

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**ESTUDO MICROMETEOROLÓGICO DE UM CULTIVO  
DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ALAGOAS**

**MANOEL DA ROCHA TOLEDO FILHO  
Meteorologista/UFAL**

Tese apresentada como um dos requisitos à  
obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia,  
área de concentração Agrometeorologia

Porto Alegre (RS), Brasil  
Junho de 2001

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus acima de tudo e de todos, que sempre a meu lado deu-me força, coragem e orientação nos momentos difíceis.

Aos meus familiares pela força e seriedade com que sempre me incentivaram durante minha vida profissional.

Aos professores Moacir Antonio Berlato, Homero Bergamaschi e João Ito Bergonci pela orientação durante o transcorrer do curso e em especial ao professor Roberto Fernando da Fonseca Lyra pelo fornecimento dos dados micrometeorológicos e ao professor Luiz Carlos B. Molion pelo incentivo neste meu programa de doutorado.

Ao professor José de Lima Filho pela potencialidade de ser humano e profissionalismo. Exemplo que deve ser seguido.

À Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de Alagoas, em especial ao Núcleo de Absorção e Transferência de Tecnologia (NATT), em nome do Dr. Luiz Ximenes, pelo auxílio financeiro.

Ao engenheiro agrônomo Alessandro José Barros pela participação efetiva nas amostragens de campo.

Aos meus amigos do curso pela força e companheirismo.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL), particularmente o Departamento de Meteorologia (MET), Maceió – AL, pela oportunidade de realização do curso.

À Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo aprendizado durante o transcorrer do curso e que gerou este trabalho.

Ao PICD/CAPES pelo auxílio financeiro.

Aos meus pais (in memoriam)

Por tudo o que fizeram por mim

Durante toda a minha vida

E que partiram desta sem ver mais

Uma vitória minha.

DEDICO

# ESTUDO MICROMETEOROLÓGICO DE UM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE ALAGOAS<sup>1</sup>

**Autor: Manoel da Rocha Toledo Filho**

**Orientador: Moacir Antonio Berlatto**

**Co-Orientador: Roberto Fernando da Fonseca Lyra**

## RESUMO

Este estudo foi desenvolvido dentro do projeto de pesquisa “Micrometeorologia da Mata Atlântica alagoana (MICROMA)” do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, que busca avaliar modificações no sistema solo-planta-atmosfera provocadas pela substituição da Mata Atlântica pela cultura da cana-de-açúcar, na Zona da Mata alagoana. O objetivo principal do presente estudo foi o ajuste do modelo de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar, na zona canavieira de Alagoas, a partir de determinações micrometeorológicas pelo método do balanço de energia, em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura e em diferentes condições de demanda evaporativa atmosférica. A evapotranspiração foi estimada pelo método de Penman-Monteith e comparada com valores calculados através do balanço de energia, pela razão de Bowen, considerando este como método padrão. Medições micrometeorológicas foram feitas nos anos agrícolas de 1997/98 e 1998/99, em um área de 12,5ha de cultivo contínuo de cana-de-açúcar, cultivar SP 70-1143, sob condições de lavoura comercial, na Fazenda Vila Nova, município de Pilar, Alagoas (9°36'S, 35°53'W, 107m de altitude). Durante o período experimental, foram tomadas amostras quinzenais para determinar altura do dossel, comprimento de colmo, índice de área foliar e acúmulo de matéria seca (este apenas em 1998/99). Os parâmetros aerodinâmicos da cultura  $z_0$  (comprimento de rugosidade) e  $d$  (deslocamento do plano zero) foram determinados a partir de perfis de vento, em condições de atmosfera neutra, e relacionados com a altura do dossel. Foram ajustados modelos para estimar o índice de área foliar e a altura do dossel da cultura em função do comprimento do colmo. O fracionamento do saldo de radiação no chamado “período potencial”, sem deficiência hídrica e com a cultura cobrindo completamente o solo, foi de 78% para o fluxo de calor latente de evaporação, 21% para o fluxo de calor sensível na atmosfera e aproximadamente 0,1% para o fluxo de calor no solo. A estimativas pelo método de Penman-Monteith se ajustaram aos valores calculados pelo método do balanço de energia, tanto para médias quinzenais ( $r = 0,93$ ) como para valores diários ( $r = 0,91$ ). Assim, dados confiáveis de evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar podem ser obtidos pelo método de Penman-Monteith ajustado neste trabalho, para a zona canavieira de Alagoas, em períodos sem deficiência hídrica e com cobertura completa do solo. O uso deste método apresenta a vantagem prática de requerer apenas dados meteorológicos, medidos em apenas um nível, em estações meteorológicas convencionais.

<sup>1</sup> Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (150p.) - Maio, 2001.

# MICROMETEOROLOGICAL STUDY OF A SUGAR CANE CROP IN THE STATE OF ALAGOAS, BRAZIL<sup>1</sup>

**Author: Manoel da Rocha Toledo Filho**

**Adviser: Moacir Antonio Berlato**

**Co-Adviser: Roberto Fernando da Fonseca Lyra**

## SUMMARY

This study was performed within to the research project “Micrometeorologia da Mata Atlântica alagoana (MICROMA)”, of the Department of Meteorology of the Universidade Federal de Alagoas, whose main purpose is to evaluate alterations in the soil-plant-atmosphere system when substituting the Atlantic Forest for sugar cane crops, in the Zona da Mata region of Alagoas. The main objective of this study was to adjust the Penman-Monteith model to calculate the evapotranspiration of a sugar cane crop, against micrometeorological determinations by the method of energy balance, in the Zona Canavieira of Alagoas. At different developmental stages, as well as in different weather conditions, the crop evapotranspiration was estimated by the Penman-Monteith method, and compared to values obtained through the energy balance, calculated by the Bowen ratio, considering this method as a standard procedure. Micrometeorological measurements were taken during the 1997/98 and 1998/99 cropping seasons, in a 12.5ha commercial cropping area, in the Vila Nova farm, in Pilar – Alagoas, Brazil (9°36´S, 35°53´W, 107m altitude). Plants were sampled each fifteen days, during the experimental period, in order to determinate the canopy height, stalk length, leaf area index, and dry matter accumulation (the latter only during 1998/99). The aerodynamics parameters  $z_0$  (roughness length) and  $d$  (zero-plane displacement) were obtained from wind profiles, in neutral atmosphere conditions, and related to the canopy height. Models were adjusted to estimate the leaf area index and the canopy height as function of the stalk length. The partitioning of the net radiation in periods without water deficit and with complete soil covering (“potential periods”) was about 78% as latent heat flux, 21% as sensible heat flux, and 0.01% as heat flux into the soil. The crop evapotranspiration estimated by the adjusted Penman-Monteith method was close to values calculated through the energy balance, either considering daily averages of five-days ( $r = 0.91$ ) or one day ( $r = 0.93$ ) periods. So, reliable data of evapotranspiration of sugar cane crops can be obtained through the adjusted Penman-Monteith method, for the cropping conditions of the State of Alagoas, Brazil, during periods without water deficit and with complete soil covering. The use of this method has an additional practical advantage if considering the only necessary input of conventional meteorological data, measured in only one level above the soil surface, in a station network.

<sup>1</sup> D.S. Thesis in Agronomy (Agrometeorology), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brazil. ( 150p.) - May, 2001.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Histórico da cana-de-açúcar no estado de Alagoas.....	4
2.2. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar.....	6
2.3. Análise de crescimento da cultura.....	13
2.4. Transportes turbulentos.....	18
2.5. Evapotranspiração.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1. Localização do experimento.....	34
3.2. Clima e solo da região.....	34
3.3. Área experimental.....	35
3.4. Torre instrumental.....	37
3.4.1. Sensores de velocidade do vento.....	37
3.4.2. Sonda de temperatura e umidade relativa do ar .....	38
3.4.3. Saldo Radiômetro.....	39
3.4.4. Placas medidoras de fluxo de calor no solo.....	39
3.5. Observações micrometeorológicas e de planta.....	39
3.6. Equações básicas dos transportes verticais turbulentos de propriedades atmosféricas.....	41
3.7. Caracterização da estabilidade atmosférica - O número de Richardson (Ri).....	44
3.8. O perfil logarítmico do vento.....	46
3.9. Determinação das propriedades aerodinâmicas da cultura.....	49
3.10. Balanço de energia.....	51
3.11. Método do balanço de energia para determinação da evapotranspiração.....	56
3.12. Método combinado de Penman-Monteith.....	58
3.13. Determinação das resistências.....	63
3.14. Análise de crescimento da cultura.....	66
3.14.1. Determinação do fator de correção para folhas de cana-de-açúcar.....	67
3.14.2. Determinação do índice de área foliar (IAF).....	68
3.14.3. Altura do colmo e do dossel vegetativo.....	69
3.14.4. Peso de matéria seca das plantas.....	70
3.14.5. Taxas de crescimento.....	70
3.14.6. Eficiência de utilização da radiação solar.....	71

3.15. Balanço hídrico.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4.1. Condições meteorológicas e hídricas durante o período do experimento.....	74
4.2. Parâmetros de crescimento da planta.....	84
4.2.1. Altura de colmos.....	84
4.2.2. Estimativa da altura do dossel.....	85
4.2.3. Fator de correção para folhas de cana-de-açúcar.....	86
4.2.4. Índice de área foliar – IAF.....	87
4.2.5. Matéria seca.....	90
4.2.6. Taxas de crescimento.....	92
4.3. Balanço de energia.....	94
4.3.1. Componentes do balanço de energia da cultura.....	94
4.3.2. Relação entre o saldo de radiação e radiação global.....	105
4.3.3. Eficiência da cultura na utilização da radiação.....	107
4.4. Parâmetros aerodinâmicos da cultura.....	107
4.5. Resistências aerodinâmica e da cobertura vegetal.....	111
4.5.1. Comparação de métodos para estimativa da resistência aerodinâmica .....	111
4.5.2. Resistência da cobertura vegetal.....	113
4.6. Evapotranspiração da cultura.....	114
4.6.1. Método do balanço de energia.....	114
4.6.2. Método de Penman-Monteith.....	117
4.6.3. Comparação de métodos.....	122
5. CONCLUSÕES.....	128
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
7. APÊNDICES.....	136

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1 Elementos do balanço hídrico climático da região Litoral Centro da zona canavieira do estado de Alagoas, obtidos através do método de Thornthwaite-Mather (1955), com capacidade de água disponível (CAD) no solo de 75 mm.....	75
2 Componentes e relações derivadas do balanço de energia diurno em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o ciclo 1997/98. Pilar, AL.....	95
3 Componentes e relações derivadas do balanço de energia diurno em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	97
4 Índice de área foliar (IAF), altura do dossel (h) (m), velocidade característica do escoamento ( $u^*$ ) ( $m.s^{-1}$ ), deslocamento do plano zero (d) e parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) (m), número de Richardson (Ri) e a relação dos parâmetros aerodinâmicos d e $z_0$ com a altura do dossel vegetativo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	108

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1 Localização do estado de Alagoas. Em destaque, a região de estudo e a área experimental.....	35
2 Croqui com a localização da área experimental e da estação meteorológica automática (EMA). Pilar, AL, 1997/1999.....	36
3 Detalhe das parcelas de amostragem de plantas.....	36
4 Representação esquemática da estação meteorológica automática utilizada para o monitoramento micrometeorológico em cana-de-açúcar. Pilar – AL, 1997/99.....	38
5 Precipitação pluvial mensal observada durante os períodos de crescimento da cultura de cana-de-açúcar. Pilar, AL. Fonte: CINAL (Companhia Industrial de Alagoas).....	76
6 Desvios da precipitação pluvial mensal em relação à média climatológica, durante os períodos de crescimento da cultura de cana-de-açúcar. Pilar, AL. Fonte: CINAL - Companhia Industrial de Alagoas e UFAL - Universidade Federal de Alagoas/Campus Delza Gitalí.....	77
7 Precipitação pluvial ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) e saldo de radiação ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), em função de dias após o corte (DAC), 1998 (ciclo 1997/98). Pilar, AL .....	78
8 Precipitação pluvial ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) e saldo de radiação ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), em função de dias após o corte (DAC), 1999 (ciclo 1998/99). Pilar, AL.....	79
9 Temperatura diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função de dias após o corte (DAC), 1998 e 1999 (ciclos 1997/98 e 1998/99, respectivamente). Pilar, AL.....	80
10 Velocidade do vento diária (m/s) medida a 2,24 e 9,69m em função de dias após o corte (DAC), 1999 (ciclo 1998/99). Pilar, AL.....	81

11	Razão entre a evapotranspiração real e de referência (ETR/Eto) (A) e deficiência e excesso hídricos (B) em função de dias após o corte (DAC). Ciclo 1997/98. Pilar, AL.....	82
12	Razão entre a evapotranspiração real e de referência (ETR/Eto) (A) e deficiência e excesso hídrico (B) em função de dias após o corte (DAC). Ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	83
13	Altura de colmo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC) nos ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.....	84
14	Relação entre a altura do dossel e a altura do colmo de plantas de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL, 1999.....	85
15	Relação entre área foliar (cm <sup>2</sup> ) e o produto entre comprimento e largura (cm <sup>2</sup> ), para obtenção de fator de correção (FC) para folhas de cana-de-açúcar. Pilar, AL.....	86
16	Índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC) nos anos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.....	87
17	Relação entre o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, e dias após o corte (DAC) durante os ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.....	89
18	Índice de área foliar (IAF) em função da altura de colmo da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 durante os ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.....	89
19	Partição de matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	91
20	Matéria seca acumulada (ton.ha <sup>-1</sup> ) da parte aérea da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	92
21	Taxa de crescimento relativo (TCR) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	93
22	Taxa assimilatória líquida (TAL) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	94

23	Componentes dos balanços de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1997/98. Dias: 30/01/98 e 15/02/98 (estação seca). Pilar, AL.....	100
24	Componentes dos balanços de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1997/98. Dias: 10/05/98 e 15/06/98 (estação chuvosa). Pilar, AL...	101
25	Componentes do balanço de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1998/99. Dias: 06/02/99 e 27/02/99 (estação seca). Pilar, AL.....	102
26	Componentes do balanço de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1998/99. Dias: 26/05/99 e 25/06/99 (estação chuvosa). Pilar, AL...	104
27	Relação entre o saldo de radiação diário (A) e entre o saldo de radiação diurno (B) e a radiação global ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) sobre um cultivo de cana-de-açúcar. Pilar, AL. 1997 e 1998.....	106
28	Relação entre o deslocamento do plano zero (d) e do parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) com a altura do dossel utilizando 18 perfis selecionados (A) e relação entre os parâmetro aerodinâmicos (d e $z_0$ ) e a velocidade característica do escoamento ( $u^*$ ) (B) sobre a cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL.....	110
29	Resistência aerodinâmica ( $\text{m.s}^{-1}$ ) ( $r_a$ ), utilizando as equações propostas por Monteith e por Jensen sobre um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante todo ciclo da cultura (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B). Pilar, AL, 1999.....	112
30	Relação entre a resistência aerodinâmica, utilizando as equações propostas por Jensen e por Monteith referente a 51 perfis de vento selecionados e a velocidade do vento sobre um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL, 1999.....	113
31	Relação entre a resistência do dossel de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 e o índice de área foliar. Pilar, AL, 1999.....	114
32	Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ), pelo método do balanço de energia (BE), durante todo ciclo, nos dois anos estudados. Pilar, AL, 1997/98 e 1998/99.....	115

33	Distribuição da evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método do balanço de energia, durante todo período de crescimento da cultura, nos dois anos estudados. Pilar, AL. A linha horizontal no interior da caixa representa o percentil 50 (mediana), a linha tracejada representa a média, o fim das caixas os percentis 25 e 75, as barras os percentis 10 e 90 e os círculos cheios os valores extremos.....	116
34	Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método de Penman-Monteith, utilizando duas formulações para a resistência aerodinâmica (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B), durante todo o ciclo 1998/99. estudados. Pilar, AL.....	118
35	Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método de Penman-Monteith utilizando a resistência aerodinâmica pela formulação de Monteith com $z_0$ e $d$ fixos e $z_0$ e $d$ variável em função da altura do dossel (A) e relação entre essas mesmas variáveis (B), Período potencial de 200 a 280 DAC. Pilar, AL, 1999.....	120
36	Distribuição da evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método de Penman-Monteith, durante todo período de crescimento da cultura, nos dois anos estudados. Pilar, AL. A linha horizontal no interior da caixa representa o percentil 50 (mediana), a linha tracejada representa a média, o fim das caixas os percentis 25 e 75, as barras os percentis 10 e 90 e os círculos cheios os valores extremos.....	121
37	Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia em função de dias após o corte (DAC) (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B), durante todo o ciclo 1998/99. Pilar, AL.....	123
38	Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, obtidos pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia em função dos dias após o corte (DAC) (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B). Período potencial de 200 a 280 DAC. Pilar, AL, 1999.....	125
39	Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em nível quinqüidial, obtida pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia em função de dias após o corte (DAC) (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B). Período potencial de 200 a 280 dias após o corte (DAC). Pilar, AL, 1999.....	126

## RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1 Cronograma de execução das amostragens de dados de planta para os dois ciclos estudados. Pilar, AL.....	137
2 Variáveis micrometeorológicas e período de observação nos dois ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Pilar, AL, 1997/1999.....	138
3 Dias após o corte (DAC), e altura de colmo de plantas de cana-de-açúcar (cm), cv. SP 70-1143 durante os ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.....	139
4 Data da amostragem, número da amostragem, altura de colmo (m), altura de dossel (m) e altura estimada do dossel (m). Pilar (AL).1998/99.....	140
5 Número de plantas e número de folhas, comprimento (C) e largura (L) de folhas (cm), peso seco das amostras (PSA), peso seco das folhas (PSF) e peso seco total (PST), (g), área foliar real (AFR) e área das amostras (AA), (cm <sup>2</sup> ). Valores amostrais para determinação do fator de correção (FC).....	141
6 Número de amostragem, data, dias após o corte (DAC), índice de área foliar (IAF) e altura de colmo (hc) (cm) de cana-de-açúcar, vr SP 70-1143, durante os ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar (AL).....	142
7 Número de amostragem, dias após o corte (DAC), índice de área foliar (IAF), peso de matéria seca da parte aérea (MST) (g.planta), altura de colmo (hc) e altura do dossel (h) (m) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o período de crescimento. Pilar (AL), 1998/99.....	143
8 Número de amostragem, dias após o corte (DAC), matéria seca total (MST)(g.planta <sup>-1</sup> ), taxa de crescimento relativo (TCR) (g.g <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> ), área foliar (AF), (dm <sup>2</sup> ) e taxa de assimilatória líquida (TAL) (g.dm <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> ) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o período de crescimento. Pilar, AL, 1998/99.....	144

9	Resistência aerodinâmica diária obtida pela formulação proposta por Jensen e pela proposta por Monteith ( $s\ m^{-1}$ ) observadas durante todo ciclo de um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar (AL), 1998/99.....	145
10	Data da amostragem, hora, índice de área foliar (IAF), velocidade do vento ( $u$ ) ( $m.s^{-1}$ ), parâmetros aerodinâmicos ( $d$ e $z_0$ ) (m), velocidade de fricção ( $u^*$ ) ( $m.s^{-1}$ ) e resistências aerodinâmicas ( $r_a$ ) observadas sobre um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 ( $s.m^{-1}$ ). Pilar (AL), 1998/99.....	146
11	Data da amostragem, dias após o corte (DAC), índice de área foliar (IAF), e resistência da cultura ( $r_c$ ) de um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar (AL), 1998/99.....	148
12	Valores de evapotranspiração diária ( $mm.dia^{-1}$ ) segundo o método do balanço de energia.....	149
13	Valores de evapotranspiração diária ( $mm.dia^{-1}$ ) segundo o método combinado de Penman-Monteith considerando as formulações propostas por Jensen e por Monteith para obtenção da resistência aerodinâmica.....	150

## RELAÇÃO DE SÍMBOLOS E SÍGLAS

P	Propriedade por unidade de volume (concentração).
u	Velocidade horizontal do vento
$u_2$	Velocidade do vento na altura de 2m.
T	Temperatura do ar.
$\bar{T}$	Temperatura média do ar entre dois níveis.
$T_m$	Temperatura média do ar.
$\theta$	Temperatura potencial.
$\theta_m$	Temperatura potencial média entre dois níveis.
$T_o$	Temperatura dentro do estômato.
UR	Umidade relativa do ar
$p$	Pressão atmosférica.
$p_o$	Pressão padrão.
$K_m$	Coeficiente de difusão turbulenta para o momento.
$K_p$	Coeficiente de difusão turbulenta para a propriedade P.
$K_h$	Coeficiente de difusão turbulenta para calor sensível.
$K_w$	Coeficiente de difusão turbulenta para calor latente .
$\tau$	Transporte de momento.
F	Densidade de Fluxo.

$R_n$	Densidade do fluxo do saldo de radiação diário.
$R_{nd}$	Densidade do fluxo do saldo de radiação diurno.
$S$	Densidade do fluxo de calor no solo.
$H$	Densidade do fluxo vertical de calor sensível na atmosfera.
$LE$	Densidade do fluxo vertical de calor latente na atmosfera.
$C_p$	Calor específico do ar à pressão constante.
$L$	Calor latente de evaporação.
$q$	Umidade específica.
$\varepsilon$	Razão entre o peso molecular do vapor d'água e o peso molecular do ar.
$g$	Aceleração da gravidade.
$z$	Altura de medição da velocidade do vento.
$\Gamma_d$	Gradiente adiabático seco.
$Ri$	Número de Richardson.
$u^*$	Velocidade de fricção.
$k$	Constante de von Karman.
$C$	Constante de integração.
$z_0$	Parâmetro de rugosidade aerodinâmica para transferência de momento da superfície.
$z_{om}$	Comprimento de rugosidade da cultura para transporte de momento.
$z_{oh}$	Comprimento de rugosidade da cultura para transporte de vapor e calor sensível.
$d$	Deslocamento do plano zero do perfil do vento.
$\delta$	Espessura da camada limite ajustada.
$\vec{\nabla}$	Operador nabla.

$\vec{i}$ $\vec{j}$ $\vec{k}$	Vetores unitários.
$\vec{V}$	Vetor velocidade.
$e_s$	Pressão de saturação do vapor d'água no ar atmosférico.
$e$	Pressão de vapor d'água do ar atmosférico.
$e_o$	Pressão real de vapor do ar dentro do estômato.
$R$	Constante universal dos gases.
$\eta$	Eficiência na utilização da radiação solar.
$EF$	Energia fixada em síntese biológica.
$\beta$	Razão de Bowen.
$\gamma$	Coefficiente psicrométrico.
$r_a$	Resistência aerodinâmica à transferência de momento.
$r_b$	Resistência adicional para transporte de calor e vapor d'água.
$r_c$	Resistência do dossel vegetativo ao transporte de vapor.
$r_{av}$	Resistência aerodinâmica ao transporte de vapor.
$r_{ah}$	Resistência aerodinâmica ao transporte calor sensível.
$\Delta$	Inclinação da curva da pressão de saturação de vapor.
$ET$	Evapotranspiração.
$H'$	Profundidade efetiva do sistema radicular.
$h_c$	Altura da cultura.
$h$	Altura do dossel vegetativo.
$A_{solo}$	Área de terreno ocupada por uma planta.
$CLA$	Camada limite ajustada.
$DAC$	Dias após o corte.
$AFE$	Área foliar específica.

A	Área dos retângulos foliares.
PMA	Peso da matéria seca dos retângulos foliares.
AFP	Área foliar da planta
AFE	Área foliar específica.
PMS	Peso da matéria seca das folhas.
FC	Fator de correção.
IAF	Índice de área foliar.
AF	Área foliar.
TCR	Taxa de crescimento relativo.
MST	Peso de matéria seca total da parte aérea da planta.
$T_2$ e $T_1$	Intervalo de tempo entre duas amostragens.
TAL	Taxa assimilatória líquida.
Eu	Energia utilizada.
Ed	Energia disponível no meio.
CAD	Capacidade de armazenamento de água no solo
Ucc	Umidade gravimétrica na capacidade de campo.
Upmp	Umidade gravimétrica no ponto de murcha permanente.
dg	Densidade global do solo.
Ea	Termo aerodinâmico

## 1. INTRODUÇÃO

O estado de Alagoas é o maior produtor de açúcar do Nordeste do Brasil. A cana-de-açúcar é a cultura de maior expressão econômica em Alagoas e seus derivados contribuem com cerca de 60% da receita gerada pelo ICMS, em 60% dos municípios alagoanos. Em adição, o setor produtivo açucareiro é o maior gerador de emprego e renda, totalizando 150 mil empregos diretos em 32 usinas e destilarias. Porém, apesar dessa expressão significativa na economia do Estado, existem fatores negativos na zona canavieira como o regime de precipitação pluvial irregular que provoca deficiência hídrica nos solos da região, prejudicial à cultura da cana-de-açúcar, principalmente no período de crescimento vegetativo. A deficiência hídrica na zona canavieira, em alguns anos, reduz o rendimento em até 70%, principalmente por ser a cana-de-açúcar cultivada, em sua maior parte, sob regime de sequeiro. Existe, entretanto, uma consciência dos produtores de cana-de-açúcar no Estado, que a única maneira de sobreviver às intempéries, e ser competitivo, é a absorção de novas tecnologias, dentre elas, a extrema necessidade da implantação de um programa de irrigação, o que justifica todo o investimento possível no setor da pesquisa.

A cana-de-açúcar, cultura tropical, tem seu desenvolvimento controlado pela temperatura, luz e umidade, desenvolvendo-se melhor em locais quentes,

com alta insolação e boa distribuição de umidade durante seu ciclo. Os diversos subperíodos do ciclo da cana-de-açúcar apresentam diferentes necessidades hídricas. No subperíodo de desenvolvimento vegetativo, crítico para a cana-de-açúcar, o consumo de água é elevado enquanto, no subperíodo de maturação, o consumo é reduzido. Segundo Dorembos & Kassam (1979), a necessidade de água (evapotranspiração máxima) da cultura varia de 1500 a 2500 mm. Pela climatologia da região canavieira de Alagoas, o total anual de precipitação pluvial da região agroclimática Litoral Centro, onde foi conduzido o experimento, é de 1733 mm. Porém, observa-se, pelo balanço hídrico, que o período de abril a agosto apresenta excedente hídrico de 538 mm, correspondendo 31 % do total anual, enquanto, nos meses de outubro a fevereiro, ocorre uma deficiência hídrica de 499 mm, correspondendo 29 % do total anual. Esse último período coincide com o desenvolvimento vegetativo, período crítico da cana-de-açúcar em relação à água.

A micrometeorologia permite a quantificação dos fluxos turbulentos de momento, calor latente (evapotranspiração), calor sensível, e outras propriedades atmosféricas, informações importantes para problemas ligados aos estudos agrônômicos, ecológicos, poluição ambiental, aproveitamento de energia eólica e hidrológicos. Em particular, a parametrização de métodos de estimativa da evapotranspiração para a cultura da cana-de-açúcar na região é essencial e pré requisito de qualquer projeto de irrigação.

Nesse contexto, realizou-se um estudo micrometeorológico com a cultura da cana-de-açúcar para a zona canavieira de Alagoas, com os seguintes objetivos:

- a) quantificar os componentes do balanço de energia, fluxos turbulentos de calor sensível (H), calor latente (LE) e fluxo de calor no solo (S) em

diferentes estádios de desenvolvimento da cultura e em diferentes condições de demanda evaporativa atmosférica;

- b) determinar as principais variáveis de crescimento da cultura;
- c) modelar o índice de área foliar e sua evolução ao longo do ciclo da cultura;
- d) determinar os parâmetros aerodinâmicos, deslocamento do plano zero da velocidade do vento ( $d$ ) e parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) da cultura;
- e) calcular as resistências aerodinâmica ( $r_a$ ) e da cobertura vegetal ( $r_c$ );
- f) relacionar a evapotranspiração da cultura calculada pelo método do balanço de energia com a calculada pelo método de Penman-Monteith.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Histórico da cana-de-açúcar no estado de Alagoas**

A cana-de-açúcar é originária da Índia Oriental, ao que tudo indica do território localizado nas margens do Ganges, ao norte do Golfo de Bengala e ao sul do Himalaia. Na Europa, as primeiras notícias sobre a cana-de-açúcar referiam-se a “uma espécie de bambu que produzia mel sem intervenção das abelhas, servindo também para preparar uma bebida embriagante”, cujas mudas foram trazidas por generais de Alexandre Magno no seu regresso da expedição à Índia, em 327 a.c.. Depois disso é que se tornou conhecida na Arábia, Egito e Ásia Ocidental. Posteriormente, as Cruzadas introduziram-na na Europa, através da Sicília, no século XIV, e no século seguinte Cristóvão Colombo, em sua segunda viagem ao Novo Mundo, em 1493, trazia a mesma das Canárias para São Domingos (Santana, 1970).

A atividade sucroalcooleira no Brasil, segundo Câmara & Oliveira (1993), teve início com a colonização portuguesa, tendo sido estabelecida, de forma definitiva, nas regiões Nordeste e Sudeste. O Infante D. Henrique, regente de Portugal, em 1420 ordenara seu plantio na Ilha da Madeira, sendo após levada para São Tomé. Desta, ou da Ilha da Madeira vieram, ao que se presume, as primeiras mudas para o Brasil, entre 1500 e 1516 (Santana, 1970).

Andrade (1997), em seu relato sobre os pontos iniciais do processo de ocupação do estado de Alagoas, disse que o território alagoano foi visitado por expedições portuguesas e por corsários franceses no início do século XVI. Nas primeiras décadas, portugueses e franceses não estabeleceram pontos de povoamento, limitando-se a explorar a costa e a manter contatos com os indígenas, adquirindo produtos da terra, sobretudo pau-brasil. A partir de 1530, Portugal resolveu desenvolver uma política de povoamento, temendo perder o controle da Terra de Santa Cruz. Em 1535, Duarte Coelho resolveu instalar o Governo de sua capitania na porção setentrional, próximo a Itamaracá, onde havia estabelecimentos portugueses e onde ficaria sediada a capitania de Pero Lopes de Souza, sendo fundadas, na primeira década de colonização, as vilas de Igarassu e Olinda, e promovendo a ocupação da várzea do Capibaribe, onde se situariam os primeiros engenhos de açúcar. Segundo o autor, o processo de povoamento da capitania foi determinado pela cultura da cana-de-açúcar, financiado por capital holandês ou por judeus instalados na Holanda, que se empenharam na aquisição de escravos e na expansão dos canaviais. O fato é facilmente explicável dado o ciclo vegetativo longo da cana-de-açúcar (18 meses) e a necessidade de capitais para instalação dos engenhos.

Assim, apesar das condições climáticas favoráveis, Andrade (1997) enfatizou que havia limitação à expansão da cultura da cana-de-açúcar, fazendo com que não ocorresse a monocultura, mas apenas a dominância, sob o ponto de vista econômico, dessa cultura sobre as demais. Havia grandes áreas em que a vegetação natural era conservada, além de ser variada a produção agrícola. A monocultura só dominaria nos tempos atuais, quando o homem passou a dispor de

técnicas e de capitais que permitissem a apropriação de uma área maior e a destruição impiedosa da vegetação natural, para a expansão dos canaviais.

O processo usineiro se deu a partir de 1892, uma vez que as usinas foram construídas, sendo que, em 1907, havia apenas seis em funcionamento. O crescimento lento fez com que o número se elevasse a 15 em 1920 e a 27 em 1931 (Andrade, 1997).

Atualmente, são 32 unidades produtoras de açúcar e álcool espalhadas por toda zona canvieira de Alagoas que, nos últimos anos, têm recebido grandes incentivos relacionados ao aumento da sua produção de cana-de-açúcar. Esse setor produtivo, tem grande importância sócio-econômica no cenário agrícola alagoano.

## **2.2. Ecofisiologia e fenologia da cana-de-açúcar**

O processo produtivo canvieiro visa três objetivos básicos a saber: alta produção de fitomassa por unidade de área, isto é, elevado rendimento agrícola de colmos industrializáveis; qualidade ou riqueza em açúcar dos colmos industrializáveis, caracterizando a matéria-prima de boa qualidade; longevidade do canavial ou manutenção no tempo de produção e qualidade da matéria prima obtida no sistema produtivo, visando aumentar o número de cortes econômicos. Todo e qualquer sistema de produção vegetal, que vise a máxima produtividade econômica, fundamenta-se na perfeita integração de três fatores: a planta, o ambiente de produção e o manejo (Câmara & Oliveira, 1993).

A cultura da cana-de-açúcar é propagada vegetativamente, através do plantio de colmos ou mudas, que são seccionadas em pedaços contendo de duas a quatro gemas, denominados toletes. Após o plantio, ocorrendo condições favoráveis, principalmente de temperatura e precipitação, inicia-se o

entumescimento das gemas. Algumas células reiniciam sua atividade meristemática, desenvolvendo-se num pequeno broto que emerge pelo poro da gema em direção à superfície do solo. Simultaneamente, os meristemas dos primórdios radiculares, também em atividade, dão início ao desenvolvimento das raízes do tolete. Sendo o tolete o segmento de um colmo maduro, naturalmente contém feixes fibrovasculares (xilema e floema), que promovem a ligação fisiológica entre o broto e as raízes em desenvolvimento inicial, com as reservas armazenadas nas células parenquimáticas do tolete. Dessa forma, os novos pontos de crescimento, que atuam como drenos fisiológicos, prosseguem o seu crescimento e desenvolvimento (Câmara & Oliveira 1993; Lucchesi, 1995).

A emergência dos brotos de cana-de-açúcar ocorre por volta de 20 a 30 dias após o plantio. A partir desse estágio, as raízes do tolete já se apresentam maiores e com capacidade de absorver água e nutrientes do solo, o broto adquire coloração verde, o que demonstra sua capacidade de realizar fotossíntese. Entretanto, tanto as raízes quanto os brotos dependem das reservas nutritivas armazenadas no tolete, para que possam dar prosseguimento aos processos subsequentes do crescimento e desenvolvimento vegetativo.

O colmo recém emergido, denominado colmo primário, contém uma sucessão de nós e entrenós, muito próximos entre si, e continuam crescendo verticalmente, ao mesmo tempo em que se observa o desenvolvimento de novas raízes. As raízes mais velhas e desenvolvidas do tolete, juntamente com as raízes do colmo primário, constituem-se no sistema primordial da futura touceira de cana-de-açúcar. Após determinado estágio de desenvolvimento, gemas localizadas na base do colmo primário se entumescem, originando novas brotações que se dirigem à superfície do solo. Aproximadamente 20 a 30 dias

após a brotação inicial do colmo primário, observam-se novos brotos emergidos que recebem o nome de colmos secundários, caracterizando, então, o início do afilhamento. A partir da base dos novos afilhos, o sistema radicular da touceira vai aumentando. Observam-se novas brotações a partir das gemas localizadas na base dos primeiros afilhos que recebem o nome de colmos terciários, que também contribuirão para o incremento do sistema radicular. O processo de afilhamento continua a ocorrer, através da sucessiva brotação de gemas basais localizadas nos colmos anteriores.

Entre 90 e 120 dias após o plantio, cerca de 100% do sistema radicular se encontra nos primeiros 30 cm de solo, onde a maior parte é constituída pelas raízes dos colmos (Lucchesi, 1995). Após o aparecimento dos colmos terciários, a touceira não mais depende das reservas nutricionais armazenadas no tolete de plantio. A jovem touceira, em função das folhas existentes nos colmos primários e secundários, já é fotossinteticamente auto-suficiente, ocorrendo uma fase de afilhamento intenso das touceiras, atingindo o máximo da produção de novos afilhos sendo que algumas cultivares chegam a produzir 20 ou mais afilhos por touceira quando atingem o ponto máximo. A competição entre esses afilhos pelos fatores ambientais torna-se elevada, constatando-se, então, a redução do número dos mesmos através da diminuição pela morte dos afilhos mais jovens.

Ao final do afilhamento, os colmos mais desenvolvidos continuam o seu crescimento em altura e espessura, acumulando cada vez mais sacarose em seus internós, à medida que vão amadurecendo até atingir seu tamanho final, isto é, constituindo-se em colmos industrializáveis, passando a armazenar, de maneira mais intensa, a sacarose produzida a partir de produtos da fotossíntese. O acúmulo de sacarose nos internós dos colmos é fortemente influenciado por

condições ambientais ocorridas durante o desenvolvimento vegetativo. Essa etapa termina em 11 a 12 meses após o plantio, quando se observa a plena maturação dos colmos de cana-de-açúcar, momento em que se processa a colheita do canavial (Câmara & Oliveira, 1993).

Nas touceiras em idade de corte, cerca de 70% do seu sistema radicular se concentra nos primeiros 50 cm do solo. Nota-se, entretanto, a presença de raízes cordões bem desenvolvidas, penetrando no interior do solo até 150 cm de profundidade. A profundidade do sistema radicular formado, entretanto, depende principalmente da cultivar e das condições edáficas: umidade e as propriedades físicas e químicas do solo (Lucchesi, 1995).

No estado de Alagoas, o calendário agrícola já é bem definido, com cinco meses de plantio, ficando a cultura exposta a condições ambientais, nem sempre adequadas as suas necessidades hídricas. No plantio relativo aos meses de junho, julho e agosto, por exemplo, que correspondem à estação chuvosa da região, quando a cultura se encontra em seu pleno crescimento vegetativo, as necessidades hídricas da mesma, para um bom desenvolvimento, não serão atendidas naturalmente, através das precipitações pluviais, pois, tal período coincide com um período seco em pleno verão. O baixo atendimento da demanda hídrica, que ocorre no período de crescimento vegetativo, reflete-se negativamente sobre a produção da cana-de-açúcar, podendo ser evitado através da suplementação de água por irrigação. Em relação à segunda época de plantio, relativa aos meses de setembro e outubro, observa-se que a probabilidade de atendimento no período crítico de crescimento vegetativo, aumenta em relação às anteriores, alcançando 50% das necessidades hídricas. A concentração do plantio nesses meses beneficia a cultura resultando em melhores rendimentos agrícolas

em relação aos demais plantios (Toledo Filho, 1988).

Após o corte dos colmos industrializáveis da cana-de-açúcar, restam no campo as socas ou soqueiras, que permanecem ligadas ao sistema radicular bem desenvolvido, formado pela cana-planta. Em torno de 20 a 30 dias após o corte, observa-se profusa brotação das soqueiras, as quais posteriormente apresentarão as seguintes etapas fenológicas: afilhamento, acúmulo inicial de sacarose e maturação. O ciclo da cana-soca dura, em média, 12 meses.

Câmara & Oliveira (1993) apresentaram quatro diferentes etapas para a fenologia da cana-de-açúcar, cana-planta, por eles denominados "estádios"- 1º estágio: brotação e emergência dos brotos (colmos primários); 2º estágio- afilhamento e estabelecimento da cultura (da emergência dos brotos ao final do afilhamento); 3º estágio- período de grande crescimento (do final do afilhamento ao início de acumulação da sacarose) e 4º estágio- maturação (intenso acúmulo de sacarose nos colmos).

Conforme os mesmos autores, a base de uma boa cultura, ou seja, estabelecimento inicial de plantas no campo, reside na primeira etapa fenológica, isto é, na boa brotação e enraizamento dos toletes e subsequente emergência dos brotos primários. Por outro lado, é o segundo "estádio" fenológico (afilhamento) que permitirá o estabelecimento da cultura em condições de campo e fornecerá, às touceiras, o número de colmos adequados à produção, que determinará a futura produção de fitomassa. Por último, a qualidade da matéria-prima produzida, teor de açúcar dos colmos industrializáveis, será decorrente das condições ambientais durante o terceiro e principalmente, quarto "estádio" fenológico.

Do plantio à colheita, inúmeros são os fatores que podem afetar a fenologia da cana-de-açúcar. O crescimento pode ser retardado por duas condições meteorológicas, o frio e a seca, enquanto a maturação é prejudicada por excesso de chuvas. De uma forma geral, todos os períodos de desenvolvimento vegetal serão mais ativos quando houver água à disposição da cultura. A maturação, por outro lado, não se realiza se a cana não sofrer um pequeno período de seca. Resumindo, a quantidade exata de água para as necessidades da cana varia consideravelmente, dependendo de cada período de desenvolvimento (Toledo Filho, 1988).

Os fatores de clima que mais afetam a brotação são a temperatura e umidade do solo. De um modo geral, com temperaturas inferiores a 20°C a brotação é muito lenta, situando-se a faixa ótima entre 27°C e 32°C. A umidade do solo é o fator mais crítico para a brotação das gemas, ocorrendo sérios problemas tanto por excesso quanto por deficiência hídrica. Assim, o estabelecimento inicial da cana-planta (após o plantio) ou da cana-soca (após o corte) dependem, respectivamente, da boa brotação dos toletes e soqueiras.

Entre os fatores que afetam o afilhamento da cana-de-açúcar, destaca-se a radiação solar, em função da sua densidade de fluxo e duração, pois a baixa luminosidade reduz drasticamente a emissão de novos afilhos. Jovens afilhos, em processo de crescimento, significam novas folhas em formação, que incrementam a área foliar das touceiras. Com o crescimento do índice de área foliar (IAF), aumenta a interceptação da radiação solar para a realização da fotossíntese. Sendo uma planta do tipo C4, a cana-de-açúcar está no grupo das espécies mais eficientes quanto ao processo fotossintético. Além disso, a cana-de-açúcar pode atingir valores de IAF da ordem de 6 a 8. A temperatura é o fator mais importante

na formação e crescimento dos afillhos. A faixa entre 25°C e 30°C é considerada a mais favorável ao processo de crescimento vegetativo (Câmara & Oliveira, 1993; Lucchesi, 1995).

Em relação ao fator vento, dependendo da velocidade, cultivar, idade do canavial e espaçamento utilizado, as conseqüências podem ser desastrosas para o crescimento ou para a maturação e colheita. Ventos quentes e fortes tendem a dilacerar as lâminas foliares e aumentar a taxa de evapotranspiração da cultura, podendo haver acamamento de colmos durante a estação de crescimento.

O florescimento, do ponto de vista do agricultor ou agroindustrial, trata-se de ocorrência extremamente indesejável para a cana-de-açúcar pois, nos processos de formação e emissão da inflorescência, ocorre elevado consumo de sacarose, a ponto de promover secamento (consumo de caldo) da extremidade apical dos colmos, prejudicando a qualidade da matéria-prima e representando perdas quantitativas de fitomassa e sacarose por unidade de área.

A maturação da cana-de-açúcar é o processo fisiológico de carregamento e armazenamento de sacarose nas células parenquimáticas dos colmos. Embora seja a maturação uma característica inerente à planta, a mesma pode ser influenciada por fatores ambientais e de manejo. De maneira geral, a cana-de-açúcar requer seis a oito meses com temperaturas elevadas, radiação intensa e precipitações regulares, para que haja pleno crescimento vegetativo, seguido de quatro a seis meses com estação seca e/ou baixas temperaturas, condições desfavoráveis ao crescimento e extremamente benéficas e estimuladoras do acúmulo de sacarose.

Após o corte da cana-planta, inicia-se, através da brotação de gemas, localizadas na base das antigas touceiras, o ciclo das soqueiras ou ciclo da cana-

soca, com duração média de 12 meses. Praticamente, todos os fatores ambientais, que afetam o ciclo da cana-planta, desde a sua brotação até o seu corte, também afetam o ciclo das soqueiras. Entretanto, novos fatores surgem em nível de planta e de manejo. O manejo dos ciclos das soqueiras é o fator primordial para se manter a longevidade do canavial. Estima-se que 80 a 85% da produção agrícola de matéria-prima são provenientes das áreas de soqueiras (Câmara & Oliveira, 1993).

### **2.3. Análise de crescimento da cultura**

A análise de crescimento utiliza-se de equações matemáticas para avaliar índices de crescimento das plantas, muitos deles relacionados com a atividade fotossintética. Nos estudos ecofisiológicos das plantas, não se pode prescindir da análise de crescimento, pois os fatores ambientais e a disponibilidade de água e nutrientes, próprios de cada local, afetam sensivelmente a taxa assimilatória líquida, a taxa de crescimento relativo, a razão de área foliar e outras variáveis das plantas (Reis e Müller, 1979).

Através do estudo das interações dessas variáveis com cada fator ambiental, e em particular, com o estágio de desenvolvimento da planta, pode-se conhecer a eficiência do crescimento e a habilidade de adaptação às condições ambientais em que essas plantas crescem.

Em estudos de análise de crescimento, o conhecimento da área foliar média das plantas de uma comunidade vegetal, é de grande importância, uma vez que outras variáveis, como taxa de crescimento, acúmulo de matéria seca, estimativa de fotossíntese e intensidade de transpiração, entre outros, dependem da mesma.

A cobertura foliar em uma comunidade vegetal é expressa por um número puro, resultante da relação entre a área foliar e a área do terreno ocupado pela planta, que é chamado de Índice de Área Foliar (IAF). Teruel (1995) define o IAF como sendo nada mais do que a área de folhas subentendida em uma área unitária de terreno ( $\text{m}^2$  de folha/ $\text{m}^2$  de terreno).

A produção vegetal está diretamente relacionada com o aproveitamento da energia solar pela cultura, que é transformada em energia química através da fotossíntese. As folhas são responsáveis por essa conversão cuja intensidade é diferente de uma cultura para outra. A cana-de-açúcar é uma planta do tipo  $C_4$  e apresenta um dos mais altos valores de fotossaturação fotossintética. Assim sendo, o estudo do comportamento do desenvolvimento foliar durante o ciclo da cultura é de extrema importância para os estudos de produção agrícola. Para cada estágio de desenvolvimento da cultura, existem índices de área foliar ótimos (Leme et al., 1984).

Existem diversas variáveis que são necessários e servem de entradas para modelos e "software" para se determinar turnos de regas com boa gestão da água, que necessitam do IAF da cultura. Um exemplo da utilização dessa variável é a determinação da evapotranspiração da cultura, através do método empírico de Penman-Monteith. Esse método utiliza o IAF na determinação do componente aerodinâmico da equação que inclui a resistência do dossel ( $r_c$ ) que, por sua vez, está intimamente relacionada à perda de água pela cultura, uma vez que a área foliar das plantas é a superfície evaporante das mesmas. O conhecimento da superfície evaporante de uma área cultivada durante todo o ciclo da cultura é de fundamental importância para suporte dos modelos de estimativa da evapotranspiração.

Leme et al. (1984), estimando a área foliar da cana-de-açúcar em três ciclos consecutivos, observaram que os maiores índices de área foliar, durante o ciclo da cultura, corresponderam à maior produção final de colmos e açúcar por hectare e que o tratamento não irrigado apresentou índices de área foliar inferiores em relação aos demais tratamentos.

Entre os diversos métodos para medir a área foliar, destaca-se o medidor digital, enquanto que para estimar a mesma, diversos métodos empíricos podem ser utilizados, entre os quais destaca-se o método do produto entre o comprimento e a largura das folhas. Nessa metodologia, utiliza-se um fator de correção (FC) o qual procura corrigir o formato da folha em relação à área da figura geométrica considerada nas amostragens (Stickler, 1961; Barros, 1973; Oga & Fonseca, 1994).

A determinação de um fator de correção para folhas de cana-de-açúcar, para obtenção da área foliar, através da relação entre a massa de matéria seca e área foliar, é considerada eficiente. Francis et al. (1969) citaram que a primeira equação de regressão para determinação do fator de correção foi apresentada por Montgomery, em 1911, para cereais ( $Y=0,75XCXL$ ), onde C é o comprimento e L a largura.

Sestak et al. (1971) mostraram o efeito do formato das folhas sobre o valor do coeficiente aproximado para transformar o produto comprimento pela largura (área do retângulo) em área foliar real. Apresentaram valores para diversas folhas, com diversas formas. Por exemplo, para folhas do tipo lanceoladas, que é o caso da cana-de-açúcar, o valor é de 0,857.

Trabalho desenvolvido por Oga et al. (1994), que objetivava determinar uma equação para determinar a área foliar em mudas de cagaiteira (*Eugenia*

*dysenterica* D.C.), obtiveram o melhor ajuste ao modelo linear da equação do comprimento X largura ( $AF=0,719XCXL$ ).

Barros et al. (1973), determinando área de folhas do cafeeiro, obtiveram ótimos coeficientes de correlação entre as áreas foliares reais e os retângulos circunscritos aos limbos foliares, entre as áreas foliares reais e os comprimentos de cada folha e entre áreas foliares reais e as maiores larguras das folhas, indicando forte dependência das áreas foliares reais de suas dimensões lineares.

Stickler (1961) estudou três métodos para determinar a área de folhas de sorgo, entre eles o da determinação do fator de correção usando medidas de comprimento e largura. Ele enfatizou que a vantagem desse método é de que as folhas não necessitam ser removidas para a determinação e concluiu que o produto da largura máxima e comprimento máximo mostrou ser um método acurado para a estimativa da área de folhas da cultura.

Cunha (1988) e Leme et al. (1984) utilizaram, para a estimativa da área foliar em milho, o método de Montgomery, sendo a área de uma folha dada pelo produto do comprimento da folha pela maior largura da mesma multiplicado pelo fator de correção 0,75.

Leme et al. (1984) apresentaram alguns valores de IAF para cana-de-açúcar. Na maturação ela é da ordem de 3,56 e que o IAF ótimo está ao redor de 9 a 12.

Normalmente, segundo Barbieri (1993), pensa-se em crescimento em termos de alongamento dos colmos. De acordo com o autor, num sentido mais amplo, o crescimento inclui o aumento da matéria seca, que equivale ao aumento do tamanho e da massa.

Resultados obtidos por Leme et al. (1984) mostraram uma produção média de colmo de cana-de-açúcar verde de  $69,8 \text{ t ha}^{-1}$ , em tratamento sem irrigação. O índice de área foliar mostrou-se maior para cana-planta, evidenciando um maior vigor vegetativo do que na soca e na ressoca. Para um período vegetativo de 22 meses, Chang (1968) observou uma produção de  $129 \text{ t.ha}^{-1}$ .

Valores de distribuição do peso da matéria seca da cana-de-açúcar, considerando as raízes, aos 317 dias após o plantio, são mostrados em Barbieri (1993), onde se tem um total de  $6,9 \text{ kg.m}^{-2}$ , sendo  $4,2 \text{ kg.m}^{-2}$  para colmos.

A taxa de crescimento relativo (TCR) avalia o crescimento vegetativo da planta, através da quantidade de matéria seca que a mesma acumulou, em relação àquela que já possuía, num determinado intervalo de tempo. O resultado é expresso em unidades de material vegetal produzido por material vegetal existente, durante um período pré-fixado de tempo. A taxa assimilatória líquida (TAL) reflete a dimensão do processo assimilatório envolvido na produção de matéria seca, ou seja, estima a fotossíntese líquida (Lucchesi, 1984; Reis & Müller, 1979 e Hunt, 1978).

Segundo Lucchesi (1984), a taxa de crescimento relativo (TCR) geralmente diminui à medida que a planta cresce, em virtude do auto-sombreamento das folhas. O efeito da TCR é maior durante a fase de desenvolvimento da área foliar e, quando é alcançado um IAF elevado, a correlação entre TCR e o rendimento econômico se reduz. No decorrer do crescimento de uma planta, sua capacidade de produção aumenta (maior IAF) mas a taxa assimilatória líquida (TAL) diminui em virtude do auto-sombreamento. A TAL depende principalmente da radiação solar, mas uma planta com baixa TAL não é necessariamente uma planta pouco produtiva.

Valores da taxa de crescimento da cana-de-açúcar são apresentados por Barbieri (1993). Os valores medidos por diversos autores estiveram em torno de 25 e 46g.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, com IAF máximo.

A eficiência, na utilização da radiação solar pelas plantas, pode ser calculada relacionando-se o valor calórico de matéria seca produzida pela planta, ou parte desta, e a energia radiante disponível na área de cultivo (Chang, 1971). O valor calórico da matéria seca pode ser determinado pela queima de amostras em bombas calorimétricas. Existe, na literatura, valor calórico para uma grande parte das plantas, determinados por vários investigadores. Para cana-de-açúcar, o valor geralmente utilizado é 3949 cal.g<sup>-1</sup> (Long, 1934).

Alguns estudos da eficiência da utilização da radiação solar mostraram que as culturas, de um modo geral, convertem 1% da radiação solar incidente (Chang, 1968). Em cana-de-açúcar, a eficiência é de 1,43% sendo considerada uma das que melhor convertem a energia solar (Lucchesi, 1984).

#### **2. 4. Transportes turbulentos**

A micrometeorologia clássica se preocupa com os fenômenos que ocorrem na interface solo-atmosfera. A micrometeorologia aplicada à agricultura considera, também, o solo onde as plantas e animais vivem, compondo uma área de interesse que é a interação solo-planta-atmosfera. Utiliza-se da técnica de medição de variáveis meteorológicas em diversos níveis de altura para obtenção de gradientes verticais. A variação dos elementos meteorológicos na vertical é muito maior do que a variação na horizontal (Pereira, 2000). Todo movimento vertical, que gera transporte de uma propriedade, é função dos gradientes das propriedades. Essa é a base dos estudos micrometeorológicos aplicados na

agricultura para determinar, entre outros, a perda de água por uma comunidade vegetal.

A micrometeorologia se baseia nos princípios da turbulência para estudar os processos de transferências (turbulentas) de momento, calor sensível e calor latente,  $\text{CO}_2$  e outros (Burman & Pochop, 1994). O conhecimento do calor latente de evaporação é importante para a agricultura pois, através dele, pode-se medir a perda d'água pelas plantas. Convém salientar que os métodos padrões para determinação desse processo são os micrometeorológicos, especificamente o método do balanço de energia, o aerodinâmico, o método da correlação turbulenta e o combinado, como o de Penman-Monteith. Esse último, além de considerar a energia e o vento, considera também as resistências que a água sofre no percurso planta-atmosfera.

Os movimentos atmosféricos, próximos à superfície terrestre, são praticamente sempre turbulentos, mesmo em estado de estabilidade. Esses movimentos turbulentos, porém, não são capazes de se estender até o solo. Uma fina camada de ar, a poucos milímetros da superfície, se adere a ela com grande tenacidade. Esta fina camada é denominada de camada limite laminar. Dentro dessa camada, calor, matéria (vapor d'água) e momento são transferidos, verticalmente, somente por processos moleculares e as taxas de transferências são proporcionais aos gradientes de temperatura do ar, para os fluxos de calor sensível (H), umidade específica, para o caso do fluxo de calor latente de evaporação (LE) e velocidade horizontal do ar para a transferência horizontal de momento do ar atmosférico (Sellers, 1965).

A camada limite da atmosfera surge devido à presença da superfície do solo. É nessa região que ocorrem as maiores modificações pois vários fatores,

tais como diferença de rugosidade, aquecimento diferenciado, resfriamento noturno e outros fenômenos, ocorrem nela. A camada limite é uma região de caráter e profundidade variáveis, a qual freqüentemente atua como uma zona fechada, onde calor, momento, massa e poluentes da superfície são armazenados e acumulados. A partir de um certo tempo, por várias razões, a camada se rompe e seu conteúdo é redistribuído por uma profundidade muito maior da atmosfera, podendo afetar variações sinóticas de uma escala totalmente diferente da anterior (André, 1980).

A turbulência atmosférica próxima ao solo é provocada por uma rápida e violenta variação da velocidade do vento imposta ao fluxo. A velocidade do vento sempre aumenta com a altura e fenece antes de chegar na superfície, tendendo a zero na superfície por causa da força de atrito. A superfície exerce resistência ao movimento do ar devido ao gradiente, resultando em um transporte de momento de cima para baixo, sempre na direção vertical.

Segundo Geiger (1980), a forma do perfil vertical do vento, isto é, o conhecimento da lei segundo a qual a velocidade do vento aumenta com a altura, tem um grande interesse não só para a teoria das correntes de ar e da difusão turbulenta, como para a economia de calor e água e, também, para muitas aplicações práticas.

O momento nada mais é do que a quantidade de movimento e junto com esse movimento, ocorre transporte de massa, podendo ser vapor d'água,  $\text{CO}_2$ , e poluentes atmosféricos entre outros, e o transporte de calor, em termos de calor sensível e calor latente. Por isso, a importância de se estudar o perfil vertical do vento uma vez que o mesmo é que carrega as propriedades atmosféricas.

A quantidade de movimento é absorvida, inicialmente, na camada de transição entre o dossel da cultura e a atmosfera, em geral, dentro da comunidade. As trocas das propriedades ocorrem a partir de uma altura correspondente ao somatório do parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) e do deslocamento do plano zero ( $d$ ) ( $z_0 + d$ ), onde ocorrem as maiores trocas turbulentas.

A caracterização das condições atmosféricas é necessária para a determinação de horários onde a mesma se encontra próxima à neutralidade. Esta caracterização se faz de acordo com a distribuição vertical da temperatura do ar. Uma camada será estável ou instável dependendo do valor do gradiente vertical de temperatura. Segundo Vianello (1991), a estabilidade é definida como aquela condição atmosférica na qual os movimentos atmosféricos ascendentes estão ausentes ou definitivamente inibidos. Ao contrário, instabilidade é definida como o estado atmosférico no qual prevalecem os movimentos verticais ascendentes.

Se a superfície é rugosa, como no caso de uma superfície cultivada com cultura de porte alto, a irregularidade se estende a poucos metros acima do solo e a camada limite laminar não existe. Na interface solo-atmosfera, porém, os processos de condução ou difusão molecular se dão por ação de processos de transferência não termal (Sellers, 1965).

O efeito termal tem uma importante influência na natureza da turbulência e torna-se necessário especificar quantitativamente. A variabilidade das condições atmosféricas pode ser estudada através do conceito de uma parcela. É detectada pelo estado de equilíbrio de uma parcela de ar se deslocando de sua posição original. Se uma parcela de ar é forçada a deslocar-se para cima adiabaticamente ela sofrerá um resfriamento por expansão adiabática e seguirá subindo, tornando-se cada vez mais densa do que o ar circunvizinho (observa-se que a pressão e a

temperatura diminuem e o volume aumenta). Quanto mais a temperatura da parcela de ar diminui, mais densa se tornará em relação ao meio em que se acha. A menos que uma força mecânica atue sobre a parcela, empurrando-a fortemente para cima, ela, naturalmente, retornará à sua posição inicial. Essa situação denomina-se de atmosfera estável. Se, pelo gradiente vertical de temperatura da camada atmosférica, a parcela é forçada a subir, ela se mantém cada vez mais quente do que o ar circunvizinho e, conseqüentemente, menos densa, afastando-se cada vez mais da sua posição de origem. Essa situação denomina-se de atmosfera instável. A atmosfera, nesse caso, não oferecerá resistência nem favorecerá a movimento vertical da parcela de ar (Pereira, 2000 ; Vianello ,1991).

Sob condições de instabilidade, os vórtices crescem verticalmente e são muito maiores e se alongam na vertical proporcionando maior mistura, ou seja, a mistura é facilitada. Sob condições de estabilidade, os movimentos verticais são inibidos, inibindo a mistura (Pereira, 2000).

Condições de estabilidade ou instabilidade são detectadas através do Número de Richardson ( $R_i$ ). O número de Richardson, número adimensional, relaciona os efeitos das forças derivadas das diferenças de temperaturas entre dois níveis, responsáveis pelas convecções livres, com as forças mecânicas que são responsáveis pelas convecções forçadas e corrige o perfil de vento em condições de não neutralidade atmosférica. A magnitude do efeito termal pode ser expresso quantitativamente pela magnitude do número de Richardson.

Pereira (2000) traz os limites do parâmetro de estabilidade  $R_i$  como os seguintes:  $R_i > 0$ , caracteriza condições de atmosfera estável, convecção suprimida,  $R_i > 0,21$ , caracteriza escoamento quase-laminar,  $R_i = 0$  indica neutralidade

atmosférica,  $R_i > -0,03$ , indica instabilidade com convecção forçada e  $R_i < -0,03$  indica convecção livre.

De acordo com Geiger (1980), um solo com uma cobertura vegetal fechada constitui, não só no espaço mas também quanto às suas propriedades, uma zona de transição, porque cada um dos órgãos da planta se comporta recebendo e emitindo radiação, evaporando e efetuando trocas de calor com o ar circundante. O ar atmosférico, por sua vez, interage com maior ou menor dificuldade com a cobertura vegetal, tornando-se este fenômeno essencial nos estudos da camada junto ao solo.

Como em toda superfície rugosa, o escoamento do ar, dado pela velocidade do vento acima de uma cobertura vegetal, gera movimento turbulento decorrente das forças de atrito que se opõem ao transporte de momento e que afetam o fluxo vertical de vapor d'água (Santos & Andre, 1993).

## **2.5. Evapotranspiração**

Segundo Moura (1992), a evaporação é o elo fundamental entre o balanço de energia e de água na superfície da terra e, como tal, é importante para os mais diversos interesses interdisciplinares, principalmente na agricultura.

O consumo de água por uma área cultivada, ou evapotranspiração, é um dos mais importantes componentes básicos do ciclo hidrológico. Informações quantitativas de evaporação e evapotranspiração são necessárias nos vários campos científicos que tratam dos problemas do manejo de água (Bergamaschi, 1992).

A evapotranspiração é a mais importante variável no planejamento e manejo de recursos hídricos como também para o monitoramento, desenvolvimento e

planejamento de práticas de irrigação. Tem particular importância em áreas áridas e semi-áridas onde se utiliza a irrigação. A sua importância em áreas úmidas está relacionada com a expansão da irrigação suplementar.

Berlato & Molion (1981) fizeram uma revisão de literatura sobre evaporação e evapotranspiração. Os autores enfatizaram a importância em se estudar essa transferência de água para a atmosfera no estado de vapor. Apresentam algumas definições para os seguintes termos: evapotranspiração (ET) como sendo a perda combinada de água para a atmosfera, em forma de vapor, através dos processos de evaporação das superfícies e transpiração das plantas; evapotranspiração potencial (ETP) como o total de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, por unidade de tempo, de uma superfície extensa, completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água; evapotranspiração real (ETR) é a perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo. A ETR é igual ou menor que a ETP.

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) corresponde à água utilizada por uma extensa superfície vegetada de porte baixo e de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo totalmente o terreno, estando esse bem suprido de umidade, sendo que, em nenhum instante a demanda atmosférica é restringida por falta d'água no solo (Pereira et al., 1997). Na prática,  $ETP = ET_o$ . O termo evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>), segundo Pereira (1997), tem significado bastante vago, pois diversos autores definem diferentemente. Conforme Matzenauer (1992), a ET<sub>m</sub> corresponde à perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração de uma cultura em condições ótimas de densidade de plantas,

fertilidade, disponibilidade de água no solo em qualquer estágio de desenvolvimento.

O processo de evaporação é, fundamentalmente, um processo dependente da energia disponível para mudança do estado físico de água líquida para vapor, sendo, portanto, a radiação solar o fator isolado mais importante. No balanço de energia na superfície, em condições de boa disponibilidade hídrica, grande parte do saldo de radiação é utilizado no processo de evaporação.

As temperaturas do ar e da água estão associadas à radiação solar, conseqüentemente se correlacionam positivamente com a evaporação. O efeito do vento na evaporação é exercido pela remoção e renovação do ar logo acima da superfície evaporante. Normalmente, o vento retira da camada acima da superfície evaporante, o ar saturado ou próximo à saturação que fica sobre a mesma superfície ar mais seco, o que determina a manutenção do processo evaporativo. Acima de uma determinada velocidade a evaporação torna-se independente da velocidade do vento. Para pequenas áreas, uma brisa leve ( $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) já é suficientemente eficaz. Para grandes superfícies de água, os estudos indicam que 32 a  $40\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  seria um valor limitante da velocidade do vento, acima da qual não exerceria mais influência. Outros fatores de menor importância podem ser citados: o armazenamento de calor ou energia, pressão atmosférica, onde a redução da pressão aumenta a evaporação; tamanho e profundidade da superfície evaporante, condições de arredores da superfície da água e presença de sais ou outras partículas (Berlato & Molion, 1981).

Em condições de ótima disponibilidade de água no solo, a ETP seria apenas uma função das condições meteorológicas e do tipo de vegetação exercido pela sua estrutura, sendo afetada pelo albedo, rugosidade aerodinâmica, cobertura do solo,

bem como pela estrutura do sistema radicular. A variação do albedo acarreta uma variação do balanço de energia e, conseqüentemente, variação da perda de água pelas plantas para a atmosfera.

À medida que a umidade do solo decresce, haverá um ponto em que a ETR passa a ser menor do que a ETP. Várias teorias e métodos foram estabelecidos para relacionar a disponibilidade de água no solo e a razão ETR/ETP. Existem muitos trabalhos que procuram mensurar essa razão, porém com resultados conflitantes devido às diferentes condições em que foram realizados os experimentos. Nenhum desses trabalhos leva em consideração o conjunto de fatores que afetam o regime hídrico do sistema solo-planta-atmosfera (Berlato & Molion, 1981).

Sabe-se que a relação entre a taxa de evapotranspiração e a tensão de umidade do solo dependem de outros fatores como a textura do solo, condutividade hidráulica do solo, profundidade e desenvolvimento do sistema radicular, densidade da vegetação e condições atmosféricas. Provavelmente, o fator que exerce maior influência é a demanda evaporativa da atmosfera.

A evapotranspiração pode ser obtida através de medição direta ou estimada através de equações empíricas. As medições da evapotranspiração sob condições de campo podem ser efetuadas através de lisímetros, que são tanques com enchimento de solo no qual desenvolvem-se as culturas sob condições naturais para medir a quantidade de água perdida por evaporação e transpiração. Esse método pode fornecer medição direta de  $E_{To}$  (ETP),  $E_{Tm}$  e ETR (Cunha, 1994; Fontana, 1992; Berlato & Molion, 1981). O lisímetro é considerado padrão para medições de evapotranspiração, sendo esses nem sempre disponíveis em número e repetições em uma determinada localidade. Normalmente, não existem

equipamentos para medir a evapotranspiração, quando isto for necessário para uma região e/ou condição climática. Em vista disso, existem vários métodos de estimativas baseadas em princípios físicos e fisiológicos, ou mesmo equações empíricas, que utilizam parâmetros climáticos comuns, os quais consistem, muitas vezes, na única alternativa disponível.

A literatura é rica em métodos ou equações para se estimar a evapotranspiração. Dentre os métodos existentes para estimativa dessa variável, os métodos micrometeorológicos se destacam por serem os mais utilizados e recomendados e são os que mais se aproximam da realidade. Isto se deve à utilização de dados micrometeorológicos observados acima de superfícies específicas que se deseja estudar. Para tanto, a determinação da evapotranspiração através de métodos micrometeorológicos necessita o conhecimento de fundamentações teóricas a respeito do comportamento da atmosfera acima de uma comunidade vegetal e na interface planta-atmosfera, onde ocorre essa perda de água por uma comunidade de plantas (Fontana, 1992).

De acordo com Santos et al. (1994), a escolha do método para estimativa da evapotranspiração de uma cultura agrícola baseia-se na precisão da estimativa, na resolução temporal mínima e na disponibilidade de dados meteorológicos para sua solução.

O método do balanço de energia baseia-se no princípio de conservação de energia, onde o ganho é igual à perda. Esse método é aplicado, segundo Cunha (1994), para determinação da evapotranspiração de culturas através da quantificação dos fluxos de calor latente de evaporação, para intervalos de tempo iguais ou inferiores a um dia. Esse método tem sido usado nas mais diversas

condições e tem mostrado resultados satisfatórios. Sua utilização depende sobretudo dos perfis de temperatura e umidade do ar médio durante um certo período de tempo considerado ( Hossein Ashktorab et al., 1989).

Sediyama (1996) afirma que esse método, entre outros que utilizam as propriedades conservativas da subcamada limite acima da superfície evaporante (camada limite ajustada), exigem uma área tampão uniforme à barlavento para garantir que os fluxos horizontais não sejam significativos no processo.

Fontana (1991) realizou um experimento micrometeorológico com o objetivo de avaliar os componentes do balanço de radiação e energia em soja sob condições de irrigação e sem irrigação e observou que o fluxo de calor latente de evaporação representou a maior porção do saldo de radiação, sendo 95% na parcela irrigada e 78% na parcela não irrigada. O fluxo de calor no solo representou a menor porção do saldo de radiação, sendo 2% e 7% para as parcelas irrigadas e não irrigadas, respectivamente.

Teixeira et al. (1997), avaliando os componentes do balanço de energia ao longo dos estádios de desenvolvimento de um cultivo de videira, em Petrolina-PE, utilizando-se da razão de Bowen, verificaram que, em média, a maior porção do saldo de radiação disponível para o cultivo foi utilizada para o fluxo de calor latente (82%), seguido do fluxo de calor sensível (13%) e o fluxo de calor no solo (5%). Observaram, também, que a prática de irrigação interfere nas trocas entre a comunidade vegetal e a atmosfera circundante, aumentando a relação  $LE/R_n$  e diminuindo  $H/R_n$ .

A partir de medições e com base no cálculo da razão de Bowen, Cunha (1994) determinou os fluxos de calor latente e sensível em um cultivo de alfafa, sem

limitações hídricas, em Eldorado do Sul-RS, e observou que, em média, o Rn foi fracionado em 86% para LE, 9% para H e 5% para S.

Para as condições de Taquari-RS, Cunha et al. (1996) determinaram que, em média, para o milho, Rn foi fracionado em 80% para LE, 14% para H e 6% para S, tendo este fracionamento se diferenciado ao longo do desenvolvimento da cultura, de forma inversa, para H e S, e de forma direta para LE, com o aumento do índice de área foliar (IAF). Observaram, também, que a magnitude do fluxo de calor no solo e o IAF da cultura apresentam uma relação inversa.

Apesar das limitações do emprego desse método para estimativa da evapotranspiração de culturas para fins de monitoramento agrícola, pela dificuldade da aquisição dos dados meteorológicos necessários, erros devidos à sensibilidade e à calibração instrumental, erros inerentes às suposições teóricas utilizadas para o cálculo da razão de Bowen e os erros causados pela advecção de energia, muitos pesquisadores utilizam essa metodologia como padrão.

O valor da razão de Bowen, segundo Pereira (1997), depende das condições hídricas da superfície evaporante. Se a superfície estiver umedecida, maior parte de Rn será utilizada em LE, resultando em  $\beta$  pequeno. Se a superfície apresentar restrição de água, maior parte de Rn será utilizada no aquecimento do ar, resultando em  $\beta$  elevado.

O método do balanço de energia, ao contrário de outras técnicas que utilizam a teoria do fluxo gradiente, não necessita de informações de velocidade do vento e propriedades aerodinâmicas da superfície, sendo que o cálculo dos fluxos independe das condições de estabilidade atmosférica quando se assume que os transporte turbulentos de vapor e calor sejam iguais. De acordo com Heilman &

Brittin (1989), a principal exigência do método é que os gradientes de umidade do ar e temperatura sejam medidos dentro da camada limite ajustada.

Prueger et al. (1997), objetivando comparar resultados de estimativa de evapotranspiração obtidos em clima semi-árido, obtiveram diferenças entre o método da razão de Bowen e lisímetros em períodos de excesso de precipitação e inadequada drenagem do lisímetro.

Outro método bastante utilizado para estimativa da evapotranspiração é uma modificação do método combinado de Penman, (1956) feita por Monteith, em 1965, e conhecido como o método de Penman-Monteith. O método de Penman-Monteith não só concilia aspectos aerodinâmicos e energéticos, mas também inclui a resistência aerodinâmica para a transferência de vapor ( $r_{av}$ ) e a resistência da superfície da cultura para transferência de vapor ( $r_c$ ).

As resistências oferecidas aos fluxos verticais de momento, calor sensível e calor latente dependem das características aerodinâmicas da superfície, sendo a resistência aerodinâmica estimada a partir dos perfis de vento, temperatura e umidade específica e a resistência do dossel, esta estimada a partir do índice de área foliar.

A resistência aerodinâmica, para cobertura vegetal de porte elevado, é menor, quando comparada à cobertura de porte baixo porque, do ponto de vista aerodinâmico, uma vegetação de porte elevado possui um parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) maior, o que lhe confere maior superfície de contato, facilitando a difusão turbulenta (Santos & Andre, 1993).

Peres et al. (1999) determinaram a resistência do dossel da cana-de-açúcar, para a região de Araras (SP), em condições ótimas de umidade do solo, (próximo à capacidade de campo), obtendo , em escala decendial, valores médios

da ordem de  $43,5 \pm 4,5 \text{ s.m}^{-1}$  com uma variação de 3 a  $82 \text{ s.m}^{-1}$ . Na escala mensal, observaram um valor médio de  $41,7 \pm 7,1 \text{ s.m}^{-1}$  com uma variação de 8 a  $74 \text{ s.m}^{-1}$ . Os mesmos autores citaram que Thompson & Boyce em 1972, trabalhando com cana-de-açúcar, após a cultura cobrir totalmente o solo, encontraram para a resistência da cultura um valor médio de  $75 \text{ s.m}^{-1}$ , com uma variação de 50 a  $100 \text{ s.m}^{-1}$ .

Peres et al. (1996) estimaram a resistência do dossel para grama, apropriada para a determinação da evapotranspiração potencial, através do modelo de Penman-Monteith e observaram que a resistência do dossel situou-se na faixa de 60 a  $80 \text{ s.m}^{-1}$ .

A equação de Penman-Monteith é mais precisa quando usada em base horária, sendo os valores somados para obter a estimativa diária da evapotranspiração (Jensen et al., 1990; Sedyama, 1996).

O método de Penman-Monteith é considerado como aquele de melhor desempenho entre os modelos combinados sendo recomendado como padrão para estimar a evapotranspiração e para calibração de modelos empíricos (Jensen et al., 1990; Peres et al., 1996).

De acordo com Souza et al. (1998), devido à clara descrição física do processo de evapotranspiração, a equação geral de Penman-Monteith é um dos modelos mais avançados para a estimativa do processo em plantas cultivadas.

Embora esse método tenha sua formulação teórica rigorosamente física, é de fácil entendimento e necessita, para sua utilização, de informações meteorológicas coletadas em apenas um único nível. Sua aplicação fica, entretanto, limitada pela dificuldade de se conseguir valores confiáveis e representativos da resistência do dossel.

Souza et al. (1998) estimaram a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) pelo método de Penman-Monteith, para a região costeira de Maceió, com base em dados diários e observaram que os valores médios diários variaram de 2,2mm entre os meses de maio a julho, elevando-se para 5,3mm para os meses de dezembro a fevereiro.

Segundo Allen et al. (1989), a inclusão de simples procedimentos como os efeitos da área foliar, parâmetro de rugosidade da superfície e resistência do dossel na equação de Penman-Monteith, melhora a estimativa da evapotranspiração de referência para extensas áreas, sendo que esse método apresentou melhor consistência em base horária e diária, dentre os métodos estudados.

Os resultados obtidos por Sentelhas et al. (1998) estimando a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith, através de dados obtidos em estações meteorológicas convencionais e automáticas, mostraram não haver tendência de melhor estimativa quando se utiliza dados de ambas estações, apesar das estações automáticas fornecerem dados com melhor representatividade, em razão da aquisição contínua dos mesmos. Porém, nem sempre elas estão disponíveis, havendo necessidade de utilização de dados meteorológicos provenientes de estações convencionais com menor representatividade.

Camargo & Sentelhas (1997), avaliando o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial, observaram que o método de Penman-Monteith teve um bom desempenho entre os estudados.

Resultados obtidos por Guerra & Slack (1996), estudando os parâmetros de rugosidade da superfície vegetada sobre grama bermuda, indicaram que o parâmetro  $z_0$  é virtualmente constante com velocidades do vento superiores a

$2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Porém, esse parâmetro cresce rapidamente com velocidades do vento inferiores, sendo que o uso de diferentes critérios para especificar os parâmetros de rugosidade da superfície resultam em diferenças significativas no cálculo das resistências aerodinâmicas. Outra observação feita pelos mesmos autores é de que o comprimento de rugosidade  $e$ , especialmente, o parâmetro de deslocamento do plano zero ( $d$ ) são muito sensíveis aos erros experimentais na medição da velocidade do vento. Em geral,  $d$  assume valores irreais quando são usados perfis de vento aparentemente semelhantes e nas mesmas condições de estabilidade atmosférica, sendo esses parâmetros dependentes, e que qualquer aumento em  $d$  causa um decréscimo em  $z_0$ . A dependência dos parâmetros de rugosidade da superfície à velocidade do vento é outro resultado conflitante na literatura, embora pesquisas indicaram que esses parâmetros sejam dependentes da velocidade do vento.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Local do experimento**

Os dados micrometeorológicos utilizados no presente trabalho foram oriundos do Projeto de Pesquisa "Micrometeorologia da Mata Atlântica Alagoana" do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, que visa analisar as modificações no sistema solo-planta-atmosfera provocadas pela substituição da Mata Atlântica por cana-de-açúcar na zona da mata alagoana.

O experimento foi instalado em uma área de cultivo contínuo de cana-de-açúcar, sob condição de lavoura comercial, em uma área da Fazenda Vila Nova, município de Pilar, AL (9°36`S, 35°53`W, 107 m de altitude). A Figura 1 mostra a zona canvieira do estado de Alagoas, dividida em sete regiões edáfico-climatologicamente homogêneas e, em destaque, a região Litoral Centro e o local onde foi desenvolvida a pesquisa.

#### **3.2. Clima e solo da região**

A região agroclimática Litoral Centro da zona canvieira do estado de Alagoas possui um clima tropical com precipitação pluvial mensal variando entre

41 a 262 mm e um total anual de 1732 mm. A temperatura média mensal varia entre 24°C a 27°C.

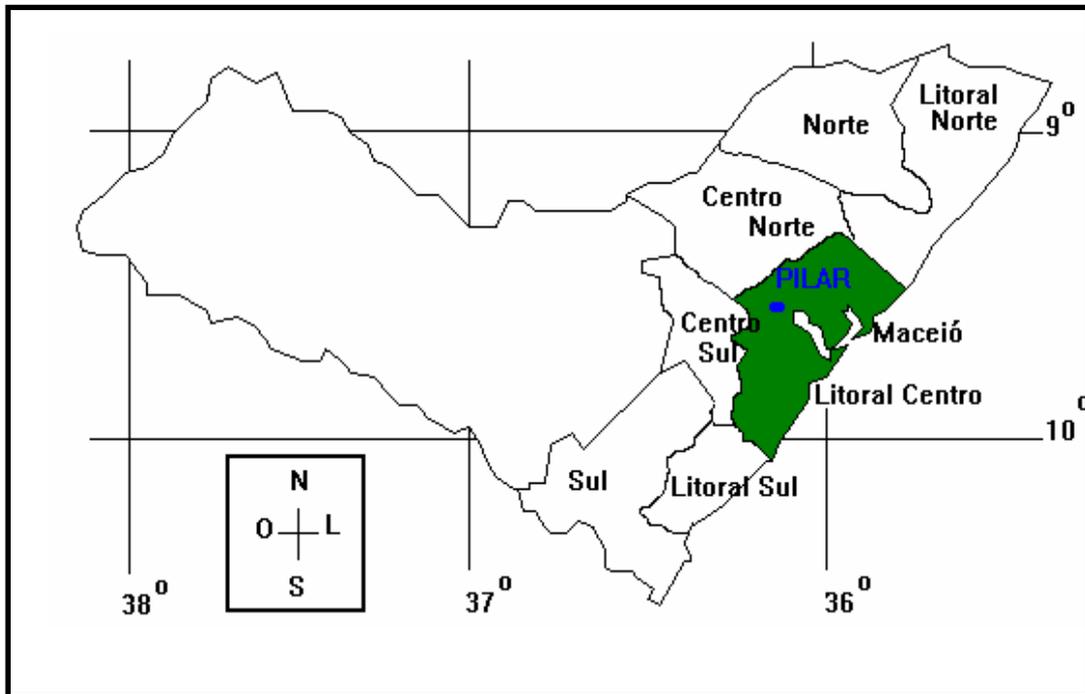


FIGURA 1. Localização do estado de Alagoas. Em destaque, a região de estudo e a área experimental.

O solo da região Litoral Centro, de acordo com o levantamento exploratório e reconhecimento de solos do estado de Alagoas, é classificado como podzólico vermelho amarelo, com textura média/argilosa (Jacomine et al., 1975).

### 3.3. Área experimental

Na Figura 2 está representada a unidade experimental, com a correspondente localização da estação meteorológica automática (EMA) e algumas características da área adjacente à mesma. O ensaio constou de uma unidade experimental de 12,5 ha (500 m x 250 m), cultivada com a cultura de cana-de-açúcar, variedade SP 70-1143, junto à qual foi feita a instalação dos equipamentos.

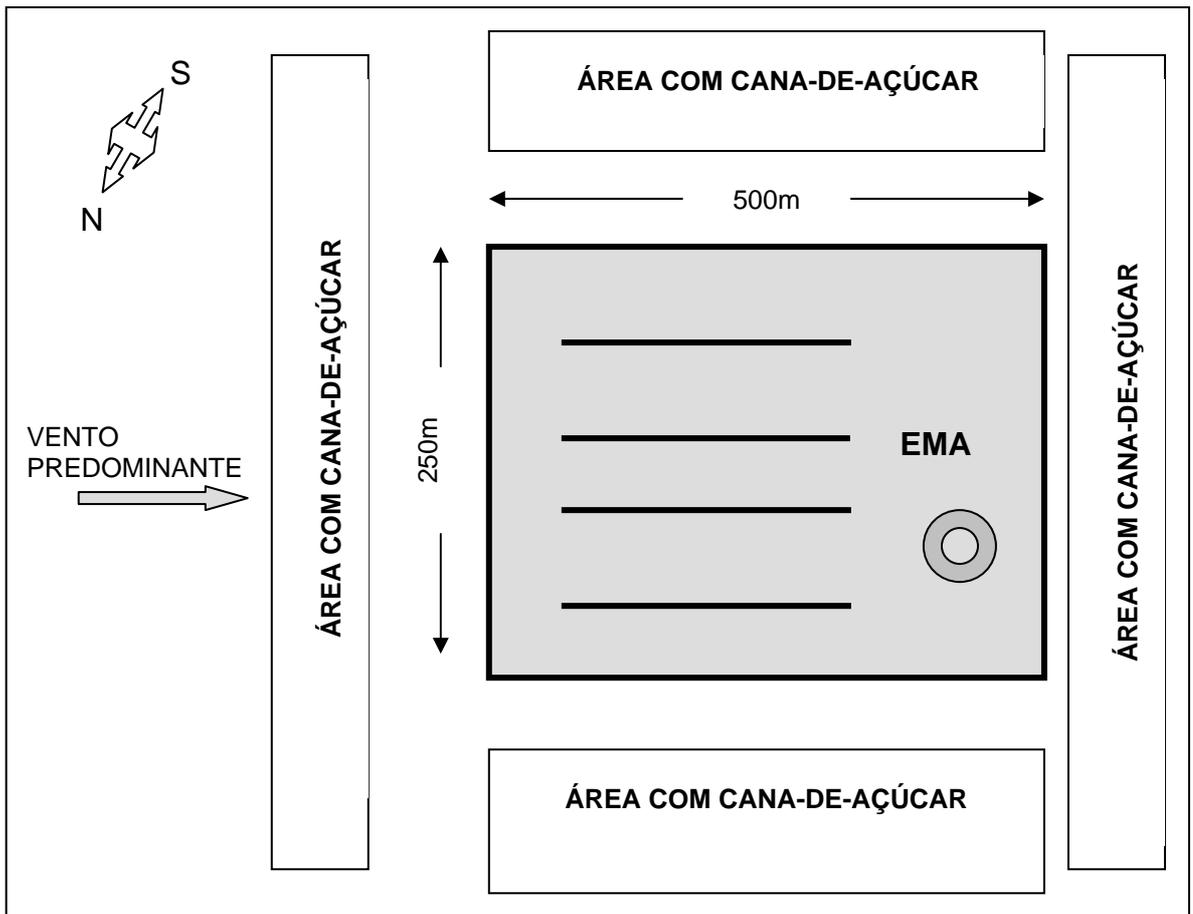


FIGURA 2. Croqui com a localização da área experimental e da estação meteorológica automática (EMA). Pilar, AL, 1997/99.

A área de amostragem das plantas foi constituída de quatro parcelas de 30 metros lineares, com cinco repetições (Figura 3).

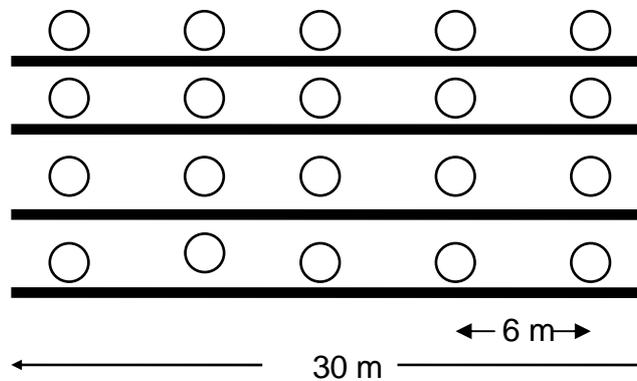


FIGURA 3. Detalhe das parcelas de amostragem de plantas.

### **3.4. Torre instrumental**

Os dados micrometeorológicos foram obtidos através de uma estação meteorológica automática (EMA), cuja representação é apresentada na Figura 4. Essa estação possui sete sensores, marca Campbell Scientific, acoplados a um sistema “ datalogger” (modelo CR10), instalados em uma torre metálica de 12m, que serve de suporte aos instrumentos de medidas. Foram registrados direção do vento (graus), velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) em quatro níveis, temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ) em quatro níveis, umidade relativa do ar (%) em quatro níveis, fluxo saldo de radiação ( $W.m^{-2}$ ) no topo da torre e no interior do canal, a 0,5m de altura, e fluxo de calor no solo ( $W.m^{-2}$ ) em três pontos, a 0,05m de profundidade. A estação dispunha, ainda, de um sistema de aquisição de dados, alimentado por energia solar captada em um painel fotovoltaico e armazenada em uma bateria. Os elementos micrometeorológicos foram coletados continuamente a cada segundo, sendo registrada sua média a cada 10min. As alturas dos instrumentos foram sendo modificadas conforme o crescimento das plantas.

#### **3.4.1. Sensores de velocidade do vento**

Utilizaram-se anemômetros RM-Young, modelo 03101-5, para medição horizontal da velocidade do vento. A velocidade do vento foi obtida através da transformação de contagens de pulso em metros/segundo, configurado para baixos níveis de frequência, com uma precisão de  $0,5m.s^{-1}$ . A faixa de operação vai de 0 a  $50m.s^{-1}$  suportando rajadas de até  $60m.s^{-1}$ . O sensor é formado por um conjunto de três conchas hemisféricas de 40 mm de diâmetro cada, movendo-se em forma circular abrangendo 0,12m de diâmetro.

### 3.4.2. Sondas de temperatura e umidade relativa do ar

Para medição da temperatura e umidade relativa do ar foram utilizados sensores, modelo HMP35C. Para mensuração da umidade relativa, a faixa de operação corresponde de 0 a 100%, com sinal de saída de 0,002 para 1 VDC (voltagem contínua), e resolução de  $\pm 2\%$  para a faixa de 0 a 90% e de  $\pm 3\%$  para 90 a 100%, à 20°C; Para temperatura do ar foi usado um termistor com a faixa de medição de  $-35^{\circ}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  com erro de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , na faixa de  $0^{\circ}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ .

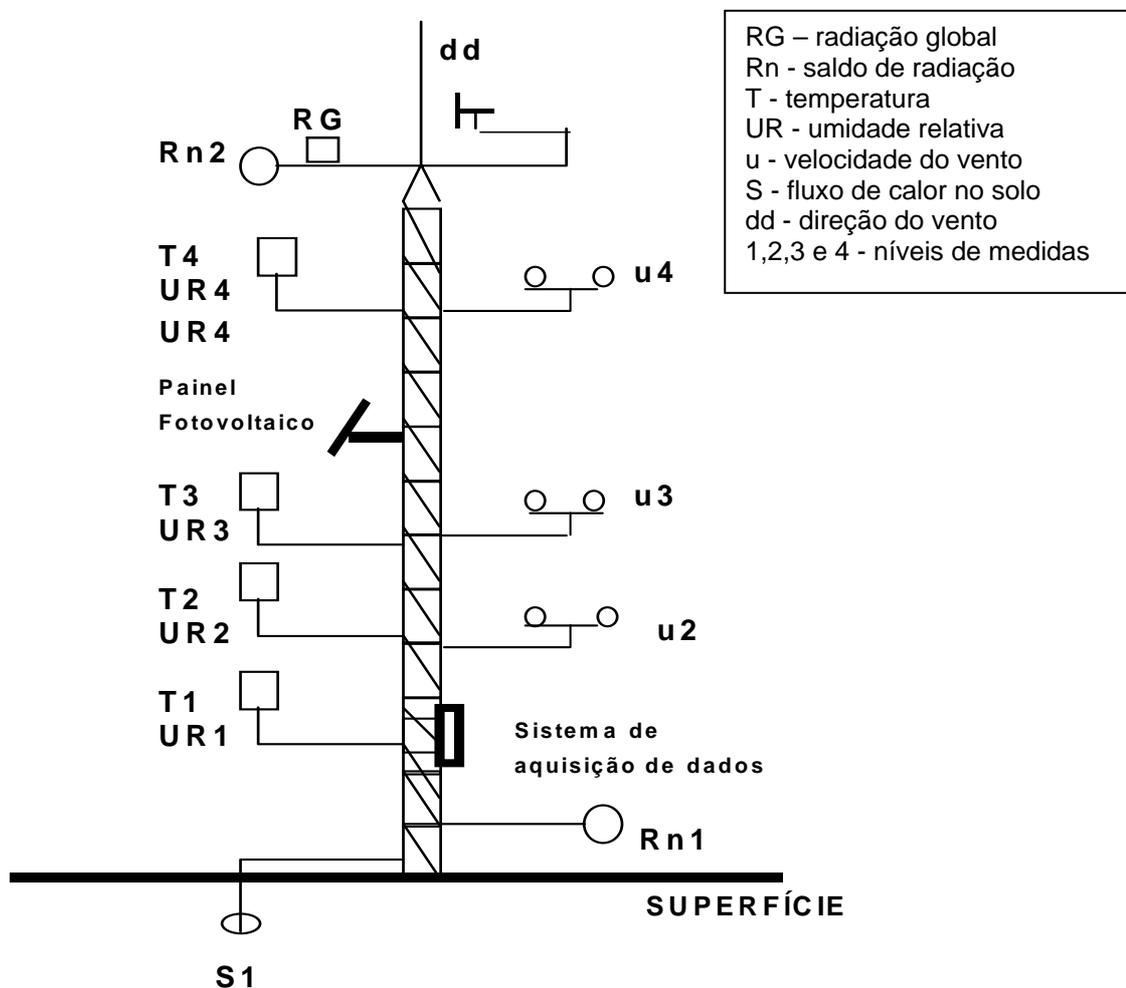


FIGURA 4. Representação esquemática da Estação Meteorológica Automática utilizada para o monitoramento micrometeorológico em cana-de-açúcar. Pilar - AL, 1997/99.

### **3.4.3. Saldo radiômetro**

Para medição do saldo de radiação, foram utilizados sensores de termopilhas de alta sensibilidade, modelo Q-7, que medem a soma algébrica de entradas e saídas de radiação solar em todos os comprimentos de onda (ondas curtas e ondas longas). Cada sensor consiste em um conjunto de 60 junções de termopilhas com baixa resistência elétrica para reduzir ruídos. A resposta do sensor corresponde a  $9,6\text{W}\cdot\text{m}^{-2}/\text{mV}$  (para valores positivos) e  $11,9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}/\text{mV}$  (para valores negativos), com uma resposta espectral de  $0,25\mu\text{m}$  a  $60\mu\text{m}$ .

### **3.4.4. Placas medidoras de fluxo de calor no solo**

As medidas de fluxo de calor através do solo foram obtidas através do sensor HFT-3, à profundidade de  $0,05\text{m}$ .

## **3.5. Observações micrometeorológicas e de planta**

Os períodos de observações das variáveis micrometeorológicas foram diferentes nos dois ciclos da cultura, devido a fatores relacionados ao trabalho de campo, principalmente por se tratar de uma área de cultivo comercial, onde as atividades seguem cronologicamente. Além disso, as observações do perfil da velocidade do vento foram suspensas no mês de outubro de 1997, por motivo de incêndio no canal que danificou os anemômetros. Essa suspensão se prolongou até o início do segundo ciclo, em novembro de 1998, com a aquisição de novos equipamentos. A radiação global foi observada apenas no primeiro ciclo (Apêndice 2).

A precipitação pluvial foi medida na estação meteorológica da Companhia Industrial de Alagoas (CINAL), situada próxima ao canal enquanto as normais

climatológicas da região foram obtidas na Seção de Agrometeorologia do Campus Delza Gitaí da Universidade Federal de Alagoas.

Foram observados e estudados dois ciclos da cultura da cana-de-açúcar: 1997/98 e 1998/99. As medições de crescimento da cultura no primeiro ciclo, 1997/98, deu-se no período de 15 de janeiro a 31 de agosto de 1998 sendo uma cana-soca do corte anterior (feito em 18 de setembro de 1997), totalizando, nesse primeiro ciclo, 16 amostragens quinzenais. Foram medidos a altura de colmo das plantas e o comprimento e largura máxima das folhas para obtenção da área foliar. As observações de crescimento da cultura no segundo ciclo foram feitas no período de 27 de novembro de 1998 a 01 de janeiro de 1999 sendo, portanto, uma ressoca do corte anterior (feito em 25 de setembro de 1998), totalizando, nesse segundo ciclo, 19 amostragens quinzenais. Nesse segundo período, foi determinada, além dos parâmetros do primeiro ciclo, a massa de matéria seca da parte aérea das plantas. O Apêndice 1 apresenta o cronograma de execução das amostragens.

Os dados de planta foram obtidos em uma área situada dentro do experimento micrometeorológico, constituída de quatro parcelas de 30 metros lineares, com cinco repetições (Figuras 3 e 4).

As amostragens foram efetuadas quinzenalmente, durante todo o ciclo da cultura, nas linhas denominadas de amostragens. Para determinação da altura e da área foliar, foram marcadas cinco plantas em cada linha de amostragem, totalizando uma amostra de 20 plantas. Outras três plantas, escolhidas ao acaso dentro de cada área experimental, serviram para a determinação do fator de correção, para obtenção da área foliar.

### 3.6. Equações básicas dos transportes verticais turbulentos de propriedades atmosféricas

Um dos métodos para estimar a densidade de fluxo para qualquer propriedade atmosférica é relacionar o fluxo com os gradientes verticais da propriedade. Basicamente, segundo Pereira (2000), utiliza-se uma extensão da lei de Fick da difusão, onde a densidade de fluxo ( $F$ ) é proporcional a um gradiente ( $dP/dz$ ), ou seja:

$$F = -K_p \frac{dP}{dz} \quad (1)$$

onde  $K_p$  é a difusividade turbulenta característica da propriedade  $P$ , ou seja, coeficiente de transporte turbulento da propriedade. Para a atmosfera,  $P$  representa uma propriedade por unidade de volume (concentração). Na prática, utiliza-se um mínimo de dois pontos para determinação de fluxos. Portanto, substitui-se ( $dP/dz$ ) por ( $\Delta P/\Delta z$ ). Considera-se  $K_h$ ,  $K_w$  e  $K_m$ , que se refere ao calor sensível, calor latente e “momentum”, respectivamente, enquanto que  $dP/dz$  representa a variação infinitesimal da propriedade com a altura e  $K_p$  a difusividade turbulenta característica da propriedade  $P$ .

Quando a propriedade transportada for o “momentum” ( $\tau$ ),  $F = \tau$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2} = \text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $K_p = K_m$  [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ], e  $P = \rho u$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ], isto é:

$$\tau = -K_m \frac{d(\rho u)}{dz} \quad (2)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar e  $K_m$  o coeficiente de difusão turbulenta para “momentum”. Como  $\rho u$  sempre aumenta com a altura acima da superfície, o ponto de maior concentração de quantidade de movimento está sempre em um nível mais elevado. Logo, o transporte de “momentum” é sempre no sentido de cima para baixo, isto é, a superfície é sumidouro de “momentum” e admite-se como positivo o transporte nessa direção.

Numa fina camada de ar, onde  $dz$  é da ordem de centímetros até alguns metros,  $\rho$  pode ser considerado constante, podendo-se escrever:

$$\tau = -\rho K_m \frac{du}{dz} \quad (3)$$

No caso da propriedade ser o calor sensível ( $H$ ),  $F = H$  [ $J.m^{-2}.s^{-1}$ ],  $K_p = K_h$  [ $m^2.s^{-1}$ ],  $P = \rho c_p T$  [ $J.m^{-3}$ ], ou seja:

$$H = -K_h \rho c_p \frac{dT}{dz} \quad (4)$$

onde  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $0,24 cal.g^{-1}.K^{-1}$  ou  $1,005 MJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ),  $K_h$  o coeficiente de difusão turbulenta para calor sensível. O fluxo de calor sensível pode ser tanto positivo como negativo. Será negativo quando  $T$  decrescer com  $z$  e positivo no caso inverso.

Quando a propriedade transportada for o calor latente ( $LE$ ),  $F = LE$  [ $cal.cm^{-2}$ ],  $K_p = K_w$  [ $cm^2.s^{-1}$ ],  $P = \rho L q$  [ $cal.cm^{-3}$ ], isto é:

$$LE = -Kw\rho L \frac{dq}{dz} \quad (5)$$

onde  $L = f(T)$  é o calor latente de evaporação, dado por:

$$L = (2501 - 2,301T) \times 10^3 \quad (6)$$

onde  $T$  é a temperatura do ar em  $^{\circ}\text{C}$  e  $L$  é dado em  $(\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1})$ .

A umidade específica é dada, com boa aproximação, por:

$$q = \varepsilon \frac{e}{p} \quad (7)$$

sendo  $\varepsilon = 0,622$  resultante da razão entre o peso molecular do vapor d'água ( $18\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) e o peso molecular do ar ( $28,97\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $p$  é a pressão atmosférica e  $e$  é a pressão real de vapor atmosférico. Substituindo 7 em 5, resulta:

$$LE = -Kw\rho L \left( \frac{\varepsilon}{p} \right) \left( \frac{de}{dz} \right) \quad (8)$$

O problema em (3), (4) e (5) é estimar os coeficientes  $K_m$ ,  $K_h$  e  $K_w$ . Sabe-se que o transporte atmosférico das diversas propriedades é feito através de vórtices que se deslocam aleatoriamente entre os diversos níveis. É lógico assumir que as diversas propriedades atmosféricas sejam transportadas pelo mesmo vórtice. Esse é o princípio fundamental em que se baseia a hipótese da similaridade (Hipótese de Reynolds), ou seja  $K_m = K_h = K_w$ . Para o caso de haver similaridade nos

transportes de “momentum”, calor sensível e vapor d’água e, além disso, considerando-se a atmosfera próxima à neutralidade, os coeficientes de transporte podem ser considerados iguais.

As equações (3), (4) e (5) são as equações básicas para estudos micrometeorológicos que têm como finalidades a determinação dos fluxos verticais das principais propriedades atmosféricas.

### **3.7. Caracterização da estabilidade atmosférica: o número de Richardson (Ri)**

Para a caracterização da estabilidade da atmosfera usa-se, comumente, o chamado número de Richardson. Esse número relaciona as forças térmicas, responsáveis pela convecção livre, com as forças mecânicas, responsáveis pela convecção forçada. É dado por:

$$Ri = \frac{g \frac{d\theta}{dz}}{\theta_m \left( \frac{du}{dz} \right)^2} \quad (9)$$

sendo  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,80\text{m.s}^{-1}$ );  $\theta$  a temperatura potencial (K);  $u$ , a velocidade horizontal do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ );  $z$  a altura de medição da velocidade do vento nos níveis considerados;  $\theta_m$ , a temperatura potencial média entre dois níveis de medida (K) (Villa Nova 1973; Monteith, 1975; Pereira, 2000).

Temperatura potencial ( $\theta$ ) é a temperatura que uma parcela de ar teria, inicialmente em um nível qualquer da atmosfera (pressão  $p$  e temperatura  $T$ ), se fosse trazida, por um processo adiabático seco, a uma pressão padrão,  $p_0$ .

(Vianello, 1991). Em meteorologia,  $p_0$  corresponde a 1000 mb, e  $\theta$  é dada por:

$$\theta = T(1000/p)^{0,286} \quad (10)$$

onde T é a temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ) e p a pressão (hPa).

O conceito de temperatura potencial é de extrema utilidade, pois necessita-se comparar as temperaturas do ar, a diferentes alturas para efeito de cálculo de fluxo de calor. Não se pode, simplesmente, medi-las em diferentes níveis e compará-las diretamente, porque sabe-se que a temperatura varia com a pressão, e esta com a altura. Então, a maneira correta de fazer comparações, nesse caso, é transformar todas as temperaturas medidas para as mesmas condições de pressão e comparar as temperaturas potenciais (Vianello, 1991).

Na camada limite superficial, da ordem de centenas de metros, onde a variação vertical de pressão não é substancial, a temperatura potencial pode ser aproximada pela equação:

$$\theta = T + \Gamma z \quad (11)$$

onde  $\Gamma$  é o gradiente adiabático seco ( $0,98^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ).

Para pequenas distâncias, da ordem de centímetros e até alguns metros, entre dois níveis de medida,  $\theta$  pode ser considerado aproximadamente igual a T e, nesse caso, a equação (9) pode ser escrita como:

$$Ri = \frac{g \frac{dT}{dz}}{\bar{T} \left( \frac{du}{dz} \right)^2} \quad (12)$$

onde  $\bar{T}$  é a temperatura média do ar entre os dois níveis de medição (K). O Ri, no formato da equação (12), é chamado número de Richardson gradiente.

No presente trabalho, foram determinados os Ri para todas as horas do dia, para o período de dezembro de 1998 a setembro de 1999, a fim de determinar os horários em que as condições estiveram próximas da neutralidade. O critério de neutralidade usado foi o recomendado por Monteith (1975), ou seja,  $-0,001 < Ri < +0,001$ .

### 3.8. O perfil logarítmico do vento

O gradiente da velocidade do vento ( $du/dz$ ) varia de acordo com a altura; é grande próximo à superfície e diminui à medida que se eleva na atmosfera (Pereira 2000; Geiger, 1980 ; Monteith 1975). Pode ser descrito pela seguinte expressão matemática de proporcionalidade :

$$\frac{du}{dz} \propto \frac{1}{z} \quad (13)$$

Como a derivada varia inversamente com a altura, é necessário utilizar uma velocidade que caracterize o escoamento. A essa velocidade característica, simbolizada por  $u^*$ , denomina-se velocidade de fricção e pode-se escrever agora:

$$\frac{du}{dz} = \frac{u^*}{kz} \quad (14)$$

onde  $k$  é uma constante de proporcionalidade denominada de constante de von Karman ( $k = 0,41$ ). Integrando-se a equação 14, em função da altura  $z$ , obtém-se:

$$u = \frac{u^*}{k} \ln(z) + C \quad (15)$$

A constante de integração  $C$  é obtida impondo-se as condições de contorno,  $u=0$  numa altura  $z = z_0 \neq 0$  pois, numa superfície irregular, é impossível definir  $z = 0$ . Nessa condição,  $z_0$  pode ser interpretado como a média das irregularidades da superfície. Logo:

$$C = -\frac{u^*}{k} \ln(z_0) \quad (16)$$

$$u = \frac{u^*}{k} \ln(z) - \frac{u^*}{k} \ln(z_0) \quad (17)$$

$$u = \frac{u^*}{k} [\ln(z) - \ln(z_0)] \quad (18)$$

$$u = \frac{u^*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right] \quad (19)$$

A equação (19) representa o perfil logarítmico do vento, ou perfil de Prandtl, válido para escoamento sobre uma superfície lisa ou de pouca rugosidade e uma atmosfera em condições de neutralidade, onde  $z_0$  é denominado parâmetro de rugosidade aerodinâmica para transferência de “momentum” da superfície. Quanto mais irregular for a superfície, maior será  $z_0$ .

O perfil logarítmico de Prandtl, na forma da equação (19), é válido para superfície com vegetação rasteira cuja altura não ultrapassa alguns centímetros.

No caso de vegetação com porte maior, o escoamento é deslocado verticalmente em função da altura das plantas. As plantas dificultam o escoamento deslocando-o para cima. Quando se trata de uma cultura anual, o deslocamento se dá progressivamente à medida em que as plantas se desenvolvem e atingem o tamanho final. À medida em que as plantas aumentam seu tamanho e sua área foliar, elas vão oferecendo maior resistência à movimentação do ar atmosférico sobre as mesmas. O perfil de vento continua logarítmico acima da vegetação. Porém, quando se plota  $u$  contra  $\ln z$ , não se obtém uma reta como anteriormente. O perfil curva-se nos níveis mais próximos ao topo da vegetação, indicando o efeito da interação planta-atmosfera (Pereira, 2000).

Verifica-se que a velocidade do vento não tende a zero no topo da vegetação, mas numa altura abaixo do topo. A natureza caótica do escoamento turbulento faz com que as plantas se agitem continuamente, extraindo “momentum” da atmosfera. A absorção de “momentum” pode provocar flexão das plantas, diminuindo sua altura efetiva. Subtraindo-se dos níveis de medidas da velocidade do vento, uma altura  $d$  menor que a altura da cultura, nota-se que o perfil volta a linearizar-se quando se plota  $u$  contra  $\ln(z - d)$ . Portanto, para cultura de porte alto, a equação 19 torna-se:

$$u = \frac{u^*}{k} \left[ \ln \frac{(z-d)}{z_0} \right] \quad (20)$$

### 3.9. Determinação das propriedades aerodinâmicas da cultura

Os valores de  $u^*$  e  $z_0$  podem ser determinados através de regressão linear (Pereira, 2000). Aplicando uma equação logarítmica, do tipo  $Y = a + b \ln z$ , com dois parâmetros, sendo  $Y$  a velocidade do vento medida nas diferentes alturas como variável dependente e  $X$  o logaritmo natural da altura  $z$  como variável independente, obtêm-se as seguintes relações para a determinação dos parâmetros aerodinâmicos

$$u^* = b k \quad (21)$$

$$z_0 = \exp\left(\frac{-a}{b}\right) \quad (22)$$

onde:

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (23)$$

$$b = \frac{[\sum XY - \bar{X}\sum Y]}{\left[ \frac{\sum X^2 - (\sum X)^2}{n} \right]} \quad (24)$$

O valor do deslocamento do plano zero do perfil do vento ( $d$ ) é obtido pelo valor descontado do valor numérico de cada ponto da altura  $z$  em que a curva do perfil da velocidade do vento passa a ser uma reta, com valor máximo de  $R^2$ .

Outra forma de determinar os parâmetros  $z_0$  e  $d$ , ainda segundo Pereira (2000), é através do método gráfico, que se fundamenta no processo de tentativas, plotando-se a velocidade do vento contra  $\ln(z - d)$ . A seguir, procura-se minimizar o somatório dos quadrados dos desvios entre os valores observados e estimados da velocidade do vento nos diversos níveis, através de valores dado para  $d$  até o perfil do vento linearizar. Nesse ponto, ao linearizar-se a reta,  $d$  será determinado e  $z_0$  será dado pela intercepção da reta com a ordenada  $Y$  do gráfico. A inclinação da reta ( $b$ ) determina o valor da velocidade  $u^*$ , conforme (21).

Nesse trabalho, os valores das propriedades aerodinâmicas da cultura de cana-de-açúcar, velocidade característica do escoamento  $u^*$ , parâmetro de rugosidade aerodinâmica  $z_0$  e deslocamento do plano zero do perfil do vento  $d$ , foram determinados utilizando-se perfis de vento em horários pré-selecionados. Utilizou-se tanto o método estatístico como o método gráfico por tentativas, após identificados os horários em que a atmosfera encontrava-se em condições de neutralidade. No total, foram selecionados 18 horários, durante todo o período de crescimento da cultura, obtendo-se assim o comportamento e a evolução dessas propriedades ao longo do ciclo, em função da altura do dossel vegetativo.

Na superfície da Terra, poucas superfícies naturais são planas e poucas podem ser consideradas homogêneas e nenhuma é infinita. Na interface entre duas superfícies distintas, ocorre mudança abrupta nas condições do escoamento do ar atmosférico, pois cada condição de rugosidade impõe o desenvolvimento de uma camada limite superficial (Pereira, 2000).

O tamanho dessa camada depende, fundamentalmente, da natureza da superfície, isto é, de sua rugosidade. A espessura de uma camada limite ajustada (CLA) à nova superfície ( $\delta$ ) aumenta à medida em que se caminha no sentido do escoamento. Pereira (2000) afirma que o conhecimento de  $\delta$  é importante, visto que as medidas dos perfis aerodinâmicos devem estar confinadas aos domínios dessa camada, para que os fluxos sejam representativos da superfície. Essa espessura pode ser dada por:

$$\delta = 0,1(z_0)^{0,2}(X)^{0,8} + d \quad (25)$$

onde  $z_0$  é uma variável característica da superfície, que representa o parâmetro de rugosidade aerodinâmica da superfície;  $X$  é a distância necessária para que as condições descritas acima sejam satisfeitas (m). Denomina-se essa área de “área tampão” ou “fecht”, e sua medida é feita levando-se em consideração a direção da velocidade do vento, ou seja, o vento tem que estar soprando na direção  $X$ ;  $d$  é o deslocamento do plano zero do perfil do vento (m) (Chang, 1968; Rosenberg, 1975; Pereira,2000).

### **3.10. Balanço de energia**

Seja  $P$  uma propriedade escalar qualquer, como temperatura, umidade específica, calor sensível e calor latente. A equação geral do transporte, conforme André (1980) e Cunha (1988).é dada por:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{V}P) - \nabla \bar{j} + G \quad (26)$$

onde  $\vec{\nabla} \cdot (\vec{V}P)$  é a divergência,  $\nabla \bar{j}$  é a difusão e  $G$  a geração. Os termos de difusão e geração geralmente são desprezíveis, comparados aos demais. Logo:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}P) = 0 \quad (27)$$

A equação (27) mostra o vento "empurrando" a propriedade  $P$  nas três direções. Pode-se escrever a mesma equação da seguinte maneira:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{\nabla} h \cdot (\vec{V}hP) + \frac{\partial (wP)}{\partial z} = 0 \quad (28)$$

onde  $\partial P / \partial t$  significa a variação do armazenamento da propriedade no tempo (variação temporal),  $\vec{\nabla} h \cdot (\vec{V}hP)$  corresponde ao fluxo horizontal (divergência) e  $\partial (wP) / \partial z$  é a parte do fluxo vertical (variação vertical). Integrando-se a equação 28, de zero a  $z$ :

$$\int_0^z \frac{\partial P}{\partial t} dz + \int_0^z \vec{\nabla} h \cdot (\vec{V}hP) dz + \int_0^z \frac{\partial (wP)}{\partial z} dz = 0 \quad (29)$$

Para o caso do calor sensível,  $P = H = \rho C_p T$ , o fluxo vertical será:

$$H = \rho c_p w T \quad (30)$$

Logo, substituindo a equação (30) na (29), fica:

$$\int_0^z \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) dz + \int_0^z \vec{\nabla} h \cdot (\vec{\nabla} h \rho c_p T) dz + \int_0^z \frac{\partial}{\partial z} (\rho c_p w T) dz = 0 \quad (31)$$

Considerando-se  $\rho$  e  $c_p$  constantes,

$$\rho c_p \int_0^z \frac{\partial T}{\partial t} dz + \rho c_p \int_0^z \vec{\nabla} h \cdot (\vec{\nabla} h T) dz + \rho c_p \int_0^z \frac{\partial}{\partial z} (w T) dz = 0 \quad (32)$$

Fazendo:

$$\rho c_p \int_0^z \frac{\partial}{\partial z} (w T) dz = H \quad (33)$$

Logo:

$$\rho c_p \int_0^z \frac{\partial T}{\partial t} dz + \rho c_p \int_0^z \vec{\nabla} h \cdot (\vec{\nabla} h T) dz + H = 0 \quad (34)$$

Para o caso do fluxo de calor latente de evaporação,  $P = LE = \rho Lq$ ,  $q$  é a umidade específica e  $L$  é o calor latente de vaporização. Assim,  $\rho Lq = \rho L\varepsilon (e/p)$ . Da equação de estado, sabe-se que  $p = \rho RT$ . Logo, vem que:

$$\rho Lq = \rho L\varepsilon \frac{e}{p} = L\varepsilon \frac{e}{RT} \quad (35)$$

onde  $\varepsilon = mv/ma$  (razão entre o peso molecular do vapor d'água e o peso molecular do ar), equivalente a 0,622 e  $p$  é a pressão atmosférica. Substituindo a equação 35 na equação 29, resulta:

$$\int_0^z \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{L\varepsilon e}{RT} \right) dz + \int_0^z \bar{\nabla}h \cdot \left[ \bar{\nabla}h \left( \frac{L\varepsilon e}{RT} \right) \right] dz + \int_0^z \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{L\varepsilon w}{RT} \right) dz = 0 \quad (36)$$

Fazendo  $L w (\varepsilon e/RT) = LE$ , fluxo vertical de calor latente e sendo  $\varepsilon$ ,  $R$  e  $L$  constantes, tem-se:

$$\frac{L\varepsilon}{R} \int_0^z \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{e}{T} \right) dz + \frac{L\varepsilon}{R} \int_0^z \bar{\nabla}h \cdot \bar{\nabla}h \left( \frac{\bar{\nabla}e}{T} \right) dz + LE \quad (37)$$

Para o balanço, considerando o fluxo saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo ( $S$ ) e energia utilizada na fotossíntese ( $EF$ ), têm-se:

$$R_n + \rho c_p \int_0^z \nabla h (\bar{\nabla}h T) dz + \frac{L\varepsilon}{R} \int_0^z \nabla h \left( \bar{\nabla}h \frac{e}{T} \right) dz + S + H + LE + EF +$$

(I)            (II)                            (III)                            (IV) (V) (VI) (VII)

$$+ \rho c_p \int_0^z \frac{\partial T}{\partial t} dz + \frac{L}{R} \int_0^z \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{e}{T} \right) dz + \rho_c c_c \int_0^z \frac{\partial T}{\partial t} dz = 0 \quad (38)$$

(VIII)                            (IX)                            (X)

Além das simplificações iniciais (equação 26), a outra condição imposta pela equação (38) é que o calor gerado pelo atrito pode ser desprezado. Nessa equação,

pode-se adotar a seguinte convenção de sinais: o fluxo que chega à superfície é positivo e o que sai é negativo. Os termos envolvidos nessa equação têm os seguintes significados: (I) fluxo saldo de radiação; (II) advecção horizontal de calor sensível; (III) advecção horizontal de calor latente; (IV) fluxo de calor no solo; (V) fluxo vertical de calor sensível para a atmosfera; (VI) fluxo vertical de calor latente para a atmosfera; (VII) energia fixada em síntese biológica; (VIII) e (X) variação no armazenamento devido ao calor sensível do ar e da cultura; (IX) variação no armazenamento do calor latente do ar.

Os fluxos divergentes horizontais de calor latente e sensível (advecção) podem ser desprezados, quando a área adotada é suficientemente grande, para evitar os efeitos de borda. Existem várias citações na literatura quanto à relação entre a altura, onde são tomadas as medidas e a extensão em que estas são representativas. Comumente, os estudos micrometeorológicos usam a relação 1/100, verificado pela determinação da camada limite ajustada.

Segundo verificações feitas por André (1980), os termos do armazenamento de calor sensível e latente são desprezíveis em relação ao saldo de radiação. Isso é possível somente para culturas de porte relativamente baixo, como culturas agrícolas em geral. A energia gasta na fotossíntese, representa 1 a 2% do saldo de radiação, quando se trabalha com períodos de um ou mais dias. Deve-se levá-la em consideração para períodos curtos, e desprezá-la para a estação de crescimento. Portanto, desde que se tomem cuidados para minimizar os efeitos da advecção de calor e vapor d'água, para um período de 24 horas, a equação (38) pode ser expressa por:

$$R_n + LE + H + S = 0 \quad (39)$$

que é a chamada equação do balanço de energia, considerando apenas as trocas verticais.

### 3.11. Método do balanço de energia para determinação da evapotranspiração

Os primeiros estudos com a equação do balanço de energia foram feitos por Bowen em 1926, que determinou a razão entre fluxos de calor sensível e latente sobre uma superfície líquida, em função dos gradientes de temperatura ( $dT/dz$ ) e pressão de vapor ( $de/dz$ ). Bowen considerou os coeficientes de difusão turbulenta vertical de calor sensível e de vapor d'água similares (Chang, 1968; Villa Nova, 1973; Rosenberg, 1975; André, 1980; Cunha, 1988; Sedyama, 1996; Prueger et al., 1997; Burba et al. 1999).

A razão entre os fluxos de calor sensível e latente foi denominada de razão de Bowen ( $\beta$ ), isto é:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (40)$$

Substituindo a equação (40) na (39), tem-se as expressões para LE e H, dadas por:

$$LE = \frac{-(Rn + S)}{1 + \beta} \quad \text{para } \beta \neq -1 \quad (41)$$

$$H = \frac{-(Rn + S)}{1 + \frac{1}{\beta}} \quad (42)$$

Tomando as equações básicas do transporte de calor sensível (4) e do transporte de calor latente (8) e considerando-se a teoria da similaridade ( $K_h = K_w$ ), após manipulação têm-se:

$$\beta = \frac{H}{L} = \left( \frac{c_p \rho}{\varepsilon L} \right) \left( \frac{dT}{de} \right) \quad (43)$$

recordando que  $\left( \frac{c_p \rho}{\varepsilon L} \right)$  é o coeficiente psicrométrico ( $\gamma$ ), fica:

$$\beta = \gamma \left( \frac{dT}{de} \right) \quad (44)$$

ou, ainda, em diferenças finitas:

$$\beta = \gamma \left( \frac{\Delta T}{\Delta e} \right) \quad (45)$$

Resulta, então, a equação:

$$\beta = \gamma \left( \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} \right) \quad (46)$$

onde  $T_2$  e  $T_1$  correspondem às temperaturas,  $e_2$  e  $e_1$  as pressões de vapor, médias horárias, ambos em dois níveis observados (subscritos 1 e 2), e  $\gamma$  o coeficiente psicrométrico igual a  $0,66 \text{ mb } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

O cálculo da pressão de vapor d'água do ar ( $e$ ), é obtido pela expressão:

$$e = \frac{UR.e_s}{100} \quad (47)$$

onde UR corresponde à umidade relativa do ar em (%) e  $e_s$  a pressão de saturação do vapor d'água no ar (mb), determinado, em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), por:

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{\frac{a \cdot T}{b+T}} \quad \begin{cases} \text{para } T > 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} a=7,5 \\ b=237,3 \end{array} \right. \\ \text{para } T < 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} a=9,5 \\ b=265,5 \end{array} \right. \end{cases} \quad (48)$$

### 3.12. Método combinado de Penman-Monteith

Todo fluxo possui uma resistência e torna-se importante descrever como uma superfície controla ou responde a esses fluxos. No caso de um cultivo agrícola, Monteith (1975) desenvolveu uma teoria conhecida como teoria da “big leaf” , que considera o dossel da vegetação como se fosse uma única e enorme folha, considerando todas as folhas estão expostas às mesmas condições ambientais. Esse processo tem limitações óbvias, mas produz valores consistentes quando aplicado para medidas de evapotranspiração sobre grande extensão de cultivo (Monteith & Unsworth, 1990; Burman & Pochop, 1994; Pereira et al., 1997;).

Nessa condição, observa-se haver um fluxo entre o estômato e a camada limite das folhas e outro fluxo entre a camada limite da folha e o escoamento atmosférico. O primeiro é controlado pela resistência da cultura à perda de água,

enquanto o segundo é controlado pela resistência aerodinâmica. Ambos são controlados pela demanda atmosférica.

A derivação do método de Penman-Monteith, apresentada abaixo, segue Pereira et al. (1997). Existindo gradientes de pressão de vapor e de temperatura entre a folha e a camada adjacente haverá transpiração, e nesse caso, têm-se:

$$LE_1 = \frac{\rho c_p [e_s(T_o) - e_o]}{\gamma r_c} \quad (49)$$

O dossel está a uma temperatura  $T_o$ , com pressão de vapor  $e_s(T_o)$  e adjacente à "folhona" existe uma camada superficial de ar que está, também, com temperatura  $T_o$ , mas com pressão de vapor  $e_o$ , e isto induz à transpiração. Portanto,  $[e_s(T_o) - e_o]$  representa o déficit de pressão de vapor, entre a superfície da folha e a camada superficial de ar sobre a mesma, e  $r_c$  é a resistência do dossel.

Imediatamente acima desta camada, observa-se existir outra resistência, que é a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor ( $r_{av}$ ) determinando uma densidade de fluxo de vapor d'água igual a:

$$LE_2 = \frac{\rho c_p [e_o - e]}{\gamma r_{av}} \quad (50)$$

onde  $e$  é a pressão de vapor a temperatura do ar ( $T$ ).

Havendo uma diferença de temperatura entre o dossel e o ar, ocorrerá transporte de calor sensível que também é governado pela resistência do ar ( $r_{ah}$ ), isto é,

$$H = \frac{\rho c_p (T_o - T)}{r_{ah}} \quad (51)$$

A tangente à curva de pressão de saturação ( $\Delta$ ) é dada por:

$$\Delta = \frac{[e_s(T_o) - e_s(T)]}{[T_o - T]} \quad (52)$$

tirando o valor de  $(T_o - T)$  de (52) e aplicando na Equação (51):

$$H = \frac{\rho c_p [e_s(T_o) - e_s(T)]}{\Delta r_{ah}} \quad (53)$$

Sendo  $T_o$  a temperatura dentro do estômato, portanto de difícil medição, eliminando-a da equação (53), somando-se e subtraindo  $e_o$  no numerador na equação (53), têm-se:

$$H = \frac{\rho c_p [e_s(T_o) + e_o - e_o - e_s(T)]}{\Delta r_{ah}} \quad (54)$$

ou:

$$H = \frac{\rho c_p [e_s(T_o) - e_o]}{\Delta r_{ah}} + \frac{\rho c_p [e_o - e_s(T)]}{\Delta r_{ah}} \quad (55)$$

Usando a Equação (49) no primeiro termo da equação (55) e, ainda,  $e_o$  da Equação (50), no segundo termo desta mesma equação, resulta:

$$H = \frac{LE_1 \gamma r_c}{\Delta r_{ah}} + \frac{LE_2 \gamma r_{av}}{\Delta r_{ah}} - \frac{\rho c_p [e_s(T) - e]}{\Delta r_{ah}} \quad (56)$$

Admitindo  $LE_1 = LE_2 = LE$ , e considerando as resistências iguais, ou seja,  $r_{av} = r_{ah} = r_a$ , a equação (56) reduz-se a:

$$H = LE \frac{\gamma}{\Delta} \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right) - \frac{\rho c_p [e_s(T) - e]}{\Delta r_a} \quad (57)$$

Aplicando (57) na equação do balanço de energia na sua forma reduzida (equação 39), têm-se:

$$Rn - S = LE \frac{\gamma}{\Delta} \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right) - \frac{\rho c_p [e_s(T) - e]}{\Delta r_a} + LE \quad (58)$$

ou, após manipulação de termos:

$$LE = \frac{\Delta(Rn - S) + \rho c_p \frac{[e_s(T) - e]}{r_a}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (59)$$

onde  $[e_s(T) - e]$  é o déficit de saturação à temperatura do ar (T). O valor numérico de  $\Delta$  é dado por Burman & Pochop (1994):

$$\Delta = \frac{2503}{(T + 273,3)^2} \exp\left[\frac{17,27.T}{(T + 237,3)}\right] \quad (60)$$

onde T é a temperatura do ar em °C.

Para a escala de tempo de um dia, a equação (59) fica:

$$LE = \frac{\Delta(Rn - S) + 86400c_p\rho \frac{[e_s(T) - e]}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (61)$$

onde LE é o fluxo de vapor ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), Rn é o saldo de radiação sobre a comunidade vegetal ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), S é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ),  $\Delta$  é a tangente à curva da pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\rho$  é a densidade do ar ( $1,275\text{kg.m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante ( $1,04.10^{-3}\text{MJ.kg}^{-1}.\text{}^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  o coeficiente psicrométrico;  $[e_s(T) - e]$  é a diferença entre a pressão de saturação de vapor e a pressão real do vapor (kPa),  $r_a$  é a resistência aerodinâmica para difusão de calor e vapor ( $\text{s.m}^{-1}$ ) e  $r_c$  a resistência do dossel vegetativo ( $\text{s.m}^{-1}$ ). A evapotranspiração (ET), em  $\text{mm.t}^{-1}$ , é calculada dividindo LE pelo calor latente de evaporação (L) ( $2,356\text{MJ.kg}^{-1}$ ). O fator 86400 converte a unidade de tempo da resistência de segundos para dia.

### 3.13. Determinação das resistências

As resistências são determinadas fazendo-se analogia com a Lei de Ohm, onde o fluxo é diretamente proporcional à diferença de concentração da propriedade e inversamente proporcional à resistência sofrida por essa propriedade ao fluxo (Jensen et al., 1990; Burman & Pochop, 1994). Logo, pode-se tratar o fluxo de transporte de “momentum” de um nível  $z_2$  para outro  $z_1$  como:

$$\tau = \frac{\rho(u_2 - u_1)}{r_a} \quad (62)$$

ou seja, o fluxo do transporte de “momentum” é diretamente proporcional à diferença entre a velocidade do vento entre dois níveis considerados e inversamente proporcional à resistência aerodinâmica ao transporte de “momentum”. Formalmente, a resistência, portanto, pode ser obtida por:

$$r_a = \frac{\rho(u_2 - u_1)}{\tau} \quad (63)$$

Observa-se que essa equação não está apropriada para cálculos, faltando determinar o valor de  $\tau$ . Utilizando-se a equação (20) referente ao perfil logarítmico do vento para vegetação de porte alto, e aplicando-a na (62), tem-se:

$$\tau = \frac{\rho \left( \frac{u^*}{k} \right) \ln \left( \frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right)}{r_a} \quad (64)$$

Fazendo  $z_1 = d + z_o$ , onde  $u(z_1) = 0$ , então a Equação (64) fica:

$$\tau = \frac{\rho \left( \frac{u^*}{k} \right) \ln \left( \frac{z-d}{z_o} \right)}{r_a} \quad (65)$$

Fazendo  $\tau = \rho u^{*2}$  e substituindo em (65), tem-se:

$$u^{*2} = \frac{\frac{u^*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_o} \right) \right]}{r_a} \quad (66)$$

Logo, a resistência aerodinâmica tem a seguinte formulação:

$$r_a = \frac{\left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_o} \right) \right]^2}{k^2 u(z)} \quad (67)$$

Segundo Allen et al. (1989) e Jensen et al. (1990), existem evidências experimentais que  $r_a$  acima de uma cultura agrícola é melhor representada por:

$$r_a = \frac{\left( \ln \frac{z_m - d}{z_{om}} \right) \left( \ln \frac{z_h - d}{z_{oh}} \right)}{k^2 u(z)} \quad (68)$$

onde  $z_m$  é a altura de medição da velocidade do vento (m),  $z_{om}$  é o comprimento de rugosidade da cultura para transporte de "momentum" (m),  $z_h$  corresponde à altura

de medição da umidade do ar ( $m$ ),  $z_{oh}$  é o comprimento de rugosidade da cultura para transporte de vapor e calor sensível ( $m$ ),  $d$  é o deslocamento do plano zero do perfil do vento ( $m$ ),  $k$  é a constante de von Karman (aproximadamente 0,41) e  $u(z)$  a velocidade do vento na altura  $z$ .

Outra formulação usada para determinação da resistência aerodinâmica é a proposta por Monteith & Unsworth (1990), onde a resistência para transporte de uma propriedade atmosférica pode ser descrita em termos de  $r_a$ , resistência à transferência de “momento” e  $r_b$ , uma resistência adicional, para transporte de calor e vapor d’água.

Na derivação da Equação (67), a altura efetiva para a absorção de “momentum” é  $z = d + z_o$ , portanto, o termo  $(z-d)/z_o = 1$ , assim,  $r_a = 0$ . Similarmente, a resistência entre a altura  $z$  acima do solo e a altura aparente  $d + z_o$  na qual ocorre absorção de calor e vapor pode ser escrita como:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{(z-d)}{z_o'}\right]}{ku_*} = \frac{\ln\left[\frac{(z-d)}{z_o}\right]}{ku_*} + \frac{\ln\left[\frac{z_o}{z_o'}\right]}{ku_*} \quad (69)$$

ou seja:

$$r_a = r_a' + r_b \quad (70)$$

sendo  $r_a'$  uma nova resistência aerodinâmica à transferência de “momento” e  $r_b$  uma resistência adicional para calor e vapor d’água, assumindo serem iguais. Valores de  $r_b$  são raramente determinados em experimentos micrometeorológicos. Através da

equação empírica de Thom, conforme Monteith & Unsworth (1990), pode-se estimá-la com adequada aproximação por:

$$r_b = 6,2 u_*^{-0,67} \quad (71)$$

A resistência da cultura pode ser estimada a partir de medidas diretas da resistência estomática média, obtida através de porômetros de difusão ou estimada através do índice de área foliar.

Geralmente, somente a metade superior do dossel denso da cultura é ativo em transferir calor e vapor, da mesma forma em que é a zona de maior absorção do saldo de radiação. A troca de vapor, através dos estômatos dentro do dossel da planta, é governada por processos e resistências semelhantes àqueles para dióxido de carbono e perfis de fluxos gradientes. Em muitos casos, a resistência da cultura,  $r_c$ , para uma cultura de referência adequadamente irrigada, pode ser estimada pela divisão da resistência mínima diária ( $100s.m^{-1}$ ) da superfície para uma única folha ( $r_c$ ) pela metade do índice de área foliar do dossel (Allen et al., 1989; Jensen et al., 1990), ou seja:

$$r_c = \frac{100}{0,5IAF} \quad (72)$$

### 3.14. Análise de crescimento da cultura

Para avaliação de densidade de plantas na área experimental, foram contadas a quantidade de touceiras e plantas por touceiras em 10 fileiras aleatórias de 10 m lineares, ou seja, sendo o espaçamento entre linhas de 1 m, a área

amostral foi de 10 m<sup>2</sup>. Obteve-se, em média, 24,12 plantas por metro quadrado, totalizando uma população de 241.200 plantas por hectare na área experimental.

Considerou-se, neste trabalho, três diferentes etapas do desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar (cana-soca). Primeira etapa: afilhamento e estabelecimento da cultura (da emergência dos brotos ao final do afilhamento, com aproximadamente 125 dias após o corte (DAC); segunda etapa: período de grande crescimento, do final do afilhamento ao início de acumulação da sacarose, ou seja, dos 125 a 300 DAC e a terceira etapa: maturação ou formação da produção, de intensa acumulação de sacarose nos colmos, após os 300 DAC.

#### **3.14.1. Determinação do fator de correção para folhas de cana-de-açúcar**

Com o objetivo de determinar uma equação que possibilitasse, a partir de medidas lineares de comprimento e maior largura, estimar com precisão a área foliar total das folhas de cana-de-açúcar, foram efetuadas amostragens específicas. Essas foram tomadas no dia 07 de maio de 1998, quando a altura do colmo das plantas era de aproximadamente 53 cm. Foram feitas medições lineares de seus maiores comprimentos (C) sobre a nervura principal, desde o ponto de inserção da bainha até o ápice da folha e suas maiores larguras (L) na posição mediana do limbo, em todas as folhas de três plantas amostradas aleatoriamente dentro da área de estudo.

A área foliar específica (AFE) foi obtida através de retângulos foliares de área conhecida, os quais foram levados à estufa a 75°C até massa constante, obtendo-se, a massa da matéria seca.

Determinou-se, então, a área foliar específica (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) através da seguinte expressão:

$$AFE = \frac{A}{PMA} \quad (73)$$

sendo A a área dos retângulos foliares (cm<sup>2</sup>) e PMA o peso da matéria seca dos retângulos foliares (g).

Para a obtenção da área foliar da planta, determinou-se o peso da matéria seca das folhas em que foram feitas as medidas lineares. A área foliar dessas plantas foi determinada multiplicando o valor da área foliar específica pelo peso de matéria seca total das folhas ou seja:

$$AF = AFE.PMS \quad (74)$$

onde AF é a área foliar da planta (cm<sup>2</sup>) e PMS o peso da matéria seca das folhas (g).

Para a obtenção do fator de correção (FC) foram plotados os valores de área foliar da planta em função do produto das respectivas medidas de comprimento e largura das folhas como variáveis independentes. Através de uma equação de regressão, passando pela origem, obteve-se o FC que nada mais é do que o respectivo parâmetro **b** da equação.

### 3.14.2. Determinação do índice de área foliar (IAF)

Para determinação dessa variável, foram efetuadas amostragens quinzenais, durante todo ciclo da cultura, nas linhas destinadas à amostragem. Para determinação da altura e da área foliar, as plantas foram marcadas para acompanhar seu desenvolvimento. Foram marcadas cinco plantas em cada linha de

amostragem, totalizando uma amostra de 20 plantas. As amostragens foram feitas sempre nas mesmas plantas, onde foram medidos o comprimento e a largura de cada folha, obtendo-se, assim, a área foliar média por planta. Multiplicando-se os valores do comprimento e largura pelo fator de correção, obtido anteriormente, obteve-se a área foliar média por planta e, por conseguinte, por amostragem.

De posse da área foliar (AF) média de cada planta, determinou-se o IAF de acordo com a equação:

$$IAF = \frac{AFP}{Asolo} \quad (75)$$

sendo AFP a área foliar média de uma planta (cm<sup>2</sup>) e Asolo a área de terreno ocupada por uma planta que, no nesse caso, foi de 415 cm<sup>2</sup>.

### **3.14.3. Altura do colmo e do dossel vegetativo**

A medida da altura do colmo foi feita em cada planta marcada, também quinzenalmente, nos dois ciclos. Cada medida foi tomada da superfície do solo até a última folha expandida da planta.

A altura do dossel vegetativo é uma variável necessária em estudos micrometeorológicos, que está relacionada com os parâmetros aerodinâmicos, sendo diferente da altura do colmo. Foram feitas cinco amostragens de alturas de colmo concomitantemente com altura de dossel durante o período de 1º de julho a 1º de setembro de 1999, intercaladas de quinze dias. Foi ajustada uma expressão para a altura do dossel em função da altura de colmo das plantas.

#### 3.14.4. Peso de matéria seca das plantas

Essa variável foi observada apenas durante o ciclo da cana-soca de 1998/99. Por ser um método destrutivo, o peso da matéria seca da parte aérea das plantas de cana-de-açúcar foi obtido retirando-se 10 plantas, escolhidas aleatoriamente, no dia 15 de dezembro de 1998, portanto quando a planta estava com 80 dias após o corte, a 16 de setembro de 1999, totalizando 19 amostragens durante todo ciclo vegetativo da planta.

As plantas foram levadas ao Laboratório de Solos do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, onde foram separadas folhas, bainhas e colmos, os quais foram colocados em sacos separadamente e levados à estufa a 75°C até obtenção de massa constante.

#### 3.14.5. Taxas de crescimento

Com os dados do peso da matéria seca e área foliar foi calculada a taxa de crescimento relativo (TCR) de acordo com a seguinte formulação proposta por Radford (1967), Reis & Müller (1979) e Lucchesi (1984):

$$\text{TCR} = \frac{\ln(\text{MST}_2) - \ln(\text{MST}_1)}{t_2 - t_1} \quad (76)$$

onde MST corresponde ao peso de matéria seca total da parte aérea da planta (g) e  $t_2 - t_1$  o intervalo de tempo entre duas amostragens (dias). A unidade é expressa em  $\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ .

A formulação utilizada para o cálculo da taxa assimilatória líquida (TAL) foi a proposta por Hunt (1978):

$$TAL = \left[ \frac{(MST_2) - (MST_1)}{AF_2 - AF_1} \right] \left[ \frac{\ln(AF_2) - \ln(AF_1)}{15} \right] \quad (77)$$

onde AF é a área foliar (cm<sup>2</sup>). Os subscritos 1 e 2 correspondem ao intervalo entre as amostragens e 15, os dias entre as amostragens. A unidade é expressa em g.cm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

### 3.14.6. Eficiência de utilização da radiação solar

A eficiência na utilização da radiação solar ( $\eta$ ), nesse caso usando o saldo de radiação (Long, 1934; Chang, 1971; Lucchesi 1984), é dada por:

$$\eta = \frac{Eu}{Ed} * 100(\%) \quad (78)$$

onde Eu é a energia utilizada e Ed a energia disponível no meio. Para o caso da cana-de-açúcar, a energia utilizada (Eu) é dada por:

$$Eu = (MST).3949 \quad (79)$$

onde MST é o peso da matéria seca total acumulada na parte aérea da planta durante todo o ciclo (kg.m<sup>-2</sup>) e 3949 corresponde ao valor calórico da matéria seca (cal.g<sup>-1</sup>) para cana-de-açúcar (Long, 1934). A energia disponível (Ed) no meio é dada por:

$$Ed = N^{\circ}D * Rn \quad (80)$$

onde  $N^{\circ}D$  é o número de dias durante o ciclo e  $R_n$  o saldo de radiação médio durante o ciclo ( $MJ\ m^{-2}.dia^{-1}$ ).

### 3.15. Balanço Hídrico

Com o objetivo de identificar e quantificar os períodos de deficiências e excedentes hídricos ocorridos durante os dois ciclos da cana-de-açúcar (1997/98 e 1998/99) utilizou-se o balanço hídrico diário seqüencial, conforme Thornthwaite-Mather (1955), com a ETP calculada pelo método original de Penman (Berlato e Molion, 1981). Foram calculados balanços hídricos para o período de junho de 1997 a setembro de 1999.

Além das características de retenção de água no solo, com valores médios representativos da área experimental, levou-se em consideração, também, as características do sistema radicular da cultura, ou seja, a profundidade efetiva do sistema radicular que concentra cerca de 70% das raízes. Conforme Câmara (1993), cerca de 70% das raízes de cana-de-açúcar se concentram nos primeiros 50cm do solo, constituídas por raízes tipicamente fibrosas, com a presença de raízes cordões bem desenvolvidas, penetrando o interior do solo além de 150 cm de profundidade. Assim, o valor da capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) é dado por (Bergamaschi, 1992):

$$CAD = \frac{(U_{cc} - U_{pmp})}{100} * d_g * H' \quad (81)$$

Sendo, a CAD em milímetros;  $U_{cc}$  e  $U_{pmp}$ , as umidades gravimétricas (%) na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, respectivamente;  $H'$ , a

profundidade efetiva do sistema radicular (mm) e  $d_g$  a densidade global do solo. Os dados meteorológicos para o cálculo do balanço hídrico diário foram obtidos do banco de dados MICROMA.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Condições meteorológicas e hídricas durante o período do experimento**

As condições termo-hídricas normais da região Litoral Centro da zona canavieira do estado de Alagoas estão apresentadas na Tabela 1. Pode-se observar que existem, nessa região, dois períodos bem característicos em termos de condições hídricas, um com deficiência de 499 mm de setembro a fevereiro, e outro com excedente hídrico de 538 mm, de abril a agosto. Observa-se que não existe grande amplitude térmica durante o ano, com médias mensais extremas de 23,7°C e 27,2°C. De acordo com Câmara & Oliveira (1993), essas condições térmicas não são limitantes para a cultura da cana-de-açúcar na região.

Para caracterizar as condições meteorológicas e hídricas do período experimental, foram levados em consideração os elementos que mais afetam o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Entre eles, destaca-se a precipitação pluvial, radiação solar e temperatura, bem como o balanço hídrico. Procurou-se, sempre, analisar as variáveis em função da idade das plantas, determinada pelos dias após o corte (DAC) e em função da fenologia média da planta.

TABELA 1. Elementos do balanço hídrico climático da região Litoral Centro da zona canavieira do estado de Alagoas, obtidos através do método de Thornthwaite-Mather (1955), com capacidade de água disponível (CAD) no solo de 75 mm.

MÊS	Temperatura Média (°C)	Precipitação (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
JAN	27,2	49	190	49	141	0
FEV	27,0	112	157	112	45	0
MAR	27,1	187	158	158	0	0
ABR	26,3	262	117	117	0	99
MAI	25,5	218	105	105	0	113
JUN	24,6	252	94	94	0	158
JUL	23,7	218	95	95	0	123
AGO	23,9	156	111	111	0	45
SET	24,4	106	128	126	2	0
OUT	25,3	90	166	126	40	0
NOV	26,4	41	181	57	124	0
DEZ	26,9	42	192	45	147	0
ANO	25,7	1733	1694	1195	499	538

Fonte: Seção de Agrometeorologia do Campus Delza Gitai/UFAL. ETP corresponde a evapotranspiração potencial, ETR a evapotranspiração real, DEF a deficiência hídrica e EXC o excedente hídrico.

Os valores da precipitação pluvial mensal durante os dois períodos do experimento (1997/98 e 1998/99) são apresentados na Figura 5.

O total acumulado da precipitação pluvial, durante o ciclo de setembro de 1997 a agosto de 1998, foi superior ao do ciclo de setembro de 1998 a agosto de 1999, com 1061mm e 943mm, respectivamente. Contudo, a média climatológica da precipitação pluvial é de 1733mm (Tabela 1). Portanto, ambos os ciclos tiveram chuvas bem abaixo das normais climatológicas. Foram anos de El Niño, reduções de 40% e 46%, respectivamente. O período de maior concentração de precipitação pluvial foi de abril a agosto, com 78% e 67% do total anual para 1997/98 e 1998/99, respectivamente, sendo maio a julho o período mais chuvoso. Nesse trimestre, a cana-de-açúcar encontrava-se, em ambos os ciclos, em pleno crescimento vegetativo, favorecendo, assim, um adequado atendimento da demanda hídrica da cultura. O período de maior estiagem ocorreu de setembro a

março de 1997/98 e de setembro a abril de 1998/99. Essas estiagens, coincidiram, em ambos os ciclos, com a formação do "stand" do canavial, no afilhamento e no início do crescimento, considerados críticos para a cana-de-açúcar.

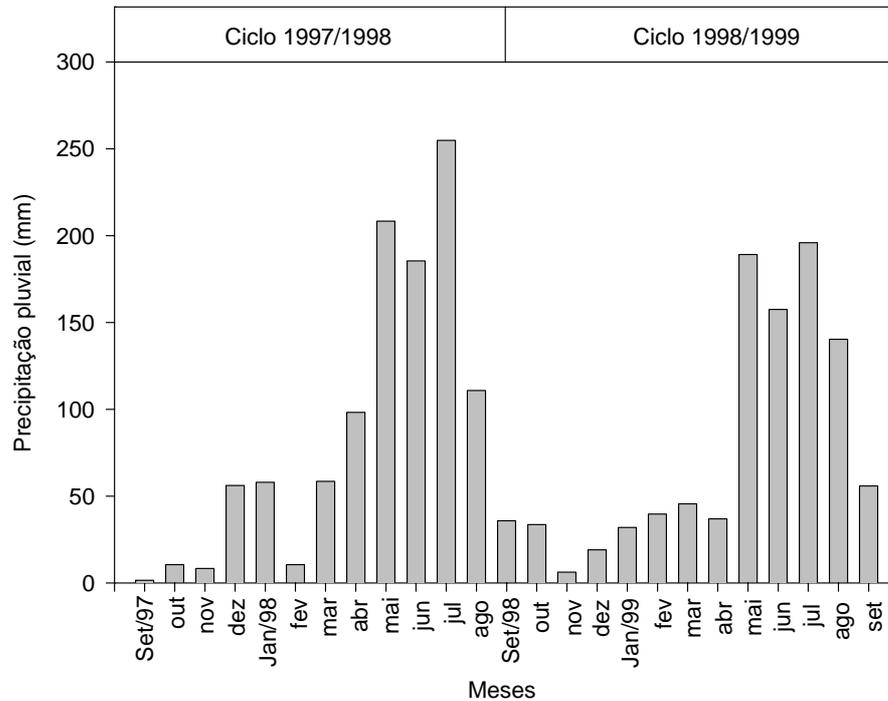


FIGURA 5. Precipitação pluvial mensal observada durante os períodos de crescimento da cultura de cana-de-açúcar. Pilar, AL. Fonte: CINAL (Companhia Industrial de Alagoas).

A Figura 6 apresenta os desvios da precipitação pluvial mensal observada em relação à média climatológica, durante o período de crescimento da cultura nos anos agrícolas 1997/98 e 1998/99. Observa-se que ambos os ciclos caracterizaram-se como anos secos, com anomalias negativas em praticamente todos os meses. Apenas nos meses de dezembro, janeiro e julho do ano 1997/98 houve anomalias positivas, refletindo condições mais favoráveis, principalmente em julho, mês correspondente ao final do período crítico da planta em relação à água. Pela fenologia da planta, verificou-se, em praticamente todo o período

crítico, que é o de crescimento vegetativo, houve desvios negativos de precipitação pluvial. Porém, o ano de 1998/99 se destacou com valores negativos muito elevados em pleno crescimento vegetativo, o que provocou menor desenvolvimento da planta de cana-soca desse ciclo, como será mostrado adiante. Nesse ano agrícola, houve anomalias negativas durante todo ciclo da planta, com valores de até 225 mm em pleno quadrimestre chuvoso, como foi o caso do mês de abril de 1999.

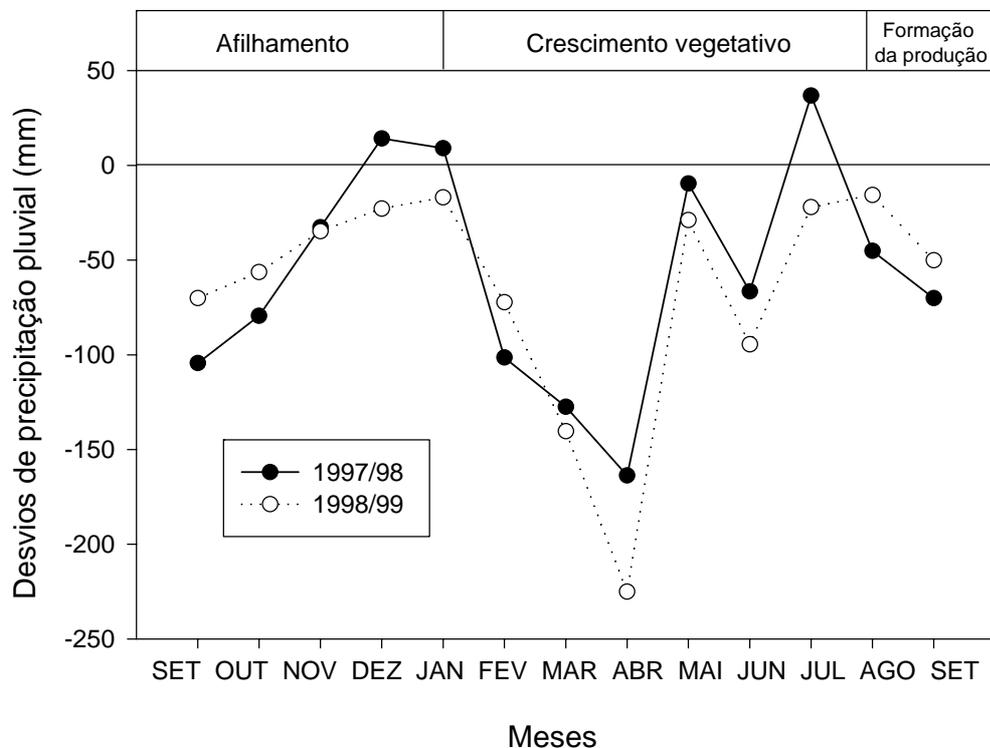


FIGURA 6. Desvios da precipitação pluvial mensal em relação à média climatológica, durante os períodos de crescimento da cultura de cana-de-açúcar. Pilar, AL. Fonte: CINAL - Companhia Industrial de Alagoas e UFAL - Universidade Federal de Alagoas/Campus Delza Gital.

As Figuras 7 e 8 mostram valores diários de precipitação pluvial e saldo de radiação para o período que abrange o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar. Observa-se, na Figura 7 que, a partir dos 200 DAC, início do quadrimestre chuvoso, a magnitude dos valores de saldo de radiação decresce. O mesmo

comportamento pode ser verificado na Figura 8, para o período de crescimento da cana-de-açúcar, no ciclo 1998/99.

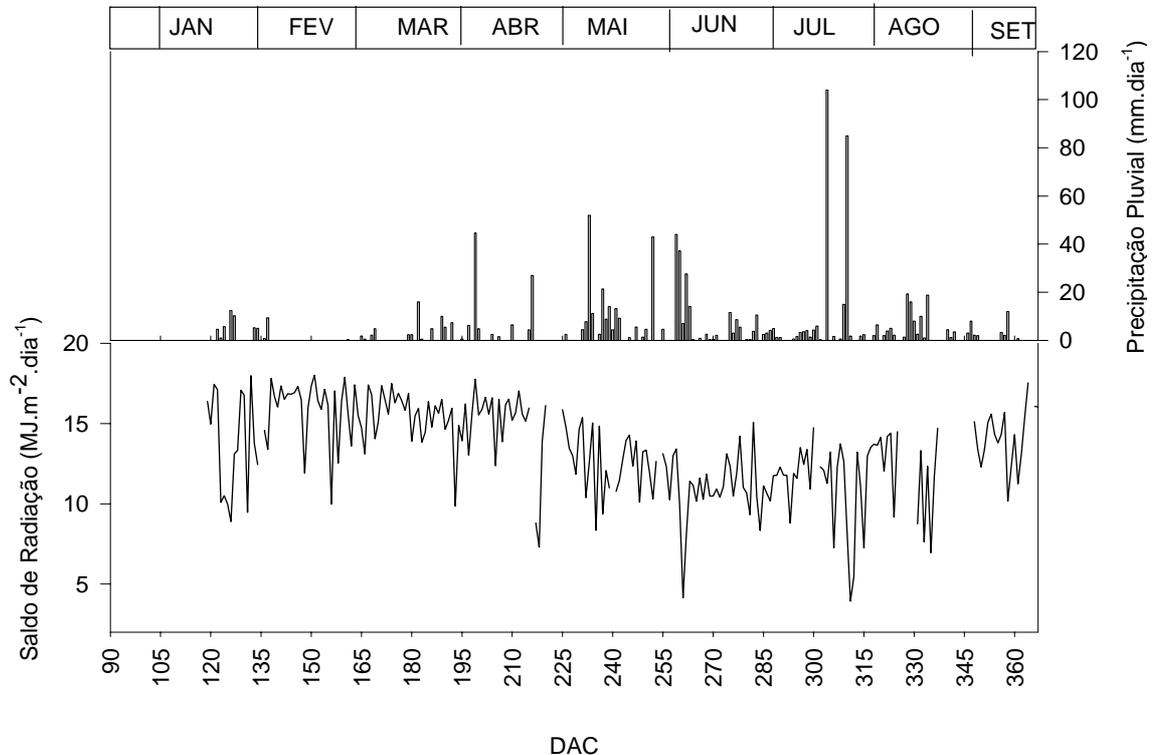


FIGURA 7. Precipitação pluvial (mm.dia<sup>-1</sup>) e saldo de radiação (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>), em função de dias após o corte (DAC), 1998 (ciclo 1997/98). Pilar, AL.

Observa-se que, durante o ano de 1998 (Figura 7), a magnitude dos valores do saldo de radiação (Rn) foram, em média, maiores do que no ano de 1999 (Figura 8). O saldo de radiação, para o período de crescimento da cana-de-açúcar, do ciclo 1997/98, esteve compreendido entre 18,01MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, aos 151 DAC (16/02/98) e 3,93MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, aos 311 DAC (26/07/98). Para o período de crescimento da cana-de-açúcar do ciclo 1998/99, Rn esteve compreendido entre 18,74MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, aos 110 DAC (14/01/99) e 1,54MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, aos 250 DAC (03/06/99).

Essa amplitude de variação do saldo de radiação esteve relacionada com a precipitação pluvial ocorrida no mesmo período. Pode-se observar, nas Figuras 7 e 8, que os limites inferiores ocorreram durante o quadrimestre chuvoso, em dias com precipitação elevada, enquanto os limites superiores ocorreram durante a estação seca, em dias sem ocorrência de precipitação.

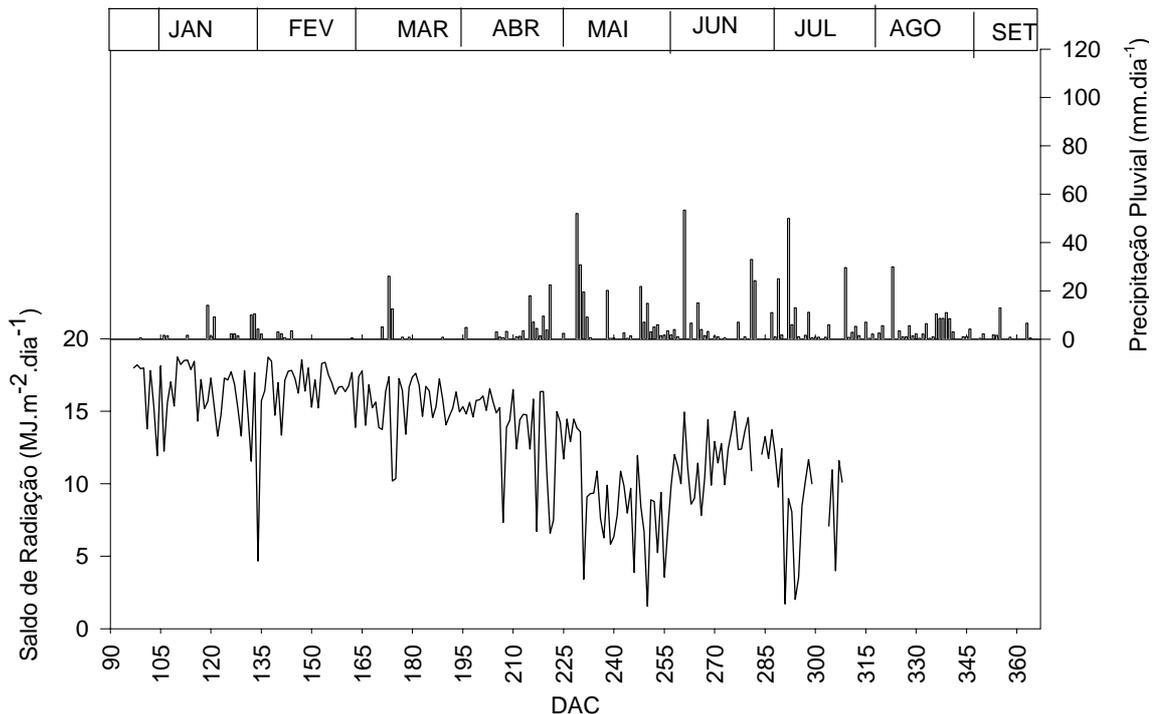


FIGURA 8. Precipitação pluvial ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) e saldo de radiação ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), em função de dias após o corte (DAC), 1999 (ciclo 1998/99). Pilar, AL.

A Figura 9 apresenta as médias diárias de temperatura do ar durante os anos de 1998 e 1999 em função de dias após o corte de cada ciclo. Observa-se que, em 1998, foram observadas temperaturas diárias mais elevadas, em relação a 1999, em praticamente todo ano, concordando com os dados de saldo de radiação. Em 1998, as médias diárias variaram entre  $21,1^{\circ}\text{C}$  a  $28,5^{\circ}\text{C}$  ( $7,4^{\circ}\text{C}$  de amplitude) enquanto, em 1999, os extremos foram de  $21,2^{\circ}\text{C}$  a  $27,9^{\circ}\text{C}$  ( $6,7^{\circ}\text{C}$  de amplitude). Observa-se, também, que essas faixas de temperatura do ar,

encontradas em ambos os anos, estiveram próximas à faixa considerada mais favorável ao processo de crescimento vegetativo ( $25^{\circ}\text{C}$  e  $30^{\circ}\text{C}$ ). Apesar de terem sido observadas temperaturas do ar inferiores ao limite inferior ideal, essa variável meteorológica não afeta o rendimento da cana-de-açúcar na região.

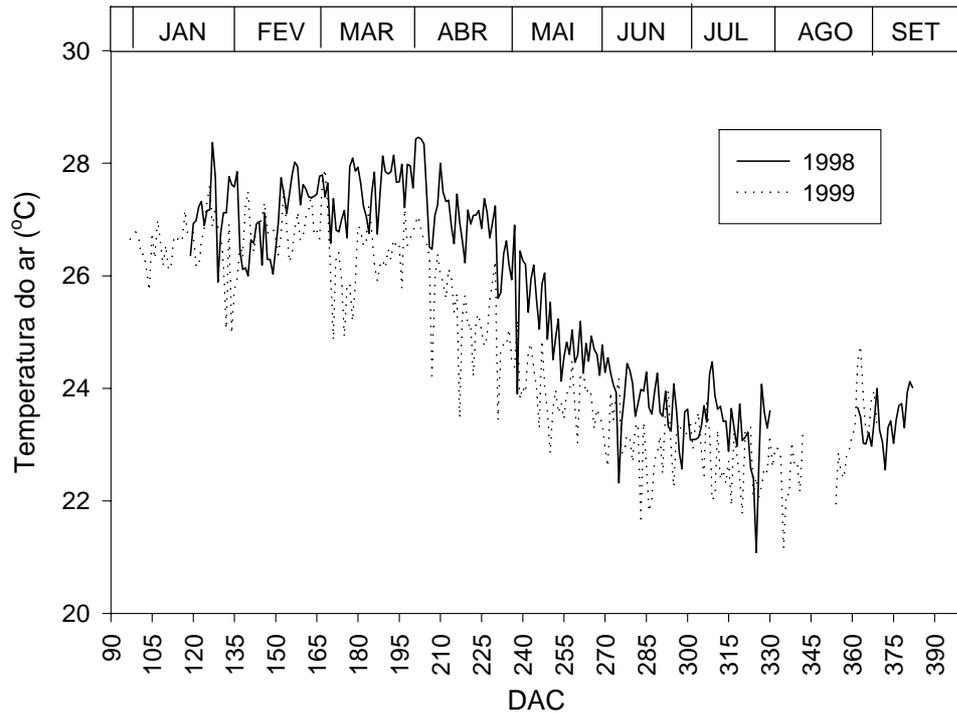


FIGURA 9. Temperatura diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função de dias após o corte (DAC), 1998 e 1999 (ciclos 1997/98 e 1998/99, respectivamente). Pilar, AL.

A Figura 10 apresenta as velocidade do vento diária medida a 2,24 e 9,69m em função de dias após o corte no ano de 1999 (ciclo 1998/99). Foram observadas velocidade do vento mais elevada no período inicial do ciclo até aproximadamente 180 DAC, correspondente ao período de verão na região. Os valores observados na altura de 9,69m variaram entre  $2,1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $5,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  enquanto, na altura de 2,24, os extremos foram de  $1,1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $3,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . A partir dos 180 DAC até o final do ciclo observa-se uma diminuição considerável da velocidade do vento. Os valores observados nesse período na altura de 9,69m

variaram entre  $1,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $3,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  enquanto, na altura de 2,24, os extremos foram de  $0,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $1,8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

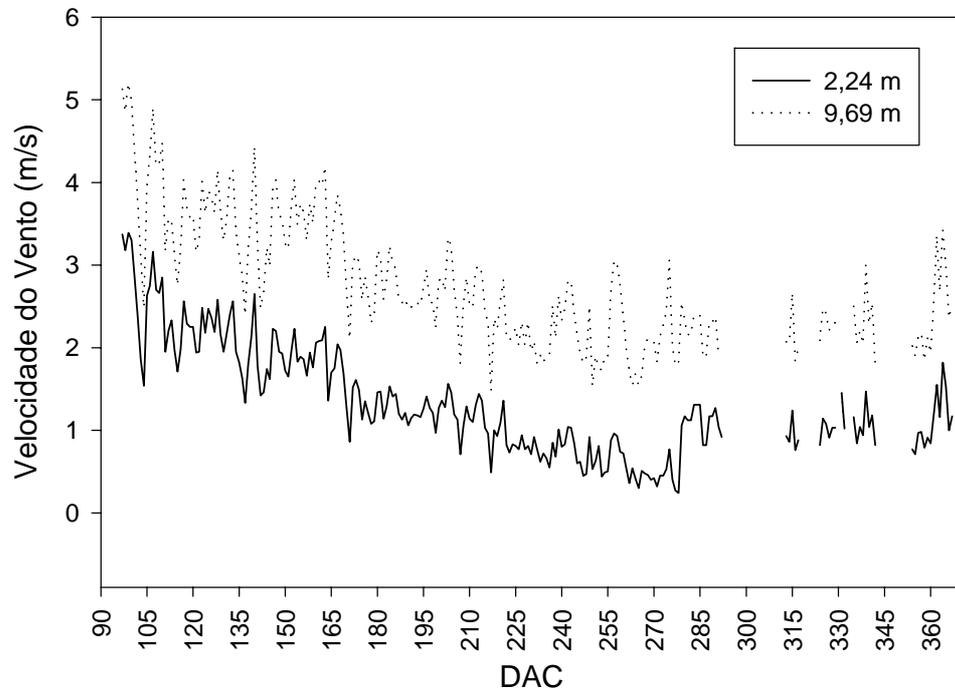


FIGURA 10. Velocidade do vento diária (m/s) medida a 2,24 e 9,69m em função de dias após o corte (DAC), 1999 (ciclo 1998/99). Pilar, AL.

Observa-se na Figura 11A e 12A que, somente a partir dos 220 DAC, a cultura efetivamente, teve 75% ou mais de sua demanda hídrica atendida. Houve, também, períodos em que o atendimento da demanda hídrica esteve próximo a zero, coincidindo com o período crítico da cana-de-açúcar, podendo ter influenciando no desenvolvimento da planta.

Figura 11B e 12B mostram valores diários de deficiência e excesso hídricos na região de estudo, durante os ciclos 1997/98 e 1998/99, respectivamente. Verifica-se que a área de estudo, em ambos os ciclos, foi caracterizada por dois períodos distintos, apresentando deficiência hídrica do

início do ciclo até aproximadamente 230 DAC e um período com excedente hídrico após essas datas até o final do ciclo.

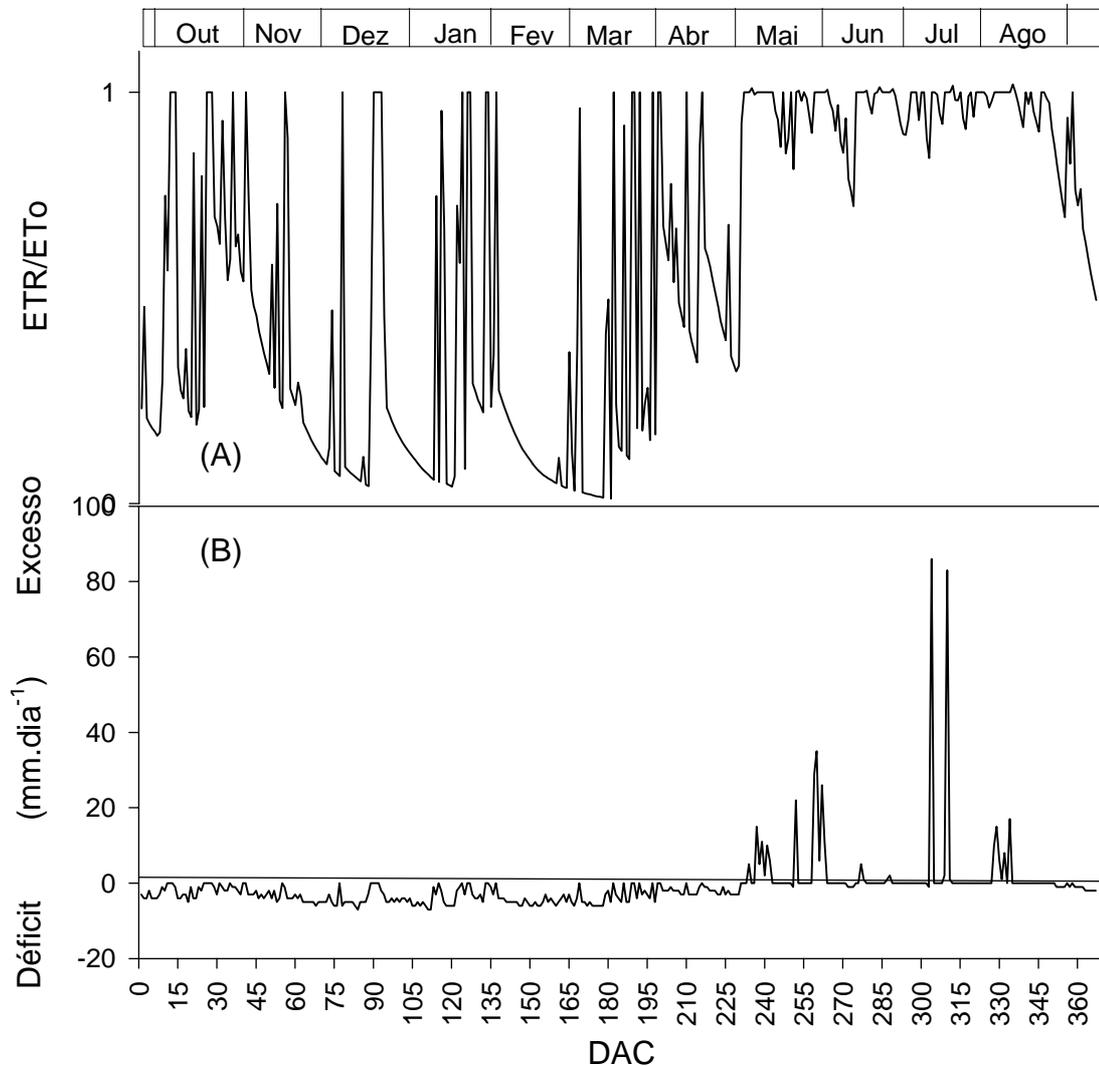


FIGURA 11. Razão entre a evapotranspiração real e de referência (ETR/ETo) (A) e deficiência e excesso hídricos (B) em função de dias após o corte (DAC). Ciclo1997/98. Pilar, AL.

No ano 1998/99, apesar do total de chuvas ter sido menor do que em 1997/98, os períodos de excessos foram distribuídos mais uniformemente ao longo do ciclo (Figura 12B). Porém, com excedentes menores, chegando ao máximo de 46 mm aos 293 DAC, enquanto em 1997/98 (Figura 11), os excessos

foram superiores, chegando a 86 mm aos 304 DAC, porém em intervalos mais concentrados em menores períodos (figura 11B).

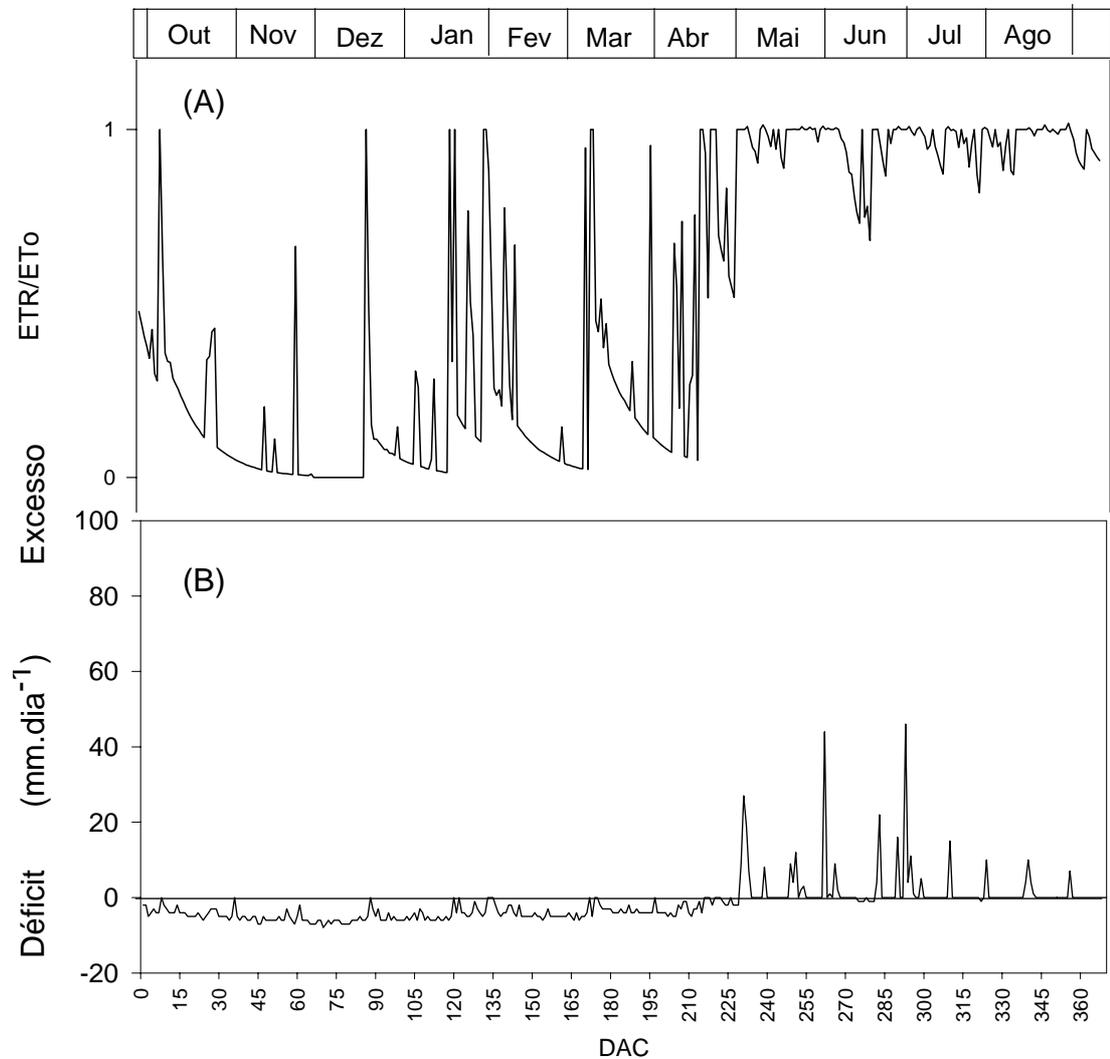


FIGURA 12. Razão entre a evapotranspiração real e evapotranspiração de referência (ETR/ETo) (A) e deficiência e excesso hídricos (B) em função de dias após o corte (DAC), no ciclo1998/99. Pilar, AL.

Após análise das condições meteorológicas e hídricas durante o período do experimento, foi selecionado um período, denominado "período potencial" com a finalidade de comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração. O critério de escolha foi a cobertura completa do solo, com IAF acima de 4 e sem

deficiência hídrica no solo. Esse período potencial está compreendido entre 14/04/1999 (200 DAC) e 03/07/1999 (280 DAC).

## 4.2. Parâmetros de crescimento da planta

### 4.2.1. Altura de colmos

Os valores de altura do colmo (hc) das plantas, em função de dias após o corte (DAC), durante os ciclos 1997/98 e 1998/99, estão representados na Figura 13. Observa-se o crescimento diferenciado do colmo das plantas de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante a soca (1997/98) e a ressoca (1998/99).

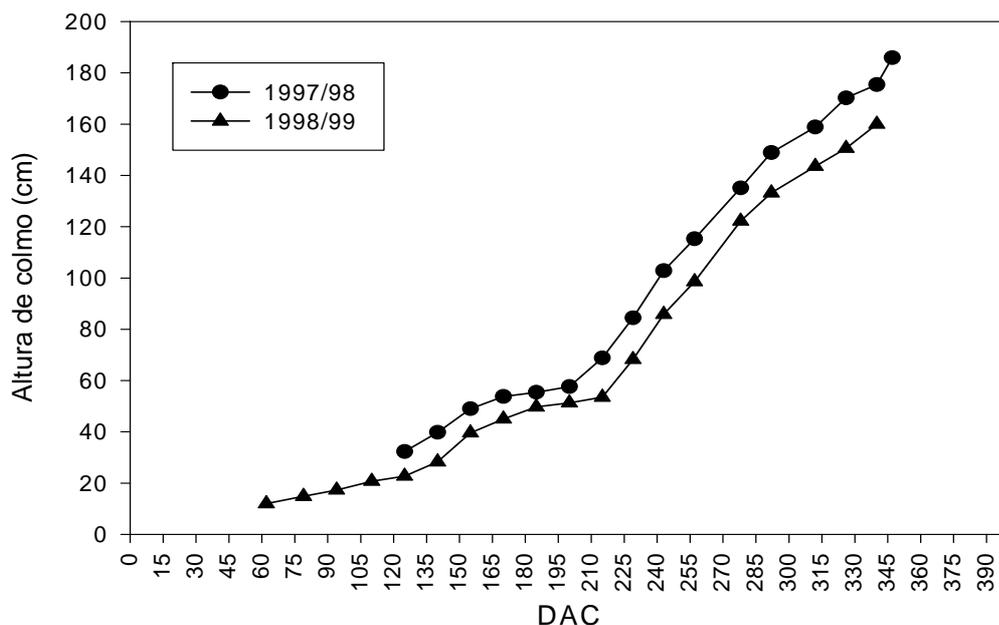


FIGURA 13. Altura de colmo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC) nos ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.

A diferença de crescimento pode ser atribuída, em parte, à uma maior restrição hídrica no ano 1998/99, que apresentou menor precipitação pluviométrica em relação a 1997/98 (Figuras 7 e 8) e pelas características intrínsecas da planta. Por ser uma ressoca, naturalmente, já apresentaria menos

reservas nutricionais, afetando o seu vigor vegetativo e resultando em menor crescimento. Teruel (1995) observou comportamento semelhante com cana-de-açúcar.

#### 4.2.2. Estimativa da altura do dossel

A Figura 14 apresenta a relação entre a altura do dossel (h) e a altura do colmo de plantas de cana-de-açúcar. Verifica-se alta correlação, evidenciando a possibilidade de estimativa da altura do dossel com base na altura de colmo, tendo em vista ser esta última uma medida mais fácil de se obter no campo, especialmente no final do ciclo.

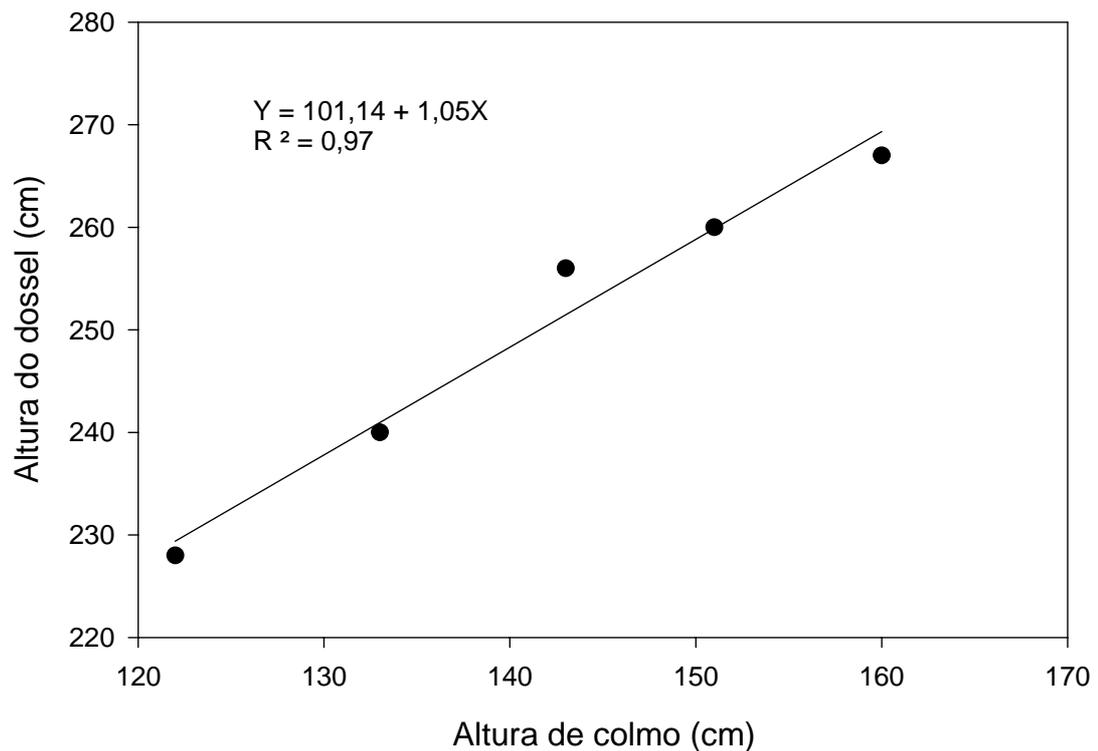


FIGURA 14. Relação entre a altura do dossel e a altura do colmo de plantas de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL, 1999.

#### 4.2.3. Fator de correção para estimativa da área foliar de cana-de-açúcar.

A Figura 15 mostra a relação entre área foliar ( $\text{cm}^2$ ) e o produto entre comprimento e largura ( $\text{cm}^2$ ). Observa-se que a equação simplificada passando pela origem foi estatisticamente significativa a 1%, com coeficiente de determinação  $R^2=0,88$ , mostrando a possibilidade de se estimar a área foliar dessa cultura, medindo-se apenas o comprimento e largura das folhas. Esse método simples pode ser usado quando não há disponibilidade de equipamento de medição direta da área foliar como, por exemplo, o planímetro eletrônico.

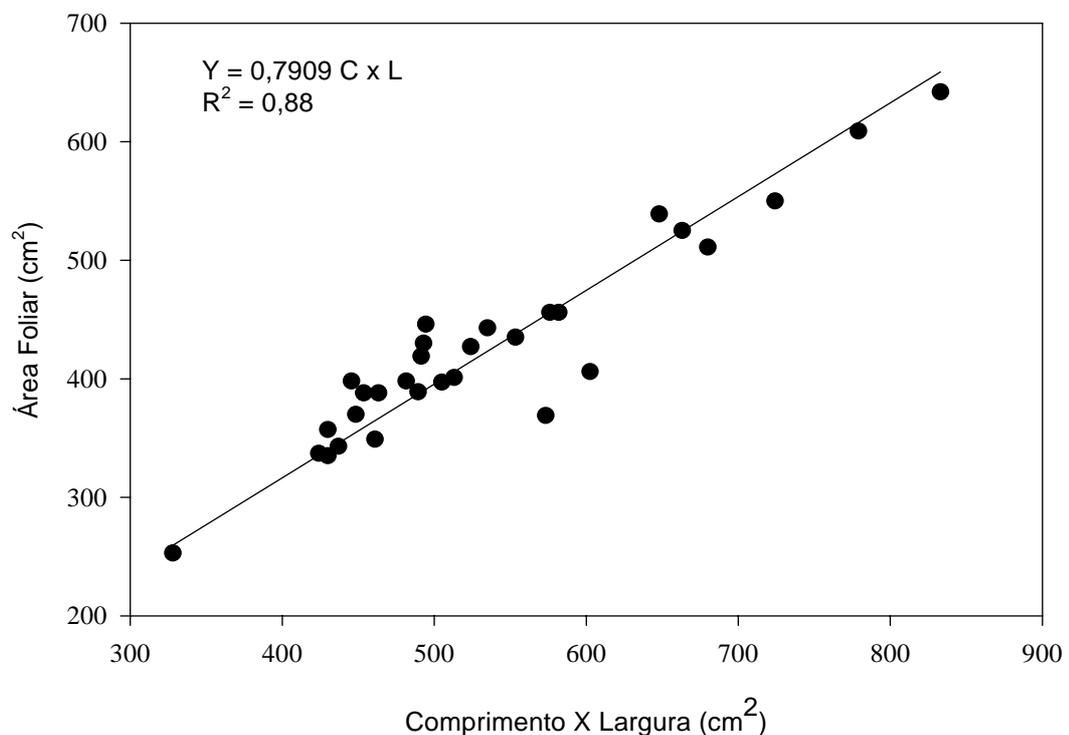


FIGURA 15. Relação entre área foliar e o produto entre comprimento e largura, para obtenção de fator de correção (FC) para folhas de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL.

O FC obtido foi de 0,7909, próximo ao usado por Cunha (1988) para milho (0,75), cuja geometria foliar é semelhante à da cana-de-açúcar. Da mesma forma, Sestak et al. (1971) obtiveram FC de 0,85 para folhas lanceoladas. Portanto, essa

metodologia pode ser empregada para a cana-de-açúcar, apresentando a vantagem de ser um método não-destrutivo.

#### 4.2.4 - Índice de área foliar (IAF)

Os valores do IAF, ao longo do ciclo da cultura, são apresentados na Figura 16. Observa-se que as curvas de crescimento do índice de área foliar, para os dois ciclos são semelhantes, apresentando uma parte inicial de crescimento lento, seguida de uma etapa de crescimento rápido, um período de estabilização e, finalmente, uma tendência a decréscimo do IAF. O formato das curvas é universal (Teruel, 1995) porém, os valores absolutos, aqui apresentados, referem-se à cultivar SP 70-1143 e para as condições do experimento.

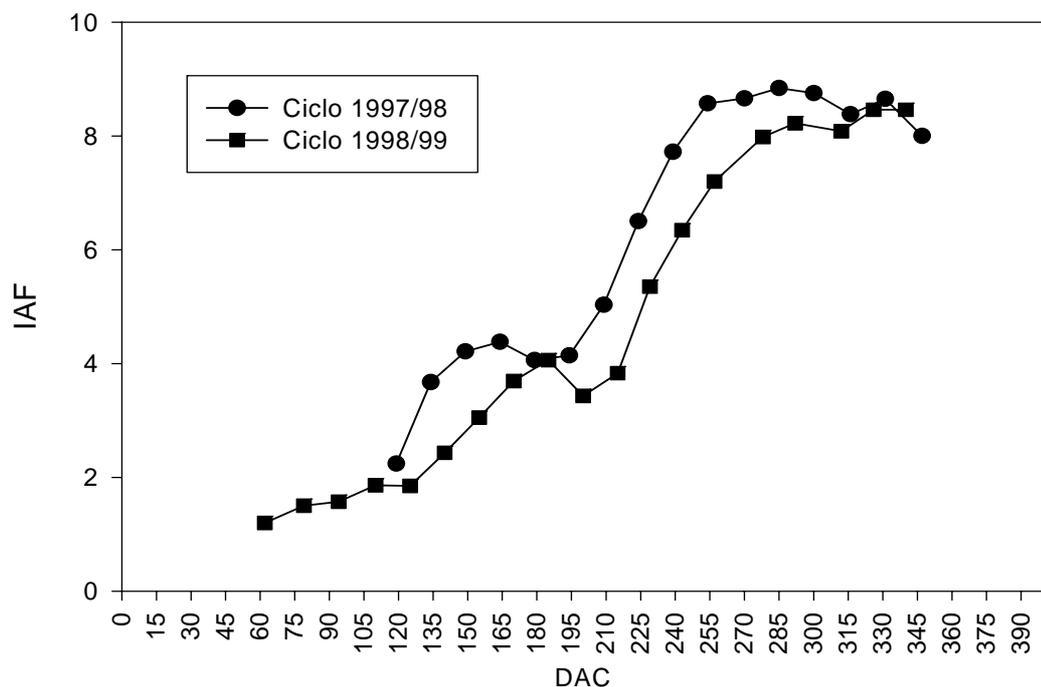


FIGURA 16. Índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC) nos anos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.

No ano de 1997/98, a partir dos 119 DAC, observa-se um vigor vegetativo mais elevado em comparação com o ciclo 1998/99, com o IAF atingindo o valor máximo de 8,75 aos 300 DAC. A queda dos valores amostrais entre os 179 e 194 DAC deu-se por motivo de algumas folhas das plantas amostradas terem sido danificadas por adubação de cobertura. Convém ressaltar que esse valor máximo observado de IAF está dentro da faixa encontrada por outros pesquisadores (Câmara & Oliveira, 1993).

No ciclo subsequente (1998/99), as amostragens tiveram início mais cedo, a partir dos 62 DAC. Ocorreu uma redução do vigor vegetativo nesse ciclo, comportamento natural por se tratar de uma ressoca. Além disso, também houve menor precipitação no período (Figura 7 e 8), resultando, possivelmente, num menor número de brotação por metro linear em relação ao primeiro razão pela qual ocorreu defasagem entre as curvas. Aos 200 e 215 DAC houve troca de planta amostrada devido à morte da anterior. Foi observado, também, que, nessas amostragens, as folhas estavam murchas devido à alta demanda evaporativa da atmosfera e a falta de água (Figura 12). Valores menores de IAF a partir do segundo ciclo também foram observados por outros autores, atribuindo ser resultado do menor número de brotação por metro linear nesses ciclos em relação ao primeiro (cana-planta), além da piora das qualidades físicas e químicas do solo (Leme et al., 1984; Teruel, 1995).

A Figura 17 apresenta a função ajustada da relação entre o IAF e DAC, para os ciclos estudados. Ela indica a possibilidade de estimativa do IAF da cana-de-açúcar, apenas considerando os dias após o corte para as condições do experimento. A Figura 18 mostra uma segunda possibilidade de se estimar o IAF

da cana-de-açúcar, que é medindo apenas a altura de colmo da planta. Entre os métodos testados neste estudo, este foi o que teve o melhor ajuste ( $R^2 = 0,98$ ).

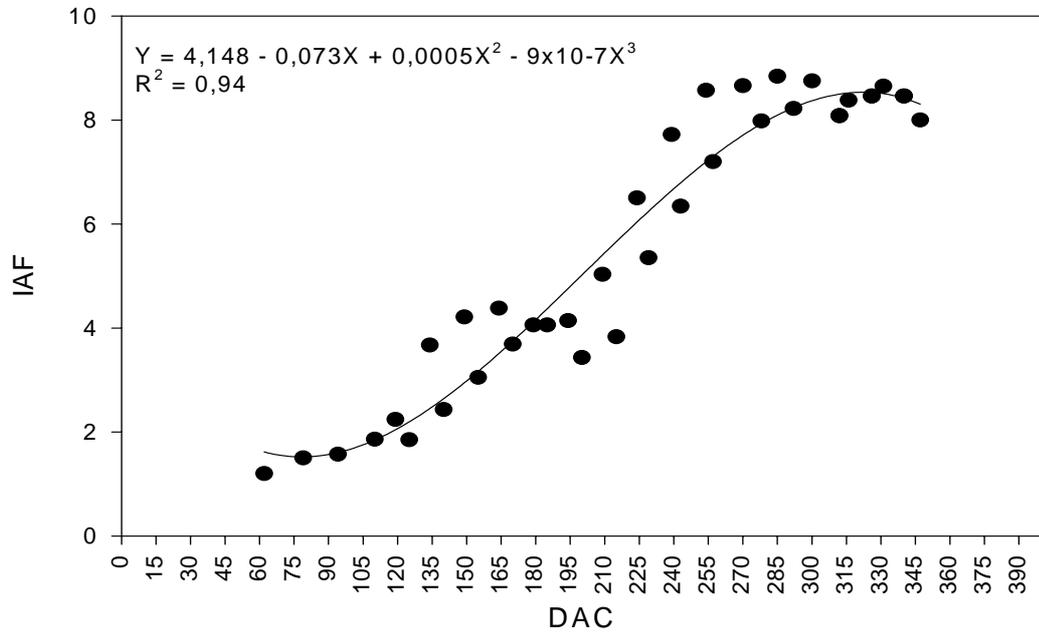


FIGURA 17. Relação entre o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, e dias após o corte (DAC) durante os ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar, AL.

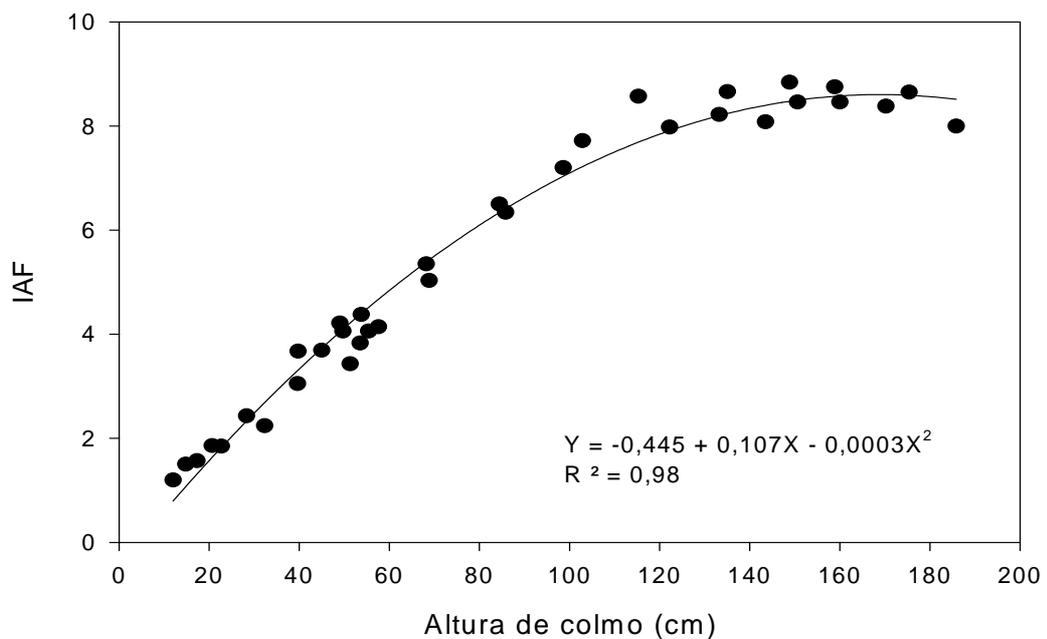


FIGURA 18. Índice de área foliar (IAF) em função da altura de colmo (hc) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante os ciclos (1997/98 e 1998/99). Pilar, AL.

#### 4.2.5. Matéria seca

Dentre as variáveis para analisar o crescimento de um vegetal, a massa de matéria seca de partes da planta é um dos atributos mais utilizados em pesquisas científicas. A matéria seca acumulada pelas plantas é uma consequência direta do processo fotossintético das folhas, transformando a energia solar em energia química a ser utilizada na síntese de compostos orgânicos.

Os valores do índice de área foliar (IAF), peso de matéria seca da parte aérea, peso médio da matéria seca de uma plantas, altura de colmo e altura do dossel da cana-de-açúcar, o número de amostragens e dias após o corte durante o período de crescimento, 1998/99, são apresentados no Apêndice 8.

Na Figura 19, está representada a distribuição do peso de matéria seca da parte aérea da cultura durante o período de crescimento, no ciclo 1998/99. Para o início do ciclo, observa-se que o peso da matéria seca total das folhas é maior do que a dos colmos, indicando que a planta investe mais assimilados em tecidos fotossintetizantes. O colmo passou a se desenvolver efetivamente somente por volta de 141 DAC. Em torno do dia 275 após o corte, os colmos iniciaram um crescimento acelerado, ultrapassando o peso de matéria seca das folhas indicando um armazenamento efetivo de sacarose e outros compostos nesses órgãos. No período entre as amostragens 11 e 12, observou-se um decréscimo no desenvolvimento da planta, causado, como já observado através do IAF, por adubação de cobertura, troca de planta amostrada e devido à falta de chuvas nesse período.

A produção média de matéria seca do colmo alcançou valor máximo de 37ton.ha<sup>-1</sup>, enquanto a matéria seca total da parte aérea da planta alcançou o

valor máximo de  $61\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Valores semelhantes foram encontrados por Barbieri (1993) e Leme et al. (1984) para o estado de São Paulo.

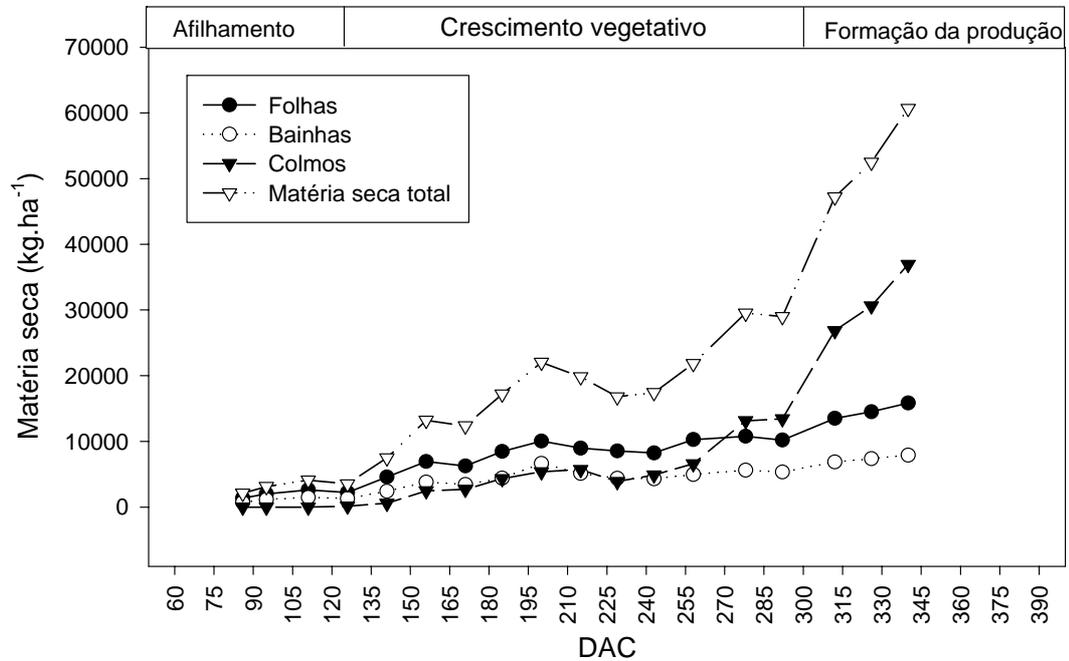


FIGURA 19. Partição de matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.

Na Figura 20, está representada a curva experimental do peso de matéria seca acumulada ( $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) da parte aérea da cana-de-açúcar durante o ciclo 1998/99, em função de dias após o corte.

O aumento do peso da matéria seca ao longo do ciclo deve-se, principalmente, à radiação interceptada e absorvida, conforme já descrito para cana-de-açúcar (Barbieri, 1993) e para milho (França, 1999).

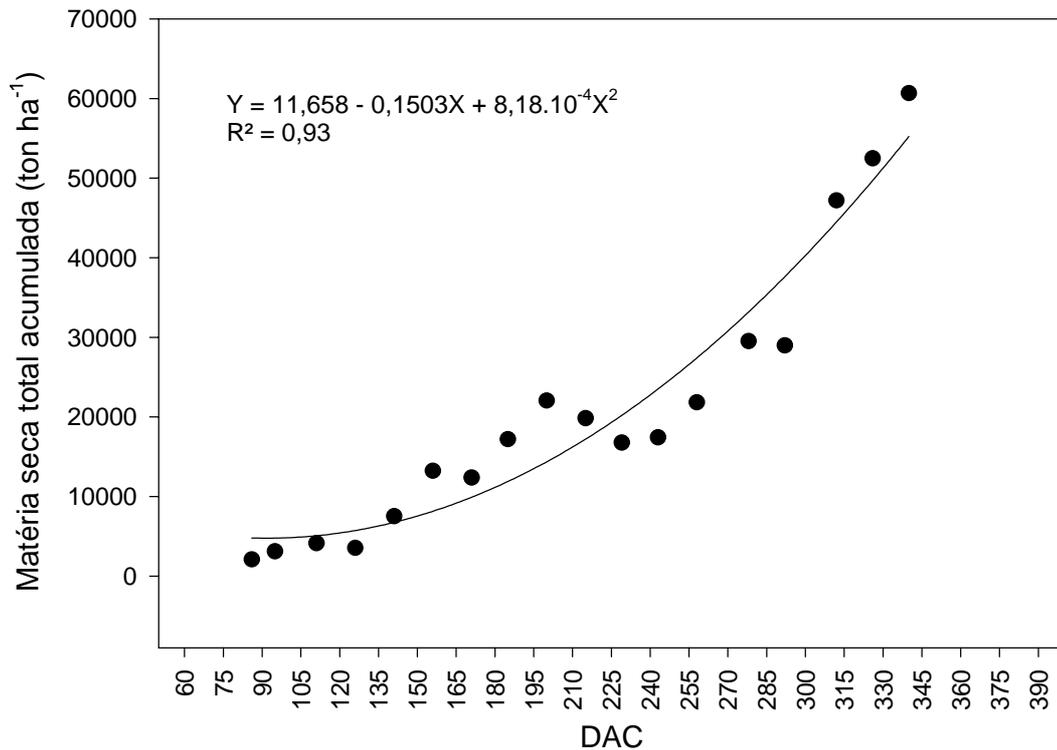


FIGURA 20. Matéria seca acumulada (ton.ha<sup>-1</sup>) da parte aérea da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.

#### 4.2.6. Taxas de crescimento

Dados referentes ao número de amostragens, dias após o corte (DAC), peso da matéria seca total (MST), taxa de crescimento relativo (TCR), área foliar (AF) e taxa assimilatória líquida (TAL) da cana-de-açúcar, durante o ciclo 1998/99 são apresentados no Apêndice 7.

A Figura 21 apresenta a TCR durante todo o ciclo de 1998/99. Observou-se que as plantas, nas condições da área experimental, apresentaram taxas diferenciadas durante o ciclo de desenvolvimento e valores negativos em determinadas etapas do crescimento. As plantas tiveram acúmulo de matéria seca diferenciado e uma tendência de redução na produção de matéria seca, em relação a que possuía. Analisando a disponibilidade hídrica, através da relação

ETR/ET<sub>o</sub> (Figura 12), nota-se que os valores negativos de TCR coincidem com períodos em que a demanda hídrica da cultura não foi atendida, entre as amostragens 11 e 12, pelo motivo já mencionado anteriormente na análise da matéria seca.

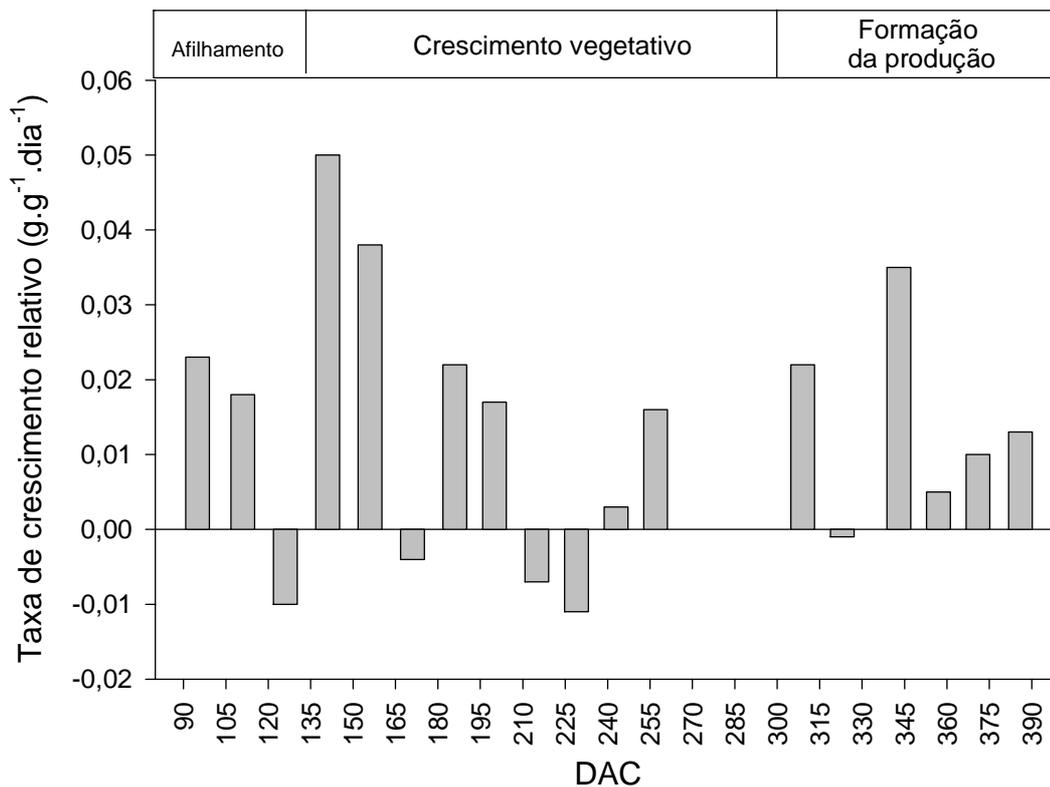


FIGURA 21. Taxa de crescimento relativo (TCR) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.

Na Figura 22, está representada a TAL, em função de DAC, para o ciclo de 1998/99 da cana-de-açúcar. Conforme pode-se verificar, as plantas obtiveram diferentes valores de TAL durante o ciclo, atingindo seu valor máximo de 0,18g.dm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. As diferenças de TAL podem ser explicadas pelas diferentes taxas de fotossíntese que, provavelmente, ocorreram ao longo do ciclo, causadas pela variação na disponibilidade hídrica (Figura 12). Os valores negativos não significam ausência de acréscimo de assimilados, podendo ser atribuídos a erros

causados nas amostragens, por se tratar de experimento a campo onde as plantas apresentam heterogeneidade. Os valores obtidos são menores do que os observados por Barbieri (1993), que apresentou valores, mensurados por diversos autores, entre 25 e 46g.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, com IAF máximo.

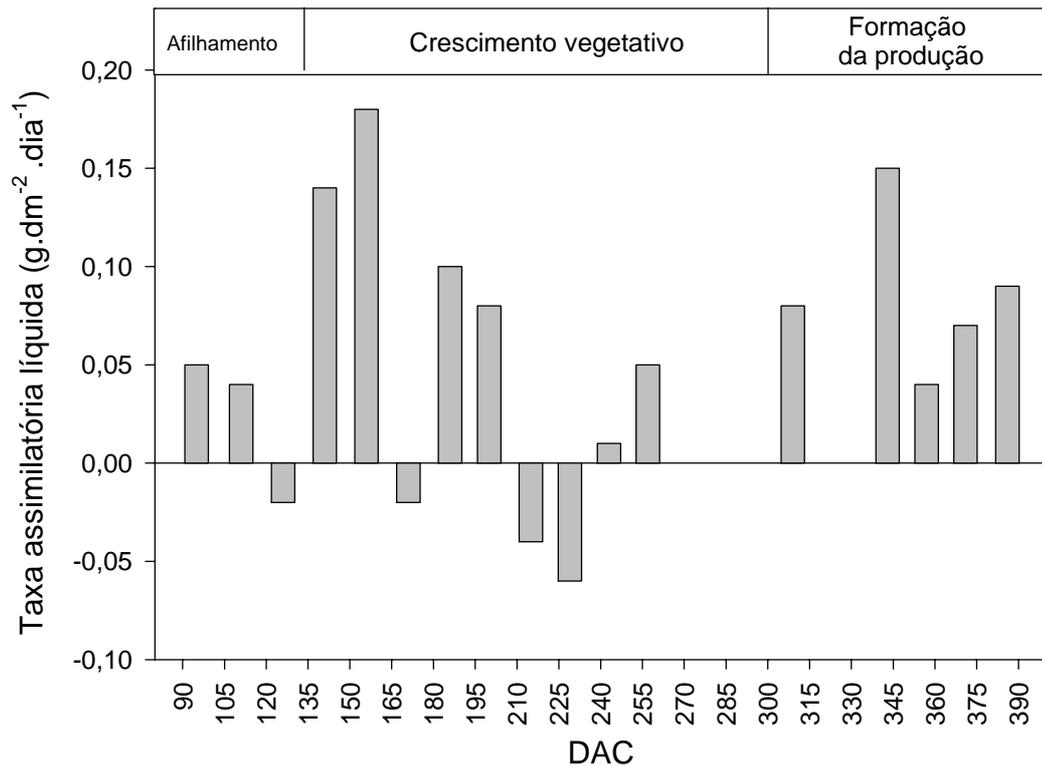


FIGURA 22. Taxa assimilatória líquida (TAL) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 em função de dias após o corte (DAC), no ciclo 1998/99. Pilar, AL.

### 4.3. Balanço de Energia

#### 4.3.1. Componentes do balanço de energia da cultura

Na Tabela 2, encontram-se os componentes do balanço de energia e relações derivadas do balanço de energia diurno (período solar), para alguns dias representativos do período de crescimento 1997/98 da cultura de cana-de-açúcar. O critério de seleção desses dias foi de estar próximo ao dia da amostragem para avaliar o crescimento da planta.

TABELA 2. Componentes e relações derivadas do balanço de energia diurno em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o ciclo 1997/98. Pilar, AL.

DATA	SUB-PERÍODO	DAC	IAF	Rnd	LE	H	S	LE/Rnd	H/Rnd	S/Rnd
15/01/98	Afilhamento	119	2,24	16,38	-10,64	-4,46	-1,40	-0,65	-0,27	-0,09
30/01/98	Cresc. Vegetativo	134	3,67	12,44	-8,88	-3,25	-0,57	-0,71	-0,26	-0,05
15/02/98	Cresc. Vegetativo	150	4,21	17,34	-10,96	-4,92	-1,63	-0,63	-0,28	-0,09
01/03/98	Cresc. Vegetativo	164	4,38	15,51	-10,27	-4,05	-1,32	-0,66	-0,26	-0,09
16/03/98	Cresc. Vegetativo	179	4,06	16,87	-11,27	-4,35	-1,39	-0,67	-0,26	-0,08
31/03/98	Cresc. Vegetativo	194	4,14	14,88	-10,29	-3,81	-1,39	-0,69	-0,26	-0,05
15/04/98	Cresc. Vegetativo	209	5,03	16,51	-11,01	-4,48	-1,17	-0,67	-0,27	-0,07
28/04/98	Cresc. Vegetativo	222	6,5	16,97	-10,98	-4,98	-1,30	-0,65	-0,29	-0,08
15/05/98	Cresc. Vegetativo	239	7,72	10,98	-7,81	-3,08	-0,34	-0,71	-0,28	-0,03
31/05/98	Cresc. Vegetativo	255	8,57	13,11	-9,16	-3,55	-0,48	-0,70	-0,27	-0,04
15/06/98	Cresc. Vegetativo	270	8,66	10,47	-7,28	-2,97	-0,28	-0,70	-0,28	-0,03
30/06/98	Cresc. Vegetativo	285	8,84	11,12	-7,80	-3,11	-0,37	-0,70	-0,28	-0,03
17/07/98	Form. da Produção	302	8,75	12,30	-8,49	-3,58	-0,31	-0,69	-0,29	-0,03
31/07/98	Form. da Produção	316	8,38	12,98	-8,87	-3,83	-0,35	-0,68	-0,29	-0,03
12/08/98	Form. da Produção	328	8,65	15,49	-10,29	-4,94	-0,40	-0,66	-0,32	-0,03
01/09/98	Form. da Produção	348	8	15,11	-10,38	-4,52	-0,28	-0,69	-0,30	-0,02
	Média TODO PERÍODO							<b>-0,67</b>	<b>-0,28</b>	<b>-0,05</b>
	Média PERÍODO POTENCIAL							<b>-0,68</b>	<b>0,29</b>	<b>-0,03</b>
	Média PERÍODO SECO							<b>-0,60</b>	<b>0,27</b>	<b>-0,07</b>

DAC corresponde aos dias após o corte, IAF o índice de área foliar, Rnd a densidade do fluxo do saldo de radiação diurno, LE a densidade do fluxo de calor latente, H a densidade do fluxo de calor sensível e S a densidade do fluxo de calor no solo. As densidades de fluxos estão expressas em  $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ .

Observa-se o efeito da época do ano sobre a magnitude do saldo de radiação diurno (Rnd), conforme discutido anteriormente. O valor de Rnd, durante o período seco (janeiro a março), variou de 12,44 a 17,34  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . No período chuvoso (abril a julho), Rnd variou de 10,47 a 16,97  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

Conforme as razões de fracionamento do saldo de radiação para os fluxos de calor latente, calor sensível e no solo (Tabela 2), constatou-se que, em média, o Rnd foi consumido em 67% para o fluxo de calor latente (LE), 28% para o fluxo de calor sensível (H) e 5% para o fluxo de calor no solo (S) considerando todo o período estudado, juntando período seco e período chuvoso. Considerando somente o período chuvoso, considerado potencial, 68% de Rnd foi destinado à LE, 29% em H e 3% em S. e para período seco, com deficiência hídrica, a

partição de Rnd para LE diminuiu em relação ao período chuvoso (63%), 27% para H e observa-se um aumento do S (7%).

Verificou-se a influência do grau de cobertura do solo pelo valor do fluxo de calor no solo (S), inferida em função de DAC e de IAF. Confrontando os valores da Tabela 2, correspondentes ao período de 119 a 222 DAC, com IAF variando entre 2 e 6 com os demais valores, verificou-se que o fluxo de calor no solo foi superior aos demais dias com IAF variando entre 7 e 8. Durante todo o período observado, notou-se que, em momento algum, a partição do saldo de energia para o fluxo de calor no solo superou ao fluxo para calor sensível.

Na Tabela 3, encontram-se os componentes e algumas relações derivadas do balanço de energia diurno, para alguns dias representativos do período de crescimento 1998/99.

Observou-se o efeito da época do ano sobre a magnitude do valor do saldo de radiação diurno (Rnd), conforme discutido anteriormente. O valor de Rnd, durante o período considerado seco (janeiro a março) variou de 16,34 a 18,38MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. No período chuvoso (abril a julho), Rnd variou de 9,89 a 14,60MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

Quanto às razões de fracionamento do saldo de radiação (Tabela 3), constata-se que, em média, Rnd foi consumido em 74% para LE, 24% para H e aproximadamente 2% para S, considerando todo o período estudado e juntando período seco e período chuvoso. No período chuvoso considerado potencial, com boa disponibilidade hídrica e com a cultura cobrindo totalmente o solo, 87% de Rnd foi para LE, 13% para H e praticamente zero para S. Para período seco, com deficiência hídrica, as porções para LE diminuiu (65%) em relação ao período

potencial (87%), houve um aumento no H (33%) e um aumento do valor para S (2%).

TABELA 3. Componentes e relações derivadas do balanço de energia diurno em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o ciclo 1998/99. Pilar, AL.

DATA	SUB-PERÍODO	DAC	IAF	Rnd	LE	H	S	LE/Rnd	H/Rnd	S/Rnd
13/02/99	Cresc. Vegetativo	140	2,43	16,97	-11,44	-3,68	-1,97	-0,71	-0,24	-0,06
27/02/99	Cresc. Vegetativo	154	3,05	18,38	-12,84	-3,70	-1,93	-0,72	-0,22	-0,05
17/03/99	Cresc. Vegetativo	172	3,69	16,34	-12,44	-2,87	-1,76	-0,80	-0,18	-0,01
29/03/99	Cresc. Vegetativo	184	4,06	16,71	-2,87	-13,65	-1,78	-0,17	-0,82	-0,11
12/04/99	Cresc. Vegetativo	198	3,43	14,60	-6,50	-7,99	-1,14	-0,44	-0,55	0,10
29/04/99	Cresc. Vegetativo	215	3,83	12,39	-10,77	-1,37	-0,86	-0,94	-0,11	-0,06
13/05/99	Cresc. Vegetativo	229	5,35	13,83	-9,44	-4,12	-0,95	-0,69	-0,30	-0,01
26/05/99	Cresc. Vegetativo	242	6,34	10,86	-9,70	-0,91	-0,73	-0,93	-0,09	-0,02
10/06/99	Cresc. Vegetativo	257	7,2	9,89	-9,55	-0,03	-0,61	-0,96	-0,00	0,06
01/07/99	Cresc. Vegetativo	278	7,98	12,38	-11,28	-1,65	-0,48	-0,92	-0,09	-0,01
13/07/99	Cresc. Vegetativo	290	8,22	12,42	-8,77	-3,48	-0,56	-0,73	-0,29	-0,01
22/07/99	Cresc. Vegetativo	299	8,22	9,99	-9,36	-0,32	-0,43	-0,94	-0,03	-0,04
Média TODO PERÍODO								<b>-0,74</b>	<b>-0,24</b>	<b>-0,02</b>
Média PERÍODO POTENCIAL								<b>-0,87</b>	<b>-0,13</b>	<b>0,00</b>
Média PERÍODO SECO								<b>-0,65</b>	<b>-0,33</b>	<b>-0,02</b>

DAC corresponde aos dias após o corte, IAF o índice de área foliar, Rnd a densidade do fluxo do saldo de radiação diurno, LE a densidade do fluxo de calor latente, H a densidade do fluxo de calor sensível e S a densidade do fluxo de calor no solo. (as densidade de fluxo estão expressas em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>).

Pode-se verificar, também, a influência do grau de cobertura do solo pelo do valor do fluxo de calor no solo, inferida em função de DAC e de IAF. Os valores de S foram mais elevados no final de afilhamento e início do crescimento vegetativo.

Confrontando valores correspondentes ao período de 140 a 184 DAC, com IAF variando entre 2 e 4, com os demais valores (Tabela 3), observou-se que, nas observações de fevereiro a março, o fluxo de calor no solo foi superior aos demais dias, quando IAF variou entre 4 e 8, sendo este o valor máximo observado no final do ciclo. Durante todo o período observado, notou-se que, em apenas um dia

observado (257 DAC), a partição do saldo de energia para o fluxo de calor no solo superou o fluxo para calor sensível.

Comparando os dois ciclos estudados, observou-se que, durante a estação seca, houve mais disponibilidade de energia ao sistema no ano 1998/99 do que durante o ano de 1997/98, embora com amplitudes menores ( $2,00\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) do que em 1997/98 ( $4,90\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ). Já na estação chuvosa houve mais disponibilidade de energia no ano 1997/98, porém com amplitudes maiores ( $6,50\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) do que em 1998/99 ( $4,70\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ).

Essa ordem de grandeza, com predomínio de utilização de  $R_n$  para LE, seguindo de H e S, tem sido o padrão observado nas determinações do balanço de energia, que empregam o uso da razão de Bowen em culturas agrícolas como observaram Bergamaschi et al. (1988) em feijoeiro, Fontana (1991) em soja, Cunha (1994) em alfafa e Cunha et al. (1996) em milho.

Observa-se que a diferença das relações derivadas do balanço de energia diurno entre os diferentes períodos considerados (todo ciclo e período potencial) mostrou-se mais evidente no ano de 1998/99. No ano de 1997/98 essa diferença não foi muito pronunciada. Isso deveu-se, provavelmente, aos períodos de excesso hídrico terem sido melhor distribuídos ao longo do ciclo, com a magnitude do saldo de radiação menor em 1999 em relação a 1998.

Para análise gráfica do balanço de energia e da razão de Bowen, foram selecionados, e separados, dias correspondentes aos períodos seco e chuvoso, em ambos os ciclos, totalizando 11 casos para estudo. Em cada grupo de gráficos, das Figuras 23 a 26, pode-se verificar os valores horários dos fluxos, juntamente com a variação nos valores da razão de Bowen, durante as 24 horas do dia.

Na Figura 23, estão os componentes dos balanços de energia e a variação nos valores da razão de Bowen nos dias 30/01/98, com baixa demanda evaporativa ( $R_n=12,44\text{MJ.m}^{-2}$ ), sem deficiência hídrica, porém sem excedente ( $ARM=17$ ) e 15/02/98, dia com alta demanda evaporativa ( $R_n=17,34\text{MJ.m}^{-2}$ ) e deficiência, baixa disponibilidade hídrica ( $ARM=7$ ), dois dias característicos da estação seca na região. Nota-se um comportamento semelhante na magnitude dos fluxos bem como, no comportamento da razão de Bowen, nessas duas datas. Com baixa demanda evaporativa (30/01/98), o saldo de radiação é utilizado para o fluxo de calor latente (70%) e para o calor sensível (30%) e praticamente zero para o fluxo de calor no solo. Porém, em dia com alta demanda evaporativa (15/02/98) observa-se um aumento na partição de  $R_n$  para o fluxo de calor no solo (7%), uma diminuição na partição utilizada no processo evaporativo (64%) e uma pequena diminuição para calor sensível (29%).

Ao dia 30/01/98, antecedeu um dia com precipitação e provavelmente a nebulosidade formada em volta desse dia proporcionou uma diminuição do saldo de radiação, diminuindo a magnitude de seu valor e dos componentes do balanço de energia.

Os valores da razão de Bowen foram positivos durante todo o período diário, para os dois dias estudados, apresentando valores em torno de 0,37 e 0,42. O fluxo de calor sensível na atmosfera, durante as 24 horas do dia, foi elevado proporcionalmente ao fluxo de calor latente, mas, em momento algum  $H$  superou  $LE$ . O sinal positivo caracterizou-se por não ter ocorrido aporte de energia para o sistema no período diurno. Esse fato indicou que a maior parte do  $R_n$  foi para o fluxo de calor latente de evaporação ( $LE$ ), superando ao de ( $H$ ) durante todo o período.

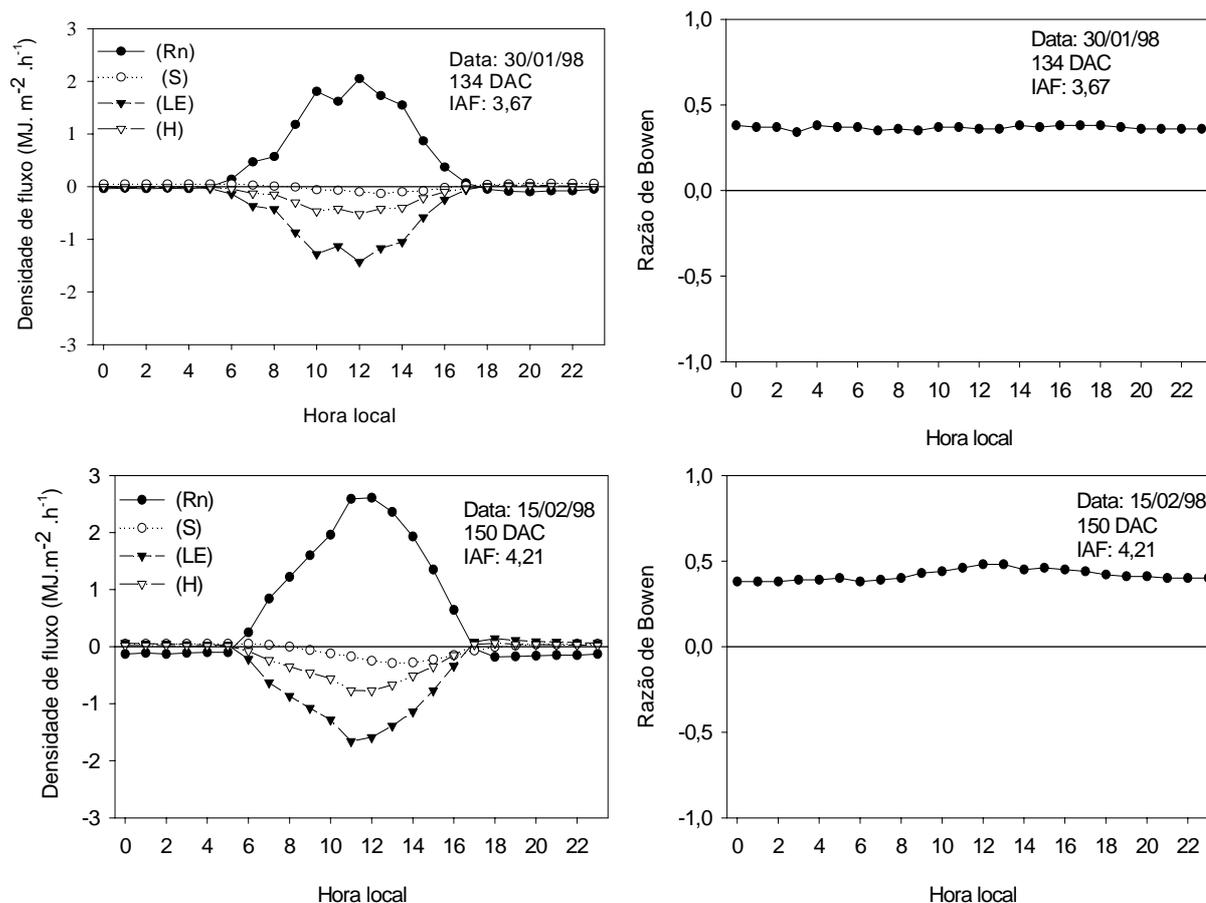


FIGURA 23. Componentes dos balanços de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1997/98. Dias: 30/01/98 e 15/02/98 (estação seca). Pilar, AL.

Na Figura 24, estão os componentes dos balanços de energia e da variação nos valores da razão de Bowen nos dias 10/05/98, dia com alta demanda evaporativa ( $R_{nd}=15,04\text{MJ.m}^{-2}$ ) e com alta disponibilidade hídrica no solo, com excedente hídrico (5mm) ( $ARM=75$ ) e 15/06/98, dia com baixa demanda evaporativa ( $R_{nd}=10,47\text{MJ.m}^{-2}$ ) e com boa disponibilidade hídrica no solo, porém sem excesso ( $ARM=60$ ), dois dias característicos da estação chuvosa na região. Notou-se, em relação ao período anterior, uma diminuição do saldo de energia disponível ao sistema, pelo fato de terem sido dias com maior nebulosidade. Os valores da razão de Bowen foram positivos durante todo o

período diário e para os dois dias estudados, apresentando valores em torno de 0,41. Estes valores mostraram que a partição do  $R_n$  para o fluxo de calor sensível na atmosfera (H), durante as 24 horas do dia, foi elevado proporcionalmente ao fluxo de calor latente (LE) embora em momento algum H tenha superado LE, apesar de existir valores próximos. Quanto ao sinal positivo, esse caracterizou-se por não ter ocorrido aporte de energia para o sistema, no período diurno, com fluxos H e LE entrando no sistema à noite.

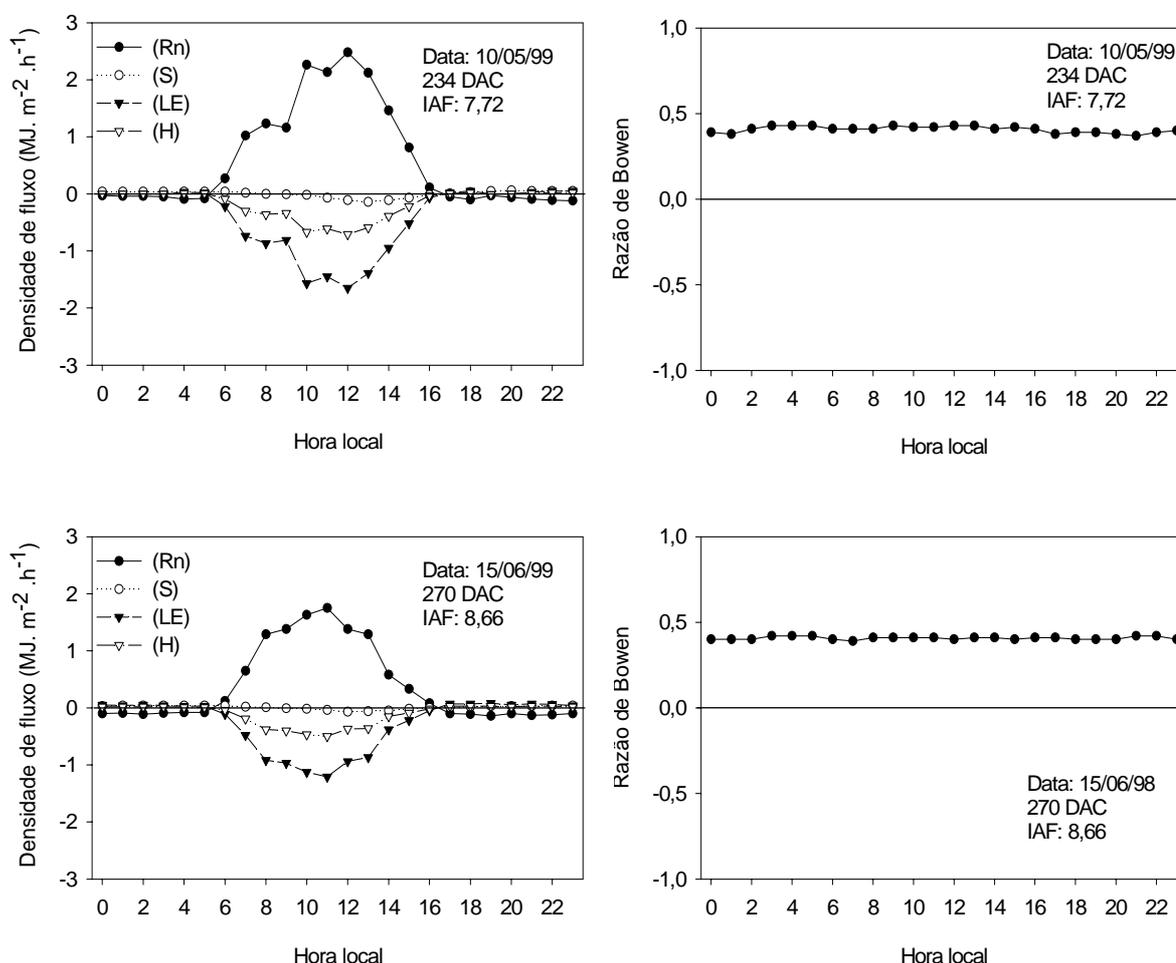


FIGURA 24. Componentes dos balanços de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1997/98. Dias: 10/05/98 e 15/06/98 (estação chuvosa). Pilar, AL.

No grupo de gráficos da Figura 25, estão os componentes dos balanços de energia e valores da razão de Bowen nos dias 06/02/99, dia com alta demanda evaporativa ( $R_n=17,66\text{MJ.m}^{-2}$ ), sem deficiência hídrica, porém sem excedente ( $ARM=18$ ) e 27/02/99 com alta demanda evaporativa ( $R_n=18,38\text{MJ.m}^{-2}$ ), com deficiência hídrica (5mm) ( $ARM=5$ ), dois dias característicos da estação seca na região. Observou-se que a razão de Bowen teve um comportamento diferenciado confrontando as duas datas com os dias observados na Figura 23 e 24. A razão de Bowen variou durante o período diurno, atingindo valores positivos e negativos.

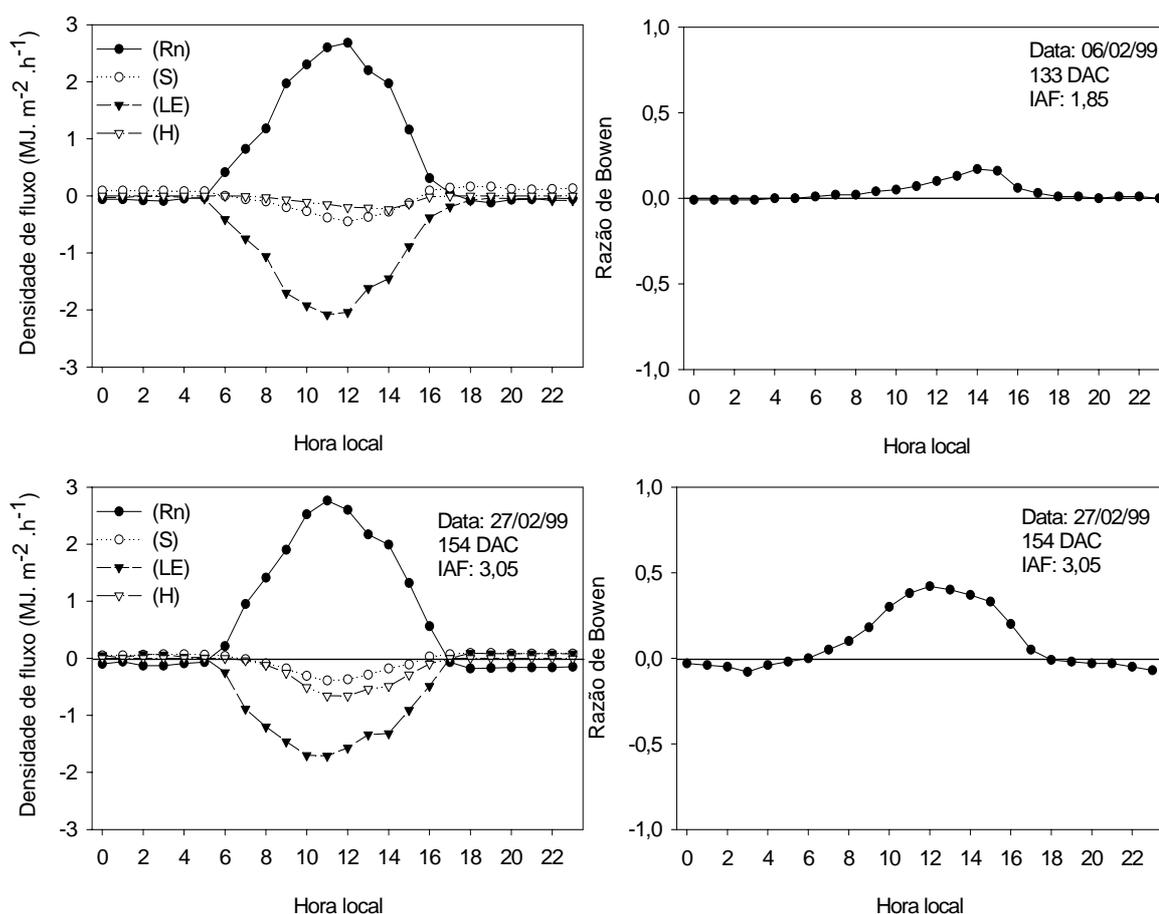


FIGURA 25. Componentes do balanço de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1998/99. Dias: 06/02/99 e 27/02/99 (estação seca). Pilar, AL.

Foram observados valores negativos da razão de Bowen em vários momentos: nos dias 06/02/99 e 27/02/99, em horário noturno, porém em momento algum H superou LE.

Em dia sem deficiência hídrica (06/02/99), porém sem excedente hídrico, o saldo de radiação foi utilizado 89% para o fluxo de calor latente 7% para o calor sensível e (4%) para o fluxo de calor no solo. Porém, em dia com deficiência hídrica (15/02/98), observou-se aumento na partição de  $R_n$  para o fluxo de calor no solo (6%), uma diminuição na partição utilizada no processo evaporativo (72%) e um aumento para calor sensível (22%).

No grupo de gráficos da Figura 26, estão os componentes dos balanços de energia e valores da razão de Bowen no dia 26/05/99, dia com baixa demanda evaporativa ( $R_n=10,86\text{MJ.m}^{-2}$ ), sem deficiência hídrica, porém sem excedente ( $ARM=69$ ) e no dia 25/06/99 com alta demanda evaporativa ( $R_n=12,77\text{MJ.m}^{-2}$ ), sem deficiência hídrica, porém sem excedente ( $ARM=63$ ), dois dias característicos da estação chuvosa na região. Observou-se que a razão de Bowen foi predominantemente positiva durante a maior parte do dia, com valores, em geral, inferiores a 0,20. Entretanto, ocorreram valores da razão de Bowen negativos durante todo período noturno.

Nos dias 26/05/99 e 25/06/99, dias com baixa demanda evaporativa, sem deficiência hídrica, porém sem excedente observou-se que o processo evaporativo não sofreu restrição, determinando os maiores valores da relação  $LE/R_{nd}$ , sendo eles 90% no dia 26/05/99 e chegando a 99% no dia 25/06/99. Os valores positivos de H pode ter sido resultantes da advecção de energia ou pela transferência vertical de energia do meio para o sistema, em consequência do resfriamento mais intenso da superfície da cultura do que do ar acima, pela

evaporação do orvalho que havia sobre a mesma, determinando as inversões térmicas de acordo com o observado por Villa Nova (1973); Fontana (1991) e Cunha et al., (1996).

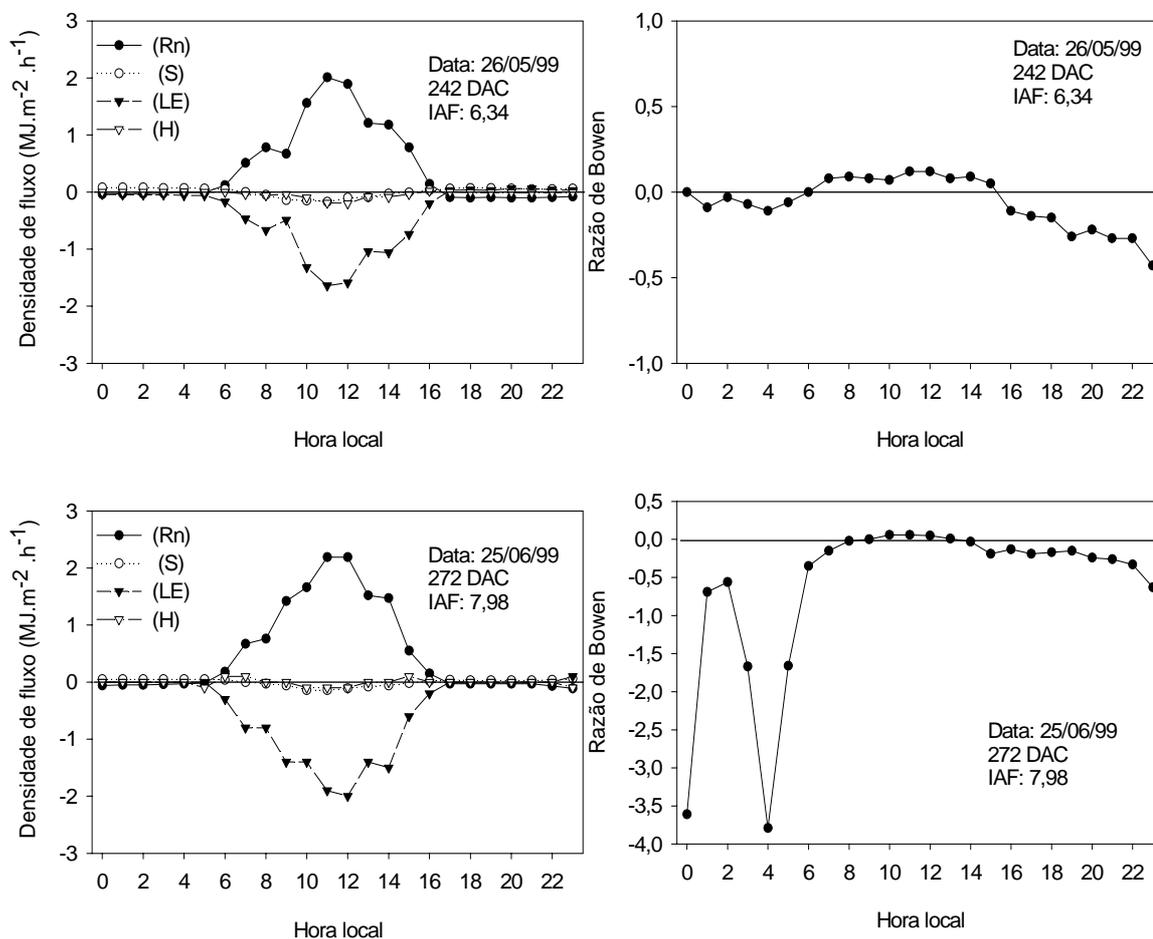


FIGURA 26. Componentes do balanço de energia ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) e razão de Bowen em uma cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, ciclo 1998/99. Dias: 26/05/99 e 25/06/99. (estação chuvosa). Pilar, AL.

Pode-se concluir que ocorreram diferenças na utilização do saldo de radiação nos períodos secos e chuvosos, causadas, principalmente, por efeito da disponibilidade hídrica do solo, demanda evaporativa da atmosfera e cobertura vegetal. A menor porção do saldo de radiação em torno de 6% no período seco e com o índice de área foliar baixo, solo descoberto e praticamente zero no período chuvoso, com índice de área foliar alto, solo com cobertura completa, foi utilizada como fluxo de calor no solo, mostrando uma tendência inversa à densidade de

cobertura. Observou-se, também, pelo comportamento do fluxo de calor no solo (S), o desvio da onda do fluxo tornando-se negativo no período diário cada vez mais tarde, decorrente da influência do aumento da cobertura do solo pelo aumento do IAF.

#### **4.3.3. Relação entre o saldo de radiação e radiação global**

A Figura 27 mostra a relação entre o saldo de radiação ( $R_n$ ) e a radiação global ( $R_g$ ). A regressão foi feita com o saldo de radiação diário ( $R_n$ ) (24 horas) e saldo de radiação diurno ( $R_{nd}$ ) (período solar). Foram utilizados 510 pares de valores diários, de abril de 1997 a setembro de 1998, período em que esses elementos foram observados simultaneamente. Os altos coeficientes de determinação observados mostraram a grande associação dessas duas variáveis, ou seja, o saldo de radiação depende, fundamentalmente, da radiação global que é o maior termo do balanço de radiação.

A utilidade prática dessa relação justifica-se pela dificuldade em se encontrar observações do saldo de radiação em estações meteorológicas convencionais, sendo esse necessário à utilização de vários métodos para determinação da evapotranspiração entre os quais a formulação de Penman-Monteith. Por outro lado, a radiação global é mais facilmente observada em estações meteorológicas convencionais.

Coeficientes de determinação superiores a 0,90 são freqüentemente encontrados em trabalhos que relacionam essas duas variáveis (Cunha, 1991).

Convém ressaltar que essas equações são válidas para a cultura da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, cultivada sob condições similares às utilizadas neste trabalho.

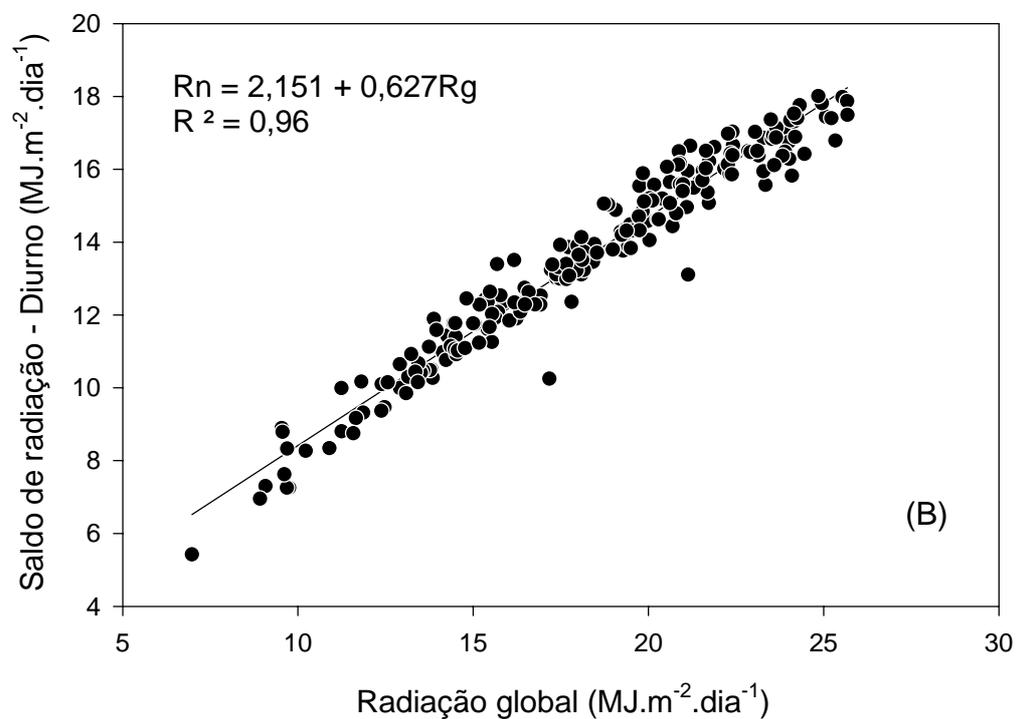
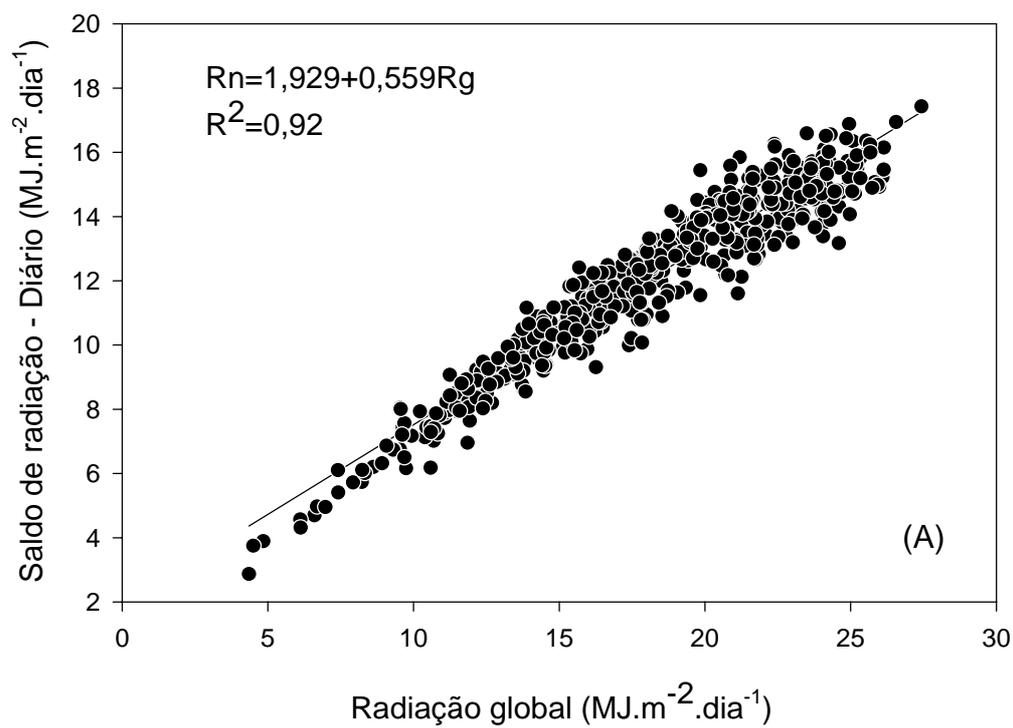


FIGURA 27. Relação entre o saldo de radiação diário (A) e entre o saldo de radiação diurno (B) e a radiação global ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) sobre um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL. 1997 e 1998.

#### **4.3.4. Eficiência da cultura na utilização da radiação**

Para quantificar as relações energéticas entre as plantas e o ambiente, baseado no valor calórico padrão da matéria seca de cana-de-açúcar, foi calculada a eficiência da cultura na utilização da radiação solar, em nível de saldo de radiação. Este parâmetro expressa quanto eficiente foi o sistema agrícola na captação e transformação da energia em material vegetal. O resultado mostrou que 1,46% do saldo de radiação foi utilizado pela cultura para incorporação de carbono, valor esse semelhante ao apresentado por Chang (1968) (1,43%) mas que não podem ser comparados pois a eficiência apresentada por Chang (1968) foi calculada com base na radiação global, o que é mais comum nesse tipo de estudo.

#### **4.4. Parâmetros aerodinâmicos da cultura**

Para a determinação dos parâmetros aerodinâmicos da cultura ( $d$ ,  $z_0$  e  $u^*$ ), foram selecionados 18 perfis de velocidade do vento sob condições de atmosfera neutra, no período de 17 de dezembro de 1998 a 31 de agosto de 1999 e com o IAF igual ou maior a 1,5. As condições de neutralidade atmosférica foram determinados através do Número de Richardson ( $Ri$ ) pela equação (12).

Os valores de  $Ri$  foram calculados durante o período de dezembro de 1998 a outubro de 1999. Utilizaram-se dados de temperatura do ar e velocidade do vento, em escala horária, nos níveis 1,75 e 4,73 m. O critério de neutralidade foi de  $(-0,001 < Ri < + 0,001)$ .

A Tabela 4 mostra os valores do índice de área foliar (IAF), altura do dossel ( $h$ ), velocidade de atrito ( $u^*$ ), deslocamento do plano zero ( $d$ ), parâmetro de rugosidade da superfície ( $z_0$ ), número de Richardson ( $Ri$ ) e a relação dos

parâmetros aerodinâmicos  $d$  e  $z_0$  com a altura do dossel vegetativo de cana-de-açúcar. As relações médias dos parâmetros aerodinâmicos da cana-de-açúcar obtidas neste trabalho ( $z_0/h=0,15$  e  $d/h=0,71$ ) são similares às observadas e sugeridas por Chang (1968), Monteith (1975), Rosenberg (1975), Geiger (1980) e Pereira (2000). A média de  $z_0$  foi de 0,30 e a média de  $d$  foi de 1,30 (Tabela 4).

TABELA 4. Índice de área foliar (IAF), altura do dossel ( $h$ ) (m), velocidade característica do escoamento ( $u^*$ ) ( $m.s^{-1}$ ), deslocamento do plano zero ( $d$ ) e parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) (m), número de Richardson ( $Ri$ ) e a relação dos parâmetros aerodinâmicos  $d$  e  $z_0$  com a altura das plantas de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o ciclo 1998/99. Pilar, AL.

No	DATA	HORA	IAF	$h$	$u^*$	$d$	$z_0$	$Ri$	$d/h$	$z_0/h$
1	17.12.98	01:00	1,50	1,15	0,21	0,94	0,15	-0,0014	0,82	0,13
2	17.12.98	05:00	1,50	1,15	0,21	0,95	0,30	-0,0004	0,83	0,26
3	31.01.99	21:00	1,85	1,24	0,28	0,88	0,23	0,0004	0,71	0,18
4	05.02.99	01:00	1,85	1,24	0,31	1,03	0,12	-0,0006	0,83	0,10
5	27.02.99	19:00	3,05	1,41	0,37	1,00	0,17	-0,0003	0,71	0,12
6	14.03.99	19:00	3,70	1,46	0,32	1,14	0,17	-0,0013	0,78	0,12
7	17.03.99	06:00	3,70	1,46	0,12	1,10	0,33	0,0000	0,75	0,22
8	17.03.99	19:00	3,70	1,46	0,35	0,95	0,19	-0,0001	0,65	0,13
9	01.05.99	14:00	3,80	1,53	0,27	0,95	0,23	-0,0002	0,62	0,15
10	15.05.99	22:00	5,40	1,73	0,25	1,10	0,44	-0,0006	0,64	0,25
11	02.06.99	08:00	6,34	1,91	0,29	1,21	0,26	0,0001	0,63	0,14
12	28.06.99	16:00	8,00	2,29	0,41	1,42	0,35	0,0009	0,62	0,15
13	01.07.99	13:00	8,00	2,29	0,46	1,77	0,17	-0,0007	0,77	0,07
14	01.07.99	14:00	8,00	2,29	0,44	1,77	0,17	0,0001	0,77	0,07
15	02.07.99	08:00	8,00	2,29	0,48	1,45	0,30	0,0005	0,63	0,13
16	23.08.99	16:00	8,50	2,59	0,59	1,80	0,33	-0,0003	0,69	0,13
17	31.08.99	13:00	8,50	2,69	0,7	1,56	0,37	-0,0010	0,58	0,14
18	31.08.99	15:00	8,50	2,69	0,5	1,85	0,30	-0,0070	0,69	0,11
<b>MÉDIA</b>						<b>1,30</b>	<b>0,30</b>		<b>0,71</b>	<b>0,15</b>

Relacionando os valores das velocidades de fricção calculadas com os valores correspondentes das velocidades do ar observadas à 2,24m de altura (Apêndice 10), observa-se que a velocidade de fricção corresponde, aproximadamente, 23% da velocidade do vento a 2,24m.

A Figura 28A mostra a relação entre o deslocamento do plano zero ( $d$ ) e o parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) com a altura do dossel ( $h$ ). Observa-se um aumento progressivo de  $d$  com a altura do dossel e um pequeno aumento, menos evidente, de  $z_0$  com a altura do dossel.

A Figura 28B mostra a relação entre o deslocamento do plano zero ( $d$ ) e o parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) com a velocidade característica do escoamento ( $u^*$ ) ( $m.s^{-1}$ ), sobre a cana-de-açúcar. O gráfico foi realizado utilizando quatro horários, referentes às amostragens dos dias 26/06/99, 01/07/99, 01/07/99 e 02/07/99, descritos na Tabela 4, com perfis próximos à neutralidade atmosférica, com as plantas cobrindo praticamente todo o solo ( $IAF=8$ ) e durante um período sem limitação hídrica (época chuvosa). Observou-se que a velocidade do escoamento exerce influência sobre a variação de  $d$  e  $z_0$ . Para velocidades menores do que  $0,44m.s^{-1}$ , há uma tendência de que  $d$  aumente e  $z_0$  diminua. Esse decréscimo de  $z_0$ , nas velocidades do vento altas é explicado devido a tendência dos elementos do dossel a se alinhar, devido à força do vento, causando um decréscimo na rugosidade efetiva do dossel.

Porém, observou-se que, a partir de  $0,44m.s^{-1}$ , com a velocidade característica do escoamento aumentando, há uma tendência de que  $d$  diminua e  $z_0$  aumente, indicando haver um selamento da cobertura vegetal, impedindo, assim, a penetração do vento dentro do dossel. Dados semelhantes foram mostrados por outros pesquisadores, como Pereira (2000) e Guerra & Slack (1996).

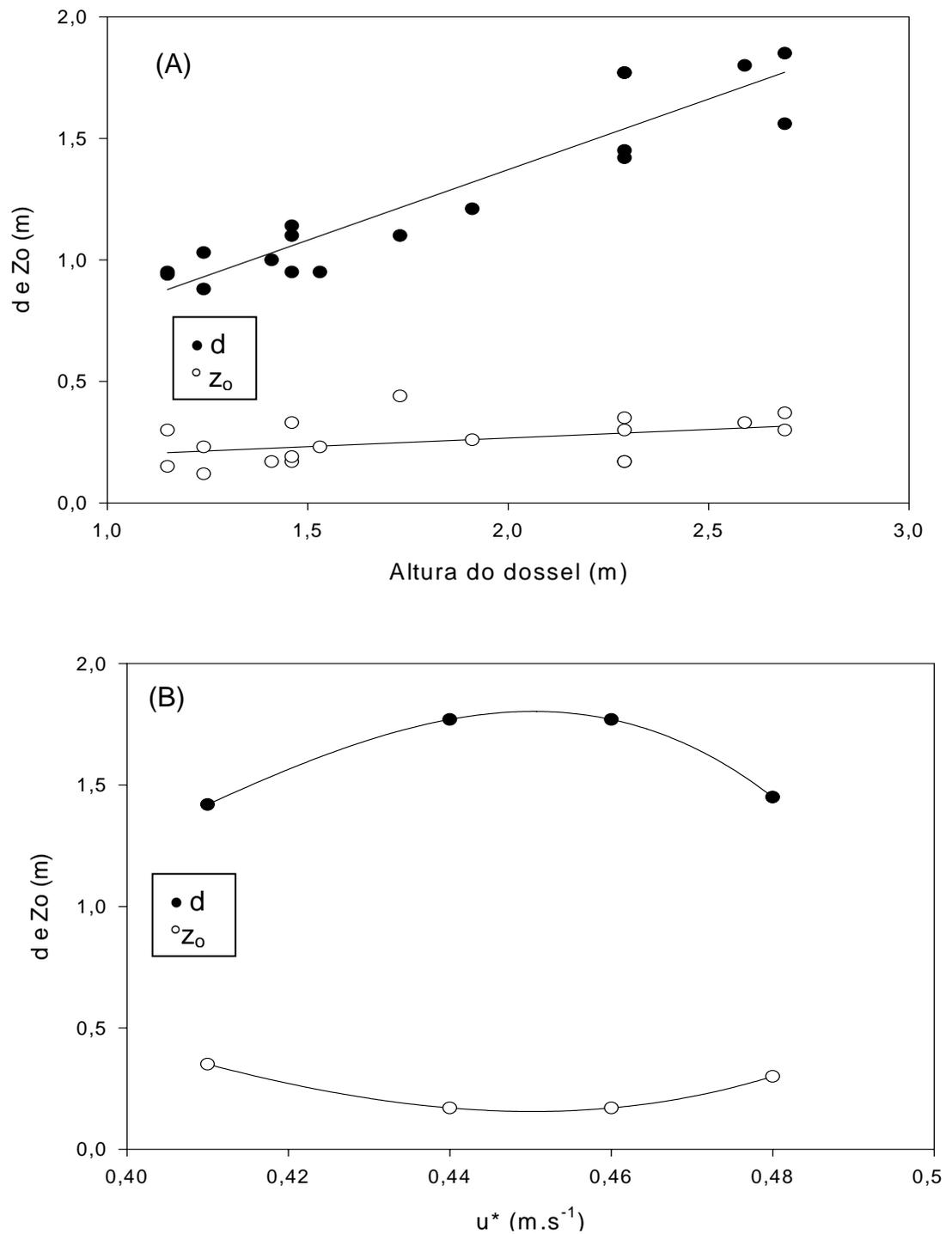


FIGURA 28. Relação entre o deslocamento do plano zero ( $d$ ) e do parâmetro de rugosidade ( $z_0$ ) com a altura do dossel utilizando 18 perfis selecionados (A) e relação entre os parâmetro aerodinâmicos ( $d$  e  $z_0$ ) e a velocidade característica do escoamento ( $u^*$ ) (B) sobre a cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL.

## **4.5. Resistências aerodinâmica e da cobertura vegetal**

### **4.5.1. Comparação de métodos para estimativa da resistência aerodinâmica**

Para o cálculo da resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), foi utilizada a Equação 68, proposta por Jensen et al. (1990) e as Equações 69, 70 e 71, propostas por Monteith & Unsworth (1990). Os resultados estão no Apêndice 9 e na Figura 29.

Conforme Figura 29A, observou-se, em geral, maiores valores de  $r_a$  obtidos através da formulação de Jensen, bem como uma maior variabilidade diária, quando comparada com a formulação de Monteith. A Figura 29B mostra o grau de correlação entre os valores de  $r_a$  conforme as equações propostas ( $R=0,78$ ), considerando todo os dias do ciclo da cultura.

Comparando os valores obtidos da resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), observou-se haver boa correlação entre os dois parâmetros calculados. O método de Jensen, porém, apresentou valores mais altos que o de Penman-Monteith na maioria dos dias do ciclo da cultura.

A resistência aerodinâmica média diária, utilizando a equação proposta por Jensen, foi de  $31s.m^{-1}$  para dias de baixa demanda evaporativa (período chuvoso), e de  $25s.m^{-1}$  para dias de alta demanda evaporativa (período seco), enquanto pela equação proposta por Monteith foi de  $23s.m^{-1}$  e  $25s.m^{-1}$ , respectivamente.

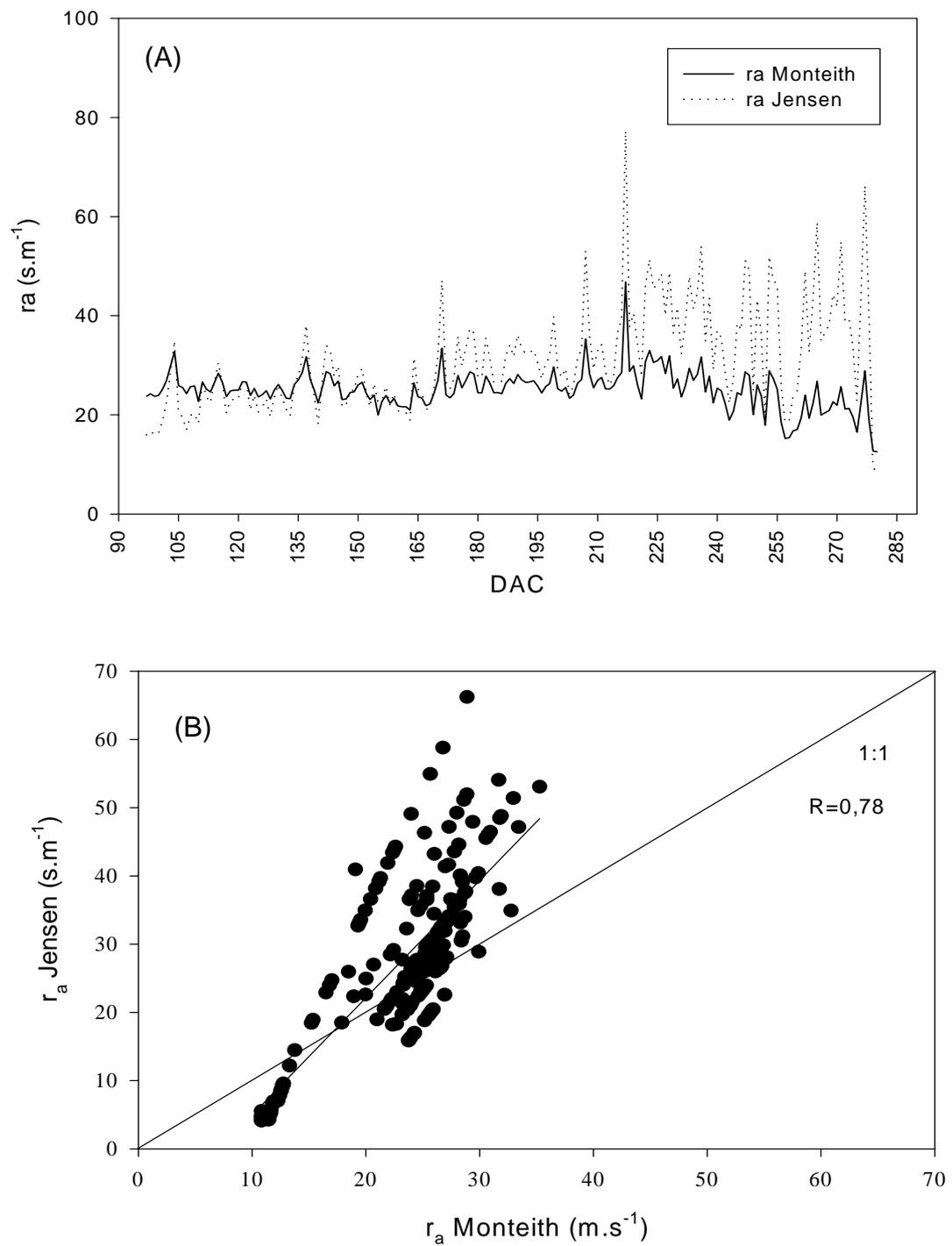


FIGURA 29. Resistência aerodinâmica diária ( $\text{s.m}^{-1}$ ) ( $r_a$ ), utilizando as equações propostas por Monteith e por Jensen sobre um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante todo ciclo da cultura (A), e correlação entre essas variáveis (B). Pilar, AL, 1999.

A Figura 30 mostra a relação entre a resistência aerodinâmica, calculada pela formulação de Jensen e pela de Monteith & Unsworth (1990) e a velocidade do vento a 2,24m de altura, referentes aos 51 perfis de vento, com a atmosfera próxima à neutralidade. Os dados numéricos estão no Apêndice 10. Nota-se (Figura 30), uma relação exponencial negativa entre as variáveis, sendo  $r_a$  a variável dependente e a velocidade do vento a variável independente. Verificou-se que, à medida em que a velocidade do vento aumenta, ocorre uma diminuição de  $r_a$ . Função semelhante foi encontrada por Santos & Andre (1993) para cultura de feijão.

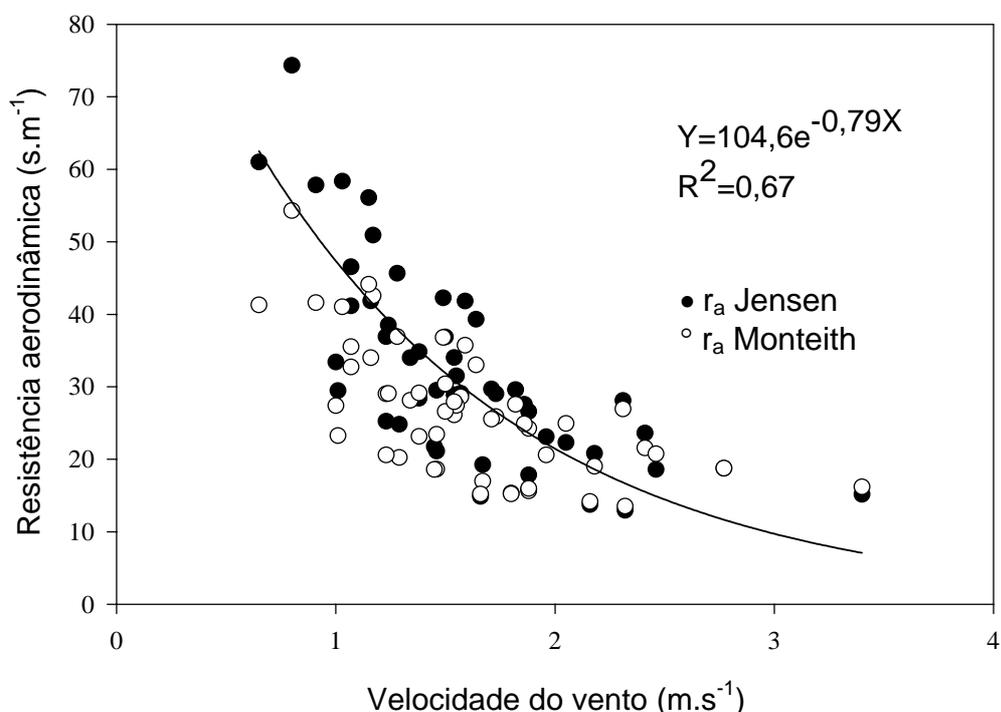


FIGURA 30. Relação entre a resistência aerodinâmica, utilizando as equações propostas por Jensen e por Monteith referente a 51 perfis de vento selecionados e a velocidade do vento sobre um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar, AL, 1999.

#### 4.5.2. Resistência da cobertura vegetal

Os resultados referentes à resistência do dossel ( $r_c$ ) encontram-se no Apêndice 11, onde também foram apresentados a data da amostragem, dias após

o corte (DAC) e o índice de área foliar (IAF), referentes ao ciclo 1998/99 da cana-de-açúcar. Na Figura 31, é expressa a relação entre a  $r_c$  e o índice de área foliar. Verifica-se que, à medida em que aumenta o IAF, superfície evaporante, ocorre uma diminuição da resistência da cultura favorecendo a um aumento no processo evaporativo.

A resistência do dossel média da cana-de-açúcar, para diferentes condições de umidade do solo, foi da ordem de  $64,4s.m^{-1}$  com uma variação de 23,6 a  $166,7s.m^{-1}$ . Os valores aqui encontrados estão de acordo com resultados encontrados na literatura (Peres et al., 1999).

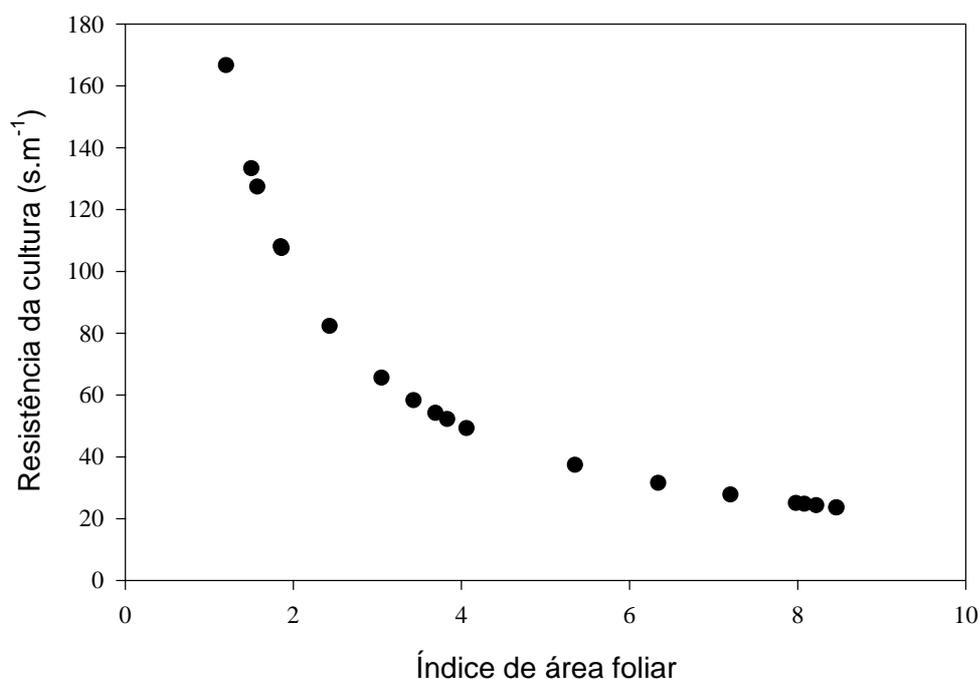


FIGURA 31. Relação entre a resistência da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 e o índice de área foliar. Pilar, AL, 1999.

#### 4.6. Evapotranspiração da cultura

##### 4.6.1. Método do Balanço de Energia

Os valores de evapotranspiração da cultura, para os dois ciclos, encontram-se no Apêndice 12. Na Figura 32 foram comparados esses valores.

O período de estimativa da evapotranspiração difere nos dois ciclos. No ciclo 1997/98, o período corresponde de 15 de janeiro/98 ou 119 DAC (final do afilhamento) a 20 de setembro/98 ou 367 DAC (sub-período de formação da produção). Do ciclo 1998/99, determinou-se a evapotranspiração no período corresponde de 01 de janeiro/99 ou 97 DAC (sub-período de afilhamento) a 31 de julho/99 ou 308 DAC (fim do crescimento vegetativo).

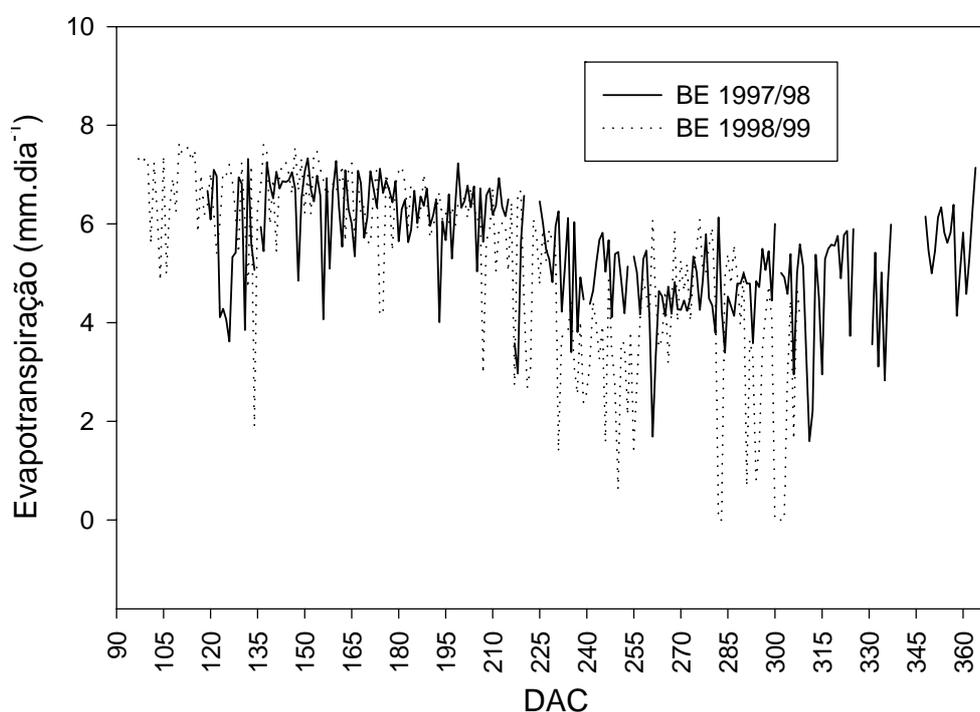


FIGURA 32. Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ), pelo método do balanço de energia (BE), durante todo ciclo, nos dois anos estudados. Pilar, AL, 1997/98 e 1998/99.

Nota-se que, de meados de abril (230 DAC) até os 300 DAC, período da estação chuvosa, houve uma diminuição na magnitude da evapotranspiração, principalmente no ciclo 1998/99, que pode ser atribuída à baixa demanda evaporativa, uma vez que havia água disponível e a baixa velocidade do vento observada na Figura 10.

A Figura 33 mostra a distribuição da evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar (mm), pelo método do balanço de energia, durante todo período de crescimento da cultura e nos dois ciclos estudados, através da técnica do diagrama de caixa (Wilks, 1995). A amplitude de variação foi maior no ano 1998/99 (tamanho da caixa) em relação a 1997/98. Em 1998/99, 90% dos valores observados foram superiores a 3mm, enquanto em 1997/98, 90% foram superiores a 4mm. A mediana de 1997/98 foi de aproximadamente 5,5mm e a de 1998/99 foi praticamente 6mm.

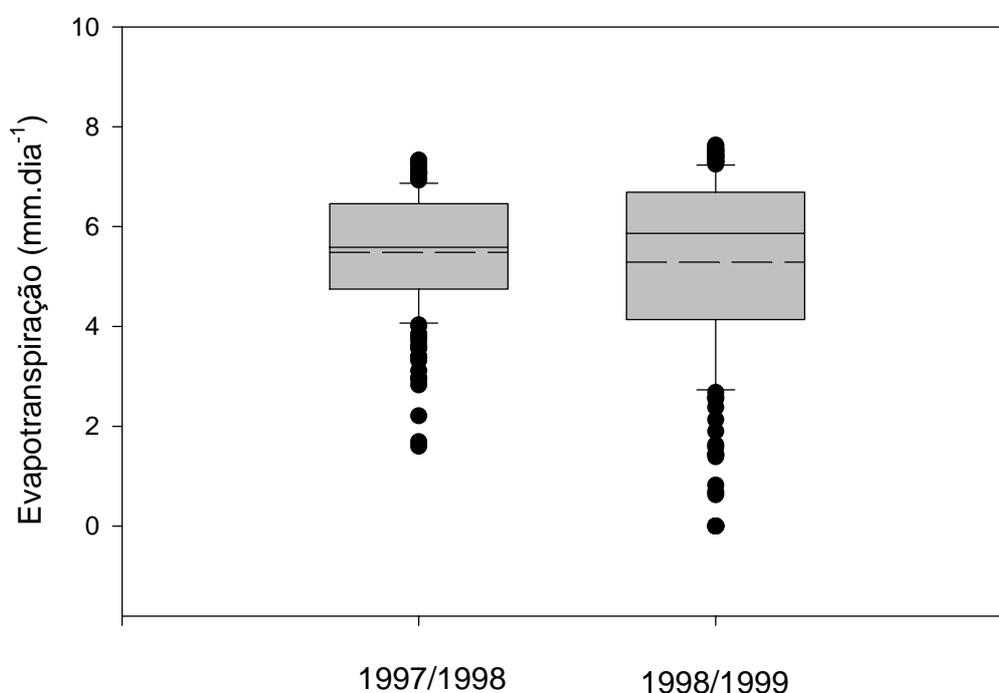


FIGURA 33. Distribuição da evapotranspiração ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método do balanço de energia, durante todo período de crescimento da cultura e nos dois ciclos estudados. Pilar, AL. A linha horizontal no interior da caixa representa o percentil 50 (mediana), a linha tracejada representa a média, o fim das caixas os percentis 25 e 75, as barras os percentis 10 e 90 e os círculos cheios os valores extremos.

#### 4.6.2. Método de Penman-Monteith

No Apêndice 13, encontram-se os valores de evapotranspiração ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) segundo o método combinado de Penman-Monteith, utilizando-se as duas formulações propostas para estimativa da resistência aerodinâmica. Nota-se, na Figura 34A, não haver diferenças significativas dos valores de evapotranspiração diária.

A Figura 34B mostra melhor a relação entre a evapotranspiração diária da cultura, pelo método de Penman-Monteith, utilizando as duas formulações para a resistência aerodinâmica. Observa-se que os pontos, em sua grande maioria, estão muito próximo da linha 1:1 ( $R = 0,90$ ). Portanto, apesar da tendência das resistências estimadas pelo método de Jensen serem maiores que as estimadas pelo método de Monteith, essas diferenças não se traduziram em diferenças significativas na evapotranspiração.

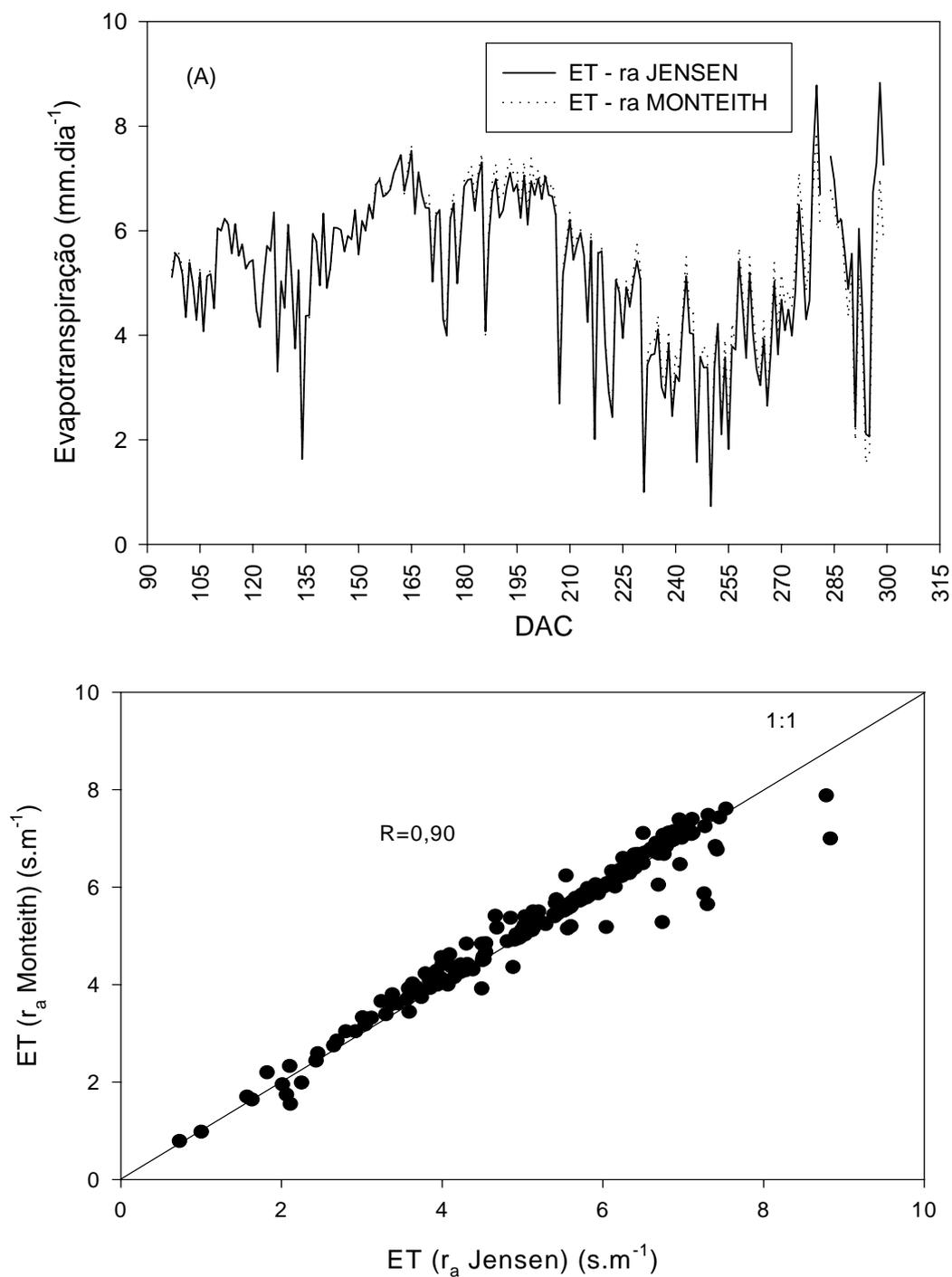


FIGURA 34. Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método de Penman-Monteith, utilizando duas formulações para a resistência aerodinâmica (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B), durante todo o ciclo 1998/99. Pilar, AL.

A relação entre os valores diários de evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar obtidos pelo método de Penman-Monteith, utilizando a resistência aerodinâmica pela formulação de Monteith com  $z_0$  e  $d$  fixos e  $z_0$  e  $d$  variáveis em função da altura do dossel, para o período potencial de 200 a 280 DAC, está apresentada na Figura 35. Observam-se valores praticamente coincidentes. Na Figura 35B, essa correlação é melhor expressa, o que permite concluir que, pelo menos para período de boa cobertura do solo, para cana-de-açúcar com IAF maior do que 4, os valores de  $z_0$  e  $d$  não influenciam muito a evapotranspiração, sendo possível usar um valor médio da altura do dossel do final do ciclo.

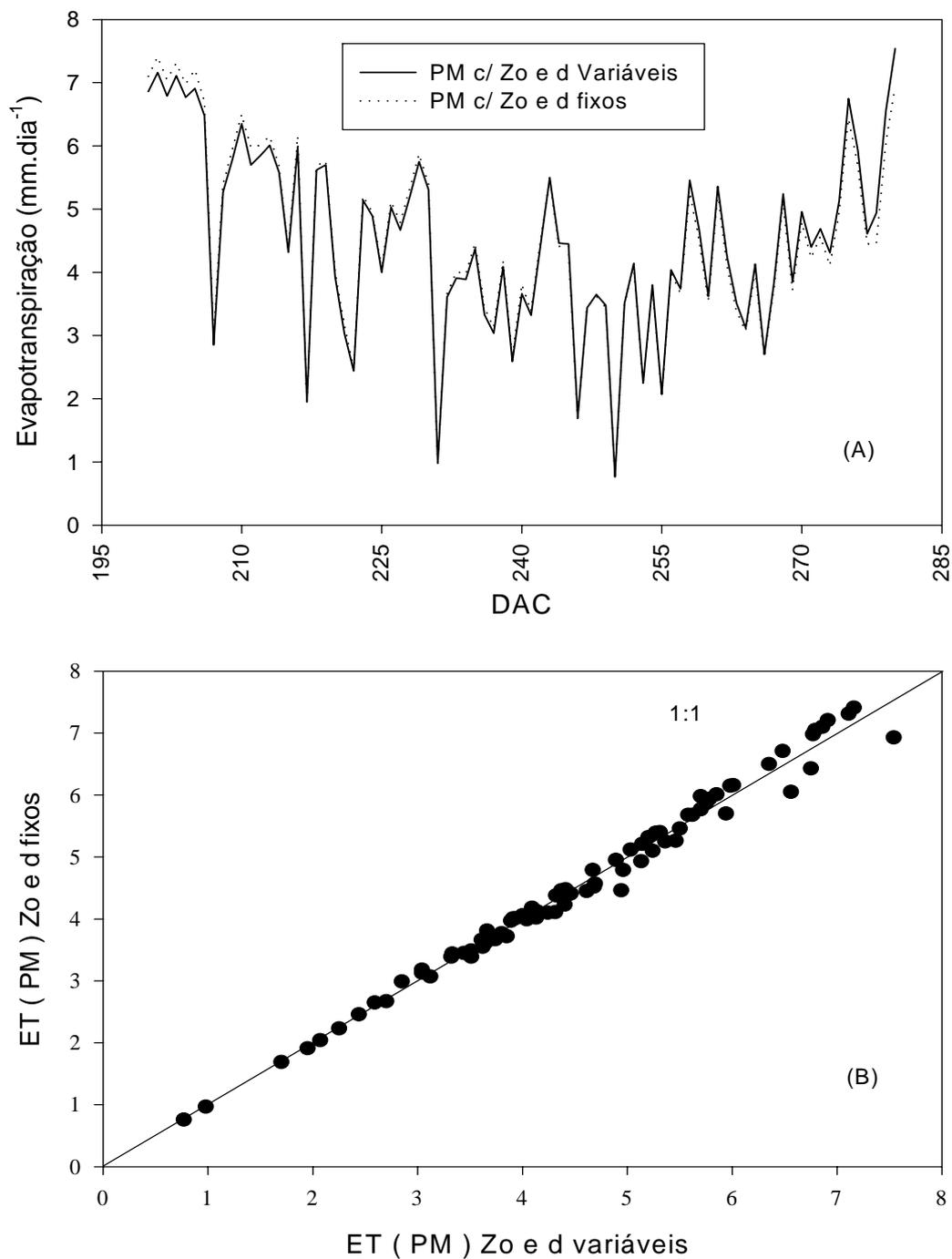


FIGURA 35. Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método de Penman-Monteith utilizando a resistência aerodinâmica pela formulação de Monteith com  $z_0$  e  $d$  fixos e  $z_0$  e  $d$  variáveis em função da altura do dossel (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B), Período potencial de 200 a 280 DAC. Pilar, AL, 1999.

Na Figura 36, é apresentada a distribuição da evapotranspiração diária através do método de Penman-Monteith para o ciclo da cana-de-açúcar de 1998/99, onde se verifica que a tendência da distribuição dessa variável é semelhante à encontrada pelo método do balanço de energia para o mesmo período. Nota-se que 90% dos valores de evapotranspiração da cana-de-açúcar foram superiores a 3,5mm. A mediana foi de aproximadamente 5,5mm, valor semelhante ao obtido pelo método do balanço de energia para o mesmo período.

Os valores médios estimados de evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar estiveram entre 4,7 e 6,2mm.dia<sup>-1</sup> no período seco enquanto, no período chuvoso, os valores médios diários foram de 4,0 a 4,2mm.dia<sup>-1</sup>.

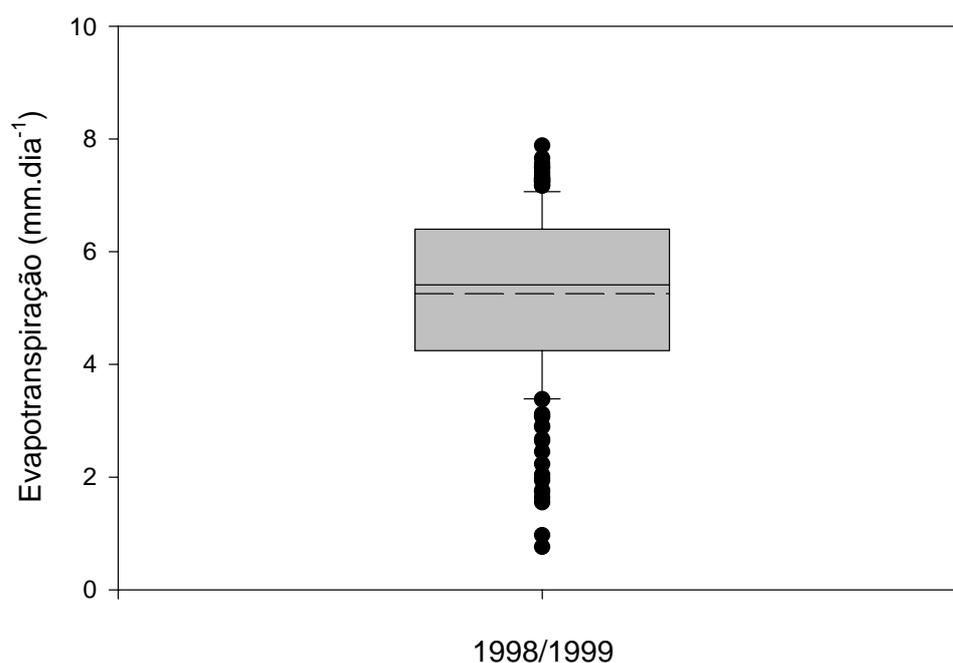


FIGURA 36. Distribuição da evapotranspiração (mm.dia<sup>-1</sup>) da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, pelo método do balanço de energia, durante todo período de crescimento da cultura. Ciclo 1998/99. Pilar, AL. A linha horizontal no interior da caixa representa o percentil 50 (mediana), a linha tracejada representa a média, o fim das caixas os percentis 25 e 75, as barras os percentis 10 e 90 e os círculos cheios os valores extremos.

### 4.6.3. Comparação de métodos

A evapotranspiração da cana-de-açúcar, estimada pelo método de Penman-Monteith, foi comparada com a evapotranspiração estimada pelo método do balanço de energia, considerado esse último como padrão. Utilizou-se o ciclo de 1998/99 para a análise, pelo motivo de que as estimativas pelo método de Penman-Monteith só foram possíveis nesse período. A resistência aerodinâmica foi estimada com a formulação proposta por Monteith e, essa escolha, foi devido ao fato que essa formulação é mais elaborada considerando, além da resistência para o transporte de momento, uma resistência adicional para vapor d'água e calor. Os valores dos parâmetros aerodinâmicos usados foram variáveis em função da altura do dossel ( $d = 0,71h$  e  $z_o = 0,15h$ ).

Na Figura 37A, estão representados os valores de evapotranspiração diária da cultura pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia e a Figura 37B mostra a relação entre os métodos estudados. Observa-se diferenças entre os métodos utilizados em período de deficiência hídrica e com baixo índice de área foliar. Resultados semelhantes foram obtidos com milho por Radin (1998). A análise mostra haver boa correlação entre os dois métodos ( $R = 0,73$ ), embora haja grande dispersão de pontos especialmente em situações de alta demanda atmosférica, avaliada pelos valores mais altos de evapotranspiração.

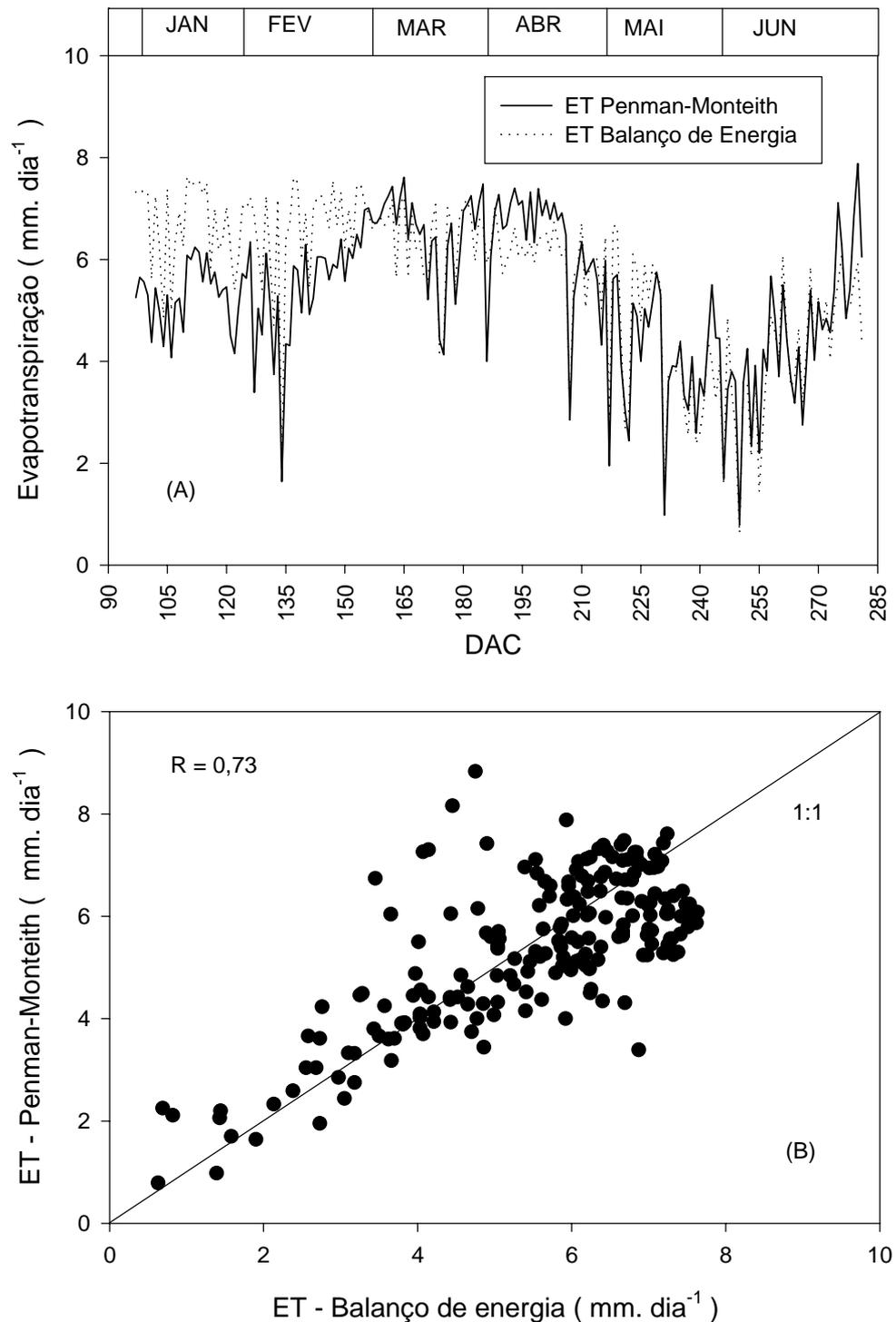


FIGURA 37. Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, estimada pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia em função de dias após o corte (DAC) (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B), durante todo o ciclo 1998/99. Pilar, AL.

Os valores de evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar obtidos pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia durante o período potencial de 200 a 280 DAC (Figura 38A) foram muito próximos de maneira geral.

A Figura 38B mostra uma melhora significativa da correlação entre os dois métodos para o período potencial ( $R = 0,91$ ) em relação a todo período. Isso é mais uma evidência do que se conhece da literatura, ou seja, que os métodos de estimativa de evapotranspiração, mesmo os mais elaborados, como é o caso do de Penman-Monteith, só apresentam bons resultados em condições potenciais ou seja, cobertura completa do solo e sem deficiência de água no solo.

A Figura 39 apresenta a comparação da evapotranspiração pelos dois métodos para períodos médios de 5 dias (quinqüídios), mostrando que há uma leve melhora na correlação.

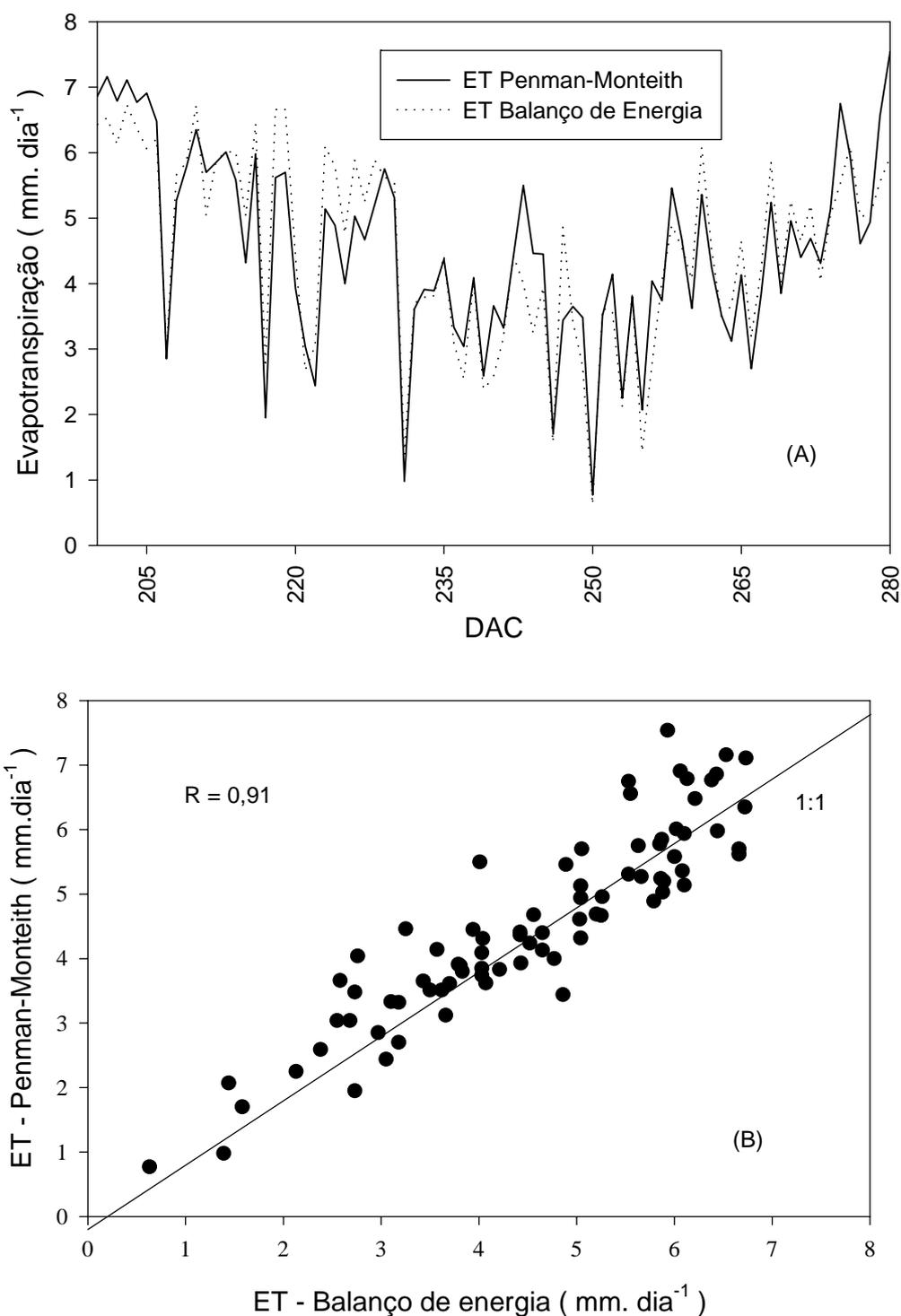


FIGURA 38. Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, obtidos pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia em função dos dias após o corte (DAC) (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B) para o período potencial de 200 a 280 DAC. Pilar, AL, 1999.

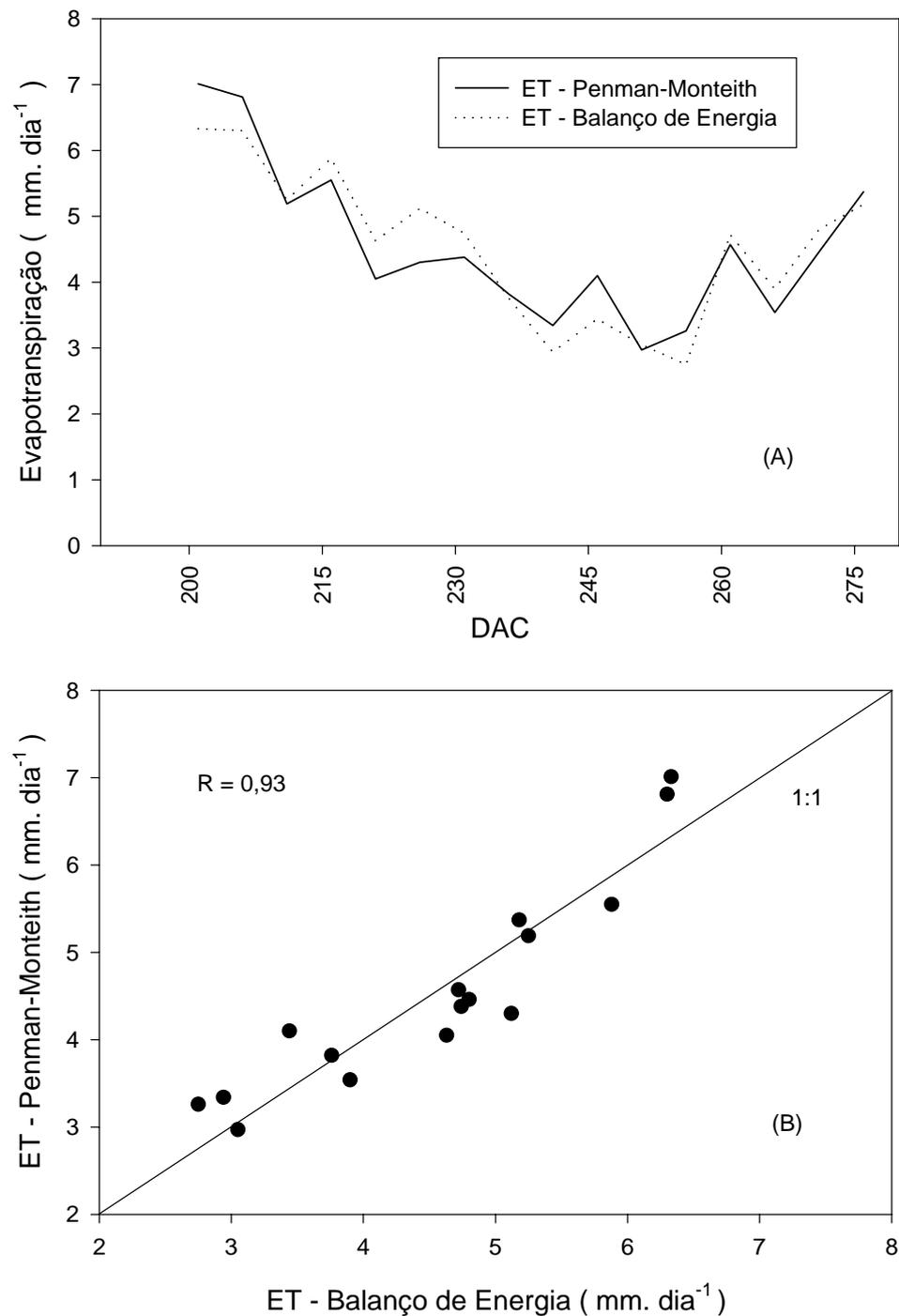


FIGURA 39. Evapotranspiração diária da cultura de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, em nível quinçidial, obtida pelo método de Penman-Monteith e pelo método do balanço de energia em função de dias após o corte (DAC) (A) e correlação entre essas mesmas variáveis (B) para o período potencial de 200 a 280 dias após o corte (DAC). Pilar, AL, 1999.

Em virtude dos dados apresentados e discutidos, especialmente neste item, e considerando o método do balanço de energia como padrão para obtenção de dados confiáveis de evapotranspiração em condições potenciais, pode-se concluir que a evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região Litoral Centro da zona canavieira do estado de Alagoas pode ser estimada pelo método de Penman-Monteith ora parametrizado. Esse método apresenta a vantagem de requerer dados meteorológicos de apenas um nível, obtidos, em geral, de estações meteorológicas convencionais.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que:

A altura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar pode ser estimada através de uma relação linear a partir da altura do colmo das plantas.

O índice de área foliar da cana-de-açúcar pode ser estimado, através de um modelo polinomial de segundo grau, a partir da altura do colmo das plantas de cana-de-açúcar.

Os parâmetros aerodinâmicos ( $z_0$  e  $d$ ) da cultura de cana-de-açúcar podem ser estimados em função da altura do dossel.

O fracionamento do saldo de radiação, na ausência de limitação hídrica e com a cultura cobrindo totalmente o solo, mostra que, a maior parte do saldo de radiação foi para o fluxo de calor latente de evaporação.

Dados confiáveis de evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar em condições potenciais (cobertura completa do solo e sem deficiência hídrica) para a zona canvieira do estado de Alagoas podem ser obtidos pelo método de Penman-Monteith parametrizado neste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-662, 1989.
- ANDRADE, M.C. de. **Usinas e destilarias das Alagoas** : uma contribuição ao estudo da produção do espaço. Maceió : EDUFAL, 1997. 136 p.
- ANDRE, R.G.B. **Um estudo dos transportes verticais de momentum, calor sensível vapor d'água sobre superfície vegetada nos trópicos**. São José dos Campos, 1980. 93f. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1980.
- BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. Piracicaba, 1993. 142f. Tese (Doutorado) - Programa de pós-graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- BARROS, R.S.; MAESTRI, M.; VIEIRA, M. et al. Determinação da área de folhas do café (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon Amarelo'). **Revista Ceres**, Piracicaba, v. 20, n. 107, p. 44-52, 1973.
- BERGAMASCHI, H.; OMETTO, J.C.; VIEIRA, H.J. et al. Deficiência em feijoeiro. II. balanço de energia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 7, p. 745-757, 1988.
- BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. 125 p.
- BERLATO, M. A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95 p. (Boletim Técnico, 7).
- BURBA, G.G.; VERMA, S.B. ; KIM, J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 94, p. 31-51, 1999.

- BURMAN, R.; POCHOP, L.O. **Evaporation, Evapotranspiration and climatic data**. New York: Elsevier, 1994. 278 p. (Developments in Atmospheric Science, 22).
- CAMARA, G.M. de S.; OLIVEIRA, E.A.M. de. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. 242 p.
- CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CHANG, J. **Climate and agriculture: an ecological survey**. Chicago: Aldine, 1968. 304 p.
- CHANG, J. **Problems and methods in agricultural climatology**. Taiwan: Oriental Publishing, 1971. 86 p.
- CUNHA, G.R. da. **Estudo micrometeorológico da transferência vertical de vapor d'água e energia em milho**. Porto Alegre, 1988. 142f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- CUNHA, G.R. da. **Evapotranspiração e função de resposta à disponibilidade hídrica em alfafa**. Porto Alegre, 1991. 197f. Tese. (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- CUNHA, G.R. da. Balanço de energia em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 9-16, 1994.
- CUNHA, G.R. da; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A. et al. Balanço de energia em cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1996.
- DOORENBOS, J; KASSAM, A H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p.
- FONTANA, D.C. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991.
- FONTANA, D.C. Determinação da evapotranspiração. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. 125p.
- FRANCIS, C.A.; RUTGER, J.N.; PALMER, A.F.E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**, Madison, v. 9, p. 537-539, 1969.

- FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.M.G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de grãos, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.
- GEIGER, R. **Manual de Micrometeorologia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1980. 556 p.
- GUERRA, A.F.; SLACK, D.C. Resistência aerodinâmica: Efeito dos métodos usados para especificar os parâmetros de rugosidade da superfície vegetada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 10, p. 673-681, 1996.
- HEILMAN, J.L.; BRITTIN, C.L. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 261-273, 1989.
- HOSSEIN ASHKTORAB, W.O.; PRUIT, K.T.; PAW U et al. Energy balance determinations close to the soil surface using a micro-bowen ratio system. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 46, n. 1, p. 259-274, 1989.
- HUNT, R. **Plant growth analysis**. London: The Camelot Press, 1978. 67 p. (The Institute of Biology's Studies in Biology, 96).
- JACOMINE, P.K.T et al. **Levantamento exploratório**: reconhecimento de solos do estado de Alagoas. Recife: EMBRAPA. Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975. 527 p.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York : American Society of Civil Engineers, 1990. 330 p.
- LEME, E.J.de A.; MANIERO, M. A.; GUIDOLIN, J.C. Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar e sua relação com a produtividade. **Caderno PLANALSUCAR**, Piracicaba, v. 2, p. 3-22, 1984.
- LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. **Crop ecology**: productivity and management in agricultural systems. New York : Cambridge University Press, 1996. 357 p.
- LONG, F.L. Application of calorimetric methods to ecological research. **Plant Physiology**, California, v. 9, p.323-238, 1934.
- LUCCHESI, A.A.. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. **Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz"**. v. 41, p. 181-201, 1984.
- LUCCHESI, A.A.. **Processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. Piracicaba: ESALQ/CENA, 1995. 48 p. (Boletim Técnico, 7).

- MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. 125 p.
- MONTEITH, J.L. **Vegetation and the atmosphere**. New York: Academic Press, 1975. v. 1, 277 p.
- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. Principles of environmental physics. 2nd. ed. London: Edward Arnold, 1990. 219 p.
- MOURA, M. A. L. **Estimativa da Evapotranspiração Horária**: Comparação entre os Métodos de Penman, Hofmann e Taxa de Bowen/Balanço de Energia. Botucatu : Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, 1992. 102f . Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1992.
- MÜLLER, A.G.; BERGAMASCHI, H.; SILVA, M.J.G. Eficiência de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. In: REUNIÃO ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGIA, 8., 2000, Mendoza, Argentina. **Anais...** Mendoza, 2000. 1 CD-ROM.
- NOBEL, P.S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. California : Academic Press, 1991. 635 p.
- OGA, F.M.; FONSECA, C.E.L da. Um método rápido para estimar área foliar em mudas de cagaiteira (*Eugenia dysenterica* d.c.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v. 29, n. 4, p. 571-577, 1994.
- PEREIRA, A. R. **Introdução à micrometeorologia** Piracicaba: Departamento de Ciências Exatas da ESALQ, 2000. 72 p.
- PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo**, Campinas, n. 114, 1987.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PERES, J.G.; PEREIRA, A.R., FRIZONE, J.A. et al. Determinação da resistência do dossel da grama para as condições de evapotranspiração potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 55-60, 1996.
- PERES, J.G.; PEREIRA, A.R.; FOLEGATTI, M.V. Determinação da resistência do dossel da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*) para utilização no modelo de Penman-Monteith. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 1-4, 1999.

- PRUEGER, J.H.; HATFIELD, J.L.; AASE, J.K. et al. Bowen-Ratio comparasion with lysimeter evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 730-736, 1997.
- RADIN, B. **Necessidades de água do milho quantificada em lisímetro e pelo modelo de Penman-Monteith modificado**. Porto Alegre, 1998. 97f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- RADFORD, P.J. Growth analysis formulae - Their use and abuse. **Crop Science**, Madison, v. 7, n. 3, p. 171-175, 1967.
- REIS, G.G.; MULLER, M.W. **Análise de crescimento de plantas**: mensuração do crescimento. Belém: FCAP. Serviço de Documentação e Informação, 1979. 39 p.
- ROSENBERG, N.J. **Microclimate**: the biological environment. New York: John Wiley & Sons, 1975. 315 p.
- SANT'ANA, M.M. **Contribuição à história do açúcar em Alagoas**. Recife: Museu do Açúcar, 1970. 513 p.
- SANTOS, R.Z. dos.; ANDRE, R.G.B. Relações energéticas e aerodinâmicas em uma cultura de feijão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 11-18, 1993.
- SANTOS, A.O. **Simulação da perda d'água dos estratos ensolarado e sombreado de um dossel de milho (Zea mays L.), sob diferentes condições de disponibilidade hídrica**. Porto Alegre, 1998. 156f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- SANTOS, A.O.; BERGAMASCHI, H.; CUNHA, G.R. da. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração máxima da alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 37-42, 1994.
- SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. i - xii, 1996.
- SELLERS, E.P. **Physical climatology**. Chicago: University of Chicago Press, 1965. 272 p.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; FOLEGATTI, M.V. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETO) por Penman-Montheith utilizando diferentes tipos de estação meteorológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10.; CONGRESSO DA FLISMET, 8., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1998. 1 CD-ROM.

- SESTAK,Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P.G. **Plant photosynthetic production: manual of methods.** New York: The Hague, 1971. p. 527-532.
- SIQUEIRA,A.A.; LEITÃO, M.M.V.R. Estimativa da evapotranspiração em áreas de caatiga e reflorestada com algaroba no semi-árido do nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10.; CONGRESSO DA FLISMET, 8., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1998. 1 CD-ROM.
- SOUZA, J.L. de.; CALHEIROS, C.B.M.; SANTOS, E.A. dos. Evapotranspiração pelo método de Penman-Montheith representativa da região do tabuleiro costeiro de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10.; CONGRESSO DA FLISMET, 8., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1998. 1 CD-ROM.
- SOUZA, J.L.; dos ANGOS, F.A.; MOURA FILHO, G. et al. Característica pluviométrica representativa dos tabuleiros costeiros de Alagoas, Período 1972-1996. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10.; CONGRESSO DA FLISMET, 8., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1998. 1 CD-ROM.
- STICKLER, F.C.; WEARDEN, S.; PAULI, A.W. Leaf area determination in grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 53, p. 187-189, 1961.
- TEIXEIRA, A.H.C.T.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.da. et al. Balanço de energia na cultura da videira, CV. "Itália". **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 137-141, 1997.
- TOLEDO FILHO, M.R. **Probabilidade de suprimento da demanda hídrica ideal da cultura de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) através da precipitação pluvial na zona canavieira do estado de Alagoas.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1988. 72f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.
- TERUEL, D.A. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1995. 93f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- VERNON, A.J.; ALLISON, J.C.S. A method of calculating net assimilation rate. **Nature**, Londres, n. 200, p. 814, 1963.
- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449p.

- VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1973. 72f. Tese (Livre Docente) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1973.
- VITAL MURTY, K.P.R.; MARQUES FILHO, E.P.; PRASAD, G.S.S.D. et al. Richardson number as a indicator of turbulent stratification in near and free convection regimes of the surface layer. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10.; CONGRESSO DA FLISMET, 8.,1998, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1998. 1 CD-ROM.
- WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.** San Diego, CA: Academic Press, 1995. p. 29-33.

## **7. APÊNDICES**

APÊNDICE 1. Cronograma de execução das amostragens de dados de planta para os dois ciclos estudados. Pilar (AL).

N. de AMOSTRAGEM	CICLO 1 - 97/98		CICLO 2 - 98/99	
	DATA	DIAS APÓS CORTE	DATA	DIAS APÓS CORTE
1	15.01.98	119	27.11.98	63
2	30.01.98	134	14.12.98	80
3	14.02.98	149	29.12.98	95
4	01.03.98	164	14.01.99	111
5	16.03.98	179	29.01.99	126
6	31.03.98	194	13.02.99	141
7	15.04.98	209	28.02.99	156
8	30.04.98	224	15.03.99	171
9	15.05.98	239	30.03.99	186
10	30.05.98	254	14.04.99	201
11	15.06.98	266	29.04.99	216
12	30.06.98	285	13.05.99	230
13	15.07.98	300	27.05.99	244
14	31.07.98	316	10.06.99	258
15	15.08.98	331	01.07.99	279
16	31.08.98	347	15.07.99	293
17			04.08.99	313
18			18.08.99	327
19			01.09.99	341

APÊNDICE 2. Variáveis micrometeorológicas e período de observação nos dois ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Pilar (AL), 1997/1999.

	Período	Rg	Rn (1nível)	Rn (2níveis)	S (1nível)	Temp. do Ar (2níveis)	Temp. do Ar (3níveis)	UR (2níveis)	Perfil do Vento (4níveis)
<b>Ciclo 1</b>	Jun/97	x	x		x	x		x	x
	Jul/97	x	x		x	x		x	x
	Ago/97	x	x		x	x		x	x
	Set/97	x	x		x	x		x	x
	Out/97	x	x		x	x		x	
	Nov/97	x	x		x	x		x	
	Dez/97	x	x		x	x		x	
	Jan/98	x	x		x	x		x	
	Fev/98	x	x		x	x		x	
	Mar/98	x	x		x	x		x	
	Abr/98	x	x		x	x		x	
	Mai/98	x	x		x	x		x	
	Jun/98	x	x		x	x		x	
	Jul/98	x	x		x	x		x	
Ago/98	x	x		x	x		x		
Set/98	x	x		x	x		x		
<b>Ciclo 2</b>	Out/98								
	Nov/98								
	Dez/98			x	x	x	x	x	x
	Jan/99			x	x	x	x	x	x
	Fev/99			x	x	x	x	x	x
	Mar/99			x	x	x	x	x	x
	Abr/99			x	x	x	x	x	x
	Mai/99			x	x	x	x	x	x
	Jun/99			x	x	x	x	x	x
	Jul/99			x	x	x	x	x	x
	Ago/99			x	x	x	x	x	x
Set/99			x	x	x	x	x	x	
RG – Radiação Global ( $W/m^2$ ) SR – Saldo de Radiação ( $W/m^2$ ) FS – Fluxo de Calor no Solo ( $W/m^2$ )					Temp. do Ar – Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ) UR – Umidade Relativa do Ar (%)				

APÊNDICE 3. Dias após o corte (DAC) e altura de colmo de plantas de cana-de-açúcar (cm), cv. SP 70-1143 durante os ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar (AL),1999.

DAC	Altura de Colmo	
	1997/98	1998/99
62		12,0
79		14,8
94		17,3
110		20,7
125	32,3	22,7
140	39,8	28,3
155	49,0	39,6
170	53,8	45,0
185	55,4	49,7
200	57,6	51,3
215	68,8	53,5
229	84,4	68,2
243	102,9	85,8
257	115,3	98,6
278	135,1	122,2
292	148,9	133,2
312	158,9	143,5
326	170,2	150,6
340	175,4	160,0
347	185,9	

APÊNDICE 4. Data da amostragem, número da amostragem, altura de colmo (m), altura de dossel (m) e altura estimada do dossel (m). Pilar (AL).1998/99.

DIA	AMOST.	Alt.ura de colmo	Altura de dossel	Dossel Est.
27.11.98	1	0,127		1,11
14.12.98	2	0,160		1,15
29.12.98	3	0,187		1,18
14.01.99	4	0,220		1,21
29.01.99	5	0,243		1,24
13.02.99	6	0,294		1,29
28.02.99	7	0,404		1,41
15.03.99	8	0,454		1,46
30.03.99	9	0,501		1,51
14.04.99	10	0,521		1,53
29.04.99	11	0,513		1,53
13.05.99	12	0,703		1,73
27.05.99	13	0,873		1,91
10.06.99	14	1,009		2,06
01.07.99	15	1,224	2,28	2,29
15.07.99	16	1,330	2,40	2,40
04.08.99	17	1,434	2,56	2,52
18.08.99	18	1,508	2,60	2,59
01.09.99	19	1,601	2,67	2,69

APÊNDICE 5. Número de plantas e número de folhas, comprimento (C) e largura (L) de folhas (cm), peso seco das amostras (PSA), peso seco das folhas (PSF) e peso seco total (PST), (g), área foliar real (AFR) e área das amostras (AA), (cm<sup>2</sup>). Valores amostrais para determinação do fator de correção (FC).

	C	L	C*L	PSA	PSF	PST	AFR	AA
<b>PLANTA 1</b>								
FOLHA								
1	112	4,4	493	1,03	4,01	5,04	430	88
2	111,5	4,7	524	0,98	3,48	4,46	427	94
3	107,5	4,7	505	0,96	3,09	4,05	397	94
4	114	4,5	513	0,91	3,13	4,03	401	90
5	124,5	4,3	535	0,84	3,48	4,31	443	86
6	135	4,8	648	0,87	4,02	4,89	539	96
7	147	5,3	779	0,98	4,67	5,66	609	106
8	151,5	5,5	833	1,03	4,97	5,99	642	110
9	132,5	5	663	0,85	3,60	4,45	525	100
10	102,5	4,5	461	0,66	1,90	2,57	349	90
<b>PLANTA 2</b>								
FOLHA								
1	100	4,3	430	0,84	2,65	3,49	357	86
2	108	4,2	453,6	0,81	2,93	3,74	388	84
3	107,5	4	430	0,81	2,57	3,38	335	80
4	106	4	424	0,78	2,51	3,29	337	80
5	115	3,8	437	0,72	2,54	3,27	343	76
6	118	3,8	448,4	0,76	2,93	3,69	370	76
7	123	4,5	553,5	0,84	3,23	4,07	435	90
8	126,5	4,6	581,9	0,87	3,44	4,31	456	<b>92</b>
9	117	4,9	573,3	0,92	2,55	3,48	369	98
10	82	4	328	0,55	1,18	1,73	253	80
<b>PLANTA 3</b>								
FOLHA								
1	103	4,8	494,4	0,96	3,52	4,48	446	96
2	99	4,5	445,5	0,91	3,13	4,05	398	90
3	107	4,5	481,5	0,87	2,96	3,83	398	90
4	116,5	4,2	489,3	0,81	2,94	3,74	389	84
5	113	4,1	463,3	0,78	2,92	3,71	388	82
6	126	3,9	491,4	0,74	3,22	3,96	419	78
7	128	4,5	576	0,88	3,56	4,43	456	90
8	136	5	680	0,97	4,00	4,98	511	100
9	142	5,1	724,2	0,92	4,03	4,95	550	102
10	120,5	5	602,5	0,85	2,60	3,45	406	100

APÊNDICE 6. Número de amostragem, data, dias após o corte (DAC), índice de área foliar (IAF) e altura de colmo (hc) (cm) de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante os ciclos 1997/98 e 1998/99. Pilar (AL).

No	CICLO 1				CICLO 2			
	DATA	DAC	IAF	hc	DATA	DAC	IAF	hc
1	15.01.98	119	2,24	32,3	27.11.98	62	1,2	12,0
2	30.01.98	134	3,67	39,8	14.12.98	79	1,5	14,8
3	14.02.98	149	4,21	49,0	29.12.98	94	1,57	17,3
4	01.03.98	164	4,38	53,8	14.01.99	110	1,86	20,7
5	16.03.98	179	4,06	55,4	29.01.99	125	1,85	22,7
6	31.03.98	194	4,14	57,6	13.02.99	140	2,43	28,3
7	15.04.98	209	5,03	68,8	28.02.99	155	3,05	39,6
8	30.04.98	224	6,5	84,4	15.03.99	170	3,69	45,0
9	15.05.98	239	7,72	102,9	30.03.99	185	4,06	49,7
10	30.05.98	254	8,57	115,3	14.04.99	200	3,43	51,3
11	15.06.98	270	8,66	135,1	29.04.99	215	3,83	53,5
12	30.06.98	285	8,84	148,9	13.05.99	229	5,35	68,2
13	15.07.98	300	8,75	158,9	27.05.99	243	6,34	85,8
14	31.07.98	316	8,38	170,2	10.06.99	257	7,2	98,6
15	15.08.98	331	8,65	175,4	01.07.99	278	7,98	122,2
16	31.08.98	347	8	185,9	15.07.99	292	8,22	133,2
17					04.08.99	312	8,08	143,5
18					18.08.99	326	8,46	150,6
19					01.09.99	340	8,46	160,0

APÊNDICE 7. Número de amostragem, dias após o corte (DAC), índice de área foliar (IAF), peso de matéria seca da parte aérea (MST) (g.planta), altura de colmo (hc) e altura do dossel (h) (m) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o período de crescimento. Pilar (AL), 1998/99.

Amost.	DAC	IAF	FOLHAS	BAINHAS	COLMO	MST	hc	h
1	80	1,2	5,70	3,01	0,00	8,71	0,12	1,11
2	95	1,5	8,24	4,70	0,00	12,94	0,15	1,15
3	111	1,57	10,88	6,14	0,00	17,08	0,17	1,18
4	126	1,86	9,18	5,35	0,64	14,65	0,21	1,21
5	141	1,85	19,05	9,98	2,33	31,12	0,23	1,24
6	156	2,43	28,77	15,78	10,31	54,85	0,28	1,29
7	171	3,05	25,96	14,19	11,17	51,32	0,40	1,41
8	185	3,69	35,12	18,24	18,00	71,36	0,45	1,46
9	200	4,06	41,68	27,51	22,27	91,46	0,50	1,51
10	215	3,43	37,27	21,32	23,69	82,28	0,51	1,53
11	229	3,83	35,42	18,13	16,06	69,61	0,54	1,53
12	243	5,35	34,22	17,91	20,21	72,34	0,68	1,73
13	258	6,34	42,60	20,62	27,36	90,57	0,86	1,91
14	278	7,2	44,72	23,30	54,47	122,49	0,99	2,06
15	292	7,98	42,34	22,15	55,79	120,28	122,2	2,29
16	312	8,22	56,01	28,46	111,38	195,86	133,2	2,40
17	326	8,08	60,23	30,57	127,00	217,80	143,5	2,52
18	340	8,46	65,73	32,76	153,25	251,73	150,6	2,59

APÊNDICE 8. Número de amostragem, dias após o corte (DAC), matéria seca total aérea (MST)(g.planta<sup>-1</sup>), taxa de crescimento relativo (TCR) (g.g<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>), área foliar (AF), (dm<sup>2</sup>) e taxa de assimilatória líquida (TAL) (g.dm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>) da cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143, durante o período de crescimento. Pilar (AL), 1998/99.

No	DAC	MST	TCR	AF	TAL
1	80	8,71		4,99	
2	95	12,94	0,026	6,23	0,179
3	111	17,08	0,017	6,50	0,168
4	126	14,65	-0,010	7,72	0,141
5	141	31,12	0,050	7,68	0,130
6	156	54,85	0,038	10,07	0,113
7	171	51,32	-0,004	12,66	0,088
8	186	71,36	0,022	15,33	0,072
9	200	91,46	0,018	16,86	0,058
10	215	82,28	-0,007	14,25	0,064
11	229	69,61	-0,012	15,90	0,062
12	243	72,34	0,003	22,22	0,049
13	257	90,57	0,016	26,32	0,039
14	309	122,49	0,006	29,90	0,124
15	323	120,28	-0,001	33,12	0,030
16	343	195,86	0,024	34,12	0,040
17	357	217,80	0,008	33,53	0,028
18	371	251,73	0,010	35,11	0,027
19	337	301,10	-0,005	35,10	-0,065

APÊNDICE 9. Resistência aerodinâmica diária obtida pela formulação proposta por Jensen e pela proposta por Monteith ( $s\ m^{-1}$ ) observadas durante todo ciclo de um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar (AL), 1998/99.

DIA	jan/99		fev/99		mar/99		abr/99		mai/99		jun/99		jul/99	
	Monteith	Jensen												
1	23,77	15,92	23,18	19,66	22,72	22,97	26,37	31,88	46,79	77,26	27,98	49,23	19,07	40,93
2	24,23	16,88	24,95	23,46	23,89	25,66	27,28	34,08	28,76	37,70	20,01	24,94	12,71	9,35
3	23,74	15,85	26,14	26,03	22,31	22,02	26,32	31,77	29,88	40,40	26,01	43,22	12,54	8,50
4	23,93	16,26	24,87	23,29	23,27	24,24	28,11	36,09	25,98	34,44	23,82	36,57	12,62	8,90
5	25,15	18,82	23,32	21,09	21,76	20,76	27,04	33,51	23,20	27,69	17,88	18,48		
6	26,92	22,56	23,25	19,79	21,66	20,52	26,52	32,26	30,75	46,00	28,88	51,95		
7	29,91	28,88	26,10	25,96	21,63	20,45	26,64	32,55	32,97	51,39	27,30	47,16	12,69	9,27
8	32,76	34,89	27,01	27,90	20,97	18,94	26,87	33,10	30,54	45,51	25,16	46,31	12,73	9,43
9	25,91	20,43	28,50	31,12	26,41	31,46	25,81	30,56	30,93	46,45	18,46	25,94	13,28	12,19
10	25,49	19,55	31,72	38,07	23,63	25,07	24,43	27,22	31,76	48,47	15,22	18,43	13,74	14,45
11	24,27	16,98	27,10	28,09	23,36	24,44	25,71	30,32	28,30	40,07	15,35	18,90	12,53	8,47
12	25,67	19,92	25,03	23,63	21,85	20,96	26,29	31,71	31,89	48,77	16,80	23,97	12,24	7,03
13	25,81	20,23	22,35	18,17	22,18	21,73	29,65	39,78	25,35	36,53	17,01	24,70	12,41	7,84
14	22,68	18,31	25,54	27,05	24,36	25,30	25,26	29,50	27,25	41,64	19,40	33,06	12,75	9,57
15	26,64	26,78	28,69	33,98	26,95	31,92	24,77	27,55	23,58	32,26	23,98	49,08	11,85	6,92
16	25,17	23,64	28,31	33,14	33,42	47,14	25,50	29,33	25,87	38,43	19,30	32,69	11,77	6,39
17	24,60	22,41	25,85	27,75	24,04	26,64	23,32	24,04	29,39	47,91	22,36	43,39	11,47	4,36
18	26,54	26,55	26,80	29,83	23,43	25,19	24,01	25,73	26,96	41,37	26,76	58,79	11,63	5,42
19	28,38	30,50	23,05	21,60	24,29	27,23	26,40	31,51	28,16	44,59	19,93	34,91	11,57	5,04
20	26,46	26,40	23,22	21,96	27,93	35,79	27,13	33,28	31,67	54,05	20,41	36,59	11,45	4,24
21	23,66	20,41	24,49	24,75	25,43	29,91	35,28	53,05	24,58	34,94	20,85	38,14	11,59	5,19
22	24,79	22,82	24,60	25,00	26,95	33,48	28,20	35,89	27,78	43,57	22,61	44,27	11,65	5,57
23	24,95	23,16	26,00	28,07	28,66	37,50	25,45	29,20	22,42	29,15	21,92	41,87	10,83	4,80
24	24,97	23,20	26,56	29,30	28,24	36,50	26,96	32,88	25,35	37,02	25,66	54,93	10,83	4,53
25	26,67	26,85	24,39	24,52	24,48	27,68	27,54	34,28	24,81	35,58	21,15	39,16	10,83	5,53
26	26,62	26,73	23,06	21,62	24,46	27,61	25,20	28,60	22,16	28,45	21,29	39,67	10,83	4,12
27	23,93	21,00	23,97	26,29	27,78	35,43	25,18	26,02	18,93	22,33	19,54	33,54		
28	25,31	23,93	19,96	22,59	26,40	31,44	25,83	27,60	20,68	26,99	16,49	22,88		
29	23,61	20,53			24,46	26,55	27,46	36,59	24,47	38,52	22,49	43,85		

APÊNDICE 10. Data da amostragem, hora, índice de área foliar (IAF), velocidade do vento ( $u$ ) ( $m.s^{-1}$ ), parâmetros aerodinâmicos ( $d$  e  $z_0$ ) (m), velocidade de fricção ( $u^*$ ) ( $m.s^{-1}$ ) e resistências aerodinâmicas ( $r_a$ ) observadas sobre um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143 ( $s.m^{-1}$ ). Pilar (AL), 1998/99.

Nº	DIA	HORA	IAF	u	d	$z_0$	$u^*$	$r_a$	
								Jensen	Monteith
1	17/12/98	01:00	1,50	1,17	0,94	0,15	0,21	50,91	41,35
2	17/12/98	03:00	1,50	1,49	0,83	0,14	0,25	42,25	36,99
3	17/12/98	05:00	1,50	0,80	0,95	0,30	0,21	74,34	33,46
4	19/12/98	22:00	1,50	1,59	0,7	0,17	0,28	41,81	32,72
5	14/01/99	20:00	1,86	2,31	0,68	0,11	0,34	28,11	30,88
6	16/01/99	19:00	1,86	1,15	0,7	0,24	0,25	56,08	33,57
7	31/01/99	21:00	1,85	1,28	0,88	0,23	0,28	45,66	29,23
8	05/02/99	01:00	1,85	1,82	1,03	0,12	0,31	29,61	31,04
9	13/02/99	19:00	2,43	1,64	0,6	0,22	0,32	39,30	27,94
10	27/02/99	19:00	3,05	1,88	1,00	0,17	0,37	26,58	24,56
11	28/02/99	19:00	3,05	2,41	0,75	0,21	0,48	23,61	19,62
12	01/03/99	19:00	3,05	1,50	0,81	0,25	0,34	36,87	24,84
13	14/03/99	19:00	3,69	1,54	1,14	0,17	0,32	28,90	26,77
14	17/03/99	08:00	3,69	1,57	1,10	0,09	0,25	29,10	40,12
15	17/03/99	09:00	3,69	2,05	1,10	0,05	0,27	22,30	43,28
16	17/03/99	10:00	3,69	2,46	1,10	0,07	0,35	18,58	31,36
17	17/03/99	16:00	3,69	3,40	0,90	0,12	0,56	15,16	19,33
18	17/03/99	17:00	3,69	2,77	0,89	0,14	0,49	18,73	21,03
19	17/03/99	18:00	3,69	1,86	0,91	0,18	0,37	27,57	24,86
20	17/03/99	19:00	3,69	1,73	0,95	0,19	0,35	29,01	25,14
21	28/03/99	18:00	4,06	1,55	0,95	0,20	0,33	31,48	26,37
22	29/03/99	19:00	4,06	1,50	1,07	0,2	0,33	30,34	25,41
23	29/03/99	20:00	4,06	1,34	1,06	0,24	0,32	33,99	24,56
24	15/04/99	19:00	3,43	1,07	1,1	0,26	0,28	41,16	26,69
25	15/04/99	21:00	3,43	1,07	0,9	0,33	0,29	46,55	25,13
26	18/04/99	18:00	3,43	1,54	0,8	0,29	0,37	34,02	21,99
27	18/04/99	19:00	3,43	1,38	0,96	0,24	0,32	34,83	25,38
28	27/04/99	20:00	3,83	0,91	0,80	0,41	0,28	57,81	24,86
29	29/04/99	17:00	3,83	1,03	0,5	0,57	0,36	58,34	19,49
30	01/05/99	14:00	3,83	1,16	0,95	0,23	0,27	41,85	30,15
31	04/05/99	15:00	3,83	1,71	0,87	0,23	0,38	29,67	22,93
32	15/05/99	05:00	5,35	1,96	0,9	0,25	0,47	23,10	18,84
33	15/05/99	06:00	5,35	2,18	0,9	0,24	0,51	20,82	17,81
34	15/05/99	15:00	5,35	1,23	0,9	0,33	0,35	36,92	22,03
35	15/05/99	22:00	5,35	0,65	1,1	0,44	0,25	61,00	23,99
36	16/05/99	16:00	5,35	1,24	0,81	0,41	0,39	38,51	19,14
37	28/05/99	16:00	6,34	1,46	0,86	0,38	0,45	29,49	17,36
38	29/05/99	16:00	6,34	1,38	1,00	0,33	0,41	28,41	18,82
39	02/06/99	08:00	6,34	1,00	1,21	0,26	0,29	33,41	25,48
40	08/06/99	10:00	7,20	1,46	1,21	0,28	0,45	21,12	17,50
41	08/06/99	16:00	7,20	1,01	1,25	0,32	0,36	29,47	19,81
42	09/06/99	09:00	7,20	1,88	1,25	0,23	0,51	15,81	16,48
43	09/06/99	10:00	7,20	2,32	1,24	0,22	0,61	12,95	14,51
44	09/06/99	11:00	7,20	2,16	1,25	0,22	0,57	13,75	15,27
45	10/06/99	08:00	7,20	1,80	1,32	0,23	0,51	15,32	16,09
46	10/06/99	15:00	7,20	1,88	1,12	0,31	0,58	17,83	14,15
47	10/06/99	16:00	7,20	1,29	1,17	0,34	0,45	24,83	16,65
48	11/06/99	07:00	7,20	1,45	1,19	0,31	0,47	21,72	16,39
49	11/06/99	16:00	7,20	1,23	1,21	0,33	0,42	25,23	17,35

50	12/06/99	16:00	7,20	1,67	1,17	0,3	0,52	19,25	15,37
51	09/08/99	16:00	8,08	1,66	1,22	0,63	0,48	14,88	10,97

APÊNDICE 11. Data da amostragem, dias após o corte (DAC), índice de área foliar (IAF), e resistência da cultura ( $r_c$ ) de um cultivo de cana-de-açúcar, cv. SP 70-1143. Pilar (AL), 1998/99.

DATA	DAC	IAF	$r_c$
27.11.98	62	1,2	166,67
14.12.98	79	1,5	133,33
29.12.98	94	1,57	127,39
14.01.99	110	1,86	107,53
29.01.99	125	1,85	108,11
13.02.99	140	2,43	82,30
28.02.99	155	3,05	65,57
15.03.99	170	3,69	54,20
30.03.99	185	4,06	49,26
14.04.99	200	3,43	58,31
29.04.99	215	3,83	52,22
13.05.99	229	5,35	37,38
27.05.99	243	6,34	31,55
10.06.99	257	7,2	27,78
01.07.99	278	7,98	25,06
15.07.99	292	8,22	24,33
04.08.99	312	8,08	24,75
18.08.99	326	8,46	23,64
01.09.99	340	8,46	23,64

APÊNDICE 12. Valores de Evapotranspiração diária (mm.dia<sup>-1</sup>) segundo o método do balanço de energia.

DIA	jan/98	jan/99	fev/98	fev/99	mar/98	mar/99	abr/98	abr/99	mai/98	mai/99	jun/98	jun/99	jul/98	jul/99	ago/98	ago/99	set/98	set/99
1		1,03	3,97	0,64	4,18	4,58	3,89	3,38	4,19	2,48	3,46	3,00	3,06	4,59	3,71		4,23	
2		1,63	3,68	1,09	4,05	4,57	4,36	2,52	3,98	4,61	2,90	2,48	2,92	7,00	3,68		3,72	
3		29,02	4,66	3,35	3,47	4,66	3,56	1,04	3,69	5,31	3,61	0,69	3,34	3,06	3,75		3,39	
4		0,88	4,57	1,86	4,60	4,63	3,99	1,07	3,62	3,36	3,72	3,41	3,30	8,90	3,82		3,73	
5		1,71	4,22	4,73	4,25	4,43	4,45	1,61	3,34	2,57	2,83	3,37	3,41		3,41		4,03	
6		0,78	4,58	6,12	3,69	4,32	4,53	0,86	3,94	3,00	1,35	1,95	3,28		3,97		4,37	
7		0,60	4,38	2,16	3,99	4,62	4,63	0,94	4,06	5,02	2,34	3,67	3,32	4,24	3,95		4,05	
8		0,49	4,49	5,69	4,64	4,03	4,75	0,74	2,97	4,65	3,23	1,21	2,54	3,67	2,63		3,85	
9		0,70	4,39	5,76	4,18	4,31	4,28	0,64	3,50	5,03	3,17	2,27	3,40	3,07	4,02		3,96	
10		1,68	4,45	6,11	4,22	4,51	4,45	2,26	4,18	4,70	2,89	3,89	3,32	3,14			4,32	
11		0,66	4,49	5,58	4,50	3,82	3,42	0,79	2,45	3,53	3,24	4,79	3,85	2,81			2,92	
12		1,28	4,29	4,56	4,36	4,49	4,65	2,65	4,14	3,88	2,88	4,48	3,55	3,20	4,19		3,44	
13		2,26	3,19	4,66	4,43	4,20	3,91	0,68	2,75	3,85	3,31	3,94	3,80	3,57			3,99	
14		0,59	4,14	4,25	4,18	4,28	4,48	1,02	3,41	3,68	2,95	5,78	3,14	0,70			3,14	
15	4,33	0,51	4,46	6,13	4,16	3,51	4,48	1,08	3,18	1,58	2,97	4,50	4,22	2,52	2,50		3,64	
16	3,92	0,44	4,70	5,88	4,59	4,80	4,21	3,79	0,00	3,35	3,07	3,51		2,25	3,69		4,25	
17	4,47	0,42	4,30	5,27	3,80	5,07	4,32	0,85	3,02	3,38	2,93	3,59	3,46	0,76	2,21		4,71	
18	4,40	2,07	4,05	4,95	4,21	6,14	4,71	1,99	3,25	3,48	3,12	4,61	3,38	1,17	3,50			
19	2,83	0,73	4,48	4,81	4,19	3,89	4,25	0,63	3,60	3,87	3,61	3,27	3,12	2,86	2,04		4,54	
20	3,07	0,48	4,20	6,03	3,91	3,96	4,05	0,57	3,87	2,88	3,43	4,28	3,63	3,34	3,36		4,29	
21	2,86	0,85	2,92	4,80	3,91	5,73	4,17	2,66	3,99	2,18	2,91	5,86	2,08	3,59	4,09			
22	2,61	1,33	4,62	5,05	4,20	5,21		2,82	3,48	3,31	3,44	4,08	3,44	3,81				
23	3,61	0,52	3,50	4,48	4,00	4,74	2,83	3,34	3,85	2,36	3,79	5,67	3,81					
24	3,71	1,03	4,50	4,69	4,32	5,10	2,21	3,46	2,89	2,44	3,10	5,43	3,57					
25	4,49	3,72	4,37	4,36	4,17	3,71	3,89	1,80	3,72	2,79	2,99	5,03	2,42					
26	4,38	3,57	3,89	5,03	4,29	2,86	4,49	2,58	3,72	3,95	2,63	4,31	1,24					
27	2,66	1,84	3,69	5,23	3,99	4,46		2,58	3,36	3,59	4,10	5,30	1,62	3,40				
28	4,68	0,80	4,56	4,64	4,15	1,35	4,47	3,26	2,90	4,24	2,98	6,53	3,69	4,57				
29	3,61	0,80			4,33	1,17		4,39	3,61	3,36	2,40	5,89	3,12	2,80				
30	3,61	0,38			2,80	0,92		3,64		1,25	3,17	4,65	2,10	4,91				
31		0,46			4,19	0,69			3,61	4,24			3,61	4,10				

APÊNDICE 13. Valores de Evapotranspiração diária (mm.dia<sup>-1</sup>) segundo o método combinado de Penman-Montheith Considerando as formulações propostas por Jensen e por Monteith para obtenção da resistência aerodinâmica.

DIA	Jan/99		Fev/99		mar/99		abr/99		mai/99		jun/99		jul/99	
	JENSEN	MONTEITH												
1	5,11	5,25	5,03	5,04	7,04	7,05	5,98	6,11	2,00	1,94	3,38	3,62	4,66	5,41
2	5,57	5,65	4,52	4,52	6,71	6,76	6,80	7,00	5,57	5,64	3,39	3,45	7,40	6,84
3	5,47	5,56	6,12	6,12	6,74	6,74	7,11	7,36	5,64	5,72	0,73	0,76	8,78	7,88
4	5,17	5,30	5,12	5,12	6,84	6,87	6,36	6,70	3,87	3,95	3,37	3,49	6,69	6,05
5	4,34	4,37	3,74	3,74	7,17	7,13	6,50	6,76	2,98	3,08	4,22	4,12		
6	5,39	5,44	5,20	5,27	7,34	7,29	6,94	7,22	2,43	2,45	2,10	2,23		
7	4,97	4,97	1,64	1,64	7,52	7,47	7,23	7,49	5,08	5,16	3,58	3,77	7,42	6,77
8	4,29	4,29	4,34	4,33	6,85	6,73	6,87	7,17	4,83	4,90	1,82	2,04	6,96	6,47
9	5,20	5,30	4,34	4,28	7,12	7,26	7,01	7,24	3,95	4,02	3,79	3,99	6,15	6,01
10	4,07	4,07	5,92	5,86	7,60	7,66	6,33	6,44	4,94	5,05	3,72	3,67	6,21	6,28
11	5,13	5,15	5,79	5,77	6,39	6,44	7,18	7,41	4,58	4,70	5,41	5,26	5,60	5,20
12	5,17	5,24	4,94	4,95	7,18	7,15	6,20	6,40	5,08	5,23	4,54	4,52	4,88	4,36
13	4,51	4,57	6,34	6,29	6,75	6,73	7,07	7,51	5,52	5,86	3,56	3,55	5,56	5,15
14	6,05	6,08	4,92	4,93	6,49	6,52	6,77	6,93	5,13	5,39	5,20	5,25	2,25	1,99
15	6,00	6,00	5,27	5,22	6,53	6,76	7,11	7,23	0,99	0,97	4,00	4,10	6,04	5,18
16	6,23	6,24	6,06	6,05	5,06	5,25	6,71	6,86	3,49	3,66	3,34	3,39	4,49	3,92
17	6,12	6,14	6,05	6,04	6,33	6,39	7,14	7,17	3,69	4,00	3,04	3,07	2,11	1,55
18	5,56	5,56	6,02	6,02	6,43	6,46	6,77	6,83	3,71	3,96	3,93	4,02	2,06	1,74
19	6,13	6,13	5,60	5,60	4,37	4,46	6,77	7,00	4,18	4,45	2,65	2,67	6,74	5,28
20	5,52	5,52	5,88	5,89	4,03	4,17	6,36	6,55	3,08	3,43	3,68	3,73	7,30	5,65
21	5,74	5,75	5,83	5,84	6,24	6,29	2,72	2,89	2,88	3,12	5,03	5,10	8,83	7,00
22	5,27	5,26	6,40	6,41	6,59	6,76	5,20	5,31	3,91	4,17	3,63	3,72	7,26	5,87
23	5,40	5,40	5,56	5,58	5,02	5,15	5,73	5,83	2,51	2,64	4,68	4,79		
24	5,44	5,46	6,21	6,23	5,95	6,04	6,27	6,39	3,37	3,80	4,09	4,23		
25	4,50	4,50	6,03	6,03	6,91	6,99	5,54	5,78	3,19	3,38	4,49	4,57		
26	4,15	4,15	6,51	6,50	7,03	7,12	5,80	5,90	4,31	4,48	3,99	4,11		
27	5,03	5,03	6,23	6,23	7,07	7,32	6,03	6,05	5,44	5,71	4,85	4,93	10,65	2,90
28	5,71	5,72	6,92	7,00	6,47	6,66	5,58	5,61	4,28	4,65	6,50	6,43	8,16	3,64
29	5,61	5,63			7,10	7,18	4,27	4,33	4,18	4,62	5,54	5,70		
30	6,35	6,34			7,42	7,56	5,85	6,03	1,62	1,76	4,30	4,45		
31	3,30	3,39			4,02	3,96			3,55	3,38				