobre cana-deaçúcar, de: (a) radiação solar incidente-Si, refletida-Sr, saldo de radiação-Rn e fluxo de calor no solo-G; (b) albedo da superfície

(continua)



Dia do Ano 1998

Figura III.6 - Continuação.

III.2.2 - Precipitação

A série temporal dos totais diários de precipitação registrados sobre a cultura da cana-de-açúcar, entre janeiro de 1997 e maio de 1999, é apresentada na Figura III.7. O total máximo registrado foi de 90mmdia⁻¹ no final do ano de 1998. Os totais integrados ao longo dos ciclos de 97/98 e 98/99 foram 1386 e 1342mm, respectivamente. Porém, as distribuições foram diferentes, como se observa pelas precipitações em maio e junho de 1997, e o início da estação chuvosa em setembro, característicos de anos que apresentam o fenômeno El Niño (Silva Dias & Marengo, 1999). No verão de 1999, foram registrados dias com chuvas intensas intercalados à veranicos.

Os totais mensais são comparados às normais climatológicas da estação do IAC em Ribeirão Preto na Tabela III.4. Nos três anos os totais acumulados foram inferiores à normal, e decresceram de ano a ano. Em junho de 1997 o total registrado (196mm) foi mais do que seis vezes a média, contribuindo favoravelmente para o desenvolvimento da cultura no período. Entretanto, a estação seca foi praticamente ininterrupta: entre julho e setembro foram registrados apenas 27mm; e no ano de 1998 durante o mês de agosto 37mm, as implicações serão abordadas no item III.3, sobre a umidade do solo.

43



The second s

the second se

A TER



Figura III.7 – Totais diários de precipitação observados sobre a cultura de cana-deaçúcar entre 1997 e 1999.

Tabela	III.4 – To	otais	mensais	de	precipitação	observado	s sobre	a	cultura	de	cana-de-
açúcar,	e normais	clim	atológica	as (1960-1990) a	la estação d	o IAC	en	n Ribeirâ	io P	reto-SP.

Ano	1997	1998	1999	1960-1990				
	(mm)							
Janeiro	325	171	309	268				
Fevereiro	87	235	199	218				
Março	92	164	98	159				
Abril	25	50	36	81				
Maio	54	54	18	54				
Junho	196	2	44	31				
Julho	9	0	11	28				
Agosto	0	37	0	26				
Setembro	18	7	61	58				
Outubro	84	154	44	139				
Novembro	242	140	43	174				
Dezembro	177	251	222	298				
Total	1309	1265	1085	1534				

III.2.3 - Temperatura do Ar, Umidade Relativa do Ar e Velocidade do Vento

As temperaturas do ar médias diárias, máxima e mínima, e as normais climatológicas mensais (1960-1990) da estação do IAC em Ribeirão Preto encontram-se na Figura III.8a. Em decorrência do fenômeno El Niño o inverno em 1997 foi relativamente mais ameno (Silva Dias & Marengo, 1999), apresentado temperaturas 1°C acima da média; e as temperaturas observadas à partir do final de outubro (dia 295) e durante o verão encontraram-se acima da média (2°C), fato não observado no ciclo seguinte (1998/1999).

Segundo Machado (1987) a taxa de fotossíntese em cana-de-açúcar aumenta com a temperatura até 30°C, estabiliza-se entre 30 e 34°C, e decresce acima destes valores. Sob baixas temperaturas observam-se quedas nas taxas de fotossíntese; na eficiência quanto ao uso de radiação e crescimento foliar (Campbell *et al.*, 1998). A temperatura média mais elevada pode reduzir o tamanho das folhas, que é função da taxa e duração da expansão da folha; taxas maiores em períodos mais curtos implicam em folhas menores (Robertson *et al.*, 1998). A biomassa das folhas verdes medida em fevereiro de 1998 e 1999 foi de 0,289 e 0,371 kgm⁻², respectivamente.

As séries temporais das médias diárias de umidade relativa e velocidade do vento observados acima do cultivo são apresentados nas Figuras III.8b,c, respectivamente. O mês de abril e a primeira quinzena de maio de 1997 apresentaram umidades abaixo da média, cujo padrão foi alterado pelas chuvas registradas; e o verão seguinte, em 1998, foi relativamente mais seco, devido à irregularidade nas precipitações. Os valores máximos da velocidade do vento média diária (Figura III.8c) atingiram 6ms⁻¹; em 25/05/1997 (em torno do dia 151 na figura), a intensidade dos ventos derrubou a torre micrometeorológica em Sertãozinho. A comparação com as normais indica que a utilização de valores médios mensais resulta em apreciável subestimativa, e a velocidade do vento não é comumente registrada nas estações mais simples.









Figura III.8 – Valores médios diários observados sobre a cultura de cana-de-açúcar entre 1997 e 1999, e as normais climatológicas de: (a) temperatura do ar; (b) umidade relativa do ar; (c) velocidade do vento.



III.2.4 - Evapotranspiração Potencial

Através dos totais diários do saldo de radiação, e dos valores médios diários de velocidade do vento, umidade e temperatura do ar foi calculada a evapotranspiração potencial segundo Penman (Cain, 1998), cujos termos de energia e aerodinâmico são apresentados na Figura III.9. Os valores máximos do termo de energia foram da ordem de 7mmdia⁻¹; e do termo aerodinâmico 2 mmdia⁻¹; observa-se a defasagem nos termos, pois a componente aerodinâmica é mais efetiva nos meses de setembro e outubro, quando a componente energética ainda não atingiu o máximo, que é observado no auge do verão.



----- Termo de Energia (Penman) — Termo Aerodinâmico (Penman)

Figura III.9 – Totais diários (mmdia⁻¹) do termo de Energia e Aerodinâmico da evapotranspiração potencial segundo Penman.

Na Figura III.10 encontram-se os totais acumulados de evapotranspiração potencial; precipitação observada e precipitação normal (climatológica), além da estimativa da evapotranspiração para cana-de-açúcar, baseada nos coeficientes de cultura do Planalsucar (Scardua e Rosenfeld, 1987). Com base nos totais acumulados em todo o período (1997/1999), a precipitação registrada (3283mm) foi

aproximadamente 15% menor do que a normal climatológica (3849mm), e a estimativa de evapotranspiração segundo Planalsucar (3233mm) foi 20% inferior à Penman (4012mm). As diferenças acumuladas entre a precipitação e a evapotranspiração, utilizando-se os coeficientes de cultura segundo Planalsucar foram de -478mm, no ciclo 1997/1998 (369 dias); e -450mm no ciclo 1998/1999 (405 dias).



Figura III.10 – Totais diários acumulados de evapotranspiração potencial (Penman), precipitação normal climatológica (IAC), precipitação observada e evapotranspiração potencial da cana-de-açúcar (Planalsucar).

III.3 – Umidade do solo sob a cultura de cana-de-açúcar

III.3.1 - Características físicas do solo do cultivo de cana-de-açúcar

O solo da cultura de cana-de-açúcar foi classificado como Latossolo Vermelho Escuro (LVE), e os dados da análise textural obtidos até 1m de profundidade indicaram a seguinte composição média: 48% de argila; 16% de silte; 36% de areia, dos quais 3% foram areias grossas.

A densidade média do perfil medida foi de $(1,226\pm0,077)$ Mgm⁻³, e a maior densidade $(1,395\pm0,026)$ Mgm⁻³ foi observada na profundidade de 0,3m. A porosidade média do perfil foi estimada em $(0,531\pm0,029)$ % Volume, assumindo-se o valor da densidade real do solo de 2,7 Mgm⁻³.

A equação (II.25), que descreve o potencial de água do solo em função do grau de saturação foi ajustada aos dados obtidos conforme o Capítulo II, produzindo os seguintes valores das constantes: B = 8.5; $\Psi_s = -0,51 \text{ mH}_2\text{O}$; e $\theta_s = 0,565 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. O valor da condutividade hidráulica de saturação (K_s) foi estimado em 9.45*E-05 ms⁻¹ (equação II.26) e obtido conforme Tomasella e Hodnett (1997), considerando-se uma porosidade efetiva igual à 0,324 m³m⁻³, que representa a diferença entre θ_s e o conteúdo de água sob um potencial $\Psi=-3,36\text{mH}_2\text{O}$.

Os valores de B e Ψ_s , reportados por Shao e Irannejad (1999) para um solo classificado como *Clay loam* são 8,52 e -0,361mH₂O, respectivamente; porém K_s (2,45E-06 ms⁻¹) e θ_s (0,476 m³m⁻³) são inferiores aos obtidos no LVE.

A calibração da sonda de neutrons foi realizada no solo da própria cultura, obtendo-se uma curva para a camada superficial entre 0 e 0,1m e outra para o restante do perfil de solo (0,2-1,4m), cujas equações são:

$$\theta = (0.533 \pm 0.038) * TCR + (0.120 \pm 0.007) r^2 = 0.99$$
; camada de 0-0.1m (III 4a)
 $\theta = (0.925 \pm 0.034) * TCR - (0.142 \pm 0.012) r^2 = 0.96$; camada de 0.2-1.4m (III 4b)

onde, θ (m³m⁻³) é a umidade do solo, e TCR é a taxa de contagem relativa, que representa a contagem obtida numa determinada profundidade do solo, dividida pela

contagem em um tubo de alumínio instalado num tambor contendo água (média de 21.900 contagens s⁻¹).

III.3.2 – As variações de longo prazo na umidade do solo (θ)

Os valores de θ medidos ao longo do tempo em diferentes camadas de solo são apresentados na Figura III.11. Os extremos do conteúdo de umidade foram 0,402 e 0,257m³m⁻³, observados em 1997, nas profundidades de 1,4m e 0,2m, respectivamente.

O decréscimo de θ durante as estações secas foi praticamente uniforme, principalmente nas camadas entre 0,6 e 1,4m indicando que o sistema radicular ativo atinge estas profundidades. Como em 1997 e 1998 as colheitas ocorreram no mês de abril durante o inverno, as rebrotas encontravam-se com 4 meses aproximadamente; logo, a renovação do sistema radicular deve ser parcial, como observado por Ball-Coelho *et al.* (1992).

De acordo com os resultados de precipitação anteriormente apresentados (III.2), o ano de 1997 foi caracterizado pelo episódio El Niño, quando precipitações acima da média ocorreram em maio e junho, interrompendo temporariamente o avanço da estação seca. Porém, após este período (15/06/1997), foram registrados 8mm em 21/07/1997, e 16,1mm em 20/09/1997, que foram suficientes para manter os níveis mínimos de umidade, como se observa nas Figuras (III.11). Só à partir de 20/10/1997 tem início a recarga do perfil.

Apesar do período seco em 1997 ter tido uma duração de 3 meses, foi praticamente ininterrupto, ao contrário de 1998, que se prolongou por cerca de 5 meses, mas foi interrompido, quando após 60 dias sem precipitações foram registrados 35mm na primeira quinzena de agosto, e depois mais 50 dias sem chuva até o início de outubro.

50





O conteúdo máximo de água armazenada na camada de 1,4m de solo (Figura III.12) observado em 16/07/1997 foi de 558,5mm, e o mínimo de 384mm foi registrado em 15/10/1997, uma diferença de –174,5mm; considerando-se o total de precipitação (24,1mm), a taxa média de evapotranspiração e drenagem foi de 2,2 mmdia⁻¹. Em 1998, os extremos observados foram: 500mm em 06/05, e 397,1mm em 04/10; levando-se em conta a variação no armazenamento e a precipitação registrada no período (35mm), obtém-se uma taxa média de evapotranspiração de 0,8mmdia⁻¹.



camada (0,1-1,4)m — Precipitação

Figura III.12 – Água armazenada (mm) na camada de solo de 1,4m de profundidade e totais diários de precipitação (mmdia⁻¹), observados no cultivo de cana-de-açúcar, entre 1997-1999.

Os valores do potencial hídrico do solo (Ψ) na camada de 1,4m foram obtidos através de θ (Equação II.25), e são apresentados na Figura III.13, que contém o albedo da superfície observado entre janeiro de 1997 e maio de 1999. Foram estimados potenciais da ordem do ponto de murcha permanente (-150mH₂O) durante a estação seca em 1997, entre 20/08 e 12/11/1997, em torno do dia 300 na figura, e entre 03/09 e 10/10/1998, dia 650 aproximadamente.



- Potencial camada(0,1-1,4)m - Albedo

Figura III.13 – Potencial hídrico do solo (m H_2O), na camada de 1,4m de profundidade, e albedo do cultivo de cana-de-açúcar, observados entre 1997-1999.

Os valores do albedo entre os dias 200 e 350 na Figura III.13 demonstram que a cultura teve o seu desenvolvimento restringido, o mesmo ocorrendo em 1998, em torno do dia 650, mas durante um período menor de tempo.

Os efeitos de estresse hídrico em cana-de-açúcar foram observados na Autrália por Robertson *et al.*, (1999); em plantios cujo o índice de área foliar (IAF) era inferior à 2 as plantas conseguiram se recuperar após o início das chuvas, o mesmo foi registrado por Wiedenfeld (2000); porém, quando as plantas apresentavam um maior IAF a ocorrência de déficites promoveu a queda acentuada na produção.

O efeito do estresse pode ser avariguado comparando-se as amostragens de biomassa aérea realizadas em 18/09/1997 e em 1/10/1998. Em setembro de 1997 os componentes da biomassa aérea foram: folhas verdes = 84gm^{-2} ; folhas secas = 37gm^{-2} ; colmos = 56gm^{-2} . Em outubro de 1998 os resultados obtidos foram: folhas verdes = 146gm^{-2} ; folhas secas = 0gm^{-2} ; colmos = 98gm^{-2} . Verificou-se a redução da área foliar verde, através da senescência em 1997, que não ocorreu no ciclo seguinte, em 1998; e na redução de 43% na biomassa dos colmos.

III.4 – Fluxos de Momento, Calor Sensível, Calor Latente e CO2

III.4.1 - Momento

Do ponto de vista aerodinâmico, o ciclo da cultura de cana-de-açúcar caracteriza-se por uma fase inicial, dominada pelo solo descoberto e linhas contendo resíduos da colheita; um período intermediário, durante o qual o solo apresenta-se parcialmente coberto, e a cobertura total do solo, após ter sido atingido um índice de área foliar em torno de 4 (Shuttleworth e Gurney, 1990).

Na Figura III. 14 são apresentados os valores médios mensais do deslocamento do plano zero (**d**) e comprimento de rugosidade (z_0) obtidos por Rocha (2001), através de dados disponíveis do perfil de vento. É notável a semelhança entre os valores de **d** e as estimativas da altura dos colmos, para o ciclo 1998/1999, que também são



Figura III.14 – Estimativas da Altura dos colmos (m), deslocamento do plano zero-d (m) e comprimento de rugosidade- z_0 (m), sobre a cultura de cana-de-açúcar ao longo do ciclo 1998-1999.

apresentadas na mesma figura. Ao final do ciclo observaram-se d menores, em decorrência do tombamento dos colmos verificado à partir de fevereiro de 1999, o que

não foi detectado pela estimativa de altura (vide III.1), pois esta só depende da biomassa seca dos colmos.

Considerando-se o dossel totalmente desenvolvido, acima dos colmos normalmente encontram-se 3,7 folhas em expansão (Robertson *et al.*, 1998), que podem apresentar aproximadamente 1,5m de comprimento, mas dobram-se; portanto, a altura máxima do dossel (h_c) será obtida adicionando-se cerca de 1m à altura dos colmos, o que implica numa altura em torno de 3m. Os maiores valores obtidos de d e z_0 foram 2,2m e 0,5m respectivamente, representando 73 e 17% da altura do dossel (hc). Em cultivos uniformes, segundo Monteith e Unsworth (1991), a razão d/h_c varia entre 0,6 e 0,7, e z_0/h_c entre 0,08 e 0,12.

Sob condições de cultivo esparso, ou cobertura parcial do solo, que foram observadas até aproximadamente novembro de 1998 (dia 329) na Figura III.14, z_0 foi aproximadamente metade de d, e apesar do crescimento do dossel, durante um longo período as variações em ambos foram mínimas. Nesta situação, outros fatores como o espaçamento das linhas de plantio, direção do vento e percentual de cobertura são atuantes, tornando bem mais difícil a definição de padões médios (Sene, 1994).

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível e latente (r_a) entre o dossel e a altura de referência (11m), e a resistência da camada limite da folha mais nova totalmente desenvolvida (r_b) são apresentadas na Figura III.15.



Figura III.15 – Resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível/latente entre o dossel e a atmosfera (r_a), e resistência da camada limite da folha mais nova desenvolvida (r_b), estimadas sobre plantação de cana-de-açúcar entre 1998-1999.


Sob condições de dossel totalmente desenvolvido, antes do corte (q) e após o dia 400 na Figura III.15, os valores de \mathbf{r}_a estimados encontraram-se entre 20 e 40 sm⁻¹; após o corte houve um aumento da variabilidade, e os valores de \mathbf{r}_a variaram entre 60 e 80 sm^{-1} . A resistência \mathbf{r}_b aumentou até o dia 300, obtendo-se e um valor médio de 40 sm^{-1} ; \mathbf{r}_b é proporcional à largura da folha, que ao atingir o máximo desenvolvimento permanece constante, logo a diminuição foi conseqüência das alterações aerodinâmicas ocorridas no dossel.

III.4.2 – Fluxos de Calor Sensível e Calor Latente

Os fluxos medidos pelo sistema de correlação de vórtices (capítulo II) de calor sensível (H) e latente (LE) foram utilizados no cálculo dos valores médios diários da razão de Bowen (β =H/LE), que são apresentados na Figura III.16. Durante aproximadamente 100 dias após o corte (**q** na figura), no ciclo 1998/1999, β foi superior à 1 em decorrência das pequenas taxas de transpiração e evaporação, devidas à baixa disponibilidade de água na camada superficial do solo.



Figura III.16 – Valores médios diários da Razão de Bowen (β) observados sobre a cultura de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999.

Nos dias subseqüentes à ocorrência de precipitação observou-se a queda em β , devido à evaporação da água da camada superficial de solo. Após este período, o

desenvolvimento da vegetação promoveu o incremento na transpiração, e os valores de β tornam-se inferiores à 0,5. Interessante notar, que antes da colheita em 1998 β era ainda menor do que 0,5 e ao final do ciclo em 1999 os valores de β já eram maiores do que 1, devido ao ciclo mais longo (405 dias) e o amadurecimento da plantação.

Os totais diários de calor sensível (H) e calor latente (LE) são apresentados nas Figuras III.17(a,b). Os maiores valores observados de H (Figura III.17a) em torno de 6 MJm⁻², ocorreram nos períodos em que o solo encontrava-se descoberto e com a cultura desenvolvida, que neste caso pode ter sido consequência da diminuição do albedo, conforme o sub-capítulo III.2. Os menores totais diários de LE (Figura III.17b) foram registrados durante a estação seca (1MJm⁻²), e valores elevados da ordem de 16 MJm⁻², o equivalente à 6,7mmdia⁻¹, ocorreram durante o verão, correspondendo à transpiração e evaporação da chuva interceptada pelo dossel.



Figura III.17 – Totais diários dos fluxos de: (a) calor sensível (MJm⁻²); (b) calor latente (MJm⁻²), observados sobre a cultura de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999.



Os ciclos diurnos dos fluxos de calor sensível e calor latente são apresentados nas Figuras III.18(a,b), que contêm os valores médios dos fluxos medidos à cada 30 minutos. São dois meses contrastantes: outubro de 1998, ao final da estação seca, e índice de área foliar (IAF) igual a 1; março de 1999, quando a plantação encontrava-se plenamente desenvolvida e apresentando um IAFverde igual a 2,4. Os fluxos de calor sensível seguem a marcha da radiação solar incidente (Figura III.6a); os valores máximos em outubro (200Wm⁻²) foram da mesma ordem em março (250Wm⁻²). A pequena diferença foi decorrência de menos energia disponível para o aquecimento da superfície em outubro em relação à março, e da alteração no albedo (III.3).





Figura III.18 – Ciclos diurnos médios dos fluxos de: (a) calor sensível (Wm⁻²); (b) calor latente (Wm⁻²), medidos em outubro de 1998 e março de 1999, sobre cana-de-açúcar.







As diferenças foram mais marcantes com relação ao ciclo diurno de LE (Figura III.18b), cujos máximos foram da ordem de 250Wm⁻² em outubro, e 350Wm⁻² em março. Os fluxos médios integrados foram 6,5MJm⁻² (2,7mmdia⁻¹) e 9,2MJm⁻² (3,8mmdia⁻¹), respectivamente; um aumento de 41% na evapotranspiração. Esta variação está de acordo com os dados de Denmead *et al.* (1997), obtidos na Austrália, que observaram para IAF entre 0,7 e 2,5 totais de evapotranspiração entre 2,5mm dia⁻¹ e 3,5 mm dia⁻¹, sobre rebrota de cultivo colhido crú.

A condutância ao transporte de vapor de água pelo dossel ($g_c=1/r_c$), que foi obtida através dos fluxos de H e LE, conforme o capítulo II, é apresentada na Figura III.19. Como em outubro de 1998 teve início a estação mais úmida; e como o dossel ainda não cobria totalmente o solo, a condutância estimada integra tanto a parte fisiológica (estômatos) quanto da superfície (evaporação), ao contrário do observado em março de 1999, quando a maior contribuição sem dúvida foi da vegetação. De forma geral, os valores de g_c variaram em torno de 0,1 e 0,3molCO₂m⁻²s⁻¹, em outubro e março, respectivamente. Os valores do ciclo diurno são similares aos dados apresentados por Denmead *et al.* (1993) obtidos na Austrália através de porometria.



🖶 outubro98 👄 março99

Figura III.19 – Ciclos diurnos médios da condutância estomática do dossel, em cultivo de cana-de-açúcar (mol $CO_2 m^{-2} s^{-1}$), relativos à outubro de 1998, e março de 1999.

III.4.3 – Fluxos de Dióxido de Carbono (CO₂)

Os totais diários dos fluxos de CO_2 observados através do sistema de covariância de vórtices (capítulo II), que representam o balanço das trocas entre o sistema solo-planta e a atmosfera, encontram-se na Figura III.20. Antes da colheita em 1998 foram medidos valores máximos de assimilação de -60 g CO_2 m⁻², cuja convenção adotada implica em fluxos da atmosfera para a vegetação. Após a colheita (q) os fluxos tornaram-se positivos, indicando que o solo e as plantas perderam mais CO_2 do que foi absorvido; este período estendeu-se até o dia 186 de 1998, quando o sinal voltou a ser negativo. Durante os meses de fevereiro e março de 1999 foram observados novamente valores de máximos de assimilação em torno de -56g CO_2 m⁻².



Figura III.20 – Totais diários dos balanço de CO_2 (g CO_2 m⁻²), medidos sobre cultivo de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999.



O ciclo diurno da fotossíntese líqüida (An) encontra-se na Figura III.21a. Estas estimativas foram obtidas através dos valores absolutos do balanço de CO₂ observados durante o dia, que foram somados às estimativas do efluxo de CO₂ do solo (Rocha *et al.*, 2000). A assimilação máxima (por área de solo) em outubro foi em média 20 μ molCO₂m⁻²s⁻¹, e em março foi 45 μ molCO₂m⁻²s⁻¹; de acordo com o aumento no índice de área foliar de 1 para 2,4. O ciclo diurno da concentração de CO₂ na atmosfera (Figura III.21b) indicou o acúmulo durante a noite, devido às concentrações mais elevadas no início da manhã (380 μ molmol⁻¹), e o decréscimo ao final da tarde (350 μ molmol⁻¹).



---- outubro98 ---- março99

Figura III.21 – Ciclos diurnos médios observados sobre cultivo de cana-de-açúcar em outubro de 1998 e março de 1999 de: (a) fotossíntese líqüida (μ molCO₂m⁻²s⁻¹); (b) concentração de CO2 no ar (μ molmol⁻¹).

As relações entre a fotossíntese líquida do cultivo de cana-de-açúcar (An) e os fluxos incidentes de radiação fotossinteticamente ativa (Qi) são apresentados na Figura III.22, em diferentes períodos do ciclo da cultura. A relação observada em outubro de 1998 foi similar à de abril de 1999; e em maio de 1999 ocorreu o maior decréscimo em relação aos valores observados entre janeiro e março de 1999, que foram os maiores.

Os coeficientes das hipérboles ajustadas, conforme a equação II.10 do capítulo II, são apresentados na Tabela III.5. O coeficiente que representa a eficiência aparente, pois trata-se da radiação incidente e não absorvida, foi ligeiramente inferior em outubro de 1998, indicando que outros fatores atuaram, além da menor área foliar. Ao final do ciclo, em abril e maio de 1999, os valores de Amáx da Tabela III.5 decresceram, e o ajuste para o mês de abril foi similar ao obtido em outubro, sobre áreas foliares bem distintas.

Tabela	III.5 –	Coeficientes	s da relaçã	o entre a	a fotossíntese	líquida	do cultivo	de car	ia-de-
açúcar	e o flux	o incidente	de radiaçã	io fotossi	inteticamente	e ativa (e	quação II.	9).	

Período	Amáx	Eficiência	±Erro Padrão	R
	µmolCO ₂ m ⁻² s ⁻¹	µmolCO2/µmol	µmolCO2m ⁻² s ⁻¹	
Outubro98	34,1	0,05	6,2	0,54
Janeiro-Março99	63,2	0,08	9,5	0,61
Abril99	34,8	0,08	8,8	0,37
Maio99	18,8	0,09	9,0	0,15



Figura III.22 – Relações observadas e estimadas, entre a fotossíntese líquida e a radiação foto de-açúcar, em (a) outubro de 1998; (b) janeiro-março de 1999; (c) abril de 1999 e (d) maio de

As trocas gasosas entre a vegetação e a atmosfera dependem da condutância estomática do dossel (g_c), cujas variações (Grace *et al.*, 1998) sob elevadas densidades de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa (Qi>1200µmol quanta m⁻²s⁻¹) são dominadas pela diferença na concentração de vapor de água entre o dossel e o ar que o circunda (VPD). A relação entre ambas é apresentada na Figura III.23, para os meses de outubro de 1998 e março de 1999.Para um mesmo valor de VPD as condutâncias foram menores em outubro, e para valores de VPD maiores do que 1,5kPa em geral, g_c foi inferior à 0,5molCO₂ m⁻²s⁻¹, de acordo com as características das plantas do tipo C₄ (Polley *et al.*, 1992).



Figura III.23 – Relação entre a condutância estomática do dossel (molCO₂ m⁻²s⁻¹) e a diferença na pressão de vapor (kPa), entre a superficie foliar e o ar do dossel, em cultivo de cana-de-açúcar, nos meses de outubro de 1998, e março de 1999.





to the second second



and the second state of the se

difer a second second

A condutância estomática do dossel (g_c) apresenta uma relação linear com o índice (h_s*A_n/C_s), desenvolvido por Ball *et al.*(1987) e conhecido como o índice BWB; os termos h_s e C_s representam a umidade relativa e a concentração de CO₂ na superfície das folhas, e An é a fotossíntese líqüida, conforme o capítulo II. Na Figura III.24 a relação entre g_c e o índice BWB foi obtida sobre o cultivo de cana-de-açúcar nos meses de outubro de 1998 e março de 1999, e é comparada à relação linear de Collatz *et al.* (1992), ajustada para folhas de milho; os valores dos coeficientes angular (m=3) e linear (b=0,04) não diferiram dos ajustes efetuados para os meses de outubro e março. Os pontos relativos à g_c maiores do que 0,5 molCO₂m⁻²s⁻¹ não foram considerados, pois representam a vegetação e ou solo parcialmente molhados.



Figura III.24 – Relação entre a condutância estomática do dossel (molCO₂ m⁻²s⁻¹) e o índice (hsAn/Cs), observados sobre cultivo de cana-de-açúcar, nos meses de outubro de 1998 e março de 1999. A relação linear proposta por Collatz *et al.* (1992) também é apresentada.





A razão C_i/C_a onde, $C_i \in C_a$ são as concentrações de CO₂ no interior da folha e no ar do dossel respectivamente, quando estimada para a superfície vegetada representa as razões para as folhas individualmente ponderadas pelas suas condutâncias estomáticas (Grace *et al.*, 1998). Normalmente a razão é menor nas plantas do tipo C₄, em conseqüência do fechamento estomático, e tanto nas plantas C₃ como nas C₄ a razão diminui com o aumento da diferença na pressão de vapor entre a superfície foliar e ao ar do dossel (Miranda *et al.*, 1997). As estimativas da razão C_i/C_a obtidas sobre o cultivo de cana-de-açúcar, nos meses de outubro de 1998 e março de 1999, encontram-se na Figura III.25.



Figura III.25 – Relação entre a razão das concentrações de CO_2 (CO_2 intercelular / CO_2 ar), e diferença na pressão de vapor (kPa), entre a superficie foliar e o ar do dossel, observada em cultivo de cana-de-açúcar, nos meses de outubro de 1998, e março de 1999.

O coeficiente angular da relação entre C_i/C_a e VPD para os meses de outubro de 1998 e abril de 1999 foi de -0,16kPa⁻¹; entre janeiro e março de 1999 foi -0,24 kPa⁻¹, e em maio de 1999 foi de -0,12 kPa⁻¹. Os menores valores dos coeficientes implicam numa maior sensibilidade dos estômatos em relação à VPD; os coeficientes lineares têm menor importância fisiológica, pois representam condições de baixa demanda evaporativa (Zhang e Nobel, 1996). Para um mesmo valor de VPD as razões estimadas em outubro, e após abril, foram maiores, o que indica uma redução na troca de gases por unidade de área de solo (Miranda *et al.*, 1997), como resposta à estresse hídrico ou o amadurecimento.

Du *et al.* (1996) observaram em cana-de-açúcar as seguintes respostas à estresse hídrico moderado (-0,8MPa na folha): reduções de 50% na fotossíntese líquida (An); na eficiência inicial e na condutância estomática (g_c); além da saturação de An para valores de Qi acima de 1000 µmol quanta m⁻²s⁻¹. Os valores de g_c variaram entre 0,25 e 0,1 mol CO₂ m⁻²s⁻¹, na ausência de restrições, e sob restrições hídricas moderadas respectivamente; o declínio na fotossíntese foi provocado pelo fechamento estomático das plantas, e não devido à mudanças nas reações bioquímicas (Du *et al.*, 1998).

No mês de abril, com o decréscimo das temperaturas e precipitação, tem início o período normal de maturação da cana-de-açúcar (Alfonsi *et al.*, 1987), quando observa-se a diminuição do crescimento e o acúmulo de açúcares no colmo (Machado, 1987). Entretanto, na área estudada é prática comum a aplicação aérea de maturadores (glifosate) durante a segunda quinzena de março. Os efeitos do glifosate são discutidos por Mutton *et al.* (1996), que observaram a influência na concentração de sólidos solúveis como também da sacarose aparente, sugerindo um possível efeito na atividade das invertases ácida e neutra, modificando a partição de fotoassimilados, com efeitos máximos aos 60 dias. Foram também observados decréscimos no crescimento das plantas e na formação de folhas aos 28 dias após o tratamento, e principalmente após 56 dias (Foloni *et al.*, 1996).

Portanto, a menor assimilação observada em outubro de 1998 foi provavelmente decorrência do estresse hídrico ocorrido durante a estação seca; e após abril de 1999 a diminuição nas taxas de An decorreu da maturação natural, que foi acelerada artificialmente.

Na ausência de estresse hídrico, tanto as taxas de fotossíntese líquida (An) como o fluxo de calor latente (LE) são dominados pelo fluxo incidente de radiação solar; sob estas condições, a relação An/LE depende da diferença na pressão de vapor (kPa) entre a superfície foliar e o ar do dossel (VPD).

As estimativas da razão An/LE e VPD obtidas sobre o cultivo de cana-deaçúcar em outubro de 1998 e março de 1999, são apresentadas na Figura III.26. A relação An/E representa a eficiência quanto à utilização de água pela vegetação (Moncrieff *et al.*, 1997b), e atingiu valores de 10mmolmol⁻¹, quando VPD foi inferior à 1kPa, em ambos os períodos. Entretanto, os valores assintóticos observados para VPD maiores do que 1kPa foram aproximadamente 1 e 3 mmolmol⁻¹, em outubro de 1998 e março de 1999 respectivamente; logo, a eficiência em março foi aproximadamente 3 vezes maior do que a observada em outubro, em decorrência do estresse hídrico ao final da estação seca.



Figura III.26 – Relação entre a razão: fotossíntese líquida (An= μ molCO₂), e o fluxo de calor latente (LE=molH₂O); e a diferença na pressão de vapor (kPa), entre a superficie foliar e o ar do dossel, observada em cultivo de cana-de-açúcar, nos meses de outubro de 1998 e março de 1999.

III.5 - Modelagem do sistema solo-planta-atmosfera

O modelo SiB2 (Sellers *et al.*, 1996) foi utilizado na simulação dos processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera da cultura de cana-de-açúcar, no ciclo 1998/1999. Os esquemas de transferência radiativa e turbulenta, e os submodelos de fotossíntese e transporte de água no solo foram introduzidos no capítulo II.3. As equações utilizadas no cálculo dos fluxos, e as resistências ao transporte associadas, encontram-se no Apêndice.

Como forçantes do modelo foram utilizados os valores médios de 30 minutos observados sobre a plantação, das seguintes variáveis meteorológicas: radiação solar incidente; saldo de radiação; temperatura do ar; umidade do ar e velocidade do vento; cujos ciclos sazonal e diurno foram apresentados item III.3.2.

Os parâmetros que definem as resistências aerodinâmicas ao transporte turbulento entre o dossel e a atmosfera foram obtidos segundo Sellers *et al.* (1996), com base nas estimativas diárias da altura dos colmos, índice de área foliar (total e fração verde), além da largura e comprimento da folha mais nova totalmente expandida (item III.3.1).

Os coeficientes de reflexão utilizados para o solo foram medidos após a colheita de 1999; da vegetação foram obtidos por Machado *et al.* (1985) sobre plantação de cana-de-açúcar; e milho com relação à fração de folhas secas (Rocha, 1998). Os valores de albedo simulados e observados em maio de 1998 e janeiro e maio de 1999, encontram-se na Figura III.27. As condições de solo descoberto (maio 1998) e vegetação desenvolvida (janeiro de 1999) foram bem estimadas pelo modelo, notando-seos pontos observados fora do padrão na figura que representam dias em que a vegetação estava molhada. Como discutido no item III.2.1, à partir de fevereiro de 1999 observou-se o tombamento da cana e o decréscimo no albedo (Figura III.5d), cuja simulação em maio de 1999 (Figura III.27c) foi obtida diminuindo-se em 15% o coeficiente de reflexão na faixa do infravermelho próximo, que inicialmente era de 0,2.

No modelo SiB2 a fotossíntese e a condutância estomática do dossel são obtidas multiplicando-se as estimativas que representam as folhas verdes no topo, por





Figura III.27 - Albedo do cultivo de cana-de-açúcar observado e simulado nos meses de: (a) outubro de 1998, (b) janeiro de 1999 e (c) maio de 1999.

12

simulado

14

observado

Hora

um fator (¶=FPAR/k) definido como a razão entre a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela fração verde do dossel (FPAR) e o coeficiente de extinção médio (k). A fração verde (VERDE=IAFv/IAFt) é dada pela razão entre o índice de área foliar das folhas verdes (IAFv) e o IAF total. No ciclo 1998/1999 da cana-de-açúcar o fator VERDE foi igual à 1 até o início da senescência, quando decai rapidamente atingindo o patamar inferior de 0,4. Utilizando-se estes coeficientes os fluxos simulados subestimaram os fluxos observados em mais de 50% durante os meses de janeiro à março de 1999. Com base nos resultados obtidos no item III.1 sobre a quantidade de folhas novas observadas entre as amostragens de biomassa, adotou-se o fator constante de 0,75 para a fração VERDE, que representaria a situação próxima da potencial, pois o maior valor observado foi 0,78.

As relações entre os valores de 30 minutos observados pelo sistema de correlação de vórtices e simulados, dos fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e balanço de CO₂ são apresentadas na Figura III.28. Os coeficientes de concordância calculados segundo a equação II.11 (capítulo II) foram superiores à 0,8 indicando que as estimativas representam as observações de forma efetiva, principalmente com relação aos fluxos de LE, que além da transpiração incluem a evaporação do solo e da precipitação interceptada. De forma geral, como as estimativas não apresentaram desvios sistemáticos considera-se que os esquemas de transferência radiativa e turbulenta foram adequados.

A maior dispersão foi observada nas simulações dos fluxos de CO₂ (Figura III.28) principalmente à noite. Como os fluxos noturnos são compostos da respiração do dossel e do efluxo do solo, que dependem da temperatura, os valores simulados foram aproximadamente constantes (3μ molCO₂m⁻²s⁻¹). Além desse fato, dependendo da estabilidade atmosférica há considerável incerteza nas medidas de fluxo (Grace *et al.*, 1998), cuja variabilidade pode ser decorrência das diferentes escalas espaciais utilizadas. O modelo simula um ponto e as medidas do sistema de covariância de vórtices integram uma área muito maior (Levy *et al.*, 1997; Lloyd *et al.*, 1997). As estimativas da área de abrangência dos fluxos (Gash, 1986; Schuepp *et al.*, 1990) indicaram que 50% dos fluxos medidos durante o dia (condições instáveis) eram provenientes de uma área de 500m de raio, e acima de 1.500m durante a noite.



Figura III.28 – Fluxos observados e simulados de calor sensível (Wm⁻²); calor latente (Wm⁻²), e balanço de CO₂ (μ molCO₂m⁻²s⁺¹).

Nas Figuras III.29 encontram-se os fluxos simulados e observados durante os primeiros 5 dias de março de 1999 (dias 60-65). Nota-se a boa concordância entre

ambos, e a subestimativa dos valores máximos é decorrência da utilização das forçantes médias de 30 minutos, e da não linearidade dos processos, principalmente a fotossíntese (Ephrat *et al.*, 1996).



- simulado o observado

Figura III.29 - Fluxos observados e simulados de calor sensível (Wm^{-2}); calor latente (Wm^{-2}), e balanço de CO₂ (μ molCO₂ $m^{-2}s^{-1}$), em cultura de cana-de-açúcar, durante os dias 60-65, de março de 1999.
Os totais diários dos fluxos (Figura III.30) demonstram claramente a sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar, e o modelo simulou adequadamente tais variações, tanto na fase inicial (inverno), quanto na fase do máximo desenvolvimento (verão).



Figura III.30 – Totais diários observados e estimados de calor sensível (MJm^{-2}); calor latente (MJm^{-2}), e fotossíntese líquida (gCO_2m^{-2}), em cultura de cana-de-açúcar.



Os ciclos diurnos simulados da condutância estomática do dossel e os valores médios observados em outubro de 1998 e março de 1999, são apresentados na Figura III.31. O ciclo diurno da condutância foi adequadamente simulado, entretanto, no mês de outubro de 1998 as condutâncias simuladas no período da tarde foram inferiores à média, provavelmente em decorrência dos maiores déficits de saturação do ar; e no mês de março de 1999 as condutâncias simuladas foram maiores pela manhã, em decorrência das precipitações, pois parte das condutâncias teriam sido simuladas com a vegetação parcialmente molhada.



Figura III.31 – Ciclos diurnos médios observados da condutância estomática do dossel $(molCO_2m^{-2}s^{-1})$ da cultura de cana-de-açúcar, e condutâncias simuladas nos meses de: (a) outubro de 1998, (b) e março de 1999.

As variações observadas e simuladas da umidade média do solo na camada de 1,4m de profundidade, ao longo do ciclo 1998/1999, da cultura de cana-de-açúcar, são apresentadas na Figura III.32. Nestas simulações a camada contendo o sistema radicular foi fixada em 1,4m e o potencial e a condutividade hidráulica foram calculados através das equações do capítulo III.3. O índice de concordância foi de 0,84 notando-se a simulação adequada do lento declínio na umidade do solo associada à drenagem profunda, e os extremos atingidos durante o período seco e úmido.

As taxas simuladas de fotossíntese e transpiração dependem diretamente do potencial da água no solo, cujo estresse simulado no mês de outubro de 1998 (em torno do dia 175 na Figura III.32) foi adequado, em concordância com os fluxos medidos de CO_2 e evapotranspiração (Figura III.30).



Figura III.32 - Variações observadas e simuladas da umidade média do solo (m³m⁻³), na camada de 1,4m de profundidade, ao longo do ciclo 1998/1999, em cultivo de cana-de-açúcar.



Na fase final do ciclo da cana-de-açúcar, quando tem início a maturação, observou-se a diminuição dos fluxos de calor latente e CO₂, conforme o capítulo III.4. Durante este período, que teve início no mês de abril de 1999, o fator que restringiu a condutância estomática simulada (g_c) depende do déficit de saturação do ar; fato já verificado experimentalmente em regiões semiáridas (Kabat *et al.*, 1997). O fator de restrição "déficit" é calculado como a razão entre a pressão de vapor no interior da folha a da sua superficie, cujos valores simulados ao longo do tempo são apresentados na Figura III.33. O fator "déficit" atingiu o valor de 0,4 nos meses de abril e maio de 1999, devido às primeiras frentes frias que atingiram a região, provocando a diminuição em g_c simulada de 0,3 para 0,1molCO₂m⁻²s⁻¹. Entretanto, os fluxos estimados ainda eram maiores do que os observados neste período, e a concordância com as observações só foi possível através da manutenção do coeficiente linear da equação II.13 (capítulo II), sem o escalonamento, que é obtido multiplicando-se pelo índice de área foliar total. A razão desta aproximação tem como base o fato de que após o início da maturação cessa a renovação da biomassa relativa às folhas ativas.



Figura III.33 –Valores simulados do fator de restrição à condutância estomática ("déficit"); e da condutância estomática (mol $CO_2m^{-2}s^{-1}$), no cultivo de cana-de-açúcar.

Os totais simulados de transpiração, evaporação do solo e drenagem no cultivo de cana-de-açúcar, ao longo ciclo de 1998/1999, são apresentados na Figura III.34. Ao final do período, do total observado de precipitação (1351mm) 693mm retornaram à atmosfera através da transpiração da cana-de-açúcar e 334mm pela evaporação do solo; ou em termos percentuais, 51 e 25%, respectivamente. O total drenado foi de 337mm e inclui a percolação profunda, observada no período seco, como um lento declínio na umidade do solo (Figura III.32).

O sistema de covariância de vórtices operou durante 295 dias, e a evapotranspiração acumulada foi de 686mm, o valor médio foi de 2,3mmdia⁻¹ e os extremos variaram entre 0,5 e 6,6 mmdia⁻¹. O total simulado pelo modelo foi de 638mm, ou 7% inferior ao observado, e a estimativa de evapotranspiração potencial segundo os coeficientes do Planalsucar (1015mm) foi 48% maior do que a medida.

Como os dias em que os fluxos não foram medidos (110) ocorreram ao longo do ciclo e não de forma concentrada, o valor médio observado de evapotranspiração foi utilizado na estimativa desses dias, obtendo-se um total de 939mm de evapotranspiração para todo o ciclo da cultura. Segundo O'May e Izuno (1995) na Flórida a evapotranspiração de cultivos de cana-de-açúcar foi de 1062mm, com variações entre 0,7 e 4,5mmdia⁻¹. O total acumulado de evapotranspiração simulado pelo modelo ao



Figura III.34 – Totais acumulados (mm) de precipitação observada, e simulados de: transpiração; evaporação do solo e drenagem, em cultivo de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999.



longo do ciclo foi de 1027mm, e a evapotranspiração potencial (Planalsucar) foi de 1453mm, ou em termos percentuais 9% e 55% maiores, respectivamente, em relação à estimativa da evapotranspiração real.

Os totais de CO_2 assimilados pela parte aérea da plantação, observados nas amostragens de biomassa ao longo do ciclo, estão representados pela linha (1:1) na Figura III.35, cujo total, ao final do ciclo foi de 7,3kg CO_2 m⁻² e uma incerteza da ordem de 30% (capítulo III.1); o total simulado de CO_2 fixado pelo cultivo foi de 9,9 kg CO_2 m⁻² ou 36% maior do que o medido.



Figura III.35 – Biomassa aérea do cultivo de cana-de-açúcar (gCO_2m^{-2}), observada ao longo do ciclo 1998/1999 (linha 1:1), e comparações com os valores simulados de assimilação de CO₂ (An) e respiração (Rg), pela cultura.

A comparação entre o total fixado de CO₂ medido e simulado deve levar em consideração além da incerteza no valor de biomassa aérea, a biomassa do sistema radicular que não foi medida; e por outro lado, a ausência dos processos de respiração dos colmos e raízes no modelo SiB2.

No modelo de cana-de-açúcar APSIM utilizado na Autrália, Keating et al. (1999) estimam a biomassa do sistema radicular de rebrotas como 30% da biomassa aérea; em sorgo e milho, segundo Choudhury (2000), a biomassa do sistema radicular varia entre

79

10 e 30% da biomassa dos colmos. Portanto, numa primeira aproximação as diferenças entre a biomassa aérea observada e os resultados do modelo poderiam ser decorrentes do sistema radicular, cujas estimativas encontram-se na Figura III.35 como (Bio+20%).

As simulações de respiração dos colmos foram obtidas conforme a Equação II.21 (Choudhury, 2000) e são representadas na Figura III.32 por (An+Rg). Neste caso o total simulado de assimilação ($8,5 \text{ kgCO}_2\text{m}^{-2}$) foi 16% maior do que o observado. Logo, devido às incertezas associadas às observações, e à falta de maiores informações sobre estes dois processos, que precisam ser corretamente quantificados, conclui-se que as simulações do processo de fotossíntese reproduziram satisfatoriamente as observações.



IV - CONCLUSÕES

O monitoramento das densidades de fluxo de CO_2 , vapor de água e energia, sobre o cultivo de cana-de-açúcar, através de um programa observacional de longo prazo e contínuo, como o utilizado neste trabalho, foi fundamental para a compreensão das interações entre a vegetação e a atmosfera nas escalas de tempo sazonal e anual.

Durante o inverno do ano de 1997 (evento El Niño) as observações de umidade do solo no cultivo de cana-de-açúcar indicaram estresse hídrico mais acentuado, em relação ao mesmo período do ano de 1998. Entretanto, este fato foi compensado no verão de 1998, que apresentou temperaturas médias do ar aproximadamente 2°C acima das normais climatológicas, e valores de assimilação de CO₂ e evapotranspiração da cultura mais elevados.

O valor médio dos totais diários de evapotranspiração observados durante o ciclo da cultura de cana-de-açúcar em 1998/1999 foi de 2,3 mmdia⁻¹, variando entre 0,7 mmdia⁻¹ no inverno e 7 mmdia⁻¹ no verão, quando além da transpiração registrou-se a evaporação da chuva interceptada pelo dossel e solo. Durante o verão de 1999 foram observadas taxas máximas de fotossíntese líquida de 56 μ molCO₂m⁻²s⁻¹, e valores de condutância estomática do dossel sempre inferiores à 0,4molCO₂m⁻²s⁻¹. No mês mais seco do ciclo, em outubro de 1998, as maiores condutâncias estomáticas foram de 0,2molCO₂m⁻²s⁻¹; e em ambos os períodos, as condutâncias estomáticas do dossel apresentaram-se linearmente correlacionadas com o índice de Ball *et al.* (1987).

As maiores incertezas nas observações do balanço de CO_2 encontraram-se nas medidas dos fluxos noturnos de CO_2 e estimativas de fluxo de CO_2 do solo. As observações noturnas foram caracterizadas pela variabilidade temporal, que por vezes chegou a alterar o sinal dos fluxos, e dependeu da estabilidade atmosférica (Goulden *et al.*, 1996; Grace *et al.*, 1998; Law *et al.*, 1999). Foram observados em várias ocasiões, durante a noite, valores negativos (assimilação) ou muito elevados de fluxos de CO_2 . Tais ocorrências dificultaram o cálculo dos balanços de CO_2 , pois durante o processo de respiração da vegetação ocorre a perda de parte do carbono fotoassimilado.

81

A estimativa do fluxo de CO₂ do solo é fundamental, sendo utilizada nos cálculos da fotossíntese líqüida durante o dia; e da respiração da cobertura vegetal durante a noite. Neste trabalho, estas estimativas foram obtidas através das medidas de temperatura do solo, conforme as relações empíricas II.13 ajustadas por Rocha *et al.* (2000), que produziram durante a noite um valor praticamente constante de 3µmolCO₂m⁻²s⁺¹. A maior crítica quanto à utilização de relações estatísticas reside na total falta de fatores biológicos no processo que levem em consideração os principais processos atuantes: a produção devido à atividade microbiana e o transporte para a atmosfera. Estas incertezas poderão ser minimizadas por meio da observação direta e contínua dos processos (Meir, 1996; Law *et al.*, 1999) aliada ao desenvolvimento de modelos com base fisica e biológica (Fang e Moncrieff, 1999)

A modelagem do balanço de energia do cultivo de cana-de-açúcar e dos fluxos de CO₂ obtida através do SiB2 (Sellers *et al.*, 1996) foi realizada com sucesso, levando-se em consideração o grande número de parâmetros utilizados na caracterização da vegetação, que em sua maior parte mostraram-se gerais, não sendo necessária a sua alteração. A evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar observada ao longo do ciclo 1998/1999 foi de 939mm e a simulada (1027mm) foi 9% maior; do total simulado a evaporação do solo simulada (334mm) representou 25% da precipitação. Com relação à fotossíntese o total simulado de CO₂ fixado pela vegetação (9,9kgCO₂m⁻²) foi 35% maior do que o observado na biomassa aérea (7,3 kgCO₂m⁻²), cuja a incerteza devido à variabilidade espacial foi da ordem de 30%.

A maior deficiência do modelo SiB2 foi decorrência da definição do fator de escalonamento utilizado na estimativa da fotossíntese e transpiração do dossel, principalmente na fase final do ciclo, cujas simulações subestimaram as taxas observadas em até 50%. Com relação à fotossíntese, na formulação original do modelo, numa mesma altura da vegetação coexistem folhas verdes e secas, o que não ocorre na canade-açúcar, pois as folhas verdes encontram-se no topo e as secas abaixo, formando dois extratos distintos; nesta situação definiu-se o fator de escalonamento através do percentual máximo observado de renovação das folhas (0,75).

A transpiração do dossel é calculada pelo modelo SiB2 através da condutância estomática, que depende linearmente da fotossíntese líquida (Collatz et al., 1992), cujo

coeficiente linear da relação é escalonado pelo índice de área foliar total. Na fase final do cultivo este fator deve diminuir, devido a ausência de renovação das folhas ativas, que iniciam a senescência. Mantendo-se a forma original os fluxos de calor latente ao final do ciclo foram superestimados em mais de 50%, e conseqüentemente os níveis de água no solo foram subestimados.

A adequação do modelo SiB2 ao cultivo da cana-de-açúcar possibilitou a simulação dos fluxos de vapor de água e CO_2 mais realistas de acordo com os valores observados. Espera-se que o mesmo ocorra também com relação ao balanço de carbono, após a inclusão do processo de respiração dos colmos e na melhoria do submodelo de fluxo de CO_2 do solo. Entretanto, a discussão sobre a utilização de modelos que representam o dossel como uma única folha ou camada ainda persiste. Resultados recentes separando o dossel em folhas sombreadas e ensolaradas indicam a superioridade desta abordagem (de Pury e Farquhar, 1997; Leuning e Wang, 1999; Wang, 2000). Outra vertente em evidência, consiste na simplificação dos processos fisiológicos, através do conceito da eficiência quanto à utilização da radiação pela vegetação, reduzindo a especificação e número de parâmetros (Anderson *et al.*, 2000).

Neste trabalho a amostragem sistemática da biomassa da cultura proporcionou uma base independente de dados, que foi utilizada na verificação das medições de fluxos de CO_2 e das simulações. Com base nos resultados obtidos, torna-se necessária a quantificação do sistema radicular e das perdas devido à senescência e respiração da planta (colmos e raízes), possibilitando a inclusão destes processos nos modelos.

Tendo em vista a estreita relação entre a modelagem e a observação, sugere-se como possíveis trabalhos futuros, a utilização de modelos de transferência solo-plantaatmosfera multicamadas, devido à sua superioridade, e a correta modelagem dos processos de respiração da planta e solo, baseados em observações de longo prazo.

83

BIBLIOGRAFIA

- Alfonsi, R.R., Pedro Júnior, M.J., Brunini, O., Barbieri, V. 1987. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: Cana-de-Açúcar cultivo e utilização, Fundação Cargill, Campinas, 42-55.
- Alonso, M.T.A. 1977. Vegetação. In: Geografia do Brasil, Região Sudeste, IBGE, Rio de Janeiro, Vol. 3, 667 p.
- Anderson, M.C., J.M. Norman, T.P. Meyers, G.R. Diak, 2000. An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency. Agric.For.Meteorol., 101: 265-289.
- André, R.G.B. e Viswanadhan, Y., 1983. Radiation balance of soybeans grown in Brazil. Agric. Meteorol., 30:157-173.
- Baldocchi, D., Meyers, T., 1998. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapour and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. Agric.For.Meterol., 90: 1-25.
- Baldocchi, D., Eva, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K, Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A, Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U, K.T., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. 2001. February 19, 2001. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor and Energy Flux Densities. Bulletin of the American Meteorological Society (revised).
- Ball, J.T., Woodrow, I.E., Barry, J.A., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Progress in Photsynthesis Research, J. Biggins, ed., Martinus-Nijhoff, Dordrecht, Netherlands, Vol 4, 221-224.
- Ball-Coelho, B., Sampaio, E.V.S., Tiessen, H., Stewart, J.W.B., 1992. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. *Plant and Soil* 142: 297-305.

- Barbieri, V., 1993. Condicionamento climático da produtividade potencial da canade-açúcar (Sacharum spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa. Tese de Doutoramento, ESALQ/USP, 142 p.
- Bárdossy, A. 1997. Downscaling from GCMs to local climate through stochastic linkages. J. of Environmental Management, 49, 7-17.
- Betts, A.K., Ball, J.H., Beljaars, A.C.M., Miller, M.J., Viterbo, P.A. 1996. The land surface-atmosphere interaction: A review on observational and global modeling perspectives. J. Geophys. Res., 101, 7209-7225.
- Black, C., e Ong, C., 2000. Utilisation of light and water in tropical agriculture. Agric.For.Meteorol., 104: 25-47
- Brunini, O., Bortoleto, N., Martins, L.M., Landell, M.G.A, Pereira, JCVNA, De Sordi,
 G, Gallo, PB, Viella, OV, Castro, JL. Duarte, AP, Kanthack, RAD, Paulo, EM,
 Sawazaki, E., Merege, WH, Miranda, LEC, Miranda, LT, Arruda, FB, Fujiwara,
 M., 1995. Determinação das exigências térmicas e hídricas de cultivares de milho.
 Resumos do III Seminário sobre a cultura do milho "Safrinha", Assis, SP, p. 141145.
- Brunini, O., Machado, E.C., Sawasaki, E., Miranda, L.T., 1999. Fluxo de gás carbônico sobre as culturas de dois híbridos de milho. *Rev.Bras.de Fisiologia Vegetal*, 11(3): 161-169.
- Boegh, E., Soegaard, H., Friborg, T., Levy, P.E., 1999. Models of CO2 and water vapour fluxes from sparse millet crop in the Sahel. Agric.For.Meterol., 93: 7-26.
- Bonett, G.D., 1998. Rate of leaf appearence in sugarcane, including a comparison of a range of varietes. *Aust.J.Plant Physiol.*, **25**: 829-834.
- Bougeault, P., 1991. Parameterization schemes of land-surface processes for mesoscale atmospheric models. In: Land surface evaporation, T.J. Schmugge and J.C. André (eds.), Springer-Verlag, Paris, p.55-92.
- Cabral, O.M.R. 1991. Armazenagem da água num solo com floresta de terra firme e com seringal implantado. Tese de Mestrado, INPE-5282-TDI/452, S.J. dos Campos, 104p.

- Cabral, O.M.R.; Rocha, H; Dias, MAFS; Brunini, O, Carvalho, R. 1997. Balanço de água no solo em plantação de cana-de-açúcar. *In*. Anais do X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Piracicaba, 593-595.
- Cain, J.D. 1998. Modelling evaporation from plant canopies. Report N° 32, Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 50 pp.
- Calder, I., 1992. Water use of eucalyptus-a review. In: Growth and water use of forest plantations, I.Calder, R.L.Hall and P.G.Adlard (eds.), J.Wiley, Chichester, p. 167-179.
- Camargo, A.M.M.P., Anefalos, L.C., Coelho, P.J., Olivetti, M.P.A., 1995. Alteração na composição da agropecuária no Estado de São Paulo, 1983-1993. Informações Econômicas, SP, 25(5), 49-81.
- Campbell, G.S. e Gee, G.W. 1990. Water Potential: Miscellaneous Methods. In: Methods of Soil Analysis, Part 1, American Society of Agronomy, Madison, 619-633.
- Campbell, J.A., Robertson, M.J., Grof, C.P.L., 1998. Temperature effects on node appearence in sugracane. Aust. J. Plant Physiol., 25: 815-818.
- Cheeroo-Nayamuth, F.C., M.J. Robertson, M.K. Wegener, A.R.H. Nayamuth, 2000. Using a simulation model to assess potential and attainable sugar cane yield in Mauritius. *Field Crops Research*, 66: 225-243
- Choudhury, B.J., 2000. Modeling radiation- and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice. Agric. For. Meteorol., 106: 317-330.
- Clapp, R.B. e Hornberger, G.M., 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 14: 601-604.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., Berry, J., 1992. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C₄ plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, **19**, 519-538.
- Cuenca, R.H., Ek, M., Marht, L. 1996. Impact of soil water parameterization on atmospheric boundary layer simulation. J Geophys. Res., 101, 7269-7277.
- Denmead, O.T., Freney, J.R., Dunin, F.X., Jackson, A.V., Reyenga, W., Saffigna, P.G., Smith, J.W.B., Wood, A.W., 1993. Effect of canopy development on ammonia uptake and loss from sugarcane fields fertilized with urea. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., 15: 285-292.

- Denmead, O.T., Mayocchi, C.L., Dunin, F.X., 1997. Does green cane harvesting conserve soil water? Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., 19: 139-146.
- de Pury, D.G.G. e Farquhar, G. D., 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell Environ.* 20: 537-557.
- Du, Y.C., Kawamitsu, Y., Nose, A., Hiyane, S., Murayama, S., Wasano, K., Uchida, Y., 1996. Effects of water stress on carbon exchange rate and activities of photosynthetic enzymes in leaves of sugarcane (Saccharum sp.). Aust.J. Plant Physiol., 23, 719-726.
- Du, Y.C., Nose, A., Wasano, K., Uchida, Y., 1998. Responses to water stress of enzyme activities and methabolite levels in relation to sucrose and strach synthesis, the Calvin cycle and the C₄ pathway in sugarcane (Saccharum sp.) leaves. Aust.J. Plant Physiol., 25, 253-260.
- Dugas, W.A., Heuer, M.L., Mayeux, H.S., 1999. Carbon dioxide over bermudagrass, native prairie, and sorghum. Agric. For. Meteorol., 93: 121-139.
- Ephrat, J.E., Goudriaan, J. and Marani, A. 1996. Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation, wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics. *Agricultural Systems*, **51**(4), 377-393.
- Fang, C. e Moncrieff, J.B., 1999. A model for soil CO₂ production and transport I: Model development. Agric. For. Meterol., 95: 225-236.
- Fitzjarrald, D., Stormwind, B., Fisch, G., Cabral. OMRC, 1988. Turbulent transport observed just above the Amazon forest. J.Geophys.Res., 93:1551-1563.
- France, J. e Thornley, J.H.M., 1984 Mathematical Models in Agriculture. Butterworths, London, 335pp.
- Foloni, L.L., Rodrigues, J.D., Ono, E.O., Baldez, L.C.G., Nelli, E.J., Morelli, J., 1996. Avaliação da eficiência do maturador etil-trinexapac em cana-de-açúcar em aplicação aérea. Anais do VI Congresso STAB, Maceió, Alagoas, 401-408.
- Gash, J.H.C., 1986. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements. Boundary Layer Meterol., 35: 409-413.

- Grace, J., Lloyd, J., McIntyre, J., Miranda A, Meir, P., Miranda, H, Moncrieff, J., Massheder, J, Wright, I, Gash, J., 1995. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. *Global Change Biology*, 1:1-12.
- Grace, J., Lloyd, J., Miranda, A.C., Miranda, H., Gash, J.H.C., 1998. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over a C₄ pasture in south-western Amazonia (Brazil). *Aust.J. Plant Physiol.*, 25, 519-530.
- Goulden, M.L., Munger, J.W., Song-Miao, F., Daube, B.C., Wofsy, S.C., 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 2: 169-182.
- Hollinger, D.Y., Kelliher, F.M., Schulze, E.D., Bauer, G., Arneth, A., Byers, J.N., Hunt J.E., McSeventy, T.M., Kobak, K.I., Milukova, I., Sogatchev, A., Tatarinov, F., Varlargin, A., Ziegler, W., Vygodskaya, N.N., 1998. Forest-atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia. *Agric.For.Meteorol.*, 90: 291-306.
- Hoogenboom, G., 2000. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. Agric. For. Meteorol., 103: 137-157.
- Horie, T. e Luchiari Jr, A., 1982. Uso do método do balanço de energia para determinar a evapotranspiração da soja no cerrado. In: Simpósio sobre o Cerrado, Embrapa, Planaltina, v.6, p. 211-226.
- IPCC, 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. OECD, Paris, 878pp.
- Kabat, P. e Feddes, R.A. 1995. Modelling soil water dynamics and crop water uptake at the field level. In: Modelling and parameterisation of the soil-plant-atmosphere system: a comparison of potato growth model. P.Kabat, B.Marshall, B.J.van der Broek, J.Vos and H.van Keulen (eds.), Wageningen Pers, Wageningen, p. 103-113.
- Kabat, P., Dolman, A.J., Elbers, J.A., 1997. Evaporation, sensible heat and canopy conductance of fallow savannah and patterned woodland in Sahel. Journal of Hydrology, 188-189: 494-515.

- Keating, B.A., Robertson, M.J., Muchow, R.C., Huth, N.I., 1999. Modeling sugarcane production systems. 1. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Res.*, 61: 253-271.
- Klute, A. 1990. Water Potential: Laboratory Methods. In: Methods of Soil Analysis, Part 1, American Society of Agronomy, Madison, 635-662.
- Law, B.E., Baldocchi D.D., Anthoni, P.M., 1999. Below-canopy and soil CO₂ fluxes in a ponderosa pine forest. *Agric.For.Meterol.*, 94: 171-188.
- Libardi, P.L. e Saad, A.M., 1994. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em latossolo roxo. *Rev.Bras.Ciência do Solo*, **18**:529-532..
- Lisson, S.N., M.J. Robertson, B.A. Keating, R.C. Muchow, 2000. Modelling sugarcane production systems II: Analysis of system performance and methodology issues., *Field Crops Research*, 68: 31-48.
- Leuning, R., Dunin, F.X., Wang, Y.P., 1998. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy. II. Comparison with measurements. Agric. For. Meteor., 91: 113-125.
- Levy, P.E., Moncrieff, J.B., Massheder, J.M., Jarvis, P.G., Scott, S.L., Brower, J., 1997.
 CO₂ fluxes at leaf and canopy scale in millet, fallow and tiger bush vegetation at the HAPEX-Sahel southerrn super-site. J.of Hydrol., 188-189: 612-632.
- Lloyd, C.R., Bessemoulin, P., Cropley, F.D., Culf, A.D., Dolman, A.J., Elbers, J., Heusinkveld, B., Moncrieff, J.B., Monteny, B., Verhoef, A., 1997. A comparison of surface fluxes at the HAPEX-Sahel fallow bush sites. J.of Hydrol., 188-189: 400-425.
- Luchiari Jr, A. e Riha, S.J., 1991. Bulk surface resistance and its effect on evapotranspiration rates in irrigated wheat. Agronomy Journal, 83, 888-895.
- Machado, E.C. 1981. Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura da cana-de-açúcar (Sacharum spp.), Tese de Mestrado, Instituto de Biologia, UNICAMP, 115p.
- Machado, E.C., Pereira, A.R., Paes Camargo, M.B., Fahl, J.I., 1985. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. *Bragantia*, 44: 229-238.
- Machado, E.C. 1987. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. In: Cana-de-Açúcar-Cultivo e Utilização, Fundação Cargill, Campinas, p. 56-87.

- Meir, P.W., 1996 The exchange of carbon dioxide in tropical forest Ph D. Thesis, Institute of Ecology and Resource Management, Edinburgh University, 208 pp.
- Meyers, T.P., 2001. A comparison of summertime water and CO2 fluxes over rangeland for well watered and drought conditions. *Agric. For. Meteorol.*, **106**: 205–214
- Miranda, A.C., Miranda, AC, Lloyd, J, Grace, J, McIntyre, J, Meir, P, Riggan, P, Lockwood, R, Brass, J. 1996. Carbon dioxide fluxes over cerrado sensu stricto in central Brazil. In: Amazonian Deforestation and Climate, J.H.C.Gash, C.A.Nobre, J.M.Roberts and R.L.Victoria (eds.), J.Wiley, Chichester, p.353-363.
- Miranda, A.C., Miranda, H.S., Lloyd, J., Grace, J., Francey, R.J., McIntyre, J.A., Meir, P., Riggan, P., Lockwood, R., Brass, J., 1997. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environment*, 20, 315-328.
- Moncrieff, J.B, Massheder, J.M., De Bruin, J., Elbers, J., Friborg, T., Huesunkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard, H. and Verhoef, A. 1997a. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, 188-189, 589-611.
- Moncrieff, J.B., Monteny, B., Verhoef, A., Friborg, T., Elbers, J., Kabat, P., de Bruin, H., Soegaard, H., Jarvis, P.G., Taupin, J.D., 1997b. Spatial and temporal variations in net carbon flux durin HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology*, 188-189, 563-588.
- Monteith, J.L. e Unsworth, M.H., 1991. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London, 290 pp.
- Mutton, M.A., Mutton, M.J.R., Barbosa, V., 1996. Efeito maturador da aplicação de glifosate em cana-de-açúcar (Saccharum sp.)-comportamento agrotecnológico. Anais do VI Congresso STAB, Maceió, Alagoas, 409-416.
- Norman, J.M. e Campbell, G.S. 1991. Canopy structure. In: Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation. R.W.Pearcy, J.Ehlerringer, H.a.Mooney and P.W.Rundel (eds.), Chapman Hall, London, p. 301-325.

- Ogallo, L.A., M.S. Boulahya, T. Keane, 2000. Applications of seasonal to interannual climate prediction in agricultural planning and operations. Agric. For. Meteorol., 103: 159-166.
- O'Leary, J.G., 2000. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *Field Crops Res.*, **68**: 97-111.
- Oliveira, A.P. Soares, J, Degrazia, G, Moraes, OLM, 1996. Numerical simulation of the planetary boundary layer at Candiota using a second order closure model. In: Air pollution and acid rain: The Candiota Program. O.L.L.Moraes, A.P Oliveira, E.Caetano Neto, G.A.Degrazia (eds.), FAPESP, SP, p. 56-67.
- O'May, M., e Izuno, F.T., 1995. Evaluation of sugarcane evapotranspiration from watertable data in the everglades agricultural area. Agric. Water Management, 27: 309-309.
- Paulson, C.A., 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable surface layer. J.Appl.Meteor., 9: 857-861.
- Polley, H.W., Norman, J.M., Arkebauer, T.J., Walter-Shea, E.A., Greegor, D.H., Bramer, B., 1992. Leaf gas exchange of Andropogon gerardii Vitman, Panicum virgatum L., and Sorghastrum nutans (L.) Nash in Tallgrass Prairie. J.Geophys.Res., 97(D17): 18837-18844.
- Roberts, M.J., Long, S.P., Tieszen, L.L, Beadle, C.L. 1987. Chapter 1, Measurement of plant biomass an net primary production. In: Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis. Eds. J. Coombs, D.O. Hall, S.P. Long and J.M.O. Surlock, Pergamon Press, Oxford, 298 pp.
- Robertson, M.J., Bonnet, G.D., Hughes, R.M., Muchow, R.C., Campbell, J.A., 1998. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlledenvironment, field and model studies. *Aust.J.Plant Physiol.*, 25, 819-828.
- Robertson, M.J., N.G. Inman-Bamber, R.C. Muchow, A.W. Wood, 1999. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water defficit, *Field Crops Research*, 64: 211-227.
- Rocha, H.R. (2001) Relatório de Pesquisa, Projeto FAPESP 99/11215-9.
- Rocha, H; Cabral, OMRC; Dias, MAFS; Barbosa, V; Carvalho, R. 1997a. Fluxos turbulentos de calor, H₂O e CO₂ sobre cana-de-açúcar em Sertãozinho, SP. In.
 Anais do X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Piracicaba, 544-546.
- Rocha, H.R. Modelagem e observação das interações atmosfera-biosfera na região sudeste. Tese de doutorado IAG-USP, 1998.
- Rocha, H.R., Cabral, O.M.R., Silva Dias, M.A.F., Ligo, M.A.V., Elbers, J.A., Freitas, H.C., Von Randow, C., Brunini, O. 2000. Atmospheric CO2 fluxes and soil respiration measurements over sugarcane in southeast Brazil. In: Global Climate Change and Tropical Ecosystems. R.Lal, J.M Kimble, B.A. Stewart eds., CRC Press, Boca Raton, 405-414.
- Russo, J.M e Zack, J.W. 1997. Downscaling GCM output with a Mesoscale model. J.of Environmental Management, 49, 19-29.
- Scardua, R, e Rosenfeld, U., 1987. Irrigação da cana-de-açúcar. In: Cana-de-Açúcar-Cultivo e Utilização, Fundação Cargill, Campinas, p. 373-431.
- Sellers, P.J. Shuttleworth, J, Dorman, J, Dalcher, A, Roberts, JM, 1989. Calibrating the Simple Biosphere Model for Amazonian forest using field and remote sensing data. Part I: Average calibration with field data. J.Climate Appl. Meteor., 28, 727-759.
- Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collelo, G.D., Bounoua, L., 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 9: 676-705.
- Sene, K.J., 1994. Parameterisations for energy transfers from a sparse vine crop. Agric. For. Meteorol., 71: 1-18.
- Shao, Y. e Irannejad, P., 1999. On the choice of soil hydraulic models in land-surface schemes. *Boundary-Layer Meteorology*, **90**: 83-115.
- Shuepp, P.H., Leclerc, M.Y., Macpherrson, J., Desjardins, RR.I., 1990. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary Layer Meterol.*, 39: 355-373.
- Shuttleworth, W.J. 1988. Evaporation from Amazonian rain forest. Proc.Roy.Met. Soc., B, 223: 321-346.

- Shuttleworth, W.J. e Gurney, R.J., 1992. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. Q.J.R.Meteorol.Soc., 116:497-519.
- Shuttleworth, W.J. e Nobre, C.A., 1992. Wise forest management and its linkages to climate change. In: Wise management of tropical forests, F.R.Miller and K.L.Adam (eds.), Oxford Forestry Institute, Oxford, p. 77-90.
- Shuttleworth, W.J. e Wallace, J.S., 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Q.J.R.Met. Soc.*, 111, 839-855.
- Silva Dias, P.L. e Marengo, J.A. 1999. Capítulo 3 Águas Atmosféricas. In: Águas Doces no Brasil. Rebouças, A.C.R., Braga, B. e Tundisi, J.G. Organizadores. IEA-USP, São Paulo, p. 65-115.
- Soares, J., Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., 1996. Surface energy balance: observation and numerical modelling applied to Candiota. In: Air pollution and acid rain: The Candiota Program. O.L.L.Moraes, A.P Oliveira, E.Caetano Neto, G.A.Degrazia (eds.), FAPESP, SP, p. 68-77.
- Thorgeirsson, H e Soegaard, H., 1999. Simulated carbon dioxide exchange of leaves of barley scaled to the canopy and compared to measured fluxes. Agric.For.Meteorol., 98-99: 479-489.
- Tomasella, J. e Hodnett, M. G. 1997. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of brazilian soils using soil-water retention data. *Soil Science*, 162(10): 703-712.

Troppmair, H. 1987. Biogeografia e Meio-Ambiente, Rio Claro, SP, 275 p.

- Twine, T.E., Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesely, M.L. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over grassland. Agric.For. Meteorol. 103, 279-300.
- Vallis, I., Parton, W.J., Keating, B.A, Wood, A.W., 1996. Simulation of the effects of trash and N fertilizer management levels and yields of sugarcane. Soil & Tillage Research, 38: 115-132.
- van den Berg, M., P.A. Burrough, P.M. Driessen, 2000. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potentials in São Paulo State, Brazil. Agriculture Ecosystems and Environment, 81: 43-55

- Wallace, J.S., 1995. Calculating evaporation: resistance to factors. Agric. For. Meteorol., 73: 353-366.
- Wiedenfeld, R.P., 2000. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agricultural Water Management* 43: 173-182.
- Wang, Y.W., 2000. A refinement to the two-leaf model for calculating canopy photosynthesis. Agric. For. Meteorol., 101: 143-150.
- Wisvanadhan, Y. e André, R.G.B., 1983. Energy balance of soybeans grown in Brazil. Arch.Met.Geoph.Biocli., Ser B, 33, 141-157.
- Wood, A.W., Muchow, R.C., Robertson, M.J., 1996. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen. *Field Crops Res.*, 48: 223-233.
- Wright, I., Gash, J.H.C., Rocha, H.R., Shuttleworth, W.J., Nobre, CA., Maitteli, G.T., Zamparoni, CAGP, Carvalho, PRA., 1992. Dry season micrometeorology of a central amazonian ranchland. Q.J.R.Meteor.Soc., 118,1083-1099
- Wright, I., Nobre, C.A., Tomasella, J., Rocha, H.R., Roberts, J.M., Vertamatti, E., Culf, AD., Alvalá, R.C.S., Hodnett, M.G., Ubarana, V.N., 1996. Towards a GCM surface parameterisation for Amazonia. In: Amazonian Deforestation and Climate, J.H.C.Gash, C.A.Nobre, J.M.Roberts and R.L.Victoria (eds.), J.Wiley, Chichester, p.473-504.
- Zhang, H. e Nobel, P.K., 1996. Dependency of c_i/c_a and leaf transpiration efficiency on the vapour pressure deficit. *Aust.J.Plant Physiol.*, **23**: 561-568.

APÊNDICE

As equações utilizadas pelo modelo SiB2 (Sellers *et al.*, 1996) no cálculo dos fluxos de calor sensível, calor latente e CO₂, entre a vegetação e a atmosfera são apresentadas à seguir.

Fluxo de calor sensível do dossel (Hc):

$$H_c = \frac{(\mathrm{T_c} - \mathrm{T_a})\rho c_p}{r_b} \quad (A1)$$

onde, Tc (K) é a temperatura do dossel; Ta (K) é a temperatura do ar do dossel; r_b é a resistência aerodinâmica da camada limite foliar (sm⁻¹); ρ é a densidade (kgm⁻³) e c_p é o calor específico do ar à pressão constante (J kg⁻¹ K⁻¹).

Fluxo de calor sensível do solo (Hg):

$$H_g = \frac{(T_g - T_a)\rho c_p}{r_d} \quad (A2)$$

onde, Tg (K) é a temperatura do solo; Ta (K) é a temperatura do ar do dossel; r_d é a resistência aerodinâmica entre o solo e o ar do dossel (sm⁻¹).

Fluxo de calor sensível acima da vegetação (Hc+Hg):

$$H_c + H_g = \frac{(\mathrm{T}_a - \mathrm{T}_m)\rho c_p}{r_a} \quad (A3)$$

onde, Tm (K) é a temperatura do ar acima da vegetação; Ta (K) é a temperatura do ar do dossel; r_a é a resistência aerodinâmica entre o dossel e a atmosfera (sm⁻¹).

Fluxo de calor latente do dossel (λ Ect):

$$\lambda E_{ct} = \frac{(\mathbf{e}^*(\mathbf{T}_o) - \mathbf{e}_a)\rho c_p}{\gamma(r_c + 2r_b)} (1 - W_c)$$
 (A4)

onde, γ é a constante psicrométrica (Pa K⁻¹); e*(T) é a pressão de vapor de saturação à temperatura T_c (Pa); e_a é a pressão de vapor do ar do dossel (Pa); r_c é a resistência da superfície ao transporte de vapor de água (sm⁻¹), e Wc é a fração molhada do dossel.

Evaporação da água do solo (λE_{gs}):

$$\lambda E_{gr} = \frac{(\text{hsolo} \, \mathbf{e}^*(T_g) - \mathbf{e}_s)\rho c_p}{\gamma(r_d + r_{solo})} (1 - W_g) \tag{A5}$$

onde, r_{solo} é a resistência da superficie do solo (sm⁻¹); h_{solo} é a umidade relativa nos espaços dos poros da camada superficial de solo, e Wg é a fração molhada do solo.

Evaporação da água interceptada pelo dossel (AEci):

$$\lambda E_{ci} = \frac{(\mathbf{e}^*(\mathbf{T}_c) - \mathbf{e}_a)\rho c_P}{\gamma(2r_b)} W_c \tag{A6}$$

Evaporação da água de chuva ou irrigação interceptada pelo solo (λE_{gi}):

$$\lambda E_{gi} = \frac{(\mathbf{e}^*(\mathbf{T}_g) - \mathbf{e}_a)\rho c_p}{\gamma r_a} W_g \tag{A7}$$

Fluxo de vapor de água acima da vegetação:

$$\lambda E_{ci} + \lambda E_{ci} + \lambda E_{gs} + \lambda E_{gi} = \frac{(\mathbf{e}_{a} - \mathbf{e}_{m})\rho c_{p}}{\gamma r_{a}}$$
(A8)

onde, e_m é a umidade do ar acima do dossel.

Fotossíntise líquida do dossel (Ac-Rd):

$$A_c - R_d = \frac{(c_a - c_i)}{p(1, 6r_c + 2, 8r_b)}$$
 (A9)

onde, Ac é a fotossíntese bruta do dossel (mol m⁻² s⁻¹); Rd é a respiração das folhas (mol m⁻² s⁻¹); p é a pressão atmosférica (Pa); $c_a e c_i$ são as pressões parciais (Pa) de CO₂ no ar do dossel e no interior das folhas respectivamente.

Fluxo de CO2 acima do dossel:

$$A_c - R_{solo} - R_d = \frac{(c_m - c_a)}{p(1, 4r_a)}$$
 (A10)

onde, R_{solo} é o fluxo de CO₂ do solo (mol m⁻² s⁻¹); c_m é a pressão parcial de CO₂ na altura de referência (Pa); c_a é a pressão parcial de CO₂ no ar do dossel (Pa);



	T459
AUTOR	
CADIA	L, C.M.R.
TITULO: O si atmosfera: da cana-de-ad	stema solo-vegetação- observação e modelagem çúcar no estado de SP.
DEVOLVER EM	NOME DO LEITOR
22.05.03	Raquel Chini
04/10/04	Migde Lima
	An
Í	William I
1 Martin	07.23
1	
	and a second

