

THIERES GEORGE FREIRE DA SILVA

**ANÁLISE DE CRESCIMENTO, INTERAÇÃO BIOSFERA-ATMOSFERA E
EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA
NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009**

THIERES GEORGE FREIRE DA SILVA

**ANÁLISE DE CRESCIMENTO, INTERAÇÃO BIOSFERA-ATMOSFERA E
EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA
NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 11 de setembro de 2009.

Magna Soelma Beserra de Moura
(Co-orientadora)

Aristides Ribeiro
(Co-orientador)

José Monteiro Soares

Antonio José Steidle Neto

Sérgio Zolnier
(Orientador)

Dedico,

Aos meus pais,

Edenilde Soares Freire da Silva e Gildemar da Silva,
pelos ensinamentos, dedicação, carinho e amor durante todos os anos de minha vida.

A minha irmã,

Taciana Freire da Silva,
pelo companheirismo, amor, carinho e amizade.

A minha companheira,

Luciana Sandra Bastos de Souza,
pelo carinho e admiração durante os meses juntos.

A todos meus amigos,

pelas vibrações positivas e confiança depositada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu grande Deus,
pela benção da vida com amor, saúde, felicidade, entusiasmo e esforço.

A meu orientador, professor Sérgio Zolnier, pela dedicação, ensinamento, respeito,
competência e profissionalismo.

A minha co-orientadora, Magna Soelma Bezerra de Moura, pela ajuda, amizade,
dedicação, oportunidades e incentivo.

Ao meu co-orientador, Aristides Ribeiro, pelo o apoio e confiança.

A minha ex-orientadora da graduação, Silva Helena Nogueira Turco, pela confiança,
incentivo e amizade.

Aos colaboradores José Monteiro Soares, Elieth O. Brandão, José Francisco A. do
Carmo, Roque Antônio Barbosa, Genival Nunes, Hélio Araújo Macedo pelo auxílio na
execução do presente trabalho.

A Universidade Federal de Viçosa - UFV, pela excepcional estrutura de ensino e
pesquisa.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, unidade Semi-Árido, pela
concessão da infra-estrutura de pesquisa e de recurso financeiro.

A Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco – AGROVALE pelo recurso
financeiro e, especialmente, aos gerentes Vinícius José de Souza Vieira e Walter Gomes
Faria Júnior, ao técnico agropecuário Ademar e aos funcionários Edson e Ubirajara,
pelo auxílio na execução deste trabalho.

Ao CNPq, pelo incentivo financeiro.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

THIERES GEORGE FREIRE DA SILVA, filho de Edenilde Soares Freire da Silva e de Gildemar da Silva, nasceu em 01 de maio de 1982, na cidade de Petrolina-PE.

Em novembro de 1999, concluiu o ensino médio pelo colégio Dom Bosco, em Petrolina-PE.

Em março de 2000, iniciou o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade do Estado da Bahia – UNEB/DTCS, localizada na cidade de Juazeiro-BA. Durante quatro anos participou de atividades de iniciação científica, na qualidade de bolsista. Graduiu-se no segundo semestre de 2004.

Em março de 2005, iniciou o mestrado na Universidade Federal de Viçosa – UFV/DEA, município de Viçosa-MG, no programa de pós-graduação em Meteorologia Agrícola, titulando-se em setembro de 2006.

Em outubro de 2006, iniciou o doutorado na área de Meteorologia Agrícola pela UFV/DEA. Em julho de 2009, foi aprovado em primeiro lugar no concurso para provimento de professor de ensino de magistério superior, na área de Agrometeorologia, pela Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UAST. Titulou-se em nível de doutorado em setembro de 2009.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Análise de crescimento da cultura da cana-de-açúcar	5
3.2. Balanço de radiação e de energia em superfície	8
3.3. Escoamento do ar em superfície e sua influência sobre a aplicação de métodos micrometeorológicos	11
3.4. Balanço de energia com base na razão de Bowen e suas particularidades	18
3.5. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar	22
3.6. Acoplamento entre a biosfera e a atmosfera (fator de desacoplamento)	25
3.7. Interação biosfera-atmosfera e a resposta da eficiência do uso de água da cana-de-açúcar à disponibilidade de água	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1. Descrição da área e do período experimental	34
4.2. Dados de crescimento e de rendimento da cana-de-açúcar	36
4.2.1. Dados biométricos	36
4.2.2. Dados de biomassa seca	38
4.2.3. Análise de rendimento e qualidade	39
4.3. Variáveis de crescimento e agrometeorológicas para a cana-de-açúcar	40
4.3.1. Índices morfofisiológicos	40
4.3.2. Taxa de aparecimento foliar e do filocrono	42
4.3.3. Fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada	42
4.3.4. Coeficiente de extinção	43
4.3.5. Uso eficiente de radiação e eficiência fotossintética	43
4.3.6. Graus dias acumulados	44
4.4. Medidas micrometeorológicas	44
4.5. Componentes do balanço de radiação	46

4.6. Componentes do balanço de energia	47
4.6.1. Balanço de energia com base na razão de Bowen	47
4.6.2. Análise da qualidade dos dados do método da razão de Bowen	49
4.7. Evapotranspiração da cultura, requerimento hídrico, evapotranspiração de referência e do coeficiente de cultura.....	51
4.8. Análise da interação entre a cana-de-açúcar e atmosfera	53
4.8.1. Fator de desacoplamento	53
4.8.2. Deslocamento do plano zero da cana-de-açúcar.....	55
4.9. Análise da eficiência do uso de água para a cana-de-açúcar	56
4.9.1. Indicadores com base na resposta produtiva da cultura	56
4.9.1.1. Uso eficiente de água	56
4.9.1.2. Produtividade da água da cultura	56
4.9.2. Indicadores de desempenho da aplicação de água com base na demanda hídrica requerida pela cultura.....	57
4.9.2.1. Suprimento relativo de água	57
4.9.2.1.1. Evapotranspiração máxima da cultura.....	57
4.9.2.2. Evapotranspiração relativa.....	59
4.9.2.3. Déficit hídrico da cultura.....	59
4.9.2.4. Fração de redução de água.....	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1. Variáveis meteorológicas, evapotranspiração de referência e irrigação.....	60
5.2. Padrões de crescimento da cana-de-açúcar.....	63
5.2.1. Perfilhamento.....	63
5.2.2. Estatura e diâmetro dos colmos	66
5.2.3. Número de folhas, área foliar e índice de área foliar	72
5.2.4. Biomassa seca da cana-de-açúcar e suas partições	81
5.2.5. Índices morfofisiológicos	87
5.2.6. Radiação fotossinteticamente ativa interceptada e coeficiente de extinção ..	94
5.2.7. Eficiência do uso de radiação	97
5.2.8. Análise do rendimento industrial.....	101
5.3. Balanço de radiação e de energia e suas partições	103
5.3.1. Análise da consistência física dos dados da razão de Bowen.....	103
5.3.2. Componentes dos balanços de radiação e de energia.....	107
5.3.2.1. Padrões para períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar	107

5.3.2.2. Padrões médios horários.....	112
5.3.2.3. Efeitos das condições de nebulosidade variável	119
5.3.2.4. Efeitos da disponibilidade de água no solo.....	121
5.3.2.5. Análise sazonal dos componentes dos balanços de radiação e de energia.....	123
5.4. Interação da cana-de-açúcar com a atmosfera – fator de desacoplamento	128
5.4.1. Padrões médios para períodos representativos do crescimento da cultura..	129
5.4.2. Efeitos da disponibilidade de água no solo	134
5.4.3. Análise sazonal	136
5.5. Requerimento hídrico e coeficiente da cultura da cana-de-açúcar irrigada.....	140
5.5.1. Evapotranspiração e requerimento da cultura.....	140
5.5.2. Coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada.....	143
5.6. Análise da eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada	147
5.6.1. Dados das lâminas utilizadas no cálculo da eficiência do uso de água.....	147
5.6.2. Eficiência do uso de água em relação à resposta produtiva da cultura	148
5.6.3. Eficiência do uso de água em relação ao desempenho de aplicação de água no sistema de produção	151
6. CONCLUSÕES	157
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
ANEXOS.....	175

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Advecção	-
AFE	Área foliar específica	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$
AFo	Área foliar	cm^2
AFoEM	Área foliar das folhas emergentes	cm^2
AFoTot	Área foliar total	cm^2
AFo+3	Área foliar da folha +3	cm^2
ARL	Açúcares redutores livres	%
B	Bainhas	-
BERB	Balanço de energia com base na razão de Bowen	-
BFC	Biomassa fresca dos colmos	g colmo^{-1}
BOC	Balanço de ondas curtas	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
BOL	Balanço de ondas longas	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
BSB	Biomassa seca das bainhas	g m^{-2}
BSC	Biomassa seca dos colmos	g m^{-2}
BSFBM	Biomassa seca das folhas e bainhas mortas	g m^{-2}
BSFV	Biomassa seca das folhas verdes	g m^{-2}
BSPA	Biomassa seca da palhada	g m^{-2}
BSPC	Biomassa seca do pseudocolmo	g m^{-2}
BSPE	Biomassa seca da parte emergente	g m^{-2}
BSTPA	Biomassa seca total da parte aérea	g m^{-2}
C	Colmo	-
CAS	Conteúdo de água no solo	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
CI	Comprimento do internódio	cm
CLI	Camada limite interna	-
CLP	Camada limite planetária	-
C+3	Comprimento da folha +3	cm
c_p	Calor específico do ar	$\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
d	Deslocamento do plano zero	m
DAC	Dias após o corte	-
DHC	Déficit de hídrico da cultura	mm
DMC	Diâmetro médio dos colmos	cm
DPV	Déficit de pressão de vapor d'água	kPa

EFT	Eficiência fotossintética	g MJ^{-1}
EMC	Estatura média dos colmos	cm
ER	Evapotranspiração relativa	-
e_a	Pressão de vapor d'água	kPa
EFT	Eficiência fotossintética	g MJ^{-1}
EMC	Estatura média dos colmos	cm
ER	Evapotranspiração relativa	-
e_s	Pressão de saturação do vapor d'água	kPa
ET	Evapotranspiração	mm dia^{-1}
ETc	Evapotranspiração diária da cultura	mm dia^{-1}
ETc15	Evapotranspiração da cultura a cada 15 minutos	mm
ETo	Evapotranspiração de referência	mm dia^{-1}
FBM	Folhas e bainhas mortas	-
FCO ₂	Fluxo de dióxido de carbono	-
FL	Filocrono	$^{\circ}\text{C dia folha}^{-1}$
f	Fração de água disponível no solo para a cultura	-
fg	Fator de Gay-Lussac	-
f_{tempo}	Fator de ajuste da escala de tempo	s
f_{RBAL}	Fator de transformação estequiométrica de sacarose	-
FRA	Fração de redução de água	-
f_{RFA}	Fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada	-
FV	Folhas verdes	-
g	Aceleração da gravidade	m s^{-2}
G	Fluxo de calor no solo	W m^{-2}
GDA	Graus dias acumulados	$^{\circ}\text{C dia}$
GPP	Produtividade primária líquida do ecossistema	-
H	Fluxo de calor sensível	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
h_c	Altura do dossel da cultura	cm
k	Constante de Von Karman	-
I	Lâmina de irrigação	mm
IAF	Índice de área foliar	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
Kc	Coeficiente de cultura	-
ke	Coeficiente de extinção	-

K_h	Coeficiente de transferência turbulenta de calor	-
K_m	Coeficiente de transferência turbulenta de <i>momentum</i>	-
K_w	Coeficiente de transferência turbulenta de vapor d'água	-
L	Calor latente de vaporização	kJ kg^{-1}
LCC	Limite crítico de água para a cultura	-
LE	Fluxo de calor latente	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
LE_{eq}	Evapotranspiração de equilíbrio	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
LE_{imp}	Evapotranspiração imposta	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
LI	Largura do internódio	cm
L_{M-O}	Comprimento característico de Monin-Obukvov	m
L+3	Largura da folha +3	cm
M	Energia utilizada em processos diversos como fotossíntese, respiração e armazenamento no dossel das plantas	-
NEE	Balanço líquido de dióxido de carbono	-
NFE	Número de folhas verdes emergentes	folhas colmo $^{-1}$
NFM	Número de folhas mortas	folhas colmo $^{-1}$
NFM_{AC}	Número de folhas mortas acumuladas	-
NI	Número de internódios	internódio colmo $^{-1}$
NFVA	Número de folhas verdes completamente abertas	folhas colmo $^{-1}$
$NFVA_{AC}$	Número de folhas verdes completamente abertas acumuladas	-
NPI	Número de perfilhos industrializáveis	perfilhos m $^{-2}$
P	Precipitação	mm
PAB	Porcentagem de açúcar bruto	%
PA_C	Produtividade da água da cultura	kg m^{-3}
pBSB	Partição da biomassa seca das bainhas	-
pBSFBM	Partição da biomassa seca das folhas e bainhas mortas	-
pBSFV	Partição da biomassa seca das folhas verdes	-
pBSPC	Partição da biomassa seca dos pseudocolmos	-
pBSC	Partição da biomassa seca dos colmos	-
pBSPE	Partição da biomassa seca da parte emergente	-

PFC	Posição da folha no colmo	-
PC	Pseudocolmo	g m^{-2}
PE	Parte emergente	g m^{-2}
PIC	Posição do internódio no colmo	-
Pr	Comprimento de mistura de Prandtl	-
r_a	Resistência aerodinâmica	s m^{-1}
RAF	Razão de área foliar	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$
RBAÇ	Rendimento bruto de açúcar	t ha^{-1}
RBAL	Rendimento bruto de álcool	t ha^{-1}
r_c	Resistência do dossel da cultura	s m^{-1}
RE	Respiração	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa interceptada	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
RFA_{LI}	Radiação fotossinteticamente ativa linear inferior	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
RFA_{LS}	Radiação fotossinteticamente ativa linear superior	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
R_g	Radiação solar incidente ou global	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
R_i	Número de Richardson	-
RMF	Razão de massa foliar	g g^{-1}
R_n	Saldo de radiação	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
ROC	Radiação de ondas curtas	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
ROL	Radiação de ondas longas	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
ROL_e	Radiação de ondas longas emitida pela superfície	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
ROL_a	Radiação de ondas longas proveniente da atmosfera	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
R_r	Radiação solar refletida	W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
SCL	Subcamada laminar	-
SCR	Subcamada rugosa	-
SCT	Subcamada de transição	-
SRA	Suprimento relativo de água	-
SFC	Subcamada de fluxo constante	-
t	Intervalo de armazenamento	min
TAL	Taxa de assimilação líquida	$\text{g m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
t_{ar}	Temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
T_{ar}	Temperatura do ar	K
t_{base}	Temperatura base	$^{\circ}\text{C}$
t_{bs1}	Temperatura de bulbo seco do nível de medição 1	$^{\circ}\text{C}$

t_{bu1}	Temperatura de bulbo úmido do nível de medição 1	$^{\circ}\text{C}$
t_{bs2}	Temperatura de bulbo seco do nível de medição 2	$^{\circ}\text{C}$
t_{bu2}	Temperatura de bulbo úmido do nível de medição 2	$^{\circ}\text{C}$
TCA	Taxa de crescimento absoluto	$\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
TCH	Toneladas de colmos por hectare	t ha^{-1}
TCR	Taxa de crescimento relativo	$\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$
TEDMC	Taxa de expansão média do diâmetro	mm dia^{-1}
TEMC	Taxa de elongação média dos colmos	cm dia^{-1}
TP	Taxa de perfilhamento	$\text{perfilhos m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
T_s	Temperatura da superfície	K
u	Velocidade do vento	m s^{-1}
u^*	Velocidade de fricção	m s^{-1}
UEA	Uso eficiente de água	kg m^{-3}
UER	Uso eficiente de radiação	g MJ^{-1}
UR_{ar}	Umidade relativa do ar	%
VI	Volume do internódio	cm^3
VTC	Volume total do colmo	cm^3
X	Bordadura	m
z	Altura de medição	m
z_1	Nível de medição 1	m
z_2	Nível de medição 2	m
z_{oh}	Parâmetro de rugosidade da superfície para o fluxo de calor	m
z_{om}	Parâmetro de rugosidade para o momentum	m
z_0	Nível de referência do dossel	m
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
α	Albedo da superfície	-
β	Razão de Bowen	-
γ	Constante psicrométrica	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor d'água	kPa
ε	Emissividade da superfície	-
ρ_a	Densidade do ar	kg m^{-3}
θ	Temperatura potencial	K
ψ_h	Fator de correção da estabilidade atmosférica para o	-

	calor	
ψ_m	Fator de correção da estabilidade atmosférica para o <i>momentum</i>	-
Ω	Fator de desacoplamento	-
ζ	Variável de estabilidade de Monin-Obukhov	-

RESUMO

SILVA, Thieres George Freire da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2009. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco.** Orientador: Sérgio Zolnier. Co-orientadores: Magna Soelma Beserra de Moura, Aristides Ribeiro e Paulo José Hamakawa.

O objetivo deste trabalho foi compreender os padrões de crescimento da cana-de-açúcar irrigada, as variações do controle da cultura à troca de vapor d'água com a atmosfera e a sua eficiência em termos de uso de água sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. O experimento foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar da Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco - Agrovale, situada no município de Juazeiro, na região semi-árida do estado da Bahia. A variedade utilizada foi a RB 92579, no ciclo de cana-soca. Uma torre foi instalada para a realização de medições micrometeorológicas a cada 60 segundos e com armazenamento dos valores médios em intervalos de 15 minutos. Adicionalmente, realizaram-se medições biométricas e de biomassa em intervalos de duas a cinco semanas e de rendimento ao final do ciclo da cultura (aos 13 meses), com a finalidade de determinar índices morfofisiológicos e variáveis agrometeorológicas. O método do Balanço de Energia com base na Razão de Bowen (BERB) foi utilizado para estimar os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H). A interação entre a cana-de-açúcar e a atmosfera na troca de vapor d'água foi realizada utilizando o fator de desacoplamento (Ω). Os valores de LE foram integrados para estimar a evapotranspiração (ET_c) e o coeficiente de cultura (K_c) da cana-de-açúcar. Finalmente, análises da eficiência do uso de água foram realizadas utilizando indicadores baseados no desempenho de aplicação de água no sistema de produção em relação à demanda hídrica requerida pela cana-de-açúcar e em função da resposta produtiva da cultura. Como resultados foram definidos os padrões de crescimento e de desenvolvimento da cana-de-açúcar irrigada, bem como o uso eficiente de radiação (UER) e a eficiência fotossintética (EFT) da cultura. Os valores de UER e EFT foram de 1,29 g MJ⁻¹ e 2,67 g MJ⁻¹, respectivamente, quando se considerou a produção de biomassa seca total da parte aérea. A análise de qualidade dos dados obtidos pelo método BERB demonstrou que 65,7% dos valores medidos apresentaram consistência física, ao passo que 88% dos dias monitorados foram considerados válidos para os cálculos dos fluxos em escala diária e ao longo do ciclo. Os valores de LE representaram 81% do saldo de radiação, enquanto que o H e o fluxo de calor no solo corresponderam a 16% e 3%, respectivamente. Durante o ciclo, o

parâmetro Ω esteve em torno de 0,68, indicando um desacoplamento de moderado a alto entre a cultura e a atmosfera, de modo que o processo de troca de vapor d'água foi governado pelo suprimento de energia, ao invés do controle estomático da cana-de-açúcar. Contudo, este controle foi observado como sendo maior do que em outras regiões de cultivo sob condições de irrigação, demonstrando uma provável restrição do sistema solo-clima ao processo de evapotranspiração da cana-de-açúcar. A ET_c média durante o ciclo foi de 4,7 mm dia⁻¹, resultando em um requerimento total de 1710 mm. O K_c variou de 0,65 a 1,10 entre as fases de brotação e crescimento máximo, reduzindo para 0,85 na fase de maturação da cultura. A cana-de-açúcar irrigada apresentou uma eficiência de produção de 9,49 kg de colmos, 1,22 kg de açúcar e 875,23 ml de álcool por metro cúbico de água evapotranspirada pela cultura (ET_c) e de 5,36 kg de colmos, 0,69 kg de açúcar e 494,14 ml de álcool por metro cúbico de água que entrou na área de cultivo por precipitação e irrigação (P+I).

ABSTRACT

SILVA, Thieres George Freire da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2009. **Growth analysis, biosphere-atmosphere interaction and water use efficiency of the irrigated sugarcane in the Submedio of the São Francisco Valley.** Adviser: Sérgio Zolnier. Co-Advisers: Magna Soelma Beserra de Moura, Aristides Ribeiro and Paulo José Hamakawa.

The objective of this work was to understand the growth patterns of the irrigated sugarcane, the variations of the crop control on water vapour exchange with the atmosphere and its water use efficiency under the climatic conditions of the Submedio of the São Francisco Valley. The experiment was carried in a commercial area of sugarcane of the Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A., a Company located in the district of Juazeiro, in the semi-arid region of Bahia State. The variety RB 92579 during the ratoon cycle was used. The tower was installed for the accomplishment of micrometeorological measurements to every 60 seconds with storage of the medium values in intervals of 15 minutes. Additionally, biometrics and biomass measurements were obtained in intervals from two to five weeks, while yield data were quantified at the end of the crop cycle (to the 13 months), with the objective to determinate morphophysiological index and agrometeorological variables. The Bowen Ratio-Energy Balance (BREB) method was used to estimate the latent (LE) and sensible (H) heat fluxes. The decoupling factor was calculated to analyze the interaction for water vapour exchange between the sugarcane and the atmosphere. The LE values along of day were integrated to estimate the crop evapotranspiration (ET_c) and the crop coefficient (K_c) of the sugarcane. Finally, analysis of the water use efficiency were carried out using indicators based an the water application performance in the production system as related to the requested water demand by the sugarcane and in function of the crop yield. As results, the growth and development patterns were defined for the irrigated sugarcane, as well as the radiation use efficiency (RUE) and the crop photosynthetic efficiency (PTE). The RUE and PTE values were of 1.29 g MJ⁻¹ and 2.67 g MJ⁻¹, respectively, when it was considered the production of aboveground dry biomass. The quality analysis of data obtained by the method BREB demonstrated that 65.7% of the measured values presented physical consistence, while 88% of the monitored days were considered valid for the calculations of the daily fluxes and during the crop cycle. The values of LE represented 81% of the radiation balance, while H and the soil heat flux corresponded to 16% and 3%, respectively. During the crop cycle, the parameter Ω was equal to 0.68 on average. This indicates that, there was a moderate to high decoupling

between the crop and the atmosphere, where the process water exchange was controlled, especially, by the energy supply, instead of the stomata control of the sugarcane. However, this control was observed to be larger than in other cultivation areas under irrigation conditions, demonstrating a probable restriction of the soil-climate to the evapotranspiration process of the sugarcane. The medium ET_c during the cycle was of 4.7 mm day^{-1} , resulting in a total water requirement of 1710 mm. The K_c ranged from 0.65 to 1.10 between the sprouting and maximum growth phases, reducing to 0.85 in the crop maturation stage. The irrigated sugarcane presented a production efficiency of 9.49 kg of stalks, 1.22 kg of sugar and 875.23 ml of alcohol for cubic meter of consumed water by the crop (ET_c) and of 5.36 kg of stalks, 0.69 kg of sugar and 494.14 ml of alcohol for each cubic meter of water that entered in the system as rain and irrigation ($P+I$).

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo, com 8,4 milhões de hectares de área cultivada e uma produção de 558 milhões toneladas de colmos, 26,6 milhões de metros cúbicos de álcool e 30 milhões de toneladas de açúcar, apresentando um aumento ano após ano, em decorrência da entrada de novas unidades industriais e da obtenção de novas variedades (BRASIL, 2008).

No ano de 2007, a produção de álcool aumentou 26% em relação ao ano anterior, resultando em um consumo total energético ainda maior (28,6%). No mesmo ano, os produtos da cana-de-açúcar ultrapassaram a energia hidráulica e elétrica na oferta de energia do país, permanecendo atrás apenas do petróleo e seus derivados. Mesmo com o aumento expressivo do consumo interno, as exportações também cresceram e permitiram ainda a formação de estoques, garantindo um equilíbrio no fornecimento e preços no período de entressafras. O uso do bagaço da cana, que é utilizado como fonte térmica, principalmente nos setores energéticos (produção de álcool, inclusive para a geração de energia elétrica) e de alimentos (produção de açúcar), teve um incremento em 11,1%. Cabe destacar também, o aumento no rendimento de processos de conversão de cana e melaço em etanol (BRASIL, 2008). Esses resultados mostram a importância e potencialidade da cana-de-açúcar para o setor de produção agrícola e para a matriz energética brasileira.

As recentes preocupações com a redução da emissão dos gases de efeito estufa, bem como o aumento dos preços dos combustíveis e as incertezas das reservas de petróleo vêm despertando o interesse pela exploração de culturas que possam se constituir em fontes de energia renovável (KOSGEI et al., 2007; SU & LEE, 2009). Neste sentido, a cana-de-açúcar destaca-se como uma das culturas potenciais, devido a produção de álcool e utilização dos resíduos do sistema de produção nas termelétricas, que contribuem para redução da emissão de gases de efeito estufa (ALONSO-PIPPPO et al., 2008; COELHO et al., 2006; IICA, 2009; SU & LI, 2009).

Por esses motivos, avanços das fronteiras agrícolas com áreas de cultivo de cana-de-açúcar têm ocorrido em várias regiões do país (IBGE, 2009). Na região semi-árida do Submédio do Vale do São Francisco, especificamente no município de Juazeiro, no norte do Estado da Bahia, a cana-de-açúcar tem apresentado um desempenho de destaque em relação às demais áreas de cultivo no país, devido a utilização de tecnologias de irrigação no sistema de produção. Nesta região, existe em torno de 18 mil hectares de cana-de-

açúcar irrigada, os quais representam 16,6% da área plantada no estado da Bahia. Em 2007, o rendimento médio desta cultura oscilou em torno de 91,2 t ha⁻¹, superior ao rendimento médio estadual (58,7 t ha⁻¹) e nacional (76,6 t ha⁻¹). A produção total do município de Juazeiro-BA foi de 1,6 milhões de toneladas de colmos, o que gerou uma renda de 75,5 milhões de reais (IBGE, 2009).

Na região do semi-árido brasileiro, os avanços das áreas agrícolas vêm promovendo modificações importantes no ecossistema local, por meio da substituição da vegetação nativa (caatinga). Estas modificações têm sido determinantes para a mudança no uso da terra desta região, o que pode contribuir para a alteração no ciclo hidrológico e no clima local ou em mesoescala (BALDOCCHI et al., 2000; HAO et al., 2007; WEVER et al., 2002). Dentre as principais alterações, destacam-se mudanças no albedo, na rugosidade da superfície, na umidade do solo e nas trocas de calor e vapor d'água entre a biosfera e a atmosfera (ADEGOKE et al., 2007; CAMPOS C., 2006).

A biosfera e o clima compõem um sistema acoplado, onde as escalares meteorológicas (temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, insolação, dentre outras) e os processos biológicos (fotossíntese, respiração, trocas de calor e vapor d'água) afetam o balanço de água, os fluxos de carbono e o crescimento das plantas (EASTMAN, 2001; MOTZER, 2005). Essa interação (vegetação-clima) reforça os *feedbacks* positivos e negativos da biosfera sobre o clima local, sendo uma informação de grande importância para estudos de melhor entendimento dos processos pertinentes, como aqueles relativos à modelagem, que visam prever os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas e necessitam de parâmetros representativos da superfície como dados de entrada dos modelos (ADEGOKE et al., 2007; BELTRÁN-PRZEKURAT et al., 2008; SANTOS & COSTA, 2004; VERHOEF & ALLEN, 2000; WRAMNEBY et al., 2008).

A compreensão dos processos que influenciam na interação biosfera-atmosfera pode ser obtida por meio de medições micrometeorológicas (BALDOCCHI et al., 1988; CABRAL et al., 2003; QIN et al., 2008), bem como por levantamento de parâmetros fisiológicos e de crescimento da vegetação do ecossistema em estudo (GILBERT et al., 2006; SINGELS et al., 2005; TEJERA et al., 2007). Com isso, é de grande relevância os monitoramentos micrometeorológico e do crescimento da cana-de-açúcar, pois permitirão entender melhor os processos que governam a interação entre a cultura e a atmosfera e obter parâmetros que possam ser utilizados em modelos de simulação.

Por outro lado, em regiões semi-áridas, a água é um recurso de fundamental relevância para a produção de cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY,

2003; WATANABE et al., 2004; WIEDENFELD, 2004). Portanto, o uso eficiente de água pode diminuir a quantidade total aplicada no sistema de produção e aumentar o rendimento da cultura (SINGH et al., 2007). Adicionalmente, pouco se conhece sobre o crescimento da cana-de-açúcar produzida na região do semi-árido brasileiro, mesmo sabendo que o acúmulo de biomassa e o rendimento de açúcar podem ser influenciados por vários fatores inerentes ao sistema de produção e ao ambiente de cultivo (GILBERT et al., 2006; SINGELS et al., 2005; TEJERA et al., 2007). Assim, a determinação do requerimento hídrico e das variáveis de crescimento da cana-de-açúcar obtidas sobre condições potenciais será de grande importância visando definir um “limiar” para a eficiência do uso de água no sistema de produção agrícola da cultura, especialmente no que se refere à produção de biomassa e, conseqüentemente, de rendimento de sacarose e de álcool (INMAN-BAMBER et al., 1999; INMAN-BAMBER & SMITH, 2005).

O incremento de biomassa e de sacarose na cana-de-açúcar apresentará benefícios à produção de energia renovável (agroenergia), por meio da utilização dos resíduos do sistema de produção (bagaço e palhada) e pelo aumento da quantidade de álcool produzido por tonelada, respectivamente. Além do mais, as informações levantadas sobre a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada permitirão melhorar o dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação, visando à redução da lixiviação excessiva de nutrientes e degradação dos solos, garantindo assim, a utilização mais responsável dos recursos naturais, redução dos impactos ambientais e aumento da lucratividade e dos benefícios sociais (COELHO et al., 2006; INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY, 2003; INMAN-BAMBER & SMITH, 2005).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Compreender os padrões de crescimento da cana-de-açúcar irrigada, as variações do controle da cultura à troca de vapor d'água com a atmosfera e sua eficiência do uso de água nas condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

2.2. Objetivos específicos

- (a) Analisar as variáveis agrometeorológicas e de crescimento da cana-de-açúcar irrigada;
- (b) Determinar a partição do saldo de radiação nos componentes do balanço de radiação e de energia ao longo do ciclo da cultura;
- (c) Estimar a evapotranspiração e o coeficiente de cultura da cana-de-açúcar para diferentes fases fenológicas;
- (d) Avaliar os padrões do acoplamento entre a cultura da cana-de-açúcar irrigada e a atmosfera para a troca de vapor d'água;
- (e) Estimar indicadores de eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Análise de crescimento da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura bem adaptada às condições tropicais e subtropicais, caracterizadas por alta disponibilidade de água e de radiação. As plantas possuem um grande armazenamento de sacarose nos tecidos dos colmos, tornando-a de extrema importância comercial (TEJERA et al., 2007). Porém, semelhante a outras culturas agrícolas, o sistema de produção da cana-de-açúcar pode ser afetado por fatores relacionados à planta (cultivares, tipo de ciclo), ao solo (tipo, fertilidade), às práticas culturais (época de plantio, densidade de plantio, rotação de cultura) e especialmente ao clima (temperatura, radiação, precipitação) (BELL & GARSIDE, 2005; BONNET et al., 2006; GILBERT et al., 2006; PARK et al., 2005).

Os componentes estruturais da cana-de-açúcar (biomassa dos colmos e sacarose) condicionam a produção de açúcar ou de álcool, sendo que o incremento de um deles pode aumentar o rendimento final da cultura (INMAN-BAMBER et al., 2002; SINGELS et al., 2005). Para avaliar tal contribuição, análises do crescimento da cana-de-açúcar, em termos de produção de biomassa e suas partições, bem como suas dinâmicas, podem ser de grande importância para melhor entender os mecanismos que promovem o aumento da eficiência produtiva da cultura em resposta às condições ambientais (TEJERA et al., 2007).

A análise de crescimento é considerada, sob o ponto de vista agrônomo, um estudo que permite conhecer as diferenças funcionais e estruturais entre variedades de uma mesma espécie. Nesta análise, a adaptação ecológica das variedades a novos ambientes é investigada, de forma que auxilie na seleção das mesmas de acordo com o seu desempenho produtivo (BENICASA, 1988; GAVA et al., 2001).

Comumente, a análise de crescimento da cultura da cana-de-açúcar é realizada por meio da estimativa de índices morfofisiológicos, como taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF) e razão de massa foliar (RMF), que necessitam de avaliações sequenciais, em intervalos regulares, do acúmulo de biomassa seca e área foliar. Contudo, também é possível avaliar o crescimento da cana-de-açúcar por meio de análise das dinâmicas de perfilhamento e das folhas, que condicionam a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}) pela cultura e, conseqüentemente,

o acúmulo de biomassa, eficiência do uso de radiação e incremento do rendimento industrial (OLIVEIRA, 2004; PARK et al., 2005; SILVA, 2005; SINGELS et al., 2005; TEJERA et al., 2007).

O perfilhamento é governado inicialmente pela temperatura e radiação; porém também é afetado pela variedade, densidade de plantio, ciclo (cana-planta ou cana-soca) e disponibilidade de água e de nitrogênio no solo. A cana-de-açúcar perfilha nos primeiros meses após o plantio ou a rebrota, e esse perfilhamento intensifica-se à medida que as condições de temperatura e disponibilidade hídrica são favorecidas. Após este período, o número de perfilhos diminui até se estabilizar (SUGUITANI & MATSUOKA, 2001). Inman-Bamber (1994) verificou, para a cana-de-açúcar durante o ciclo de soca, que o máximo perfilhamento ocorreu até 500 °Cdia e que a estabilização aconteceu após 1200 °Cdia, considerando uma temperatura base (t_{base}) de 16°C. Quanto à cana-planta, a cultura necessita de mais tempo para atingir o pico de perfilhamento quando comparada à cana-soca. Zhou et al. (2003) observaram que o máximo perfilhamento ocorreu entre 873 e 774 °Cdia ($t_{base} = 16^{\circ}\text{C}$), respectivamente, para as cultivares ZN6 e NCo376. Almeida et al. (2008), avaliando o desenvolvimento e a produtividade de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas, verificaram, para a cana-soca, um perfilhamento acentuado até 60 dias após o corte (DAC) ou 350 °Cdia. Este comportamento também foi observado por Alvares & Castro (1999), que encontraram valores de graus dias acumulados em torno de 350 °Cdia. Contudo, Donald et al. (2003), trabalhando com a variedade NCo376 no ciclo de cana-soca, verificaram que o perfilhamento ocorreu entre 399 e 873 °Cdia ($t_{base} = 16^{\circ}\text{C}$).

Associada à produtividade da cana-de-açúcar, tem-se que a dinâmica de crescimento dos colmos é outra variável que apresenta correlação positiva com o rendimento final desta cultura; contudo, a mesma pode variar com a variedade e condições do ambiente de cultivo. Silva (2005), analisando o crescimento de cinco variedades de cana-de-açúcar (RB 855113, RB 928064, RB 845210, RB 845197 e RB 855536) cultivadas em sequeiro, no ciclo de cana-soca, na região Noroeste do estado do Paraná, verificou que o diâmetro dos colmos estabilizou-se a partir dos 150 DAC, atingindo 2,62, 2,69, 2,46, 2,26 e 2,33 cm, respectivamente, quando a estatura dos colmos havia alcançado 50% do valor final (300 cm). Por outro lado, Costa et al. (2008), trabalhando com a variedade RB 92579 em condições de sequeiro, no município de Rio Largo, Alagoas, verificaram que a estabilização do diâmetro dos colmos ocorreu quando a estatura das plantas era de apenas 12% da estatura final (275 cm).

Concomitantemente, a dinâmica foliar é crucial na produtividade da cultura, uma vez que o baixo desenvolvimento foliar pode limitar expressivamente o rendimento da cana-de-açúcar, devido à redução da interceptação de radiação solar e ao acúmulo de biomassa pelas plantas (SINCLAIR et al., 2004). Inman-Bamber (2004) cita que o desenvolvimento foliar da cana-de-açúcar, ou seja, a taxa de aparecimento foliar ou filocrono (intervalo de tempo entre o surgimento de duas folhas consecutivas) é extremamente influenciada pela temperatura, mas que varia com a variedade (SINCLAIR et al., 2004; SINGELS et al., 2005). Segundo estes autores, a cana-de-açúcar apresenta dois períodos distintos de filocrono: um antes e outro após o surgimento da folha nº14. As primeiras folhas dos colmos têm uma taxa de crescimento maior do que àquelas que surgem em fases mais avançadas do ciclo da cultura. Para a variedade NCo376, o filocrono para o primeiro intervalo é de 69 °Cdia, enquanto que para o segundo é de 169 °Cdia. Esses valores são bem inferiores ao observados para a variedade N12 (118 °Cdia e 200 °Cdia) por Inman-Bamber (2004). No que se refere à área das folhas, geralmente a mesma aumenta com a posição foliar até a folha nº14, como resultado do aumento da área foliar específica (AFE), apresentando valores diferentes a depender da variedade (DONALD et al., 2003; ROBERTSON et al., 1998).

A área foliar tem grande importância para os valores da fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}), que pode ser afetada pelo espaçamento de plantio, tipo de ciclo (planta ou soca), data de início do ciclo e variedade (SINGELS & SMITH, 2002; SINGELS et al., 2005). Singels et al. (2005), analisando os efeitos da data de plantio ou de início de soca (dezembro e junho) no desenvolvimento do dossel e na f_{RFA} da cana-de-açúcar cultivada em Mount Edgecombe, África do Sul, verificaram que as variedades NCo376 e CP66/1043 atingiram valores de 80% de f_{RFA} mais rápidos, quando o ciclo teve início em dezembro. Quando comparado com o início em junho, estes autores observaram que a cana-de-açúcar, durante o ciclo de soca, atingiu 80% de f_{RFA} , mais rápido do que a cana-planta, logo que no início do ciclo da cana-soca existe um maior número de gemas para promover a emissão de perfilhos.

Na literatura internacional, tem-se avaliado a eficiência de conversão da radiação para biomassa da cana-de-açúcar, em termos de radiação solar global interceptada, denominando uso eficiente de radiação (UER). Contudo, quando se considera a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, a mesma recebe o nome de eficiência fotossintética (EFT) (SINGELS et al., 2005; SINCLAIR & MUCHOW, 1999). A cana-de-açúcar tem uma eficiência do uso de radiação relativamente alta, mas que depende da variedade e das condições climáticas do local de cultivo (SINCLAIR &

MUCHOW, 1999). Robertson et al. (1996a) informam que durante o ciclo de cana-planta, o UER ($1,72 \text{ g MJ}^{-1}$) foi 8% maior do que no ciclo de cana-soca ($1,59 \text{ g MJ}^{-1}$). Muchow et al. (1994) obtiveram, para variedade Q96, um UER de $1,75 \text{ g MJ}^{-1}$. Singels & Smith (2002) mencionam valores variando entre $1,72$ e $1,25 \text{ g MJ}^{-1}$ para a variedade NCo376, a depender do espaçamento de cultivo; ao passo que os modelos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar, APSIM e CANEGRO, assumem valores variando de $1,8$ a $1,65 \text{ g MJ}^{-1}$ e $1,5$ a $1,2 \text{ g MJ}^{-1}$ a depender da idade e do ciclo da cultura, respectivamente (SINGELS et al., 2008; KEATING et al., 1999).

Quando não se verifica melhorias no acúmulo de biomassa, devido ao aumento da eficiência do uso de radiação da cana-de-açúcar, uma partição mais favorável de biomassa para os colmos pode promover maior conversão em sacarose (INMAN-BAMBER et al., 2002). Robertson et al. (1996a) citam partição de 0,80 para variedades de cana-de-açúcar que produzem acima de 5 kg m^{-2} . Inman-Bamber et al. (2002) mencionam valores máximos de partição para os colmos na ordem de 0,85 para variedades que produzem acima de 6 kg m^{-2} sob condições tropicais. Em termos de concentração de sacarose, esses autores encontraram valores variando entre 0,35 e 0,50 g de sacarose por g de matéria seca.

3.2. Balanço de radiação e de energia em superfície

A superfície terrestre é a principal área de transferência de energia para os processos atmosféricos, que estão relacionados aos fluxos do balanço de radiação e de energia em superfície. O conhecimento do comportamento desses fluxos é crucial para um melhor entendimento dos mecanismos que controlam o ciclo de água, carbono e de outros processos dos ecossistemas, bem como os seus efeitos sobre o tempo meteorológico e o clima da Terra (BALDOCHI et al, 2004; HAO et al., 2007; WEVER et al., 2002). Como pode ser observada na Figura 1, admite-se que, de toda energia que atinge o topo da Terra, uma fração (30%) é refletida pela superfície, nuvens e atmosfera e retorna ao espaço, ainda como radiação de ondas curtas (ROC). Outra parte (19%) é absorvida pela atmosfera e nuvens, e o restante (51%) é retida na superfície terrestre. Desse total (51%), uma fração (21%) é irradiada na forma de ondas longas (ROL).

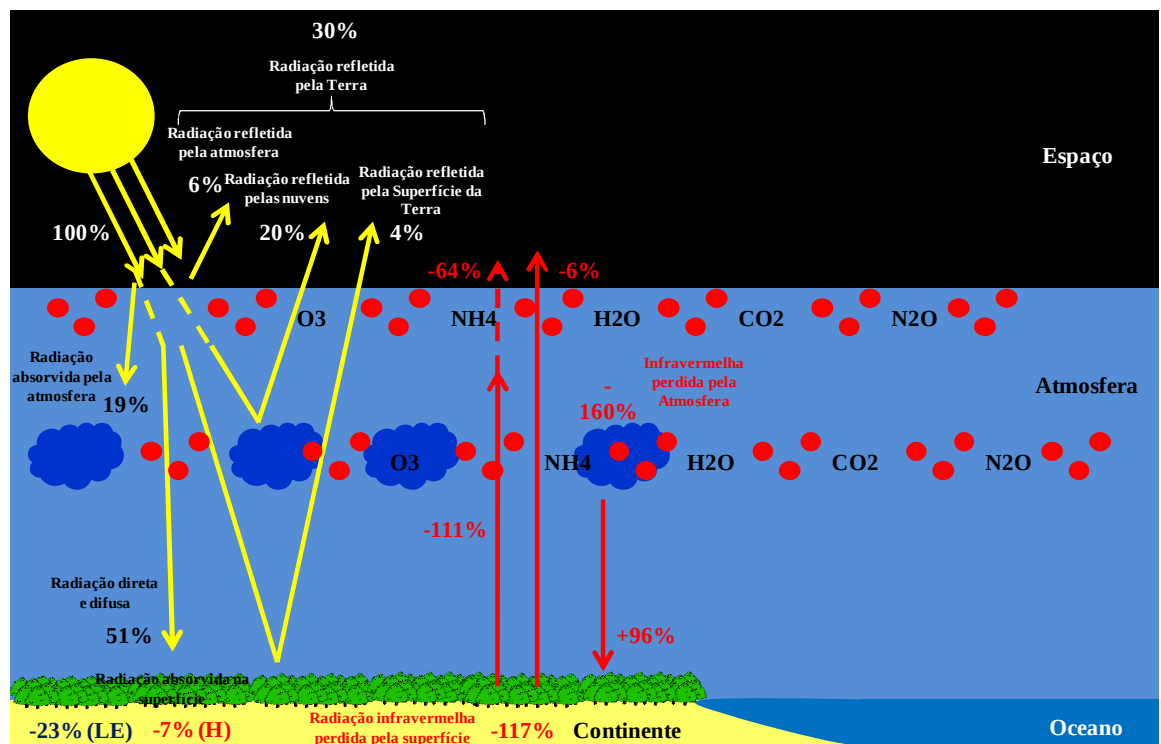


Figura 1. Balanço de energia em superfície.

No entanto, a Terra tende a emitir uma quantidade de ROL maior para o espaço (117%), devido receber ROC apenas durante o dia e emitir ROL durante o dia e a noite. Apenas uma pequena fração de ROL (6%) atravessa a atmosfera em direção ao espaço, sendo que a maior parte (111%) é absorvida pela atmosfera e pelas nuvens, retornando a superfície, devido o efeito estufa (96%). Assim, a superfície da Terra recebe aproximadamente duas vezes mais ROL da atmosfera (96%) do que ROC (51%), totalizando uma quantidade (147%) superior aquela recebida no início do processo (100%). Por outro lado, a atmosfera terrestre perde uma quantidade de energia (-160%) superior aquela recebida pela Terra. Para um intervalo de tempo grande, por exemplo, um ano, a energia retida pela superfície (51%) e absorvida pela atmosfera (19%) é perdida por ROL pela própria superfície (6%), bem como pela atmosfera (64%), zerando o balanço de energia (AHRENS, 2000).

Analisando o balanço de energia em intervalo de tempo mais curto, por exemplo, um dia, observa-se que da energia recebida pela superfície (147%, sendo 51% em ROC e 96% em ROL), uma parte é irradiada (117%), e o saldo de radiação (30%) é utilizado no aquecimento da atmosfera e do solo por processos de condução e convecção (7%) e a outra parte (23%) é usada para a evapotranspiração (AHRENS, 2000).

Além dos processos de condução, convecção e conversão em calor latente, dependendo do tipo de superfície e considerando um volume de controle solo-planta-atmosfera, outros processos tais como, o armazenamento de energia no solo e pelo dossel das plantas, também podem assumir uma importância no balanço de energia à superfície (AYRA, 2001). Assim, vários componentes podem ser considerados e o balanço de energia passa a ser tratado pela seguinte equação:

$$R_n + LE + H + G + A + M = 0 \dots\dots\dots (1)$$

em que, R_n = saldo de radiação ($W\ m^{-2}$); LE = fluxo de calor latente ($W\ m^{-2}$); H = fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$); G = fluxo de calor no solo ($W\ m^{-2}$); A = energia resultante da adição horizontal de calor, ou seja, processo de advecção ($W\ m^{-2}$); e M = energia utilizada em processos diversos como fotossíntese, respiração e armazenamento no dossel das plantas ($W\ m^{-2}$). Porém, assumindo os princípios de conservação de energia à superfície, a equação do balanço de energia pode ser simplificada para (OKE, 1978):

$$R_n + LE + H + G = 0 \dots\dots\dots (2)$$

onde, os componentes A e M são considerados desprezíveis devido a baixa capacidade de armazenar energia de algumas superfícies, especialmente em intervalo de tempo maior, e devido a fração de energia destinada à fotossíntese ser bastante pequena (ROSENBERG et al., 1983). Assim, a partir dessa equação, de uma maneira prática, é possível conhecer a contribuição de cada um dos componentes (R_n , LE , H e G) na partição do balanço de energia.

O componente do saldo de radiação (R_n) da equação do balanço de energia pode ser representado por outros componentes, que caracterizam o balanço de radiação em superfície (BRUTSAERT, 1982). Esse balanço é dividido em radiação de ondas curtas ($< 3\ \mu m$) e ondas longas, e pode ser representado das seguintes formas:

$$R_n = BOC + BOL = R_g - R_r + ROL_a - ROL_e \dots\dots\dots (3)$$

onde, BOC = balanço de ondas curtas ($W\ m^{-2}$ ou $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); BOL = balanço de ondas longas ($W\ m^{-2}$ ou $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); R_g = radiação solar incidente ou global ($W\ m^{-2}$ ou $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); R_r = radiação solar refletida ($W\ m^{-2}$ ou $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); ROL_a = radiação de

ondas longas proveniente da atmosfera (W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); e, ROL_e = radiação de ondas longas emitida pela superfície (W m^{-2} ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O BOC, pode ser representado pela equação:

$$\text{BOC} = \text{Rg}(1 - \alpha) \dots\dots\dots (4)$$

em que, α = albedo da superfície (adimensional). Similamente, BOL pode ser quantificado por:

$$\text{BOL} = \text{Rol}_a \downarrow - \varepsilon \sigma T_s^4 \dots\dots\dots (5)$$

em que, ε = emissividade da superfície (exemplo, água: 0,96; areia fina: 0,95); σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); e, T_s = temperatura absoluta da superfície, em K.

Os componentes LE e H da equação do balanço de energia representam as frações de energia destinadas aos processos de evapotranspiração e aquecimento do ar, respectivamente. Em geral, estes componentes têm sido medidos ou estimados para diferentes superfícies, utilizando métodos micrometeorológicos (Vórtices Turbulentos, Balanço de Energia – Razão de Bowen e Método Aerodinâmico), dentre os quais um dos mais utilizados é o método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB), como será posteriormente discutido no item 3.4.

3.3. Escoamento do ar em superfície e sua influência sobre a aplicação de métodos micrometeorológicos

Os balanços de radiação e de energia, previamente abordados, juntamente com outros processos (exemplo: movimentos da Terra, etc.), são fatores responsáveis pela ocorrência de diferentes fenômenos na superfície da Terra. Dentre eles, tem-se o escoamento do ar, que é um dos fenômenos de maior importância para os processos de interação biosfera-atmosfera, com ações sobre a mistura e a troca de *momentum*, calor e massa na camada limite planetária (CLP), a qual é extremamente influenciada pela superfície terrestre. Essa influência pode ocorrer em intervalos de tempo de uma hora ou menos e se estender desde algumas centenas de metros até alguns poucos quilômetros (STULL, 1988).

A CLP é dividida em subcamadas, sendo que a do topo é denominada subcamada de transição (SCT), enquanto que a situada imediatamente abaixo denomina-se subcamada superficial ou camada limite interna (CLI) (Figura 2). Por sua vez, a CLI divide-se em outras duas: a subcamada de fluxo constante (SFC) ou subcamada inercial, que é a de maior interesse em estudos micrometeorológicos, logo que suas propriedades de escoamento (*momentum*, calor e massa) tornam-se constantes com a altura; e, a subcamada rugosa (SCR), que é extremamente influenciada pelos fatores inerentes às características da superfície, tais como, geometria e espaçamento entre os objetos. Finalmente, próxima à superfície, em intervalo de espaço em torno de milímetros, está situada a subcamada laminar (SCL) (CAMPBELL & NORMAN, 1998; ROSENBERG et al., 1983).

Com exceção da SCL, o escoamento em superfície ocorre essencialmente de forma turbulenta, caracterizada por flutuações ou turbilhões (“eddies”) quase caóticos da velocidade do ar, temperatura e da concentração de propriedades (calor, CO₂, entre outras), em torno de um valor médio, no tempo e no espaço. Esses turbilhões apresentam grande eficiência no transporte de *momentum*, calor e massa, e apresentam uma forma mais ou menos contínua na CLI (AYRA, 2001). Todavia, devido a natureza quase caótica dos turbilhões, sua descrição físico-matemática resulta em equações diferenciais de escoamento com resolução analítica difícil, de modo que para um melhor entendimento do escoamento faz-se necessário um tratamento estatístico e a aplicação de parametrizações (AYRA, 2001; STULL, 1988).

Os turbilhões podem ser gerados de duas formas distintas, sendo a primeira como resultado da fricção do ar sobre a superfície, denominada turbulência mecânica, e a segunda devido ao aquecimento da superfície que produz flutuações, denominada “turbulência convectiva”. Na turbulência mecânica, o tamanho dos turbilhões produzidos tendem a ser menores do que aqueles gerados pela turbulência convectiva. Por outro lado, na ausência de fortes efeitos convectivos, o escoamento é extremamente controlado pela força de arraste do vento sobre a superfície (cisalhamento), que atua com uma força de atrito em sentido contrário ao movimento do ar, a qual depende do grau de rugosidade superficial. Esse atrito reduz o escoamento e modifica as características do movimento próximo à superfície (CAMPBELL & NORMAN, 1998; OKE, 1978).

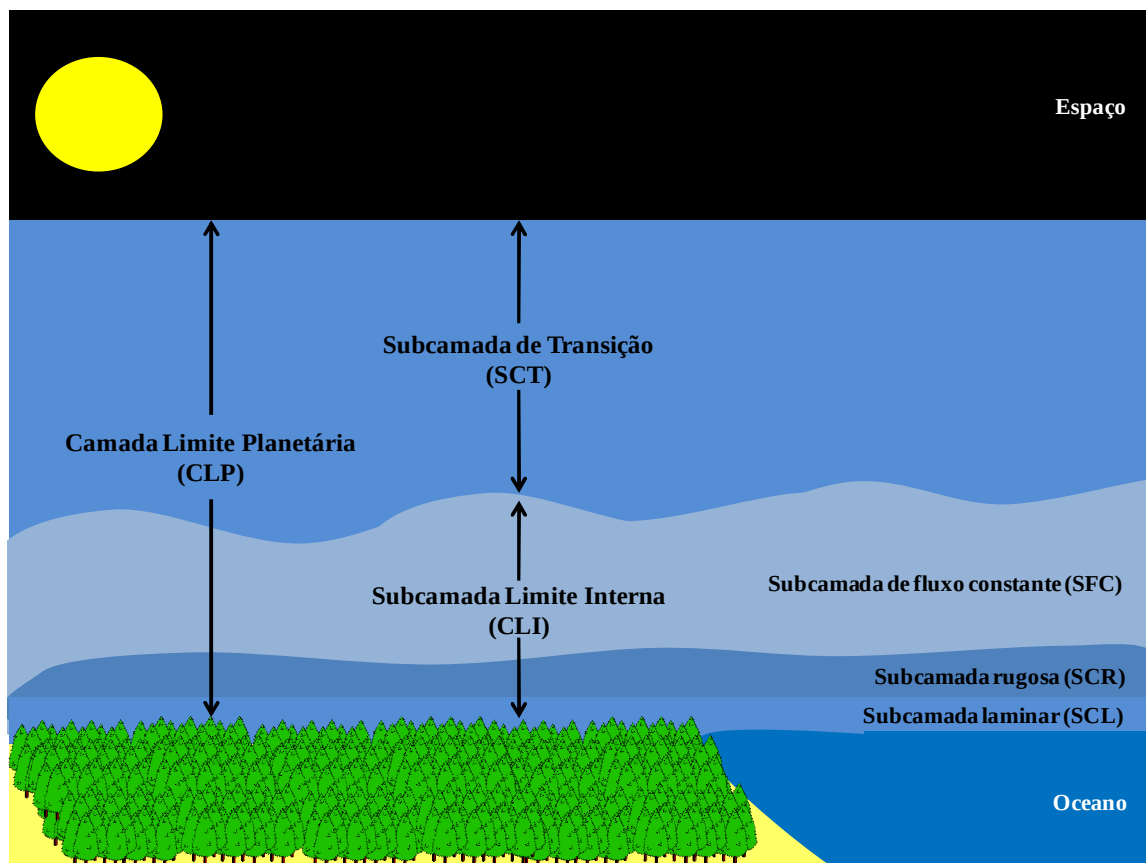


Figura 2. Subcamadas da atmosfera terrestre.

No escoamento, os turbilhões maiores quando são convertidos naqueles de tamanhos menores, e esses em turbilhões de escalas ainda menores, dissipam Energia Cinética Turbulenta (ECT), também denominada energia interna (Teoria de Kolmogorov), que resulta num processo denominado “cascata de energia”. Esse processo é responsável pela produção de energia e transporte das propriedades da atmosfera, e desempenha um papel importante na transferência de calor e umidade, na evaporação, na interação térmica e dinâmica entre a atmosfera e a superfície, bem como na dispersão de poluentes (MARTINS, 2004).

O escoamento na CLI é descrito pelas equações de continuidade, para a conservação de massa, e pelas equações de Navier-Stokes, para a conservação do *momentum*, por apresentar um comportamento semelhante ao escoamento de um fluido incompressível sobre uma placa plana (BERNARDES, 2008). Por causa do maior número de incógnitas do que de equações e da necessidade de descrever o processo turbulento do escoamento, no tratamento dessas equações são utilizadas as aproximações de Boussinesq e a convenção de Reynolds, que consistem em separar o valor da propriedade de escoamento, em sua média e flutuabilidade (FOKEN, 2008). Apesar desses artifícios, outras teorias são utilizadas para promover o “fechamento” das

equações do escoamento em superfície, por exemplo, as teorias de Monin-Obukhov e da similaridade dos coeficientes de transferência turbulenta das propriedades (“Teoria K”).

As trocas turbulentas de calor entre a superfície e a atmosfera, normalmente levam a estratificação térmica da CLI, que se caracteriza por escoamento de natureza inteiramente mecânica, e depende do atrito da superfície e da distribuição do fluxo de *momentum*. Assim, a teoria da similaridade de Monin-Obukhov (M-O) ganha importância para descrever funções que validem o comportamento médio e as flutuabilidades das propriedades de escoamento, por meio da determinação de um parâmetro de estacionalidade para superfície lisas e homogêneas:

$$\zeta = z / \left[\frac{u_*^3}{k \left(\frac{g}{T_{ar}} \right) \left(\frac{H}{\rho_a c_p} \right)} \right] \dots\dots\dots (6)$$

onde, ζ = variável de estabilidade de Monin-Obukhov (adimensional); z = altura de medição dos fluxos (m); u_* = velocidade de fricção ($m s^{-1}$); k = constante de Von Karman (adimensional); g = aceleração da gravidade ($m s^{-2}$); T_{ar} = temperatura do ar (K); H = fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$); ρ_a = densidade do ar ($kg m^{-3}$); e , c_p = calor específico do ar ($kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$) (Obs.: na equação de ζ , o termo do denominador refere-se ao comprimento característico de Monin-Obukhov, L_{M-O}) (AYRA, 2001).

A hipótese básica da teoria de M-O é a de que o escoamento médio e suas flutuações dependem apenas da altura acima da superfície (z), velocidade de fricção (u_*), do fluxo de calor sensível (H) e da flutuabilidade ou variação da força ascensional (g/T_{ar}), sob condições homogêneas, horizontais e quase estacionárias. Deste modo, os fluxos turbulentos de *momentum* e de calor são constantes (independentemente da altura em relação à superfície), as trocas moleculares são insignificantes na comparação com as trocas turbulentas, os efeitos rotacionais podem ser desconsiderados na superfície e a influência da rugosidade superficial, altura da CLP e os ventos geostróficos (definidos pelas diferenças de pressão em grandes escalas) são totalmente responsáveis pela fricção do vento na superfície (AYRA, 2001).

Porém, estudos de interação biosfera-atmosfera têm mostrado que, quando a superfície deixa de ser lisa e homogênea, o escoamento torna-se complexo, de modo que resulta em efeitos importantes sobre a variação dos fluxos das propriedades da atmosfera

(*momentum*, calor e massa). Tais condições são evidentes especialmente no local de transição entre duas superfícies, onde há o desenvolvimento de uma nova CLI, que cresce com a distância deste local. Este comportamento é muito comum em áreas de cultivo que são circundadas por áreas de solo nú, onde os perfis das propriedades atmosféricas não estão em equilíbrio com a nova superfície (EVETT, 2000; AYRA, 2001).

Por este motivo, a determinação da nova altura da CLI (δ) torna-se de grande importância, visando definir o local de instalação e o posicionamento dos equipamentos micrometeorológicos, os quais serão utilizados para medir as características do escoamento ou os fluxos das propriedades atmosféricas. Para isto, utiliza-se a seguinte expressão:

$$\delta = 0,1 z_{om}^{0,2} X^{0,8} \dots\dots\dots (7)$$

em que, z_{om} = parâmetro de rugosidade da superfície para o *momentum* (m); X = distância entre o ponto de transição da nova superfície e o local de instalação dos equipamentos, ou seja, “bordadura” (m).

Outro problema, inerente ao escoamento do ar, refere-se a sua ocorrência sobre uma superfície vegetada. Sob tal condição, a distribuição espacial das estruturas do dossel das plantas (folhas, tronco, galhos, entre outras) atua como elemento de atrito para o escoamento do ar, aumentando a transformação de turbulhões maiores naqueles de menores escalas, sem a passagem por escalas intermediárias, de forma a acelerar a liberação de energia interna no sistema (FINNIGAN, 2000). Por outro lado, o aparente nível de referência deixa de ser a superfície do solo e passa a ser a altura equivalente ao deslocamento do plano zero (d), onde está situada a altura média dos parâmetros de rugosidade da superfície, que modifica o comportamento das trocas de *momentum*, calor e massa no ambiente (AYRA, 2001). Essas trocas regulam o microclima de desenvolvimento das plantas, modificando a concentração de CO_2 para a fotossíntese, crescimento, ciclo de nutrientes e remoção do vapor d’água resultante do processo de transpiração (MOTZER, 2005; PATTON, 1997; WILSON et al., 1982).

O entendimento do escoamento do ar na superfície vegetada não é trivial, pois apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal. Essa complexidade deve-se, especialmente, a existência das diversas subcamadas fisicamente distintas acima e dentro

de superfícies vegetadas, que influenciam consideravelmente, a força de arraste do vento sobre a própria superfície (PATTON, 1997; SHEN & LECRERC, 1997).

Em muitos casos, o principal local de trocas é nas folhas das plantas, que possuem densidades variáveis ao longo do dossel, bem como características de superfície que são bastante distintas (altura, rugosidade, dentre outras) (OKE, 1978). Por exemplo, em culturas como cereais, a densidade foliar não varia muito em função da altura. Porém, naqueles casos como milho e muitas árvores, a densidade foliar concentra-se próximo ao topo do dossel, não podendo ser considerada a região que compreende o caule ou tronco das plantas. No caso de florestas, o dossel de algumas espécies estende-se até próximo à superfície do solo (FINNIGAN, 2000).

Para caracterizar a estrutura média do escoamento do ar em superfície são utilizados os valores médios da velocidade do vento. Porém, para representar a natureza turbulenta do escoamento do ar, devem ser aplicadas estatísticas de turbulência, bem como análises dos termos do balanço de energia cinética e do espectro de turbulência (Energia Cinética do Fluxo Médio) acima e abaixo do dossel das plantas (SHEN & LECLER, 1997; WILSON, 1989). O conhecimento destas características de escoamento do ar em superfície torna-se de grande importância, visando a aplicação de métodos micrometeorológicos como: vórtices turbulentos, balanço de energia com base na razão de Bowen e método aerodinâmico.

Estes métodos são aplicados na subcamada de fluxo constante, acima da subcamada rugosa, onde são encontrados fortes gradientes verticais que controlam a transferência de *momentum*, calor e massa. Nesta subcamada, considera-se que os fluxos medidos a uma altura são aproximadamente iguais aos da superfície, comportamento esse análogo aos fluxos moleculares. Esses fluxos são proporcionais aos gradientes das variáveis médias, assumindo a relação fluxo-gradiente, sendo que as características do escoamento do ar e o transporte das suas propriedades ocorrem de forma idêntica. Assim, pode-se estabelecer a igualdade dos coeficientes de transferência turbulenta para o *momentum* (K_m), calor (K_h) e vapor d'água (K_w) ("Teoria de K") (AYRA, 2001; FOKEN, 2008).

Nessa subcamada, o fluxo descreve um perfil logarítmico a partir do plano de deslocamento zero (d), considerando que o comprimento de mistura de Prandtl é proporcional à distância da superfície ($Pr = kz$) e que a tensão de arrasto é constante, o que leva ao surgimento de um perfil de velocidade do vento e o estabelecimento de uma constante, denominada (k = constante de Von Karman) (YI, 2008). Os valores de " d " dependem das características da vegetação, especialmente da altura e da densidade foliar

das plantas. Nesse caso, o escoamento sobre uma superfície vegetada pode ser obtido a partir da lei do perfil logarítmico, acrescido dos valores de “d” (CAMPBELL & NORMAN, 1998):

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_{oh}} \right), \quad z > z_{om} \dots\dots\dots(8)$$

em que, $u(z)$ = velocidade do vento na altura de medição z (m); u_* = velocidade de fricção ($m\ s^{-1}$); z_{om} = parâmetro de rugosidade para o *momentum* (m); k = constante de Von Karman (adimensional); e, z_{oh} = parâmetro de rugosidade da superfície para o fluxo de calor (m).

Porém, a aplicabilidade dessa equação pode apresentar várias limitações. Ao contrário do escoamento molecular, os coeficientes de transferência turbulenta ($K_m = K_h = K_w$) não são necessariamente constantes ou iguais, podendo variar com a altura, estabilidade atmosférica ou outros parâmetros de importância da turbulência. Com isso, a equação do perfil logarítmico do vento é válida apenas para condições de atmosfera neutra, sendo que sob condições de atmosfera estável ou instável, o perfil do escoamento apresenta uma distorção (AYRA, 2001; ROSENBERG et al., 1983).

Para se adequar à nova situação, deve-se utilizar funções de correção de estabilidade, como função do número do comprimento característico de Monin-Obukhov (L) ou de Richardson (Ri) (CAMPBELL & NORMAN, 1998; STULL, 1988). Outro problema, relacionado ao uso da equação do perfil logarítmico, refere-se ao fato de “d” não garantir que medições de velocidade de vento tenham sido feitas acima da camada rugosa da superfície. Além do mais, tem-se que considerar que os valores de “d” são diferentes para o fluxo de calor latente e para o fluxo de calor sensível (RAUPACH & THOM, 1981).

Devido à falta de homogeneidade do escoamento do ar na subcamada rugosa acima do topo das plantas, a relação fluxo-gradiente não se aplica a tais condições, logo que as estruturas de arraste promovem a formação de turbilhões em várias direções. Estes turbilhões perturbam os gradientes horizontais médios do escoamento do ar e das suas propriedades, tornando-os menores do que aqueles da subcamada de fluxos constantes e, conseqüentemente, distorcem o perfil logarítmico (RAUPACH & THOM, 1981). Por esse motivo, métodos como o da razão de Bowen e o aerodinâmico, que assumem a relação fluxo-gradiente, perdem a sua aplicabilidade na subcamada rugosa.

Com base nisto, faz-se necessário garantir a instalação dos equipamentos, que fornecem dados para estes métodos, dentro da camada de fluxo constante.

3.4. Balanço de energia com base na razão de Bowen e suas particularidades

O método do balanço de energia, com base na razão de Bowen (BERB), é um dos mais utilizados em estudos micrometeorológicos, visando melhor entender a interação entre a atmosfera e a vegetação. Para a partição da energia disponível ($R_n - G$) entre os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), o método BERB se baseia na relação do fluxo-gradiente e na transferência de massa. É um método indireto, quando comparado ao método dos Vórtices Turbulentos, que mede diretamente os fluxos, ou aos lisímetros de pesagem, que medem a variação de massa de um volume de solo (INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY, 2003; TOLEDO FILHO, 2001).

O método BERB tem sido amplamente aplicado por ser simples e prático, além de apresentar bons resultados quando comparado aos métodos dos Vórtices Turbulentos e lisimétrico (PAUWELS & SAMSON, 2006; SILVA et al., 2005; TODD et al., 2000), bem como, por possuir desempenho superior ao método aerodinâmico (MOLDER et al., 1999). Por esse motivo, vários autores têm recomendado a sua utilização na avaliação da precisão de outros métodos de estimativa dos fluxos sob diferentes superfícies, por exemplo, o método de Penman-Monteith (RANA & KATERJI, 2000; ZHANG et al., 2008). Outra vantagem do método BERB está relacionada com o fato de dispensar informações de características aerodinâmicas. Além disso, permite estimar os fluxos em intervalos de tempo pequeno (< 1 hora), sendo sua aplicação validada em intervalos de até 5 minutos (HEILMAN et al., 1989; RANA & KATERJI, 2000; STEDUTO & HSIAO, 1998c).

Trata-se de um método que permite estimar LE, de modo que possa ser utilizado, por conseguinte, na determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c), do coeficiente de cultura (K_c) e do requerimento hídrico de culturas agrícolas (MARIN, 2003; RIGHI, 2004; SILVA, 2005; TEIXEIRA et al., 2007). Neste método, são utilizadas medidas do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G), temperatura do ar (t) e pressão de vapor d'água (e), em pelo menos dois níveis acima do dossel vegetativo (AZEVEDO et al., 2003; HANSON & MAY, 2006; TEIXEIRA et al. 2007).

O método BERB é baseado no balanço de energia, discutido anteriormente, forçando o seu fechamento por meio do uso da relação entre os fluxos de LE e H, denominada razão de Bowen (β) (BROTZGE, & CRAWFORD, 2003):

$$\beta = \frac{H}{LE} \dots\dots\dots(9)$$

O método BERB pode ser utilizado em várias condições ambientais, inclusive na região semi-árida (DUGAS et al., 1991; GAVILÁN & BERENGENA, 2007; TODD et al., 2000), onde o gradiente de temperatura pode atingir valores elevados, enquanto que, o gradiente de pressão de vapor no ar pode ser pequeno (ANGUS & WATTS, 1984). As regiões semi-áridas são caracterizadas como advectivas, com grande contribuição de calor sensível horizontal, que pode afetar os valores dos fluxos de calor sensível e latente (LEE et al., 2004). Isto ocorre, especialmente, em áreas irrigadas que são comumente circundadas por áreas nuas e secas ou em áreas de cultivos esparsos, que podem apresentar incrementos nas taxas de evapotranspiração (OLIVEIRA & LEITÃO, 2000; FIGUEROLA & BERLINER, 2006).

No entanto, para sua aplicabilidade, faz-se necessário atender algumas suposições e requerimentos. Dentre elas, tem-se a hipótese da igualdade dos coeficientes de transferência turbulenta de calor (K_h) e de vapor d'água (K_w), como mencionado anteriormente, que pode assumir resultados contraditórios, caso sejam constatadas condições advectivas no ambiente de monitoramento (GAVILÁN & BERENGENA, 2007; VERMA et al., 1978). Essas condições são evidenciadas, especialmente quando as medições dos sensores instalados acima da cultura não são realizadas dentro da camada limite ajustada ou camada de fluxo constante (PEREZ et al., 1999). Assim, é imprescindível para o uso do método BERB, uma distância mínima de bordadura visando garantir a consistência da estimativa dos valores dos fluxos acima da superfície (HEILMAN et al., 1989).

Outros problemas, inerentes ao método BERB, estão relacionadas às precisões dos sensores utilizados, a aproximação dos valores de β a -1 e as dificuldades de manutenção do sistema, no que se refere ao sensor de temperatura do bulbo úmido. Adicionalmente, tem-se a necessidade de inversão dos psicrômetros para reduzir os erros de medições e, conseqüentemente, a inconsistência dos resultados de LE e de H, a depender dos valores da razão de Bowen (OHMURA, 1982; PEREZ et al., 1999; TODD et al., 2000).

A precisão das estimativas dos valores de H e LE e a consistência da partição dos fluxos dependem de algumas suposições e requerimentos e da análise de erros associados à precisão de medida dos sensores (OHMURA, 1982; PEREZ et al., 1999). Como mencionado anteriormente, o método BERB é baseado na igualdade dos coeficientes de transferência turbulenta para calor (K_h) e vapor d'água (K_w) (Bowen, 1926). No entanto, tem-se verificado que, sob condições de advecção, os valores da relação K_h/K_w tendem a diferirem de 1. Verma et al. (1978) e Motha et al. (1979) encontraram que K_h/K_w é maior do que 1 em condições de inversão térmica (atmosfera estável ou $\Delta T / \Delta e < 0$). Contudo, Lang et al. (1983) e Gavilán & Berengena (2007) observaram valores de K_h/K_w menores do que 1 sob condições de inversão térmica, o que está relacionado com o ajuste incompleto da camada limite interna à nova superfície, comumente evidenciado em áreas com bordadura pequena e localizadas em regiões com advecção. Sob essas condições, Blad & Rosenberg (1974) verificaram subestimativas dos valores de LE. Lee et al. (2004) constataram que a relação K_h/K_w sob ambiente advectivo foi menor do que 1, quando os valores de β eram negativos, ou superiores a 1, quando os valores de β eram positivos.

Righi et al. (2007), analisando se as condições de bordadura eram suficientes para minimizar os efeitos de advecção, determinaram, por meio das relações entre os valores de temperatura e pressão de vapor d'água obtidos em três níveis de medição (N_1 , N_2 e N_3), o índice de similaridade (IN) como sugerido por Verma et al. (1978) ($IN = [(\theta_{N_3} - \theta_{N_1}) / (\theta_{N_2} - \theta_{N_1})] / [(e_{N_3} - e_{N_1}) / (e_{N_2} - e_{N_1})]$). Os perfis dessas propriedades tendem a serem similares, se a razão entre os gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água forem constantes ao longo da subcamada atmosférica amostrada, o que ocorre apenas na ausência de advecção de calor sensível. Righi et al. (2007) constataram que um menor efeito advectivo foi evidenciado quando os valores de IN variaram de 0,7 a 1,3. Esta variação em relação a 1, é decorrente dos erros de medição dos sensores. Mcnaughton & Laubach (1998) informam que grande parte dos efeitos de advecção ocorre quando os valores de β variam entre -0,2 e 0,1, o que promove desvios nos valores da relação K_h/K_w .

Por outro lado, Gavilán & Berengena (2007) verificaram, sob condições de atmosfera neutra e instável, que os valores de K_h/K_w não foram expressivamente maiores do que 1, concluindo que o método BERB pode ser aplicado na estimativa dos fluxos em regiões com advecção, desde que não ocorram erros importantes. Sob tais condições, estes autores verificaram que o método BERB superestimou os valores de LE, em média, em apenas 5,5%, apresentando resultados melhores nos períodos em que

ocorreu instabilidade atmosférica. Além do mais, quando comparado a métodos como o dos Vórtices Turbulentos, tem-se mostrado mais adequado para obtenção dos fluxos, logo que este método necessita de manutenção mais freqüente e complexa (UNLAND et al., 1996). Por outro lado, outros autores também têm constatado o bom desempenho do método BERB quando comparado a métodos que consideram a variação de massa em um volume de controle limitado, como o do balanço de água no solo, o qual não necessita de grandes áreas para sua aplicação (ZHANG et al., 2008).

Vários autores têm constatado desempenho satisfatório do método BERB. No entanto, a aplicação do mesmo requer uma exigência mínima de bordadura e da altura de instalação dos psicrômetros (inferior e superior). Todd et al. (2000) verificaram que a limitação de bordadura resultou em diferenças entre 5 e 15% nos valores de LE durante o período diurno e entre 25 e 40% durante o período noturno. Porém, essas diferenças aumentaram quando a localização de monitoramento (footprint) e as alturas dos sensores foram distintas. De acordo com Rosenberg et al. (1983), o método BERB para apresentar bons resultados de estimativa dos fluxos, requer uma relação bordadura:altura dos sensores maior do que 100:1. Dentro desta faixa, as medidas dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água tendem a entrar em equilíbrio com o dossel da cultura. Porém, quando os valores de β são pequenos e positivos, Heilman et al. (1989) afirmam que uma relação bordadura:altura de 20:1 é suficiente.

Os requerimentos com bordadura tendem aumentar com a altura do psicrômetro superior. Além do mais, a diferença entre a altura dos sensores do nível inferior e superior deve ser suficiente para que estes estejam dentro da camada limite interna (acima da camada rugosa) e que os gradientes de temperatura e de pressão de vapor d'água sejam maiores do que a resolução dos sensores. Assim, quanto maior for essa diferença entre os níveis de medição, maior será a necessidade de bordadura (STANNARD, 1997).

Finalmente, os erros de estimativa dos valores de LE e H, obtidos pelo método BERB, podem ser avaliados comparando-se os resultados com dados de fluxos medidos pelo método dos Vórtices Turbulentos ou a partir da adoção de critérios que avaliem a consistência dos valores da razão de Bowen (β) (OHMURA, 1982; PEREZ et al., 1999). Essas avaliações são relevantes, especialmente nos instantes em que os valores de β aproximam-se de -1, o que torna as estimativas de LE e de H inconsistentes. Isso ocorre, comumente, nos horários próximos ao amanhecer e ao entardecer ou mesmo durante eventos de precipitação ou de irrigação, que promovem a inversão dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água (PEREZ et al., 1999). Assim, para rejeitar os

valores de β próximos a -1, alguns autores consideram um intervalo de rejeição com valores β fixos (ORTEGA-FARIAS et al., 1996; SOARES et al., 2007; UNDLAND et al., 1996) ou definem intervalos que se baseiam na precisão de medida da temperatura e da pressão de vapor d'água (OHMURA, 1982; PEREZ et al., 1999). A depender do método de aceitação ou rejeição dos valores de β e de atenuação dos efeitos advectivos, podem ser constatadas diferenças nos resultados de estimativa dos fluxos (SOARES et al., 2007).

Nesse caso, também é importante ter medidas representativas de R_n e G da área experimental e conhecer o erro de medição dos sensores, especialmente dos psicrômetros, os quais apresentam grande importância na obtenção dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água (RIGHI et al., 2007). Linkosalo et al. (1996) consideram um erro de 5% como aceitável para a precisão de medição dos sensores de R_n . Angus & Watts (1884) assumem que o erro de medições de R_n é aceitável quando estiver em torno de 4%. Para avaliar as medições de pressão de vapor d'água e temperatura do ar, têm sido utilizados os valores de $|0,02|$ kPa e $|0,05|^\circ\text{C}$, respectivamente (AZEVEDO et al., 2003; PEREZ et al., 1999).

3.5. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, em que a estimativa precisa em escala local e, ou, regional faz-se necessário para a determinação do uso da água nas diferentes áreas de atuação (LAGE et al., 2006).

No setor agrícola da cana-de-açúcar, a ET é um fator importante no manejo de irrigação visando à determinação das alocações e melhoria do manejo de água armazenada na superfície e no perfil do solo, bem como na concepção e dimensionamento do sistema de irrigação. A ET é muito relevante para assegurar tanto o suprimento quanto o requerimento de água da cultura, bem como para a diminuição dos impactos dos sistemas de irrigação, que normalmente são superdimensionados (INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY, 2003; INMAN-BAMBER & SMITH, 2005). O aumento da eficiência do uso da água, também, é importante para melhorias no rendimento da cultura e para a sustentabilidade do sistema de produção.

Em regiões onde a exploração comercial da cana-de-açúcar ocorre em condições de sequeiro, o conhecimento da evapotranspiração da cultura é de grande importância

para assegurar que o estresse hídrico seja minimizado em fases críticas do crescimento. Adicionalmente, pode ser utilizada como uma ferramenta decisiva em programas de melhoramento, visando identificar variedades resistentes à seca (INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY, 2003).

A evapotranspiração da cana-de-açúcar pode ser influenciada por fatores inerentes às condições ambientais, técnicas agrícolas, sistema de irrigação, período de plantio, idade do corte e variedades, e por estes motivos, é comum encontrar valores diferenciados de requerimento hídrico da cultura. De acordo com Doorenbos & Kassam (1979), o requerimento hídrico desta cultura oscila entre 1500 mm e 2500 mm. Pacheco et al. (1983) observaram valores de evapotranspiração acumulada para a cana-de-açúcar entre 1600 mm e 1800 mm, na Província de Matanzas, em Cuba; 1420 mm a 1650 mm, em Porto Rico; 1936 mm, na Argentina. Porém, estes valores tendem a diminuir com o ciclo da cultura (cana-planta, primeira soca e segunda soca).

Souza et al. (1999), em cultivo de cana-soca com idade de 13 meses e utilizando sistema de irrigação por aspersão tipo canhão, encontraram para as variedades RB72454, RB76418 e SP70-1011, máximas produtividades em colmos da ordem de 155,8, 126,9 e 141,9 t ha⁻¹, com lâminas de água de 1568, 1424 e 1589 mm, respectivamente.

Alfonsi et al. (1987) citam que, nas áreas canavieiras do Brasil, o total de precipitação pluviométrica anual varia de 1100 a 1500 mm. Farias et al. (2008), avaliando a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar cultivada na região dos Tabuleiros Costeiros do município de Capim – PB, verificaram que a maximização do uso eficiente de água para a variedade SP 79-1011 pode ser obtida com a lâmina de 1276 mm. Gomes (1999) obteve, para a variedade RB72454, durante o ciclo de cana-planta, uma produtividade média de colmos e de açúcar de 130 e 17 t ha⁻¹, respectivamente, para um requerimento médio de 1195 mm.

Maule et al. (2001) verificaram no estado de São Paulo, para a variedade SP79 1011 com produtividades médias de 149, 154 e 170 t ha⁻¹, precipitações totais de 1478, 1695 e 1829 mm, para ciclos de 14, 17 e 19 meses, respectivamente. Azevedo (2002) encontrou para a mesma variedade, cultivada nos tabuleiros costeiros da Paraíba, produtividades de 52, 79, 93 e 92 t ha⁻¹, para uma precipitação efetiva mais irrigação de 609, 761, 905 e 1043 mm, respectivamente, durante 12 meses de cultivo. Para as condições climáticas da Austrália, Baillie (2004) cita que o rendimento da cana-de-açúcar responde espacial e sazonalmente no que se refere a distribuição da precipitação,

especialmente por apresentar requerimentos hídricos diferenciados entre os distritos sucroalcooleiros, os quais podem variar entre 1110 e 1960 mm.

Em termos de coeficiente de cultura (K_c), Doorenbos & Kassam (1994) informam, para a cana-de-açúcar, que os seus valores podem variar em função do clima, variedade, ciclo da cultura (cana-planta, soca, ressoca) e eventos de irrigação, especialmente na fase inicial e de desenvolvimento. No boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998), o valor recomendado de K_c para a cana-de-açúcar é de 0,40 para a primeira fase de crescimento da cultura, de 1,25 para a fase de crescimento máximo e de 0,70 para o final do ciclo.

Valores similares foram obtidos por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003), durante as duas primeiras fases de crescimento desta cultura, sob as condições climáticas de Kalamia – Austrália e Simunye – Suazilândia (Região Sul do continente africano). Em Kalamia – Austrália, estes autores verificaram que a ET_c média, no período de cobertura máxima do solo (fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, $f_{RFA} > 80\%$), foi de $5,48 \pm 0,13 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto a ET_o foi de $4,44 \pm 0,07 \text{ mm dia}^{-1}$, resultando em valores médios de K_c de 1,23. Constataram também que, na fase inicial, os valores de K_c variaram de 0,4 a 1,0 quando a RFA_{inter} aumentou de 5% para 25%. Em Simunye – Suazilândia, estes autores observaram que a ET_c foi de $5,19 \pm 0,26 \text{ mm dia}^{-1}$, no período de cobertura máxima do solo ($f_{RFA} > 80\%$), ao passo que, a ET_o foi de $3,98 \pm 0,16 \text{ mm dia}^{-1}$, resultando em valores médios de K_c de 1,30 (entre 0,9 e 1,54). Para a fase final de desenvolvimento, estes autores verificaram que os valores de K_c foram superiores ao valor recomendado pela FAO.

Apesar da conformidade de valores observados por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003), em relação aos valores sugeridos pela FAO, muitos autores têm obtidos valores de K_c inferiores, em diferentes regiões de cultivo de cana-de-açúcar. Watanabe et al. (2004), utilizando o método BERB para estimar a ET_c e K_c da cultura da cana-de-açúcar cultivada num solo franco-arenoso na região semi-árida do Nordeste da Tailândia, onde a temperatura média anual oscila em torno de 26°C , a radiação solar varia entre 15 e $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e o total de precipitação é de 1200 mm , verificaram que a ET_c média foi de $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto o K_c atingiu valores médios de 1,10, durante a fase de máximo crescimento desta cultura, considerando a disponibilidade de água no solo superior a $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Decréscimos dos valores de K_c foram verificadas quando o conteúdo de água no solo foi reduzido para a faixa de $0,20$ a $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e abaixo de $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, como resultados do estresse hídrico sofrido pela cultura. Pacheco et al. (1983), revisando valores de K_c da cana-de-açúcar, encontraram valores médios de

1,14, na África do Sul e de 1,10, no Hawaí, durante a fase de crescimento máximo da cultura.

Omary & Izuno (1995) verificaram, para as condições do Sul da Flórida, que o valor médio de K_c foi de 0,47, durante os dois primeiros meses do ciclo da cultura da cana-de-açúcar (entre janeiro e fevereiro), os quais abrangem a fase de brotação e de estabelecimento da cultura, com uma taxa de crescimento inferior a $5 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Entre o terceiro e quinto mês (março a maio), em que a taxa de crescimento foi menor do que $10 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, o valor médio de K_c variou de 0,66 a 0,76. Na fase de crescimento máximo, a cultura apresentou taxa de crescimento entre 10 e $20 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, resultando num K_c médio de 1,09 (durante os meses de junho e outubro). Ao final do ciclo, durante a fase de maturação da cultura (entre novembro e dezembro), a taxa de crescimento foi inferior a $10 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com o K_c médio correspondente a 0,93.

Souza et al. (1999), em experimento com duração de 13 meses (cana-soca), verificaram valores de K_c durante a fase de crescimento máximo da cultura (novembro a maio), variando entre 1,10 e 1,15, em Campos dos Goytagazes, no Rio de Janeiro. Na fase inicial (agosto), o K_c foi de 0,60 e variou entre 0,85 e 1,02 na fase de perfilhamento (setembro e outubro). Na fase de maturação (junho a agosto), o seu valor reduziu-se de 0,85 para 0,60. Para as condições climáticas do Sul do Estado do Texas, nos Estados Unidos, Wiedenfeld (2004) cita que o valor de K_c da cana-de-açúcar durante a fase de crescimento máximo (maio a outubro), variou de 0,9 a 1,0, com valores da fase inicial inferior a 0,2, mas que variaram de 0,2 a 0,90 na fase de perfilhamento.

3.6. Acoplamento entre a biosfera e a atmosfera (fator de desacoplamento)

O grau de acoplamento é um indicativo da habilidade de troca de *momentum*, energia e massa entre o dossel da planta e a atmosfera. Inicialmente, esse conceito foi proposto por Mcnaughton & Jarvis (1983) e Jarvis & Mcnaughton (1986), que quantificaram o grau de acoplamento para a troca de vapor d'água por meio do cálculo de um fator denominado, fator de desacoplamento (Ω). Este acoplamento depende das características aerodinâmicas da superfície e expressa a conversão de calor sensível do ar circunvizinho em calor latente. Deste modo, uma superfície rugosa interage mais fortemente com a atmosfera quando comparada com uma superfície lisa, proporcionando o consumo maior de calor sensível no processo de remoção de água da superfície por evapotranspiração (PEREIRA, 2004). Em nível foliar, o grau de acoplamento é

determinado pela resistência da camada limite, enquanto em nível de dossel da cultura, depende da resistência aerodinâmica (STEDUTO & HSIAO, 1998b).

O acoplamento entre a biosfera e a atmosfera é baseado na equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1977), expressa por:

$$LE = \frac{\Delta(Rn - G) + \frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \dots\dots\dots(10)$$

em que, LE = fluxo de calor latente ($W m^{-2}$); Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água (kPa); Rn = saldo de radiação sobre uma superfície gramada ($W m^{-2}$); G = fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); ρ_a = densidade do ar ($kg m^{-3}$); c_p = calor específico do ar à pressão constante ($kPa ^\circ C^{-1}$); $(e_s - e_a)$ = déficit de pressão vapor d'água (kPa); γ = constante psicrométrica ($kPa ^\circ C^{-1}$); u = velocidade do vento ($m s^{-1}$); r_a e r_c = resistências aerodinâmica e do dossel da cultura ($s m^{-1}$), respectivamente.

Os valores de r_a e r_c estão relacionados ao acoplamento biosfera-atmosfera, sendo que a última controla, expressivamente, a resistência estomática e, portanto, a resistência do dossel. Quando r_a é muito baixa comparada a r_c , o acoplamento é considerado bom e mudanças nos valores de r_c resultam em alterações proporcionais na transpiração das plantas (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005). Por exemplo, para a cana-de-açúcar, Mcglinchey & Inman-Bamber (1996) obtiveram valores de r_c da ordem de $57 s m^{-1}$, por meio da inversão da equação de Penman-Monteith e dados de LE obtidos por meio de lisímetros. Por outro lado, Grantz & Meinzer (1991), utilizando o método BERB para obter os valores de LE, encontraram para cana-de-açúcar irrigada, valor de r_c de $34 s m^{-1}$.

Assumindo os limites para a equação de Penman-Monteith, em que os valores de r_a são considerados próximos ao infinito ($+\infty$) e a zero (0), respectivamente, tem-se que:

$$\lim_{r_a \rightarrow +\infty} LE = \frac{\Delta(Rn - G)}{\Delta + \gamma} \dots\dots\dots(11)$$

$$\lim_{r_a \rightarrow 0} LE = \frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{\gamma r_c} \dots\dots\dots(12)$$

O limite para LE, com r_a tendendo ao $+\infty$, é conhecida como evapotranspiração de equilíbrio (LE_{eq}), que depende apenas da energia disponível e armazenada, ou seja, do

termo energético da equação de Penman-Monteith. Por outro lado, o limite para LE, com r_a tendendo a zero, é conhecida como evapotranspiração imposta (LE_{imp}), que depende apenas do déficit de pressão de vapor d'água e da resistência do dossel da cultura, ou seja, do termo aerodinâmico da equação de Penman-Monteith. Com isso, reestruturando-se a equação de Penman-Monteith, é possível analisar a contribuição dos termos energético e aerodinâmico na evapotranspiração total, considerando a seguinte expressão (MCNAUGHTON & JARVIS, 1983):

$$LE = \Omega LE_{eq} + (1 - \Omega) LE_{imp} \dots\dots\dots(13)$$

em que, Ω = fator de desacoplamento (adimensional), que varia entre zero (caso extremo de total acoplamento entre a planta e a atmosfera; neste caso, indicando que a evapotranspiração total deve-se ao termo aerodinâmico, representando a importância relativa da LE_{imp} , ou mesmo que sob essas condições a cultura exerce maior controle sobre a transferência de vapor d'água para atmosfera) e um (caso extremo de total desacoplamento entre a planta e a atmosfera. Neste caso, a evapotranspiração total é resultado do termo energético, sendo o termo LE_{eq} de maior importância relativa. A energia disponível no sistema possui maior contribuição para a transferência de vapor d'água da cultura por evapotranspiração) (GOLDBERG & BERNHOFER, 2008; JONES, 1992; MCNAUGHTON & JARVIS, 1983).

Quando a cultura encontra-se no período de senescência, ou seja, quando há uma redução do índice de área foliar, o Ω tende a diminuir, demonstrando que a cultura começa a exercer influência no processo de evapotranspiração, quando então um aumento da resistência estomática é evidenciado (PEREIRA, 2004; STEDUTO & HSIAO, 1998b). Por outro lado, quando a cultura encontra-se totalmente desenvolvida, a interação biosfera-atmosfera pode ser induzida pelo aumento da velocidade do vento, resultando em valores de Ω tendendo a zero; porém, condições de vento muito calmo ou muito forte promovem um menor acoplamento entre a biosfera e a atmosfera (valores de Ω tendendo a 1), indicando que a importância relativa no processo de evapotranspiração deve-se ao termo energético (LE_{eq}). Sob condições de cultura esparsa e velocidade do vento moderada, também é observado baixo acoplamento entre a vegetação e a atmosfera (STEDUTO & HSIAO, 1998b).

Pereira (2004), calculando os valores de Ω para uma superfície gramada, nas condições de Davis-USA e Piracicaba-SP, verificou que os seus valores variaram de 0,69

a 0,93, cuja a média foi de 0,83. Este autor evidenciou, também, uma relação negativa entre os valores de Ω e a velocidade do vento, de modo que, sob condições de vento entre $\sim 0,5$ e $\sim 4 \text{ m s}^{-1}$, um aumento do acoplamento da vegetação com a atmosfera é favorecido. Steduto & Hsiao (1998b), determinando o fator de desacoplamento para o milho, com altura entre 3,0 e 3,2 m, submetido a dois regimes de água no solo (tratamento seco e úmido), observaram, em escala diária, antes do período de senescência da cultura, que os valores de Ω variaram entre 0,4 (acoplamento moderado) e 0,8 (baixo acoplamento), no horário de meio-dia, demonstrando o baixo controle da cultura no processo de evapotranspiração. Verificaram também, durante as primeiras horas da manhã, que os valores de Ω foram menores devido aos altos valores de resistência da cultura e à baixa velocidade do vento, mas que tenderam a aumentar até ao meio-dia. Contudo, uma nova redução até o entardecer foi evidenciada. Além disso foi constatado que o aumento da velocidade do vento até 5 m s^{-1} promoveu um acréscimo na interação entre a cultura e a atmosfera. Entretanto, sob condições de ventos fortes ($> 5 \text{ m s}^{-1}$), os valores de Ω tornaram-se superiores a 0,4, indicando a redução do acoplamento entre a cultura e a atmosfera. As diferenças entre os valores de Ω para os dois regimes de água no solo foram significativamente evidenciados, somente após o início do período de senescência da planta no tratamento seco, quando então notou-se uma redução na transpiração da cultura. A redução no índice de área foliar proporcionou um aumento do acoplamento (baixos valores de Ω), devido ao maior controle da superfície vegetada.

Para a cana-de-açúcar, Meinzer & Grantz (1989) obtiveram, para diferentes variedades cultivadas sob condições irrigadas, valores de Ω em torno de 0,9. Contudo, sob condições severas de restrição de água no solo, Ω atingiu valores próximos de 0,2. Segundo estes autores, quando a cultura apresenta desenvolvimento completo do seu dossel e estão submetidas a condições ótimas de água no solo, os valores de Ω tendem a ser semelhantes entre variedades distintas. Adicionalmente, os valores de Ω somente respondem a pequenas variações quando as variedades foram cultivadas sob condições de estresse hídrico severo.

Quando comparados com espécies florestais, os valores de Ω tendem a ser maiores do que os de culturas agrícolas, especialmente sob condições de baixa turbulência e resistência estômática, indicando um maior acoplamento da vegetação de floresta com a atmosfera. Isto se deve ao fato da estatura, fechamento do dossel e a dimensão das folhas das culturas agrícolas inibirem a interação do ar com a superfície vegetada das plantas (MAGNANI et al., 1998). Estes autores constataram, nas primeiras horas da manhã, quando a resistência das plantas e a velocidade do vento eram baixas,

um menor acoplamento ($\Omega > 0,3$) entre uma vegetação de floresta (*Fagus sylvatica* L.) e a atmosfera. Com o aumento de energia incidente, devido à baixa disponibilidade de água no solo, os valores de Ω tenderam a diminuir, em decorrência do maior controle das plantas à transpiração. Na fase de crescimento das plantas, foram evidenciados valores médios de Ω da ordem de 0,28.

3.7. Interação biosfera-atmosfera e a resposta da eficiência do uso de água da cana-de-açúcar à disponibilidade de água

O balanço de radiação à superfície é a fonte primária de energia que governa muitos dos processos de importância para o solo e para as plantas. Por exemplo, pode-se citar a partição da energia em fluxo de calor latente e sensível, partição de biomassa, condutância estomática e a assimilação de carbono, que condicionam a eficiência do uso de água da cultura. No entanto, a partição dos fluxos de energia, a utilização de radiação e os níveis de estresse hídrico, os quais as plantas são submetidas, permitem entender melhor os fatores e suas influências no crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como nos processos do balanço líquido de dióxido de carbono (NEE), respiração (RE) e produtividade primária líquida de um ecossistema (GPP) (KAR & KUMAR, 2007; SUYKER & VERMA, 2008).

Sob condições de disponibilidade de água e nutrientes no solo, a cana-de-açúcar produz uma grande quantidade de biomassa. No entanto, quando cultivada em condições de estresse hídrico durante as fases críticas (perfilhamento e início da elongação de colmos), pode apresentar reduções expressivas no acúmulo de biomassa total, biomassa dos colmos e de sacarose. Por outro lado, quando o estresse hídrico é aplicado, durante a fase de maturação, condiciona o aumento da concentração de sacarose nos colmos (INMAN-BAMBER, 2004; ROBERTSON & DONALD, 1998; ROBERTSON et al., 1999; SINGH et al., 2007).

Quando este estresse não é bem manejado, a restrição de água no solo pode reduzir a emissão foliar e aumentar a velocidade de senescência das folhas e dos perfilhos da cana-de-açúcar. Como resultado, a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura é reduzida (INMAN-BAMBER, 2004). Assim, sob tais condições, onde a possibilidade de estresse hídrico é alta, a cultura da cana-de-açúcar pode apresentar um menor crescimento, resultando numa maior exposição da superfície do solo (SMITH & SINGELS, 2006; TERUEL et al., 1997).

Um aumento da temperatura do dossel, também pode ser verificado (TRIGGS et al., 2004; INMAN-BAMBER & SMITH, 2005), em decorrência, tanto do incremento da radiação de ondas longas emitida pela superfície do solo quanto da redução da condutância estomática do dossel (MAGLIULO et al., 2003; TRIGGS et al., 2004; WANG et al., 2007).

Quando a disponibilidade de água no solo é reduzida, ocorre elevação do albedo da superfície (LIMA et al., 2005). Por outro lado, onde a disponibilidade de água no solo não é limitante, a maior parte do saldo de radiação é convertida em LE. No entanto, à medida que a quantidade de água no solo vai diminuindo, a energia disponível é utilizada no armazenamento de calor no solo e, ou, na conversão de calor sensível (TEIXEIRA et al., 2008).

Cabral et al. (2003) monitoraram durante 408 dias o LE, H e o fluxo de dióxido de carbono (FCO_2), em uma área cultivada com cana-de-açúcar não irrigada, no município de Sertãozinho-SP. Os autores observaram que a maior parte do saldo de radiação foi convertida em H ($4 \text{ a } 6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), durante os períodos de menor disponibilidade de água no solo, que ocorreram nos primeiros 100 dias após o corte (superfície descoberta) e na fase de maturação da cultura (final do ciclo). Em ambos os períodos, foram evidenciados valores de β superiores a 1. Na fase subsequente aos primeiros 100 dias, quando houve a ocorrência de precipitações, os valores de β mostraram-se inferiores a 0,5, e a cultura passou a crescer de maneira plena. Os maiores valores de LE ($16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foram observados na estação do verão, que correspondeu ao período de maior disponibilidade de água no solo e, conseqüentemente, maior taxa de transpiração e de evaporação de chuva interceptada pelo dossel da cana-de-açúcar. A assimilação máxima de CO_2 no período de maior e menor disponibilidade de água, verificados em março e outubro, foram de $45 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $20 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Nesse caso, o balanço de radiação e a partição para o LE e H, bem como o FCO_2 foram afetados pela disponibilidade de água no solo, o que pode ter resultado em modificações no NEE e, conseqüentemente, no uso eficiente de água (UEA) pela cultura.

Sob condições de estresse hídrico, Robertson & Donald (1998) e Robertson et al. (1999) informam que o acúmulo de biomassa total, biomassa dos colmos e de sacarose da cana-de-açúcar são expressivamente afetados, caso a restrição ocorra na fase fenológica de perfilhamento e, ou, início da elongação de colmos da cultura. O estresse hídrico imposto durante a fase de perfilhamento, quando o índice de área foliar (IAF) ainda era pequeno, promoveu grandes impactos na área foliar, perfilhamento e biomassa

acumulada. Porém, teve pouco efeito sobre o rendimento final desta cultura, comparado ao manejo de água pleno durante todo o ciclo. O mesmo resultado não foi observado para a fase de início da elongação dos colmos, quando o dossel da cultura estava bem estabelecido ($IAF > 2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Esses resultados, provavelmente, ocorreram devido a habilidade da cana-de-açúcar reestabelecer a taxa de emissão foliar e de perfilhos quando irrigada, logo após ter sido submetida a um período de estresse hídrico, o que permite a cultura apresentar um NEE maior quanto imposta a outra condição de estresse hídrico.

Sob condições de estresse hídrico prolongado, vários autores (KWON et al., 2008; SAITO et al., 2005; SAN JOSÉ et al., 2007; WANG et al., 2004) têm observado que as plantas reduzem a assimilação de CO_2 , em decorrência dos efeitos da limitação de água no solo sobre a estrutura fotossintética (IAF) e o processo de respiração.

Kwon et al. (2008) mencionam que o FCO_2 entre a vegetação e a atmosfera é governado, primeiramente, pela RFA, IAF, temperatura e umidade do solo, dependendo do período do dia. Durante o período diurno, o balanço líquido de carbono (NEE) tende a apresentar uma forte dependência do nível de radiação incidente nas diferentes fases de crescimento da cultura. Neste período, reduções do NEE podem ser evidenciadas devido ao controle estômático das plantas à transferência de vapor d'água, sob condições de baixo conteúdo de água no solo, altos valores de temperatura do ar e de déficit de pressão de vapor d'água. Contudo, o FCO_2 pode atingir valores elevados quando o IAF é máximo, mesmo que as plantas sejam ou não irrigadas (SURKER et al., 2004). Por outro lado, devido à redução do IAF sob restrição de água no solo, as magnitudes de FCO_2 tendem a ser menores, provocando reduções do NEE. Durante o período noturno, além da umidade do solo e IAF, a temperatura do solo assume, igualmente, grande relevância nos processos do FCO_2 entre a superfície e a atmosfera. Este fato ocorre especialmente na fase inicial de crescimento, provavelmente, em decorrência da influência relativa das taxas de respiração de crescimento e de manutenção. O NEE, durante o período noturno, tende a ser significativamente menor para culturas não irrigadas (SURKER et al., 2004). Por outro lado, sob condições irrigadas, as taxas de respiração das plantas (RE) tendem a ser elevadas na fase de crescimento, o que pode compensar os benefícios do GPP evidenciadas sob maior disponibilidade de água no solo (VERMA et al., 2005).

De modo geral, o valor de NEE tende a ser superior nas áreas com maior disponibilidade de água no solo, logo que as plantas apresentam maior acúmulo de biomassa. No entanto, o valor de NEE pode apresentar uma grande variabilidade sazonal, principalmente entre os períodos secos e chuvosos e entre as distintas fases de crescimento das plantas (BONNEVILLE et al., 2008; SUYKER et al., 2004).

A cana-de-açúcar responde bem a condições irrigadas, podendo apresentar altos valores de UEA (atingindo até 27 kg m^{-3} , a depender do método de cálculo do UEA), mesmo quando o incremento de água pela irrigação não seja significativo (em torno de 9% do total recebido pelas plantas). Sob estas condições, a cultura apresenta expressivo aumento no desenvolvimento do dossel, o que resulta em um incremento considerável da biomassa (em torno de 31%), juntamente com a produtividade (41%). Este resultado pode ser atribuído à melhoria na partição de biomassa para os colmos, proporcionada pela irrigação (INMAM-BAMBER & SMITH, 2005). Por esses motivos, comumente, sob condições irrigadas, a cana-de-açúcar tende a apresentar incrementos expressivos no valor de UEA quando comparado aos sistemas de produção de sequeiro, como resultado do incremento do NEE, principalmente, quando a fase de maior crescimento desta cultura coincide com o período de maior disponibilidade hídrica.

Sob restrições de água no solo, reduções de UEA de diversas culturas têm sido evidenciado por vários autores (DETAR, 2008; KARAM et al., 2007; LINDERSON et al., 2007). Contudo, para a cana-de-açúcar, a magnitude de redução do UEA depende do tipo de variedade, ciclo (cana-planta ou cana-soca), condições ambientais e práticas de manejo adotadas (SINGELS & SMITH, 2006). Esses fatores afetam o desenvolvimento do dossel, que governa os processos de interceptação de radiação fotossinteticamente ativa, evapotranspiração, balanço de carbono e, conseqüentemente, os valores de NEE da cultura. Por exemplo, dependendo da variedade de cana-de-açúcar, as plantas tendem a fechar os estômatos, enrolar as folhas e realizar ajustes osmóticos, como mecanismos de tolerância ao estresse hídrico (INMAM-BAMBER & SMITH, 2005; ROBERTS et al., 1990).

Pelo que foi abordado, é evidente que o manejo de água adequado e estratégico ao longo de todo o ciclo da cana-de-açúcar, torna-se de grande importância, podendo o UEA ser utilizado para ajustar o planejamento e a tomada de decisão da irrigação e, conseqüentemente, aumentar a produtividade de colmos, açúcar e de álcool, bem como a lucratividade do sistema de produção (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005; KARATAS et al., 2009).

Muitos pesquisadores têm proposto indicadores para avaliar a eficiência do uso de água (BOS et al., 1994; MOLDEN et al., 1998; PERRY et al., 1996). Estes indicadores consideram a resposta produtiva da cultura (grupo I) e o desempenho de aplicação de água no sistema de produção em relação à demanda hídrica máxima requerida (grupo II) (PEREIRA et al., 2002). O primeiro grupo de indicadores está associado à produtividade da água da cultura (PA_C), que expressa a relação entre a

quantidade produzida e o volume de água aplicado ou consumido pela cultura. Comumente, este indicador é conhecido como uso eficiente de água. No entanto, para a PA_C , é considerada a fração econômica do rendimento (IGBADUN et al., 2006; KAHLOWN et al., 2007). A PA_C é um ótimo indicador de análise da eficiência do uso de água, pois permite avaliar a redução do rendimento em decorrência da diminuição da disponibilidade de água para a cultura (DETAR, 2008; DI PAOLO & RINALDI, 2008). O segundo grupo de indicadores tem sido utilizado em diferentes áreas agrícolas e considera o suprimento relativo de água (SRA), a evapotranspiração relativa (ER), a fração de redução de água (FRA) e o déficit de hídrico da cultura (DHC) (AHMAD et al., 2009; BASTIAANSSEN et al., 2001; BOS et al., 2005; KARATAS et al., 2009).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição da área e do período experimental

Este estudo foi conduzido em um talhão experimental de 12,17 ha de cana-de-açúcar, pertencente à Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco (Agrovale), que possui aproximadamente 18 mil hectares de áreas cultivadas, localizados no município de Juazeiro, Bahia, no Submédio do Vale do São Francisco, na região semi-árida do Nordeste brasileiro. As coordenadas geográficas do local de realização do estudo são: 9°28'07"S; 40°22'43"O; 386,5 m. A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* ssp.), variedade RB 92579, foi conduzida no ciclo de cana-soca (segundo ciclo da cultura), na safra de 2007/2008.

O solo da área experimental é pertencente à classe dos Vertissolos, que compreendem solos constituídos de material mineral, horizonte vértico, pequena variação textural ao longo do perfil, baixa velocidade de infiltração de água e com características de mudanças abruptas entre contração e fendilhamento, nos períodos entre eventos de irrigação (AMARAL et al., 2007). Na Tabela 1 são demonstradas as características físico-hídricas e químicas do solo da área experimental.

O cultivo foi realizado na direção leste-oeste, em fileiras com espaçamento de 1,5 m. A adubação foi feita com base nas análises de solo e foliar, onde no início do ciclo de cana-soca foram aplicados 157,5 kg ha⁻¹ e 0,5 L ha⁻¹ de uréia e Ajipower, respectivamente. Para o controle de ervas daninhas foram aplicados 1 L ha⁻¹ dos herbicidas Aminol e Trop. A irrigação era do tipo superficial por sulcos, utilizando um sistema de condução em tubos janelados, tendo os eventos sido realizadas com base no conteúdo de água no solo obtido por meio de uma sonda FDR (Frequency Domain Reflectometer) modelo PR2/6 (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK) e a partir dos valores de evapotranspiração de referência (ET_o). A irrigação foi realizada sempre que o conteúdo de água no solo atingia 50% da capacidade de campo.

O experimento foi conduzido entre os meses de junho/2007 a junho/2008, totalizando 389 dias, compreendendo as fases fenológicas brotação e estabelecimento (Fase I), estabelecimento e perfilhamento (Fase II), crescimento máximo (Fase III) e maturação (Fase IV). O período e duração de cada uma destas fases podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 1. Características físico-hídricas e químicas do vertissolo da área experimental da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Características	Unidades	Profundidades						Média
		5	10	20	30	50	90	
Argila	%	46,84	49,14	50,52	48,21	44,94	53,18	48,80
Silte	%	21,31	17,64	15,26	17,53	22,38	17,44	18,59
Areia fina	%	10,91	10,46	11,09	11,09	11,23	10,81	10,93
Areia grossa	%	20,93	22,76	23,13	23,17	21,45	18,58	21,67
Areia total	%	31,84	33,22	34,22	34,25	32,68	29,39	32,60
d _a	g cm ⁻³	1,33	1,36	1,37	1,39	1,38	1,37	1,37
d _s	g cm ⁻³	2,40	3,26	2,43	2,45	2,44	2,44	2,57
CC	cm cm ⁻³	0,51	0,52	0,46	0,48	0,45	0,48	0,48
PM	cm cm ⁻³	0,35	0,36	0,33	0,34	0,32	0,33	0,34
M.O.	g/kg	28,62	17,31	8,14	5,89	4,93	4,31	11,53
pH	-	8,53	8,77	8,83	8,90	9,00	8,97	8,83
C.E.	dS/m	2,31	0,96	1,02	0,97	0,74	0,88	1,15
P	mg/dm ³	2,00	1,33	1,00	1,00	1,00	1,67	1,33
K	cmolc/dm ³	2,22	2,57	0,55	0,42	0,28	0,17	1,04
Ca	cmolc/dm ³	29,53	31,03	33,20	34,13	35,83	37,43	33,53
Mg	cmolc/dm ³	4,30	3,10	3,30	3,47	2,47	2,43	3,18
Na	cmolc/dm ³	1,34	0,88	0,83	0,83	0,84	0,93	0,94
Al	cmolc/dm ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al	cmolc/dm ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S (bases)	cmolc/dm ³	37,39	37,58	37,88	38,85	39,42	40,97	38,68
CTC	cmolc/dm ³	37,39	37,58	37,88	38,85	39,42	40,97	38,68
V	%	100	100	100	100	100	100	100

Obs.: d_a = densidade aparente, d_s = densidade do solo, CC = capacidade de campo, PMP = ponto de murcha permanente.

Tabela 2. Período e duração das fases fenológicas da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Fase fenológica	Data	DAC	Duração
I. Brotação e estabelecimento	28/05/2007 a 27/06/2007	0 a 30	30
II. Estabelecimento e perfilhamento	28/07/2007 a 14/09/2007	31 a 109	79
III. Crescimento máximo	15/09/2007 a 10/05/2008	110 a 347	238
IV. Maturação*	11/05/2008 a 20/06/2008	348 a 389	42
Ciclo	28/05/2007 a 20/06/2008	0 a 389	389

DAC: Dias após o corte.

*Considerou-se o início desta fase, após a realização do último evento de irrigação.

4.2. Dados de crescimento e de rendimento da cana-de-açúcar

Para a análise dos padrões de crescimento da cana-de-açúcar, foram realizadas medições de variáveis biométricas, de biomassa e de rendimento da cana-de-açúcar em três subáreas de amostragem, representativas do talhão experimental (Figura 3). Estas subáreas apresentavam dimensões de 30 m x 30 m (900 m²).

4.2.1. Dados biométricos

O monitoramento biométrico foi executado em intervalos entre duas e quatro semanas, a partir dos 60 dias após o corte (DAC), ou seja, início do ciclo produtivo. Realizou-se dois tipos de monitoramento biométrico, um em campo e o outro em laboratório. No monitoramento em campo, foram realizadas entre 10 e 15 campanhas, em que se mediu o número de perfilhos industrializáveis (NPI), o diâmetro médio dos colmos (DMC), a estatura média dos colmos (EMC), o número de folhas verdes completamente abertas (NFVA), de folhas emergentes (NFE) e de folhas mortas (NFM), o comprimento (C+3) e a largura (L+3) da folha +3, que se refere à terceira folha superior completamente desenvolvida, e o índice de área foliar (IAF).

O NPI foi obtido por meio da contagem dos perfilhos (ou plantas) em cinco metros ao longo da fileira em cada subárea de amostragem. O DMC foi medido na base dos colmos de 15 perfilhos representativos de cada subárea de amostragem, com o auxílio de um paquímetro, totalizando 45 perfilhos monitorados no talhão experimental. Nestes mesmos perfilhos, foram obtidas a EMC por meio da utilização de uma trena, medindo-se do nível do solo até a primeira aurícula visível, classificada como folha +1 (primeira folha superior completamente desenvolvida com a lígula visível).

O NFV e o NFM foram contados em cada um dos perfilhos selecionados, considerando-se como folhas verdes, aquelas com pelo menos 50% de área foliar verde. O NFE foi contabilizado considerando-se as folhas acima da folha +1 que não se apresentavam completamente expandidas. Os dados de L+3 e C+3 foram obtidos por meio da realização de medições na porção mediana e nos pontos extremos das folhas +3, respectivamente, utilizando paquímetro e trena. O IAF foi obtido por meio de um integrador de área foliar (LAI 2000, LI-COR Inc., Lincoln, NE). Nesta análise, foram

selecionadas parcelas dentro das subáreas de amostragem, as quais foram monitoradas ao longo do experimento.

No monitoramento biométrico em laboratório, foram realizadas 10 campanhas, amostrando-se entre três e cinco perfilhos por subárea, totalizando entre 9 e 15 perfilhos por cada campanha. Nesta etapa, foram registrados as seguintes variáveis: número de internódios (NI), largura (LI) e comprimento (CI) de cada internódio e a estatura média dos colmos (EMC); número de folhas verdes completamente abertas (NFVA), folhas emergentes (NFE) e de folhas mortas (NFM); comprimento (C+3) e largura (L+3) da folha +3; área foliar da folha +3 (AFo+3) e das folhas emergentes (AFoEM); e, a área foliar total (AFoTot). A AFoEM e AFoTot foram medidas utilizando o LAI 3000 (LICOR Inc., Lincoln, NE).

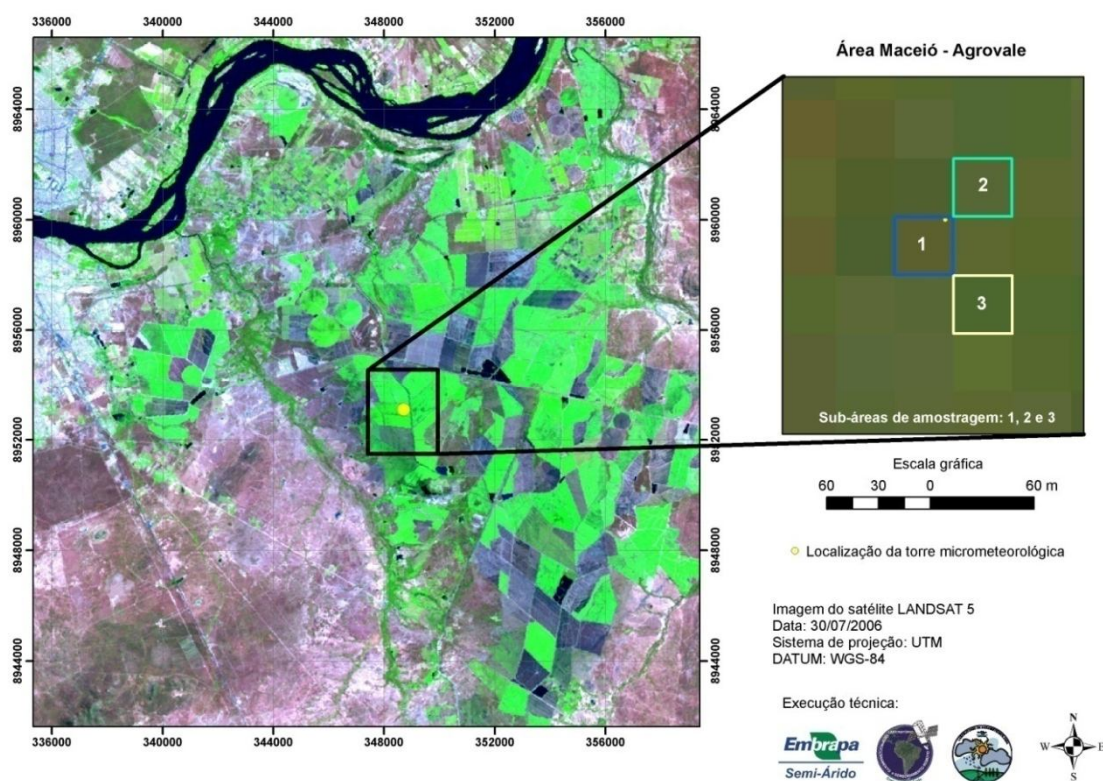


Figura 3. Localização da área experimental e das subáreas de amostragem.

4.2.2. Dados de biomassa seca

A biomassa seca da cana-de-açúcar foi obtida para seis componentes estruturais dos perfilhos, bem como para a parte aérea total, utilizando uma metodologia proposta por MUCHOW et al. (1993), que tem sido bastante aplicada em estudos para esta cultura (INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY, 2003; INMAN-BAMBER, 2004; ROBERTSON et al., 1996a). Os componentes estruturais dos perfilhos compreenderam as folhas verdes (FV), as bainhas (B), as folhas e bainhas mortas (FBM), o pseudocolmo (PC), o colmo (C) e a parte emergente (PE). Realizou-se 10 campanhas de amostragens, ao longo do ciclo da cultura.

A partir desta metodologia, amostragens de perfilhos foram realizadas, ao nível do solo, em quatro a cinco metros ao longo da fileira de cultivo, de cada subárea, totalizando entre 18 e 24 m² de material analisados por campanha de amostragem. Este material foi pesado separadamente por subárea, de modo a se obter a biomassa fresca total por parcela (BF1 - biomassa fresca da primeira coleta). Desse total, foram amostrados 15 perfilhos representativos por subárea, que foram divididos nos seis componentes estruturais (FV, B, FBM, PC, C e PE), caracterizando a segunda coleta na mesma campanha de amostragem (BF2).

As folhas referem-se à lâmina foliar verde da cultura expressa em base seca (BSFV - biomassa seca das folhas verdes). Para as bainhas, designou-se a abreviação BSB (biomassa seca das bainhas). A biomassa seca das folhas e bainhas mortas (BSFBM) representa o termo “trash”, comumente denominada na literatura internacional para a cana-de-açúcar. O pseudocolmo, por sua vez, refere-se à seção do colmo acima de um ponto de quebra, onde se inicia a parte ainda em maturação, ou seja, onde há internódios em formação. O ponto de quebra é facilmente identificado pela sua facilidade de rompimento, expresso em termos de biomassa seca por BSPC (biomassa seca do pseudocolmo). O segmento do perfilho a partir deste ponto até a interseção com as raízes, corresponde ao colmo da planta, caracterizando a biomassa seca dos colmos (BSC). Finalmente, as folhas em expansão existente acima do pseudocolmo são designadas como folhas em emergência e, conseqüentemente, sua biomassa seca que é representada por BSPE. Na literatura internacional esse termo é conhecido como biomassa seca das folhas do meristema. A soma entre os componentes estruturais da BSPC e da BSPE é conhecida mundialmente, como “cabbage” (INMAN-BAMBER et al., 2002; ROBERTSON et al., 1999; 1996a).

A soma da biomassa fresca dos componentes estruturais dos 15 perfilhos de cada subárea forneceu a biomassa fresca total da parte aérea. Na sequência, todo o correspondente a cada um dos componentes estruturais foi triturado separadamente em uma forrageira, da qual foram retiradas subamostras, caracterizando a terceira coleta (BF3). Essas subamostras foram colocadas em recipientes de alumínio, pesadas em uma balança de precisão de 0,001 g (modelo MARK 210A, Bel Engineering, Monza-MI, Itália) e, posteriormente, foram secas em estufa com ventilação forçada e temperatura entre 65-70°C, até atingir massa constante. Após a secagem, definiu-se a biomassa seca da terceira coleta (BS3).

Os valores correspondentes a biomassa de cada componente estrutural das plantas possibilitaram a determinação da biomassa seca total da parte aérea dos perfilhos sem os colmos (BSFV + BSB + BSFBM + BSPPC + BSPE), conhecida como biomassa seca da palhada (BSPA). Adicionalmente, foram obtidas as biomassas seca dos colmos (BSC) e total da parte aérea (BSTPA). Os valores de biomassa seca foram expressos em metro quadrado e por hectare. Estas informações foram obtidas, inicialmente, a partir da extrapolação dos dados das coletas do material triturado para o cálculo da biomassa seca dos 15 perfilhos de cada subárea ($BS2 = BS3 \times BF2 / BF3$). Em seguida, calculou-se a fração (f_x , onde $x = BFFV, BFB, BFFBM, BFPC, BFC$ e $BFPE$) que cada componente estrutural dos perfilhos correspondia da biomassa fresca total da parte aérea (BFTPA), ou seja, $f_x = x/BFTPA$. Os valores de f_x , BS2, BF3 e BF2 permitiram estimar a biomassa seca de cada componente estrutural dos perfilhos referente às coletas por subárea (BS1), ou seja, $BS1 = f_x \times BS2 \times BF3 / BF2$.

4.2.3. Análise de rendimento e qualidade

Ao final do ciclo da cana-de-açúcar, foram obtidos, no laboratório de Análise Química da Empresa Agro-Indústrias do Vale do São Francisco S.A. – AGROVALE, os seguintes índices tecnológicos: sólidos solúveis totais, teor de fibra, teor de sacarose do caldo, pureza, percentagem de açúcar bruto, açúcares redutores livres, açúcares redutores totais, umidade e toneladas de colmo por hectare.

Com base nestes índices tecnológicos foram calculados os rendimentos de açúcar e de álcool, bem como o conteúdo de sacarose na biomassa seca dos colmos. O rendimento bruto de açúcar (RBAÇ) foi calculado conforme metodologia proposta por Caldas (1998):

$$RBA\dot{C} = (PAB \times TCH) \times 0,01 \dots\dots\dots(14)$$

em que, RBA $\dot{C}$, em t ha⁻¹; PAB, porcentagem de açúcar bruto, em %; TCH, toneladas de colmos por hectare, em t ha⁻¹.

O rendimento bruto de álcool (RBAL) foi calculado utilizando a seguinte expressão (CALDAS, 1998):

$$RBAL = ((PAB \times f_{RBAL}) + ARL) \times fg \times 0,01 \times TCH \dots\dots\dots (15)$$

em que, RBAL, em m³ ha⁻¹; fg, fator de Gay-Lussac, igual a 0,6475; ARL, açúcares redutores livres, em %; f_{RBAL}, fator de transformação estequiométrica de sacarose em uma molécula de glicose mais uma de frutose, igual a 1,052.

4.3. Variáveis de crescimento e agrometeorológicas para a cana-de-açúcar

A partir dos dados biométricos, de biomassa e meteorológicos foram calculadas as seguintes variáveis de crescimento e agrometeorológicas para a cana-de-açúcar: índices morfofisiológicos, filocrono, fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, coeficiente de extinção, uso eficiente de radiação e exigência térmica ou graus-dia acumulados (ROUPHAEL & COLLA, 2005; TEJERA et al., 2007; SINGELS et al., 2005; WOOD et al., 1996).

4.3.1. Índices morfofisiológicos

A partir dos valores de biomassa seca total da parte aérea das plantas (sem as raízes) (BSTPA), IAF, EMC, DMC e do NPI, foram estimados os índices morfofisiológicos: taxa de crescimento absoluto (TCA, g m⁻² dia⁻¹), taxa de crescimento relativo (TCR, g g⁻¹ dia⁻¹), taxa de assimilação líquida (TAL, g m⁻² dia⁻¹), razão de área foliar (RAF, m² g⁻¹), razão da massa foliar (RMF, g g⁻¹), área foliar específica (AFE, m² g⁻¹), taxa de elongação média dos colmos (TEMC, cm dia⁻¹), taxa de expansão média do diâmetro (TEDMC, mm dia⁻¹) e a taxa de perfilhamento (TP, perfilhos m⁻² dia⁻¹).

A TCA representa a variação da biomassa seca acumulada pela planta, ao longo de um intervalo de tempo, enquanto que, a TCR reflete o acúmulo de matéria seca da

planta em um intervalo de tempo, a partir do seu tamanho atual. A TAL indica a eficiência do sistema assimilador que está envolvido na produção de matéria seca, ou seja, a fotossíntese líquida da planta. A AFE refere-se à espessura das folhas, quanto maior o valor, menor será a espessura, enquanto que, a RAF representa a relação entre a área foliar (IAF) e a massa seca (BSTPA), resultando na taxa de fotossíntese. A RPF indica quanto da estrutura das folhas corresponde da massa total. A TEMC, TEDMC e TP indicam o incremento de estatura, do diâmetro dos colmos e do número de perfis industriais em um intervalo de tempo.

Para estimativa dos valores de TAL, TCA, TCR, RAF, RPF, AFE, TEMC, TEDMC e TP foram utilizadas as seguintes equações:

$$TAL = \frac{BSTPA_{(n+1)} - BSTPA_n}{DAC_{(n+1)} - DAC_n} \cdot \frac{\ln(IAF_{(n+1)}) - \ln(IAF_n)}{IAF_{(n+1)} - IAF_n} \dots\dots\dots (16)$$

$$TCA = \frac{BSTPA_{(n+1)} - BSTPA_n}{DAC_{(n+1)} - DAC_n} \dots\dots\dots (17)$$

$$TCR = \frac{\ln(BSTPA_{(n+1)}) - \ln(BSTPA_n)}{DAC_{(n+1)} - DAC_n} \dots\dots\dots (18)$$

$$RAF = \frac{IAF_{(n+1)} - IAF_n}{BSTPA_{(n+1)} - BSTPA_n} \cdot \frac{\ln(BSTPA_{(n+1)}) - \ln(BSTPA_n)}{\ln(IAF_{(n+1)}) - \ln(IAF_n)} \dots\dots\dots (19)$$

$$RPF = \frac{BSFV_n}{BSTPA_n} \dots\dots\dots (20)$$

$$AFE = \frac{IAF_n}{BSTPA_n} \dots\dots\dots (21)$$

$$TEMC = \frac{EMC_{(n+1)} - EMC_n}{DAC_{(n+1)} - DAC_n} \dots\dots\dots (22)$$

$$TEDMC = \frac{DMC_{(n+1)} - DMC_n}{DAC_{(n+1)} - DAC_n} \dots\dots\dots (23)$$

$$TP = \frac{NPI_{(n+1)} - NPI_n}{DAC_{(n+1)} - DAC_n} \dots\dots\dots (24)$$

em que, BSTPA = biomassa seca total da parte aérea (g), excluindo-se as raízes; BSFV = biomassa seca das folhas verdes (g); IAF = índice de área foliar (m² m⁻²); DAC = dias após o corte; EMC = elongação média dos colmos; DMC = diâmetro médio dos colmos;

NPI = número de perfilhos industrializáveis; e, n+1 e n = números de duas amostras consecutivas.

A derivação do modelo sigmoidal com três parâmetros em relação à variável DAC foi utilizada para descrever a variação dos índices morfofisiológicos TCA, TEMC, TEDMC e TP, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar. Similarmente, a equação utilizada para descrever os comportamentos da TCR foi obtida por meio da solução analítica da relação $TCR = TCA/BSTPA$. Adicionalmente, as curvas de AFE, TAL, RAF e RMF foram traçadas com base nos cálculos das relações $AFE = IAF/BSFV$, $TAL = TCA/IAF$, $RAF = IAF/BSTPA$ e $RMF = BSFV/BSTPA$.

4.3.2. Taxa de aparecimento foliar e do filocrono

A taxa de aparecimento foliar (folha °C⁻¹dia⁻¹) para a cana-de-açúcar foi calculada por meio do coeficiente angular da regressão linear obtida entre a relação dos graus dias acumulados (GDA) e o número de folhas verdes completamente abertas (NFVA) acumuladas ao longo do ciclo. O filocrono (FL, °C dia folha⁻¹) foi obtido invertendo-se o valor da taxa de aparecimento foliar. O FL é definido como o intervalo de tempo térmico necessário para a emissão de folhas consecutivas e trata-se de um indicador que tem sido utilizado para simular o aparecimento de folhas nos colmos da cana-de-açúcar, em trabalhos de modelagem (SINCLAIR et al., 2004; SINGELS et al., 2005).

4.3.3. Fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada

A fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{FRA}) é um indicador da radiação solar que foi utilizada pela cultura para a realização da fotossíntese, a qual, também, indica a percentagem de cobertura do solo. Para sua estimativa foram utilizadas medições de radiação fotossinteticamente ativa realizadas abaixo (RFA_{LI}), em três repetições, e acima (RFA_{LS}) do dossel da cultura, em uma repetição. Em seguida, utilizou-se a seguinte expressão:

$$f_{RFA} = 1 - \frac{RFA_{LI}}{RFA_{LS}} \dots\dots\dots(25)$$

em que, RFA_{LI} e RFA_{LS} são expressos em escala diária em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$.

4.3.4. Coeficiente de extinção

O coeficiente de extinção (k_e , adimensional) é um indicador da interceptação de radiação fotossinteticamente ativa pelas plantas, influenciado por uma série de fatores morfológicos e estruturais das plantas, tais como crescimento, estrutura, ângulo foliar e disposição das folhas no dossel (KINIRY et al., 2005). Os valores de k_e foram calculados com os dados de f_{FRA} e do IAF, conforme a seguinte expressão resultante da Lei de Beer:

$$k_e = - \frac{\ln(1 - f_{RFA})}{IAF} \dots\dots\dots(26)$$

4.3.5. Uso eficiente de radiação e eficiência fotossintética

O uso eficiente de radiação (UER, $g\ MJ^{-1}$) e a eficiência fotossintética (EFT, $g\ MJ^{-1}$) indicam a quantidade de biomassa seca produzida, a partir da radiação interceptada pela cultura. O UER e a EFT foram calculados a partir da regressão entre a biomassa seca e a radiação interceptada acumuladas entre os intervalos de amostragens, considerando-se os valores acumulados da radiação solar global (Rg) e da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), respectivamente. Esta distinção entre UER e EFT foi considerada, visando uma análise comparativa com os dados da literatura, pois o UER, da maneira proposta, destaca-se como o mais calculado para a cana-de-açúcar (ROBERTSON et al., 1996a; SINGELS et al., 2005). Considerou-se para os cálculos do UER e da EFT, os dados de biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) e de biomassa seca dos colmos (BSC). Os valores dos coeficientes angulares das equações lineares obtidas entre a relação de BSTPA ou BSC e Rg ou RFA acumulados forneceram os valores de UER ou EFT (KINIRY et al., 2005; ROUPHAEL & COLLA, 2005).

4.3.6. Graus dias acumulados

Para a estimativa dos graus-dia acumulados (GDA, °Cdia) ou da exigência térmica da cana-de-açúcar, foram utilizados os dados de temperatura média do ar obtidos por meio de uma estação meteorológica automática, instalada a 3 km de distância em relação à área experimental. Para o cálculo dos GDA, foi considerada a temperatura base da cultura igual a 10°C para a parte aérea total da planta e 16°C para os colmos, como sugerido por Smith & Singels (2005) e Sinclair et al. (2004).

4.4. Medidas micrometeorológicas

As medidas micrometeorológicas foram obtidas dentro do talhão experimental, onde foi instalada uma torre micrometeorológica de oito metros de altura e a 350 m em relação à bordadura, na direção do vento predominante. Para a medição dos componentes do balanço de radiação e de energia foram instalados vários sensores eletrônicos (Tabela 3). As disposições destes sensores, equipamentos e acessórios na torre micrometeorológica podem ser observadas na Figura 4.

Um saldo radiômetro foi instalado na altura de $2z_{om} + 1,5h_c$ (onde, z_{om} = parâmetro de rugosidade da superfície para o *momentum* e h_c = altura do dossel da cultura), juntamente com um sensor de radiação solar refletida. No topo da torre, foram dispostos um sensor de radiação solar incidente ou global, um de radiação fotossinteticamente ativa pontual e outro linear. Abaixo do dossel da cultura foram dispostos três sensores lineares de radiação fotossinteticamente ativa, de maneira perpendicular e diagonalmente em relação as fileira de cultivo. Além disso, foram instalados três fluxímetros a 0,02 m de profundidade no solo, situados entre fileiras e na fileira de cultivo.

Para a estimativa dos componentes do balanço de energia, também, foram utilizados três psicrômetros ventilados com termopares do Tipo T de Cobre-Constantan, sendo o primeiro localizado a uma altura de $2z_{om}$ do topo do dossel da cultura, enquanto o segundo a uma distância de 1,5 m do primeiro psicrômetro. O segundo e o terceiro, também, foram posicionados a 1,5 m entre si. Estas distâncias entre os psicrômetros foram mantidas até o final do experimento, contudo os mesmos foram realocados para novas posições em relação ao dossel, à medida que a cultura foi crescendo.

Tabela 3. Descrição dos sensores eletrônicos utilizados no experimento da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco e seus respectivos períodos de medição. Obs.: Início do ciclo em 28/05/2007, z_{om} = parâmetro de rugosidade e h_c = altura do dossel da cultura.

Parâmetro	Quantidade	Instrumento	Modelo/Fabricante/Local	Descrição das medidas	Disposição (m)	Período de medição
Rg	1	Piranômetro	LI-200SA Quantum sensor, Li-cor, Nebraska, USA	Radiação solar incidente ou global	8**	19/06/2007 a 09/06/2008
Rr	1	Piranômetro	EPPLEY PSP, Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah, USA	Radiação solar refletida	2 z_{om} + 1,5*	19/06/2007 a 09/06/2008
Rn	1	Saldo radiômetro	NR-Lite Net radiometer, Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah	Saldo de radiação	2 z_{om} + 1,5 *	19/06/2007 a 09/06/2008
t_{bs} e t_{bu}	3	Termopar	Tipo T, Cobre-Constantan	Temperatura do bulbo seco e úmido	2 z_{om} + 1,5 *	19/06/2007 a 09/06/2008
RFA	1	Sensor quântico	LI-190SA Quantum sensor, Li-cor, Nebraska, USA	Radiação fotossinteticamente ativa	8**	19/06/2007 a 09/06/2008
RFA _{LS}	1	Sensor Quântico	LI-191SA Line Quantum Sensor Li-cor, Nebraska, USA	Radiação fotossinteticamente ativa linear superior	8**	19/06/2007 a 09/06/2008
RFA _{LI}	3	Sensor quântico	LI-191SA Line Quantum Sensor Li-cor, Nebraska, USA	Radiação fotossinteticamente ativa linear inferior	Em três posições abaixo do dossel	19/06/2007 a 09/06/2008
G	3	Placas de termopilha	HFT3-REBS, Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah, USA	Fluxo de calor no solo	0,02 de profundidade *	19/06/2007 a 09/06/2008
P	1	Pluviômetro	CS700-L Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Australia	Precipitação	8 **	19/06/2007 a 10/06/2008
t_{ar} e UR _{ar}	4	Termistor e Capacitor	CS215, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA	Temperatura e umidade relativa do ar	2 z_{om} + 0,5; 2 z_{om} + 1,0; 2 z_{om} + 2,0; e, 2 z_{om} + 4,0 *	12/07/2007 a 09/06/2008
u	4	Anemômetro	03001-5, R.M. Young, Wind Sentry, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA	Velocidade do vento	2 z_{om} + 0,5; 2 z_{om} + 1,0; 2 z_{om} + 2,0; e, 2 z_{om} + 4,0 *	06/08/2007 a 09/06/2008

Obs.: * posição em relação ao dossel da cultura; e, ** posição em relação à superfície do solo.

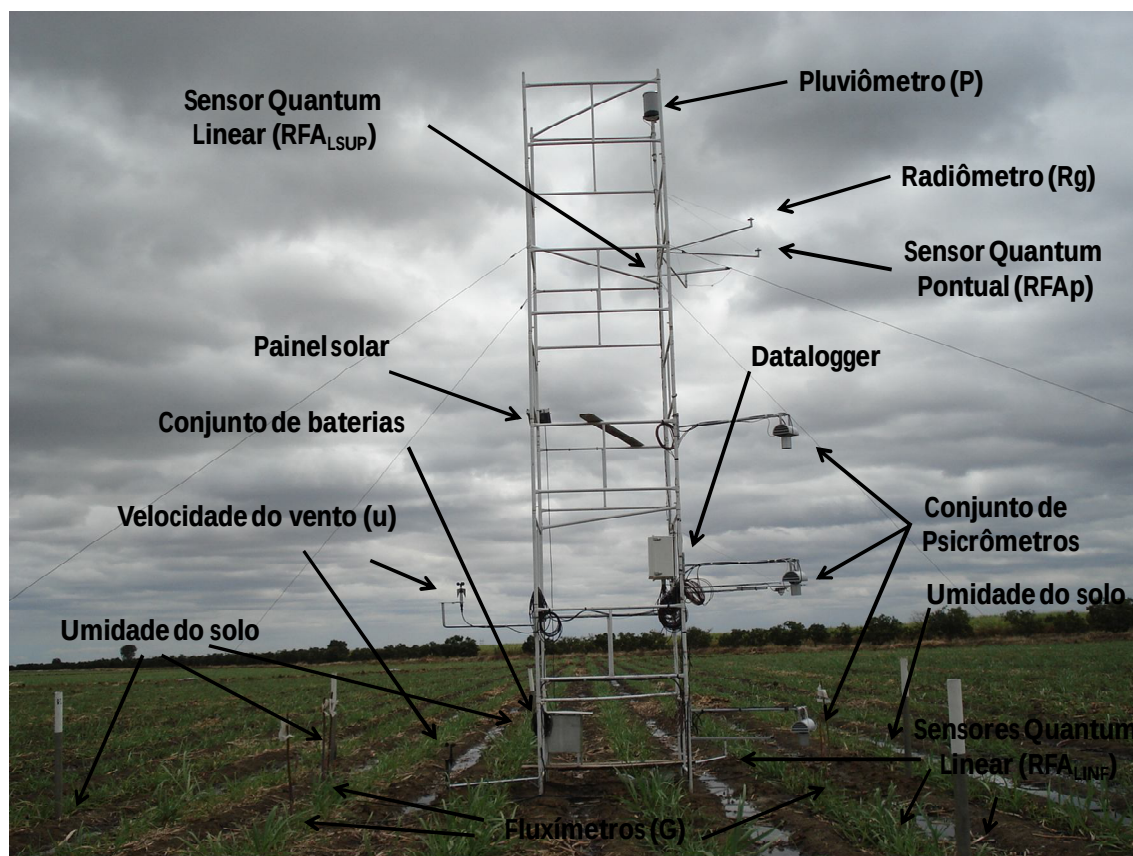


Figura 4. Disposição dos sensores eletrônicos e equipamentos na torre micrometeorológica instalada em uma área experimental cultivada com cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), ciclo cana-soca, safra 2007/2008, no Submédio do Vale do São Francisco.

Quatro sensores de velocidade do vento, temperatura e de umidade relativa do ar foram instalados logaritmicamente em diferentes alturas acima do dossel vegetativo, visando determinar as características aerodinâmicas da cultura. Os dados de chuva foram monitorados por meio de um pluviômetro instalado no topo da torre.

Todos os sensores foram conectados a um multiplexador (modelo AM16/32, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) e a um sistema de aquisição de dados (modelo CR10X, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) programado para realizar medidas a cada 60 s e armazenar médias em intervalos de 15 min. O período de monitoramento micrometeorológico compreendeu os dias 19/06/2007 a 09/06/2008, totalizando 357 dias.

4.5. Componentes do balanço de radiação

Os componentes medidos do balanço de radiação (R_n , R_g , R_r e R_{FAp}) foram utilizados para o cálculo do balanço de ondas curtas (BOC) e de ondas longas (BOL),

acima da superfície do dossel da cana-de-açúcar. O BOC foi estimado pela equação 4, expresso em $W\ m^{-2}$, quando analisados ao longo do dia, e em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$, quando analisados em escala diária.

Uma vez determinados os componentes do BOC e o R_n , foi calculado o BOL sobre o dossel da cana-de-açúcar, como segue:

$$BOL = R_n - (R_g - R_r) \dots\dots\dots(27)$$

Finalmente, por meio dos dados de R_g e R_r foram calculados os valores da fração da radiação solar refletiva pela superfície (cultura + solo), ou seja, o albedo (α , %), utilizando a seguinte relação:

$$\alpha = \frac{R_r}{R_g} \times 100 \dots\dots\dots(28)$$

4.6. Componentes do balanço de energia

4.6.1. Balanço de energia com base na razão de Bowen

A partição do balanço de energia à superfície, entre os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), foi obtida por meio do método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB), conforme as seguintes expressões:

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \dots\dots\dots(29)$$

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \dots\dots\dots(30)$$

em que, β = razão de Bowen (adimensional).

Assumindo um período médio de 15 minutos, as relações empíricas entre os fluxos e gradientes verticais de H e LE podem ser expressas por:

$$H = -\rho_a c_p K_h \frac{\partial t}{\partial z} \dots\dots\dots(31)$$

$$LE = -\frac{\rho_a c_p}{\gamma} K_w \frac{\partial e}{\partial z} \dots\dots\dots(32)$$

em que, ρ_a = densidade do ar (kg m^{-3}), c_p = calor específico do ar à pressão constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), L = calor latente de vaporização (kJ kg^{-1}), K_h e K_w = coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível e latente, respectivamente (adimensionais); e, $\partial t/\partial z$, $\partial e/\partial z$ = gradientes de temperatura ($^\circ\text{C}$) e de pressão de vapor d'água (kPa), respectivamente.

Admitindo a hipótese da igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor, vapor e *momentum* ($K_h = K_w = K_m$), β pode ser expresso como:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta t}{\Delta e} \dots\dots\dots(33)$$

em que, Δt e Δe = diferença de temperatura do ar e de pressão de vapor d'água, em $^\circ\text{C}$ e kPa , respectivamente.

Os valores de Δt e Δe foram obtidos por meio de medições de temperatura de bulbo seco (t_{bs}) e de bulbo úmido (t_{bu}) dos psicrômetros situados em dois níveis (z_1 e z_2) acima do topo da cultura. Assim, considerando a equação psicrométrica, os valores de β foram calculados a partir da seguinte expressão (PEREIRA et al., 1997):

$$\beta = \left(\frac{\Delta + \gamma (t_{bu1} - t_{bu2})}{\gamma (t_{bs1} - t_{bs2})} - 1 \right)^{-1} \dots\dots\dots(34)$$

em que, Δ = declividade da curva de pressão de vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); t_{bu1} e t_{bu2} = temperaturas de bulbo úmido em dois níveis de medida acima do dossel da cultura ($^\circ\text{C}$), respectivamente; t_{bs1} e t_{bs2} = temperatura de bulbo seco em dois níveis de medida acima do dossel da cultura ($^\circ\text{C}$), respectivamente.

Com os valores de LE , R_n e G , também foram quantificados os valores da fração evaporativa acima do dossel da cana-de-açúcar (TEIXEIRA et al., 2008).

4.6.2. Análise da qualidade dos dados do método da razão de Bowen

Para avaliar os erros associados com o método BERB na estimativa dos valores de β e, conseqüentemente, no cálculo do fluxo de calor latente (LE) foram utilizados inicialmente os critérios definidos por Perez et al. (1999). De acordo com as recomendações destes autores, avaliou-se a consistência física dos dados com base nos dados do perfil de pressão de vapor d'água em cada horário de medição, na resolução dos sensores e na conversão de sinais da relação fluxo-gradiente.

Nessa conversão, os valores de R_n e G são considerados positivos quando em direção à superfície, enquanto LE e H são positivos quando em direção oposta à superfície e aos gradientes de temperatura (Δt) e pressão de vapor (Δe). A variação de " t_{ar} " e " e " no perfil é obtida pela diferença dos valores medidos em duas alturas (z_1 e z_2), acima do dossel da cultura ($\Delta t_{ar} = t_{bs1} - t_{bs2}$ e $\Delta e = e_1 - e_2$) (Figura 5), sendo que o primeiro psicrômetro foi situado a altura de $2 \times z_{om}$.

A partir das considerações acima, tem-se que a expressão a seguir, deve ser sempre maior que zero, enquanto os valores de β não devem estar contidos no intervalo de rejeição para que os dados de LE e H sejam considerados consistentes:

$$\frac{\Delta e}{LE} = \gamma \frac{\Delta t_{ar}}{H} = \frac{\Delta e + \Delta t_{ar}}{R_n - G} > 0 \dots\dots\dots(35)$$

$$(-1 - |\partial \varepsilon|) \leq \beta \leq (-1 + |\partial \varepsilon|) \dots\dots\dots(36)$$

em que, $\partial \varepsilon$ = erro absoluto de β .

Os valores de $\partial \varepsilon$ foram estimados por meio da seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{\partial \Delta e - \gamma \partial \Delta t_{ar}}{\Delta e} \dots\dots\dots(37)$$

em que, $\partial \Delta e$ e $\partial \Delta t_{ar}$ = limites de resolução dos gradientes de pressão de vapor d'água (kPa) e de temperatura (°C), respectivamente.

Como os erros podem ser positivos ou negativos, considerou-se valores fixos de $\partial \Delta e$ e $\partial \Delta t_{ar}$, sendo iguais a $|0,02|$ kPa e $|0,05|$ °C, respectivamente (AZEVEDO et al., 2003; PEREZ et al., 1999). Observa-se pela equação 37, que os valores de ε variam

tanto com a resolução dos sensores quanto com os valores medidos de Δe . A partir das condições citadas anteriormente, apenas duas combinações são válidas para estimativas fisicamente consistentes dos valores de LE e H:

a) quando $(R_n - G) > 0$ e $\beta > -1$, o valor de LE (equação 32) sempre deverá ser positivo, enquanto que, H (equação 31) pode ser positivo (caso $\beta > 0$) ou negativo (caso $-1 < \beta \leq 0$). Quando $(R_n - G) > 0$ e $\beta < -1$, apenas os casos $LE < 0$ e $H > 0$ são possíveis.

(B) quando $(R_n - G) < 0$ e $\beta < -1$, apenas os casos $LE > 0$ e $H < 0$ são possíveis. Quando $(R_n - G) < 0$ e $\beta > -1$, LE sempre deverá ser negativo, enquanto H pode ser negativo (caso $\beta > 0$) ou positivo (caso $-1 < \beta \leq 0$).

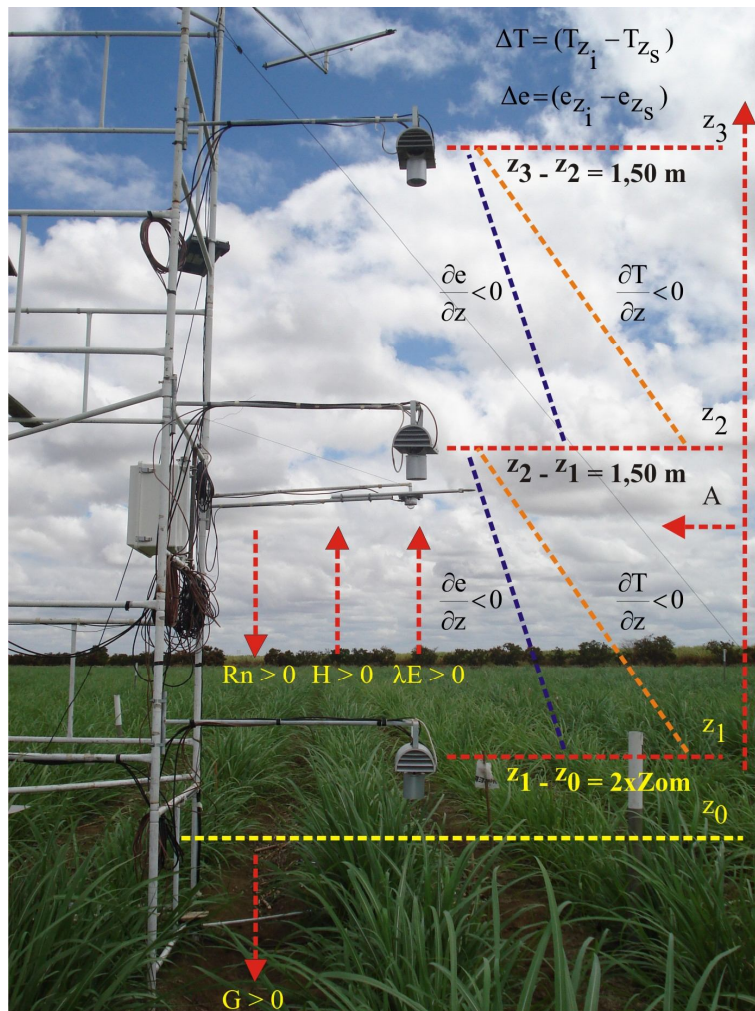


Figura 5. Representação esquemática da convenção dos sinais dos fluxos de energia na interface entre a cana-de-açúcar e a atmosfera.

Ambos os casos não consideram uma possível advecção (A) (Figura 3). Além do mais, quando as condições acima não são satisfeitas, o método BERB falha e pode apresentar erros denominados por Perez et al. (1999) tais como A, B, C e D (Tabela 2). Adicionalmente, considerou-se que valores de $\beta < -0,75$ resultam em valores de LE e H fisicamente inconsistentes (MARIN, 2003; ORTEGA-FARIAS et al., 1996).

Para o cálculo dos valores diários de LE e H foram considerados os dados a cada 15 minutos, quando $(R_n - G)$ foram positivos. Contudo, utilizou-se apenas os dias que apresentaram pelo menos 80% dos dados de LE e H (médios de 15 minutos) fisicamente consistentes de acordo com os critérios mencionados anteriormente, sendo com isso caracterizado como dias “válidos”. Para os dados rejeitados, referentes aos 20% complementares do período diurno, foram interpolados assumindo que os valores de LE e H eram iguais a zero, quando o primeiro valor de $R_n - G$ foi negativo (INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY, 2003; MARIN, 2003; OHMURA, 1982).

Tabela 4. Resumo dos erros do método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB), segundo Perez et al. 1999.

Tipo de Erro	Condição
A	$(R_n - G) > 0, \Delta e > 0, \beta < -1 + \varepsilon $
B	$(R_n - G) > 0, \Delta e < 0, \beta < -1 - \varepsilon $
C	$(R_n - G) < 0, \Delta e > 0, \beta < -1 - \varepsilon $
D	$(R_n - G) < 0, \Delta e < 0, \beta < -1 + \varepsilon $
E	Mudanças rápidas de “t” e “e”

$R_n - G$: energia disponível, Δe : diferença da pressão de vapor entre o primeiro e segundo níveis de medição, β : razão de Bowen, “ t_{ar} ” e “e”: temperatura e pressão de vapor, respectivamente, e $|\varepsilon|$: intervalo de exclusão de dados de β em torno de -1.

4.7. Evapotranspiração da cultura, requerimento hídrico, evapotranspiração de referência e do coeficiente de cultura

Para a estimativa dos valores da evapotranspiração da cultura (ET_c), foram integrados inicialmente os valores de LE a cada 15 minutos, caracterizados como consistentes de acordo com a metodologia proposta de Perez et al. (1999). Assim, para este intervalo de tempo, a ET_{c15} foi estimada por:

$$ET_{c15} = \frac{LE \times t \times f_{tempo}}{L} \dots\dots\dots (38)$$

em que, LE = fluxo de calor latente (W m^{-2}); t = intervalo de armazenamento dos valores médio (15 minutos); f_{tempo} = fator de ajuste da escala de tempo (60 s); L = calor latente de vaporização (kJ kg^{-1}). Por meio dos valores de ETc15 foram calculados os valores diários de ETc, considerando os valores durante o período em que a energia disponível ($R_n - G$) foi positiva:

$$ETc = \sum_{R_n - G > 0}^{i=1} ETc15 \dots\dots\dots (39)$$

O requerimento hídrico da cultura da cana-de-açúcar foi determinado integrando-se os valores de ETc para todo o período de monitoramento (357 dias) e, em seguida, extrapolado para todos os dias do seu ciclo (389 dias), incluindo dias não considerados “válidos” e que não foram monitorados. Este procedimento foi realizado a partir das equações de coeficiente de cultura ajustadas em função das variáveis independentes, dias após o corte e graus dias acumulados.

Para estimar a evapotranspiração de referência (ETo, mm dia⁻¹), foram utilizados os dados de uma estação meteorológica automática (modelo Davis Vantage Pro2, Hayward, CA, USA) instalada em uma área gramada de 20 m x 20 m, pertencente à Empresa AGROVALE e situada a 3 km de distância da área experimental. Foi utilizado o método de Penman-Monteith padronizado pela FAO para o cálculo da ETo (ALLEN et al., 1998):

$$ETo = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{t_{ar} + 273} \right) u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)} \dots\dots\dots (40)$$

em que, R_n = saldo de radiação sobre a superfície gramada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); t_{ar} = temperatura do ar ($^\circ\text{C}$); u = velocidade do vento (m s^{-1}); $(e_s - e_a)$ = déficit de pressão vapor d’água (kPa); Δ = declividade da curva de pressão de vapor d’água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Com base na relação entre os valores de ETc e ETo, foi estimado o coeficiente de cultura (K_c , adimensional) para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \dots\dots\dots(41)$$

4.8. Análise da interação entre a cana-de-açúcar e atmosfera

Para analisar a interação entre a cana-de-açúcar e a atmosfera, no processo de troca de vapor d'água, calculou-se os valores do fator de desacoplamento (Ω) em função dos dados micrometeorológicos coletados na torre instalada dentro do talhão experimental e das estimativas das características aerodinâmicas da cultura.

4.8.1. Fator de desacoplamento

Para a estimativa do fator de desacoplamento, foi utilizada a seguinte expressão (MCNAUGHTON & JARVIS, 1983):

$$\Omega = \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \frac{r_c}{r_a} \right)^{-1} \dots\dots\dots(42)$$

Os valores de r_c foram calculados por meio da inversão da equação de Penman-Monteith (equação 11), obtendo-se a equação a seguir:

$$r_c = r_a \left(\frac{\Delta}{\gamma} \frac{H}{LE} - 1 \right) + \left(\frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{\gamma LE} \right) \dots\dots\dots(43)$$

A r_a foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z-d}{z_{oh}}\right)}{k u_*} - \psi_h \left(\frac{z-d}{L_{M-O}} \right) \dots\dots\dots(44)$$

em que, z = altura de medição acima do dossel da cultura (m), d = deslocamento do plano zero (m), z_{oh} = parâmetro de rugosidade que governa a transferência de calor e vapor d'água entre a superfície e a atmosfera; k = constante de Von Karman (0,41); u_* = velocidade de fricção ($m s^{-1}$); ψ_h = fator de correção da estabilidade atmosférica para o

calor (adimensional); L_{M-O} = comprimento de Monin-Obukhov (adimensional), que é semelhante ao número de Richardson (Ri), pois permite caracterizar a natureza do escoamento, apresentando a seguinte relação com o Ri: a) $L_{M-O} = z / Ri$ (sob condições de instabilidade atmosférica) e, b) $L_{M-O} = z (1 - 5 Ri) / Ri$ (sob condições de estabilidade atmosférica).

Para o cálculo de u_* , foi utilizada a relação fluxo-gradiente com dois níveis de velocidade do vento acima do dossel da cultura e a equação:

$$u_* = \frac{k(u_2 - u_1)}{\ln\left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d}\right) - \psi_m\left(\frac{z_2 - d}{L_{M-O}}\right) + \psi_m\left(\frac{z_1 - d}{L_{M-O}}\right)} \dots\dots\dots (45)$$

em que, u_2 e u_1 são os valores de velocidade do vento obtidos nos níveis z_2 e z_1 , respectivamente; e ψ_m = fator de correção da estabilidade atmosférica para o *momentum* (adimensional).

No cálculo de ψ_h e ψ_m consideraram-se as seguintes expressões:

a) condições de instabilidade ($Ri < -0,01$):

$$\psi_h = 2 \ln \left(\frac{1 + (16 Ri^{0,25})^2}{2} \right) \dots\dots\dots (46)$$

$$\psi_m = 2 \ln \left(\frac{1 + (1 - 16 Ri^{0,25})}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + (1 - 16 Ri^{0,25})^2}{2} \right) - 2 \arctan(1 - 16 Ri^{0,25}) + \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots (47)$$

b) condições de estabilidade ($Ri > 0,01$):

$$\psi_h = \psi_m = -5(16 Ri^{0,25}) \dots\dots\dots (48)$$

Os valores de z_{oh} foram obtidos a partir dos dados estimados de z_{om} (parâmetro de rugosidade para o *momentum*), considerando a seguinte relação: $z_{oh} = 0,1 z_{om}$. Por sua vez, z_{om} foi calculado a partir da expressão:

$$z_{om} = \frac{z - d}{\exp\left(\frac{k u(z)}{u_*} + \psi_m\left(\frac{z-d}{L_{M-O}}\right)\right)} \dots\dots\dots (49)$$

4.8.2. Deslocamento do plano zero da cana-de-açúcar

O deslocamento do plano zero (d) foi calculado considerando o perfil logarítmico do vento para subcamada de fluxo constante ou inercial. Os dados foram estimados utilizando os valores médios de 30 min de velocidade do vento restritos a condições próximas da neutralidade ($-0,01 < Ri < 0,01$), para satisfazer a lei do perfil logarítmico do vento (TOLEDO FILHO et al., 2003).

Devido aos erros proporcionados pela inércia dos anemômetros de concha, os perfis, em que, a velocidade do vento no anemômetro inferior foi menor que $1,0 \text{ m s}^{-1}$, foram desconsiderados (LYRA & PEREIRA, 2007). Para caracterizar as condições de estabilidade atmosférica e, posteriormente, identificar os perfis próximos à neutralidade, foi utilizado o número de Richardson (Ri):

$$Ri = \frac{g \frac{\Delta\theta}{\Delta z}}{\bar{\theta} \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right)^2} \dots\dots\dots (50)$$

em que, g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), $\Delta\theta$ e Δu = diferença da temperatura potencial (K) e da velocidade do vento (m s^{-1}) entre dois níveis de medição (Δz), respectivamente, $\bar{\theta}$ = temperatura potencial média (K). Quando as condições da atmosfera aproximam-se da neutralidade, tem-se que as forças térmicas e mecânicas se equilibram, com isso as flutuações instantâneas da velocidade do ar na horizontal e na vertical são idênticas.

Assim, a partir de um método iterativo da relação linear entre $\ln(z-d)$ e “u”, os valores de “d” foram obtidos até que o coeficiente de determinação fosse o maior possível (LYRA & PEREIRA, 2007; STEDUTO & HSIAO, 1998a).

4.9. Análise da eficiência do uso de água para a cana-de-açúcar

Para analisar a eficiência do uso de água em relação ao desempenho da aplicação de água, com base na demanda hídrica requerida pela cultura, foram calculados indicadores mensais do ciclo produtivo da cana-de-açúcar (13 meses). Foram estimados os seguintes indicadores: suprimento relativo de água (SRA), evapotranspiração relativa (ER), fração de redução de água (RFA) e déficit de hídrico da cultura (DHC). Para avaliar a eficiência do uso de água, com base na resposta produtiva da cultura, foi considerado o uso eficiente de água (UEA) e a produtividade da água da cultura para o mesmo intervalo de tempo (PA_C).

4.9.1. Indicadores com base na resposta produtiva da cultura

4.9.1.1. Uso eficiente de água

Os valores do uso eficiente de água (UEA) da cana-de-açúcar referem-se à quantidade de biomassa seca produzida em relação ao volume de água aplicado ou que entrou no sistema de produção pela irrigação (I , mm) e precipitação (P , mm). Os valores de UEA foram obtidos para a produção de biomassa seca total da parte aérea (BSTPA, kg m^{-2}), de palhada (BSPA, kg m^{-2}) e dos colmos (BSC, kg m^{-2}), utilizando a seguinte expressão:

$$UEA = \frac{BSTPA \text{ ou } BSPA \text{ ou } BSC}{ET_c \text{ ou } (P + I)} \dots\dots\dots(51)$$

4.9.1.2. Produtividade da água da cultura

A produtividade da água da cultura (PA_C) é semelhante ao UEA, contudo leva em consideração o rendimento industrializável da cana-de-açúcar. Os seus valores foram calculados por meio dos dados da análise de rendimento e de qualidade cana-de-açúcar, em termos de toneladas de colmos por hectare (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBAÇ) (equação 14) e de rendimento bruto de álcool (RBAL) (equação 15), por meio da seguinte expressão:

$$PA_c = \frac{TCH \text{ ou } RBA\check{C} \text{ ou } RBAL}{ET_c \text{ ou } (P + I)} \dots\dots\dots(52)$$

4.9.2. Indicadores de desempenho da aplicação de água com base na demanda hídrica requerida pela cultura

4.9.2.1. Suprimento relativo de água

O suprimento relativo de água (SRA) é um indicador utilizado para avaliar se o volume de água aplicado está atendendo à demanda máxima da cultura (PERRY et al., 1996), como segue:

$$SRA = \frac{(P+I)}{ET_m} \dots\dots\dots(53)$$

em que, P = precipitação mensal acumulada (mm), I = lâmina de água mensal acumulada aplicada pela irrigação (mm) e ET_m = evapotranspiração máxima da cultura mensal acumulada (mm mês⁻¹).

4.9.2.1.1. Evapotranspiração máxima da cultura

A ET_m considerada neste trabalho difere teoricamente da que é obtida por meio do produto entre ET_o e o valor médio da curva do coeficiente de cultura (K_{cmed}) para uma determinada fase fenológica. Na ausência de condições meteorológicas, de manejo e de disponibilidade de água no solo que possam restringir o processo de evapotranspiração, tem-se que a ET_m possui valores maiores que a ET_c.

Considerando, em termos de coeficiente de cultura, o valor acima do valor médio da curva (K_{cmed}) pode ser representado como K_{cmax}. Para um melhor entendimento, na Figura 6 é demonstrada uma representação gráfica do que foi considerado nos cálculos da ET_m. A partir desta representação, é possível inferir que, além dos valores de K_c acima da curva representarem os valores máximos (K_{cmax}) ao longo do ciclo da cultura, tem-se que os valores abaixo indicam os valores mínimos

($K_{c_{min}}$). O valor médio ($K_{c_{med}}$) representado pela curva do coeficiente de cultura é obtido por meio da média aritmética entre os valores de $K_{c_{max}}$ e $K_{c_{min}}$.

Assumindo duas situações, representadas no gráfico teórico da Figura 6, observa-se que, na situação 1, a ET_m será resultante do produto entre o ET_o e o K_{c1} , logo que nesta situação o K_{c1} refere-se ao valor de $K_{c_{max}}$, uma vez que $K_{c1} > K_{c_{med}}$. Por outro lado, na situação 2, em que o K_{c2} é menor do que o $K_{c_{med}}$, ou seja, $K_{c2} < K_{c_{med}}$, a ET_m é resultado do produto entre a ET_o e $K_{c_{med}}$, pois nesta situação o $K_{c_{max}}$ será igual ao $K_{c_{med}}$.

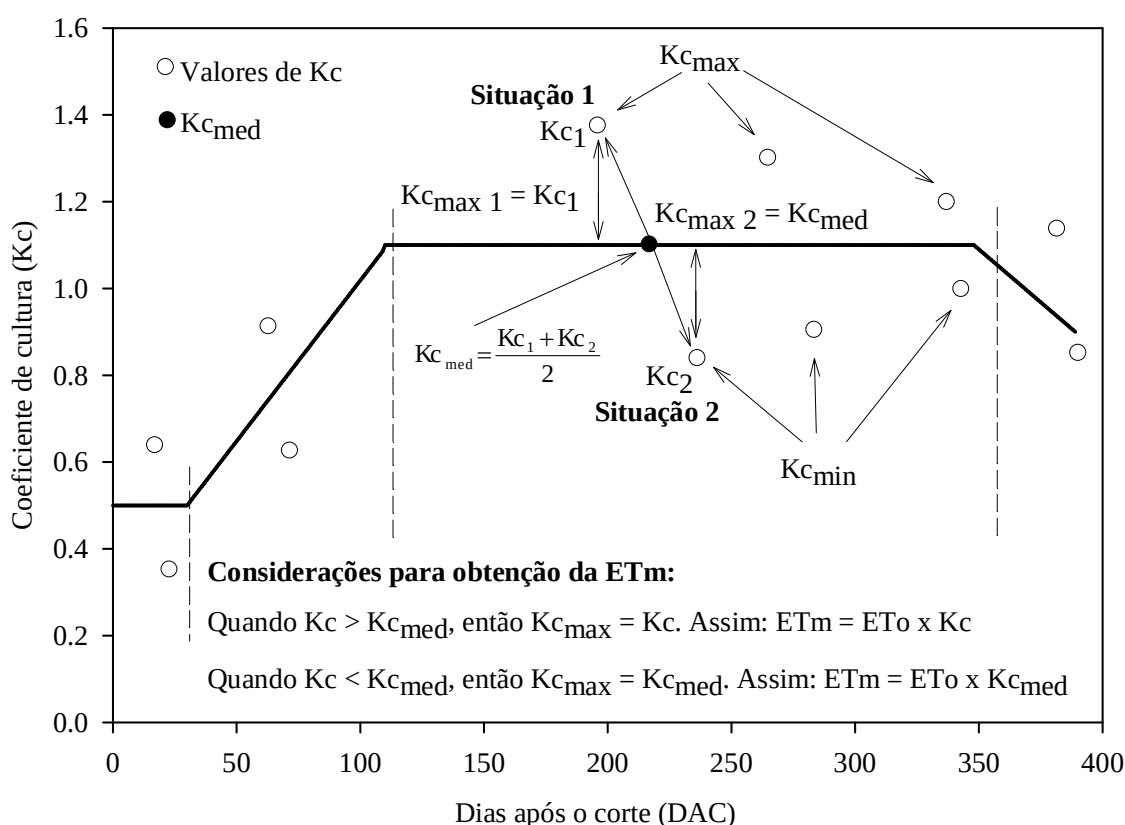


Figura 6. Representação gráfica da teoria de cálculo da evapotranspiração máxima (ET_m) a partir dos valores do coeficiente de cultura (K_c).

4.9.2.2. Evapotranspiração relativa

A evapotranspiração relativa (ER) quantifica a redução da evapotranspiração da cultura, permitindo avaliar o desempenho do fornecimento de água ao longo do tempo e identificar as áreas com limitação hídrica (BANDARA, 2006), calculada pela expressão:

$$ER = \frac{ET_c}{ET_m} \dots\dots\dots(54)$$

em que, ET_c = evapotranspiração da cultura mensal acumulada (mm), obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen.

4.9.2.3. Déficit hídrico da cultura

O déficit hídrico da cultura (DHC, mm) para um determinado período é definido como a diferença entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e máxima (ET_m), indicando quanto à cultura evapotranspirou em relação a sua capacidade máxima (KARATAS et al., 2009):

$$DHC = ET_m - ET_c \dots\dots\dots(55)$$

4.9.2.4. Fração de redução de água

A fração de redução de água (FRA) é um indicador que permite demonstrar as variações no consumo de água pela cultura em relação ao volume de água aplicado ao longo de um mês produtivo. O valor de FRA foi calculado pela expressão:

$$FRA = \frac{ET_c}{(P + I)} \dots\dots\dots(56)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Variáveis meteorológicas, evapotranspiração de referência e irrigação

Os valores médios diários das variáveis meteorológicas (temperatura do ar, T_{ar} ; umidade relativa do ar UR_{ar} ; radiação solar global, R_g ; déficit de pressão de vapor, DPV; e, velocidade do vento, u), evapotranspiração de referência média diária (ETo) e irrigação (I), ao longo do ciclo da cultura, são demonstrados na Figura 7.

Na Fase I do ciclo da cultura (brotação e estabelecimento) (junho/2007, até 30 DAC), os valores médios diários da T_{ar} foram, em torno, de $24,6^{\circ}\text{C}$ (Figura 7A), enquanto a UR_{ar} foi de aproximadamente 61% (Figura 7A). Esses valores resultaram em um baixo DPV, cuja média diária foi de 1,3 kPa (Figura 7C). Neste período, a R_g na região é considerada baixa (em média, $16,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (Figura 7B), coincidindo com a fase em que o índice de área foliar ainda era reduzido. O valor de “ u ” é ascendente, cuja média foi de $1,8 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 7D). A interação entre essas variáveis resultou em uma ETo média diária em torno de $4,5 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 7E).

Na Fase II (estabelecimento e perfilhamento) (julho a setembro/2007, entre 31 a 109 DAC), houve uma pequena redução nos valores da T_{ar} e da UR_{ar} , o que resultou em um DPV médio diário de 1,4 kPa. Por outro lado, a R_g mostrou-se ligeiramente superior ao período anterior, com média diária de $17,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Neste período, os valores médios diários de “ u ” apresentaram-se bem mais elevados ($2,5 \text{ m s}^{-1}$) (Figura 7D), condicionando junto com a R_g a elevação da ETo ($5,0 \text{ mm dia}^{-1}$).

No período subsequente (Fase III, crescimento máximo, outubro/2007 a maio/2008, entre 110 a 348 DAC), com o aumento da temperatura do ar (27°C) e redução da umidade relativa (54%), os valores de DPV foram superiores, com média diária de 1,7 kPa. Porém, observou-se valores médios em torno de 2,11 kPa entre os meses de outubro/2007 e janeiro/2008. A R_g apresentou, em média, $21,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo que, entre os meses de novembro e janeiro, a mesma foi de $23,1 \pm 0,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A “ u ” reduziu de $2,3 \text{ m s}^{-1}$, em outubro/2007, para $0,8 \text{ m s}^{-1}$ em abril/2008, resultando em um valor médio de $1,5 \text{ m s}^{-1}$ para a fase de crescimento.

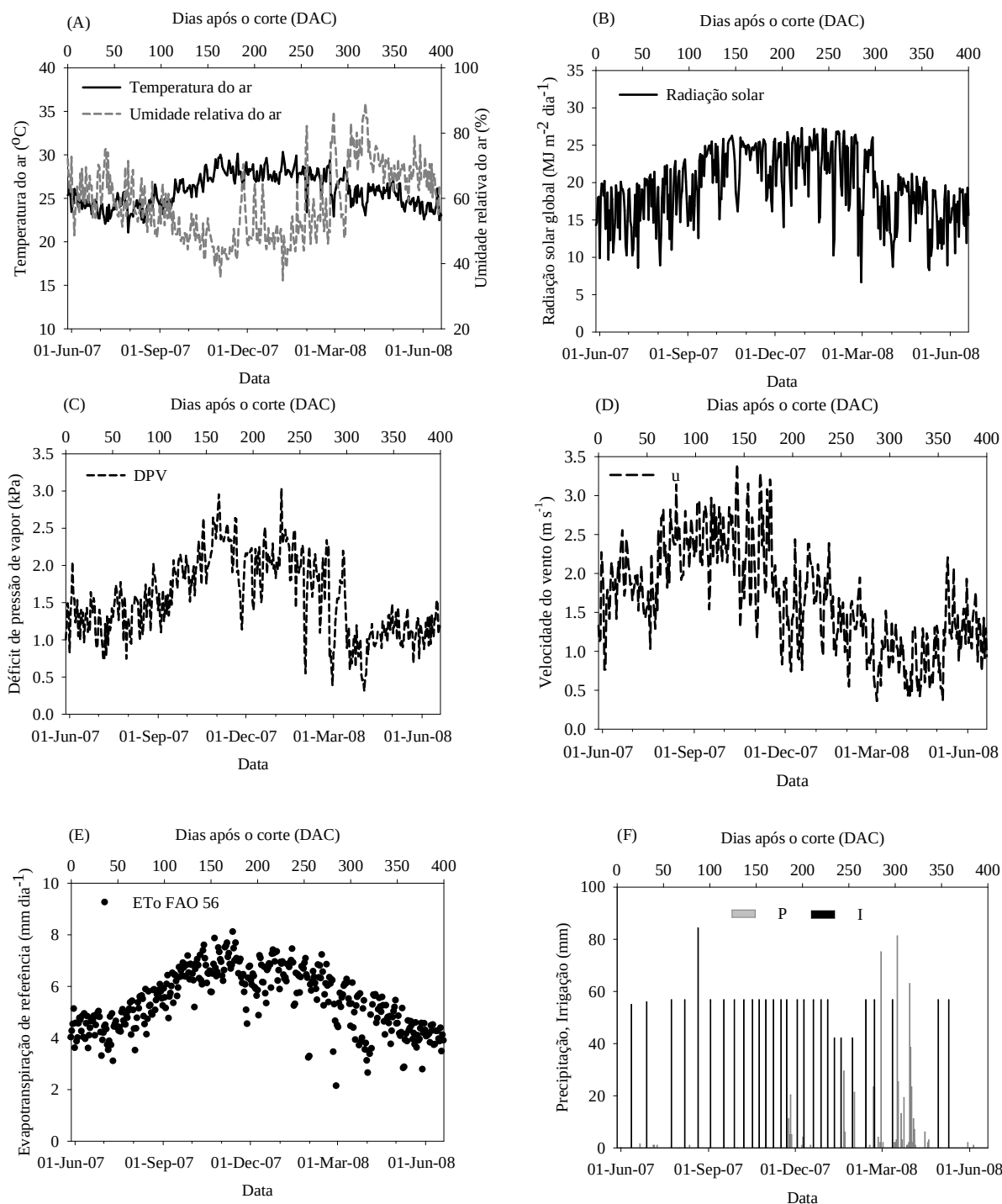


Figura 7. Valores médios diários das variáveis meteorológicas, evapotranspiração e irrigação, ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, sob as condições do Submédio do Vale do São Francisco.

Na Fase III, a ETo atingiu o maior valor médio diário durante o ciclo da cultura ($5,9 \text{ mm dia}^{-1}$), com valores máximos e mínimos de $6,73 \text{ mm dia}^{-1}$ (em novembro) e de $4,67 \text{ mm dia}^{-1}$ (em abril), respectivamente.

No período da Fase IV (maturação, maio a junho/2008, entre 349 a 389 DAC), a Rg oscilou em torno de $15,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e o valor de temperatura do ar, em média, foi igual a $24,1^{\circ}\text{C}$. Em decorrência do aumento da UR_{ar} e da redução dos valores de Rg e velocidade do vento ($1,3 \text{ m s}^{-1}$), os valores de ETo foram menores ($4,1 \text{ mm dia}^{-1}$).

O total de precipitação pluviométrica ocorrida ao longo do ciclo da cultura foi de 523 mm (Figura 7F). Observou-se que no início do ciclo da cana-de-açúcar, em que a demanda de água é reduzida, o intervalo de irrigação foi maior (em média, a cada duas semanas). Um aumento na frequência da irrigação foi evidenciado, a partir de outubro/2007 (Figura 7F), quando os valores de ETo alcançaram valores máximos (Figura 5E). Pode-se constatar que, entre os meses de março e abril/2008, o número de irrigações foi reduzido, devido à ocorrência dos eventos de precipitação pluviométrica, a qual respondeu por 48% do volume total de chuva ao longo do experimento.

A partir do dia 10/05/2008 (DAC 348), os eventos de chuva foram reduzidos e as irrigações foram suspensas para promover a maturação da cultura, bem como para propiciar a colheita mecanizada, por se tratar de um solo da classe dos vertissolos.

5.2. Padrões de crescimento da cana-de-açúcar

5.2.1. Perfilhamento

Nas Figuras 8 e 9 são demonstrados o número de perfilhos industrializáveis (NPI) e a taxa de perfilhamento (TP) da cana-de-açúcar irrigada a partir dos 70 dias após o corte (DAC), quando se iniciou o período de amostragem das variáveis biométricas e de biomassa. Nestas figuras, também, podem ser verificadas as equações do NPI ajustadas em função dos dias após o corte (DAC) e dos graus dias acumulados (GDA).

O máximo de perfilhamento constatado foi de 42,5 perfilhos m^{-2} , próximo aos valores informados por Almeida et al. (2008), para a mesma variedade (RB 92579), cultivada sob irrigação, no ciclo de soca, no Estado de São Paulo. Porém, o autor relatou que um pico de perfilhamento com 40,5 perfilhos m^{-2} ocorreu quando o ciclo da cultura iniciou em março. Por outro lado, esse resultado foi superior ao observado para um cultivo de cana-de-açúcar no ciclo de cana-soca, variedade RB 92579, em sequeiro sob as condições de climáticas de Rio Largo-AL, onde foram encontrados 23,2 perfilhos m^{-2} (COSTA et al., 2008). Para as variedades NCo376 e N17, cultivadas sob as condições climáticas de Mount Edgecombe, África do Sul, com início do ciclo de soca em junho, Singels et al. (2005) obtiveram o número máximo de perfilhos na ordem de 35 e 20 perfilhos m^{-2} , respectivamente.

Para o NPI foi possível observar três períodos distintos, tendo o primeiro sido caracterizado por um aumento do número de perfilhos, ocorrido até o 96 DAC ou 790 °Cdia. Neste caso, a taxa de perfilhamento variou entre 0,250 e 0,147 perfilhos dia^{-1} ou 0,0289 e 0,0185 perfilhos $m^{-2} °Cdia^{-1}$, quando então ocorreu o pico de perfilhamento da cultura. Castro (2001) cita que o perfilhamento da cana-de-açúcar pode ocorrer até o quarto mês do seu ciclo produtivo, contudo pode ser influenciado pela temperatura do ar, umidade do solo, cultivar e ciclo (cana-planta ou cana-soca). Casagrande (1996) informa que a cana-de-açúcar, durante o ciclo de cana-planta, pode atingir o pico de perfilhamento até o quarto mês após o plantio. Silva (2005), trabalhando com as variedades RB855113, RB 72454, RB 83594, RB855536 e SP81-3250, em ciclo de cana-soca, sob irrigação plena, na região de Coruripe-AL, obteve o pico de perfilhamento aos 60 DAC.

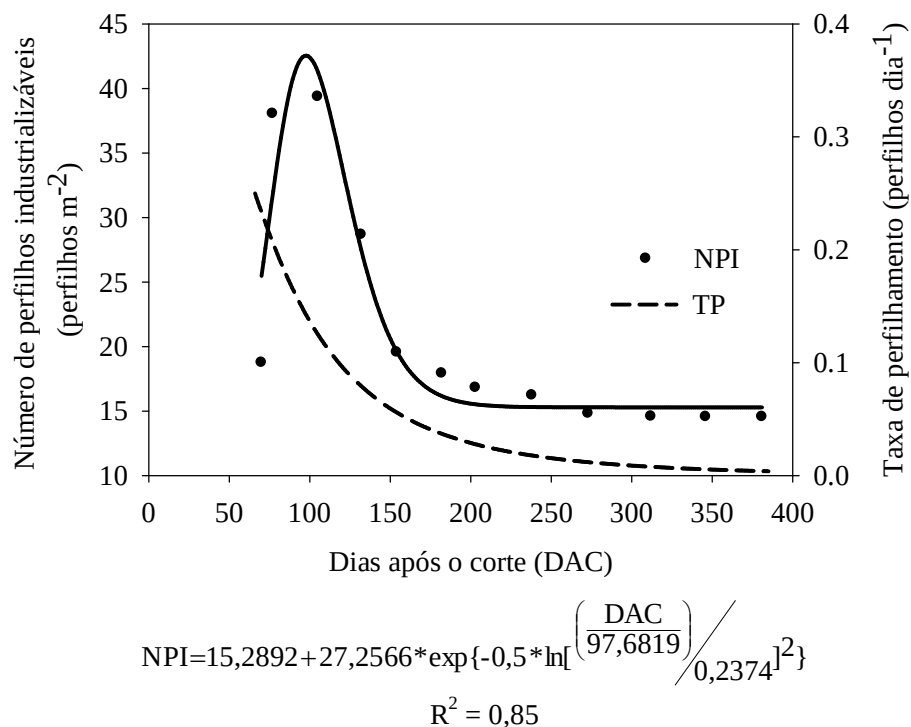


Figura 8. Número de perfilhos industrializáveis (NPI) e taxa de perfilhamento (TP) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Vale do Submédio São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).

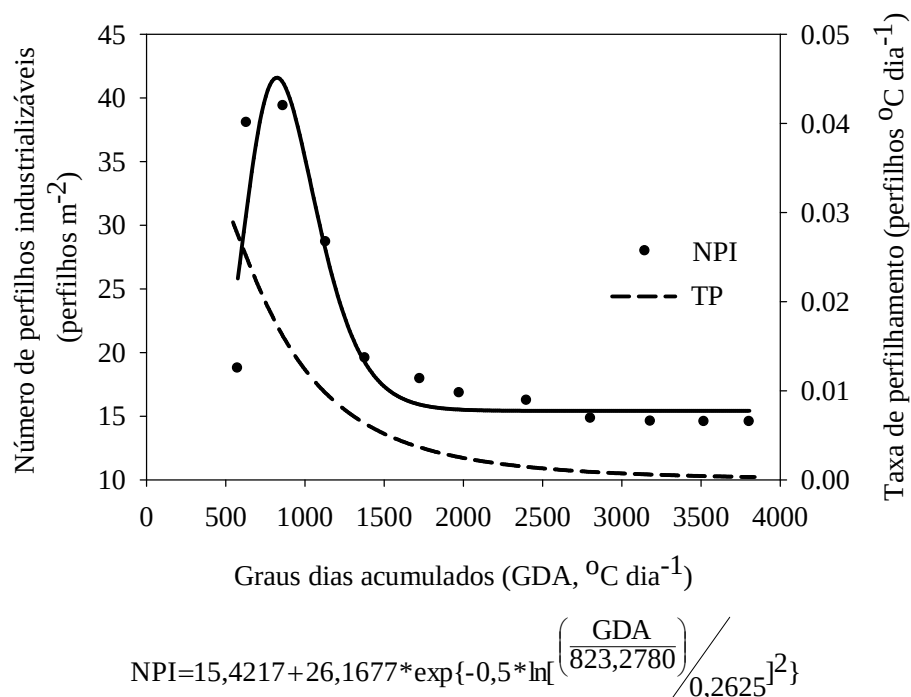


Figura 9. Número de perfilhos industrializáveis (NPI) e taxa de perfilhamento (TP) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Vale do Submédio São Francisco, em função dos graus dias acumulados (GDA), utilizando a temperatura base de 16°C.

Em termos de graus dias acumulados, o período de ocorrência de máximo perfilhamento foi semelhante aos observados por Donald et al. (2003), para a variedade NCo376 no ciclo de cana-soca, variando entre 399 e 873 °Cdia ($t_{base} = 16^{\circ}\text{C}$) e por Singels et al. (2005) para as variedades NCo376 e N17, com valores variando, tanto para o ciclo de cana-planta quanto de cana-soca, entre 600 e 800 °Cdia ($t_{base} = 16^{\circ}\text{C}$); porém, o valor aqui observado foi superior ao informado por Inman-Bamber (1994), que considera para cana-soca valores até 500 °Cdia ($t_{base} = 16^{\circ}\text{C}$).

A taxa de perfilhamento observada por Singels et al. (2005), quando o ciclo teve início no mês de dezembro, foi de 0,0825 e 0,0528 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$, para as variedades NCo376 e N17, respectivamente. Singels & Smit (2002) assumem um valor médio para a taxa de perfilhamento na ordem de 0,1234, 0,0515 e 0,0333 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$, para a cana-planta irrigada sob espaçamento de 0,72, 1,69 e 2,66 m, respectivamente.

O segundo período (96 DAC a 154 DAC) de perfilhamento da cana-de-açúcar, que se refere ao intervalo entre o máximo perfilhamento e a estabilização do número de perfilhos, caracterizou-se por uma fase de rápida senescência. Neste período, constatou-se uma brusca diminuição do número de perfilhos, passando de 42,5 para 19,6 perfilhos m^{-2} , enquanto a taxa de perfilhamento reduziu-se de 0,147 para 0,056 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (0,0185 para 0,0063 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$). A estabilização ocorreu quando o GDA foi de 1380 °Cdia⁻¹. Inman-Bamber (1994) cita valores em torno de 1200 °Cdia⁻¹ ($t_{base} = 16^{\circ}\text{C}$) para a estabilização do número de perfilhos para variedades sul-africanas no ciclo de cana-soca sob condições de sequeiro.

No terceiro período (>154 DAC ou >1380 °Cdia⁻¹), observou-se pequena variação tanto do número (0,056 para 0,003 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) quanto da taxa de perfilhamento (0,0063 para 0,003 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$) da cana-de-açúcar. Ao final do ciclo, foi verificado que o número de perfilhos industrializáveis foi de 15,3 perfilhos m^{-2} . Este valor está acima daqueles citados por Almeida et al. (2008) para a mesma variedade RB 92579, cultivada sob irrigação no estado de São Paulo (12,7 perfilhos m^{-2}), e por Oliveira et al. (2008), cultivada no estado de Pernambuco (14,5 perfilhos m^{-2}).

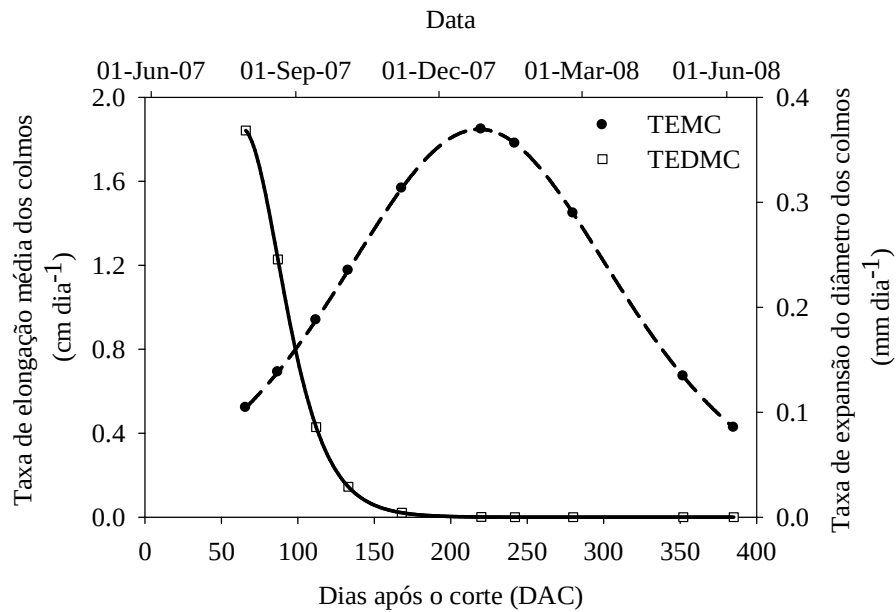
5.2.2. Estatura e diâmetro dos colmos

As taxas de alongação média (TEMC) e de expansão do diâmetro médio (TEDMC) dos colmos da cana-de-açúcar irrigada e suas respectivas equações podem ser observadas na Figura 10, respectivamente. A estatura média (EMC) e o diâmetro médio (DMC) dos colmos desta cultura e suas referentes equações ajustadas, em função dos DAC e dos GDA, podem ser visualizadas nas Figuras 11 e 12.

O conhecimento do comportamento do crescimento dos colmos da cana-de-açúcar é de grande importância, logo que apresenta uma correlação positiva com a produtividade esperada (BARBOSA et al., 2002; MIOCQUE et al., 1999). Evidenciou-se que a cana-de-açúcar apresentou um crescimento acentuado do diâmetro dos colmos, atingindo valor de TEDMC em torno de $0,368 \text{ mm dia}^{-1}$. Por outro lado, o valor médio do DMC foi de 2,67 cm, a partir dos 132 DAC. Neste instante, a estatura da cultura correspondeu a apenas 20% do seu valor final.

Costa et al. (2008), trabalhando com a variedade RB 92579, cultivada sob condições de sequeiro, no município de Rio Largo-AL, verificaram que a estabilização do diâmetro dos colmos ocorreu quando a estatura máxima das plantas, ainda, era de 12% da estatura final. Contudo, o mesmo não foi observado por Silva (2005), para outras variedades (RB 855113, RB 928064, RB 845210, RB 845197 e RB 855536) cultivadas na região Noroeste do estado do Paraná, verificando no momento da estabilização do DMC, que a estatura da cultura correspondia a 50% do seu valor final. Diante disto, a relação entre EMC e DMC, provavelmente, depende da variedade de cana-de-açúcar.

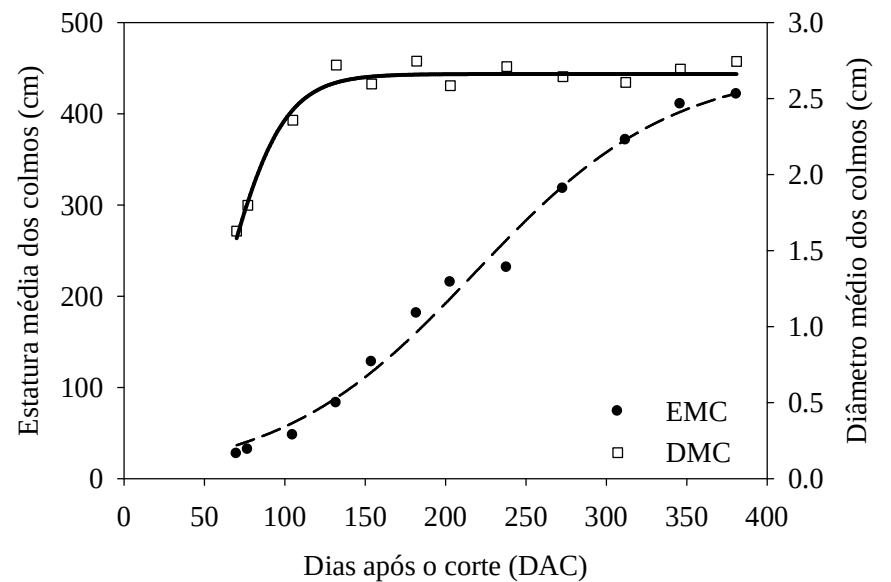
A partir dos 132 DAC, é possível observar que o valor do DMC tornou-se praticamente constante, com a TEDMC tendendo a zero. Por outro lado, a TEMC aumentou expressivamente, atingindo valores médios máximos de $1,837 \text{ cm dia}^{-1}$, durante os meses de janeiro e fevereiro/2008 (Figura 10). Contudo, observou-se que o incremento de estatura dos colmos ocorreu mais efetivamente entre os 238 e 273 DAC (21/01 a 26/02/2008). Neste período, foi verificado incremento em torno de $2,47 \text{ cm dia}^{-1}$ (Figura 13), em decorrência do tombamento da cultura, que promoveu um crescimento acentuado dos colmos. Concomitantemente, verificou-se que o suprimento de radiação solar global (Figura 7B) associada à disponibilidade de água para as plantas (Figura 7F), proporcionou ótimas condições para o crescimento da cana-de-açúcar.



$$TEMC = \frac{451,9413 \exp(-(DAC - 218,3941)/61,1507))}{61,1507 (1 + \exp(-(DAC - 218,3941)/61,1507))}^2$$

$$TEDMC = \frac{2,6612 \exp(-(DAC - 63,1636)/17,9445))}{17,9445 (1 + \exp(-(DAC - 63,1636)/17,9445))}^2$$

Figura 10. Taxas de elongação média (TEMC) e de expansão do diâmetro médio dos colmos (TEDMC) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).



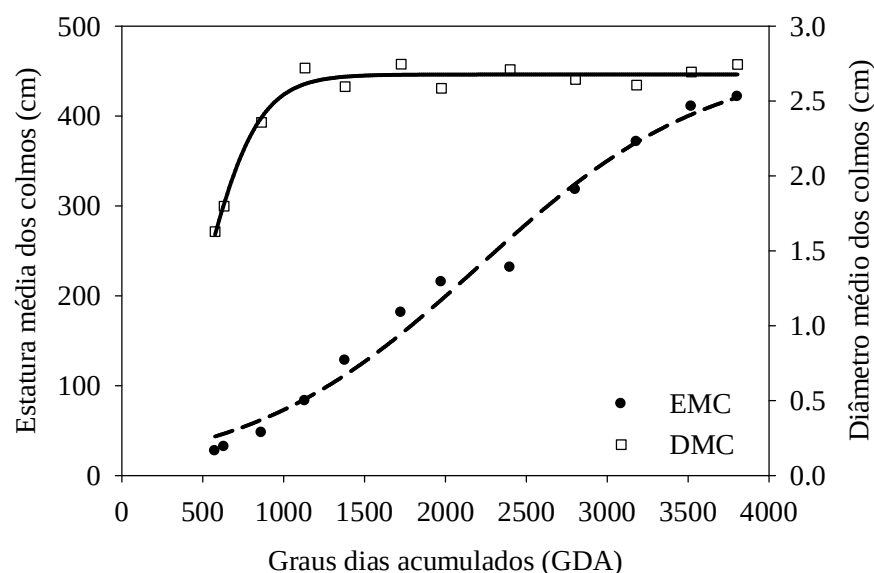
$$EMC = \frac{451,9413}{\{1 + \exp[-\frac{(DAC - 218,3941)}{61,1507}]\}}$$

$$DMC = \frac{2,6612}{\{1 + \exp[-\frac{(DAC - 63,1636)}{17,9445}]\}}$$

$$R^2 = 0,99$$

$$R^2 = 0,98$$

Figura 11. Estatura (EMC) e diâmetro médio dos colmos (DMC) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).



$$EMC = \frac{466,1641}{\{1 + \exp[-\frac{(DAC - 2208,3338)}{717,7254}]\}}$$

$$DMC = \frac{2,6770}{\{1 + \exp[-\frac{(DAC - 507,6702)}{167,7880}]\}}$$

$$R^2 = 0,98$$

$$R^2 = 0,97$$

Figura 12. Estatura (EMC) e diâmetro médio dos colmos (DMC) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos graus dias acumulados (GDA).

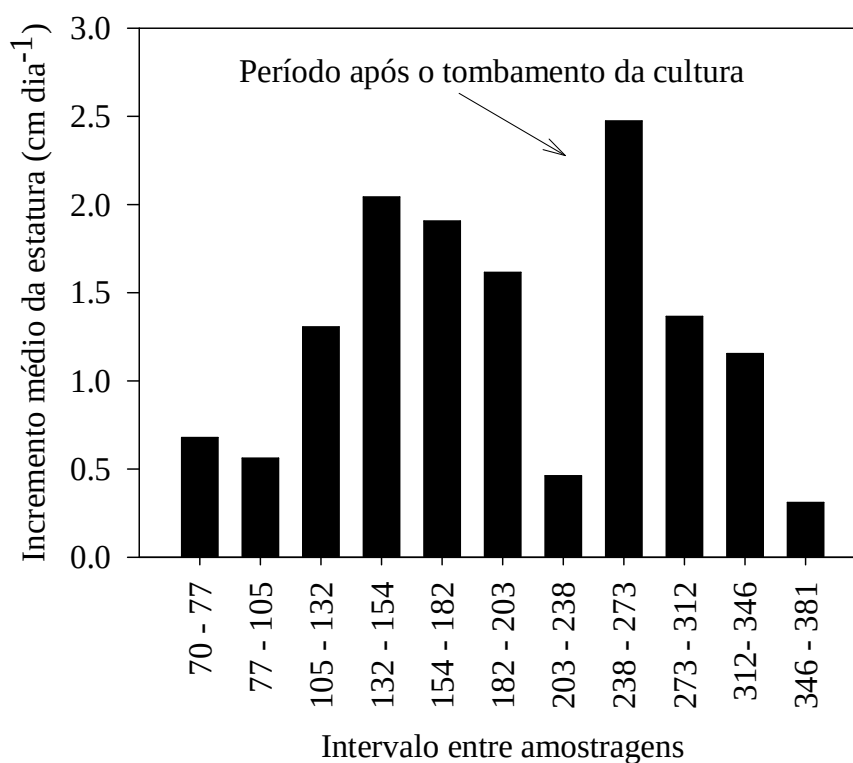


Figura 13. Incremento médio da estatura dos colmos entre os intervalos das amostragens biométricas da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

No período antecedente aos 238 DAC, observou-se que o incremento da estatura dos colmos era pequeno, sendo em torno de $0,46 \text{ cm dia}^{-1}$ (Figura 13) e houve uma ligeira redução do IAF da cultura (Figuras 25 e 26), como será discutido posteriormente. Ao final do ciclo, quando também foi observado o tombamento da cultura, não foram evidenciados incrementos expressivos na estatura dos colmos. Contudo, verificou-se influências nos valores do IAF (Figuras 25 e 26).

No período subsequente aos 238 e 273 DAC, verificou-se uma redução do valor de TEMC até o final do ciclo, em que a cultura atingiu valores máximos de EMC na ordem de 421 cm. Este valor foi superior aos encontrados por outros autores como, Costa et al. (2008) que, trabalhando com a variedade RB 92579 irrigada, no ciclo de cana-soca, encontraram valores de EMC em torno de 275 cm, enquanto Almeida et al. (2008) verificaram valores próximos a 350 cm. O valor superior da EMC observado no presente trabalho pode estar associado ao tombamento da cultura, constatado mais efetivamente após os 200 DAC, que promoveu um novo crescimento da parte apical da cultura. Este comportamento pode promover incrementos expressivos na produtividade da cana-de-açúcar (CARLIN et al., 2008), ou seja, no valor de TCH (toneladas de colmos por hectare). Entretanto, uma relação linear com a EMC pode não ser evidenciada, logo que, parte do incremento da EMC, resultante do tombamento, promove o acúmulo de biomassa para os pseudocolmos, que, neste caso não é considerada nos valores de TCH. Para a cana-soca irrigada em Rio Largo-AL, variedade RB 92579, Oliveira et al. (2008) encontraram valores de EMC próximos a 300 cm, ao passo que a TCH foi de $136,22 \text{ t ha}^{-1}$.

Como demonstrado na Figura 14, o aumento do DMC apresentou importância para a biomassa seca dos colmos (BSC), apenas até o momento em que o valor de BSC foi inferior a 50 g. A partir daí, o seu valor médio final oscilou em torno de 600 g colmo^{-1} de biomassa seca, resultante, principalmente, devido ao incremento da EMC ao longo do ciclo. Assumindo que as medidas de comprimento (CI) e de largura (LI) dos internódios (Figura 15) correspondiam aos valores de altura e do diâmetro de cada internódio e que os mesmos assemelham-se a um cilindro, observou-se, pelos cálculos dos volumes dos internódios (VI) (Figura 16), que a importância EMC nos valores de BSC ocorreu especialmente entre os internódios 2 e 17, respondendo por 57% do volume total do colmo ($435,6 \text{ cm}^3$). Estes internódios foram os que apresentaram os maiores valores de CI e LI e, conseqüentemente, os maiores volumes dentre os 32 existentes no final do ciclo.

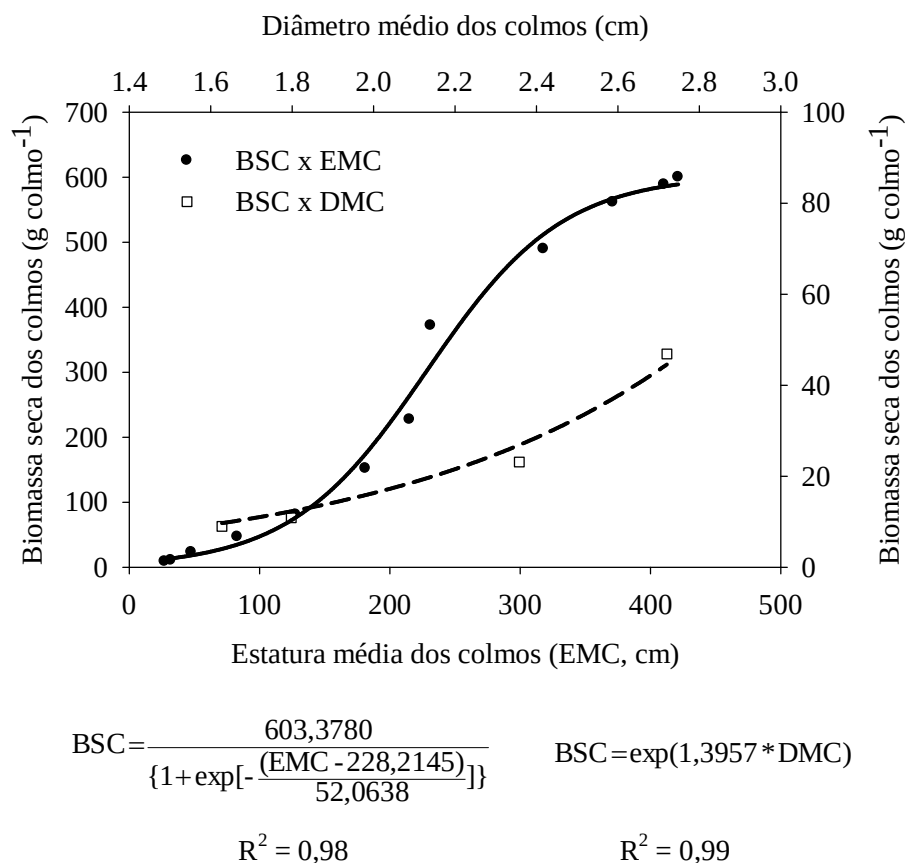


Figura 14. Relação da estatura (EMC) e do diâmetro (DMC) com a biomassa seca dos colmos (BSC) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

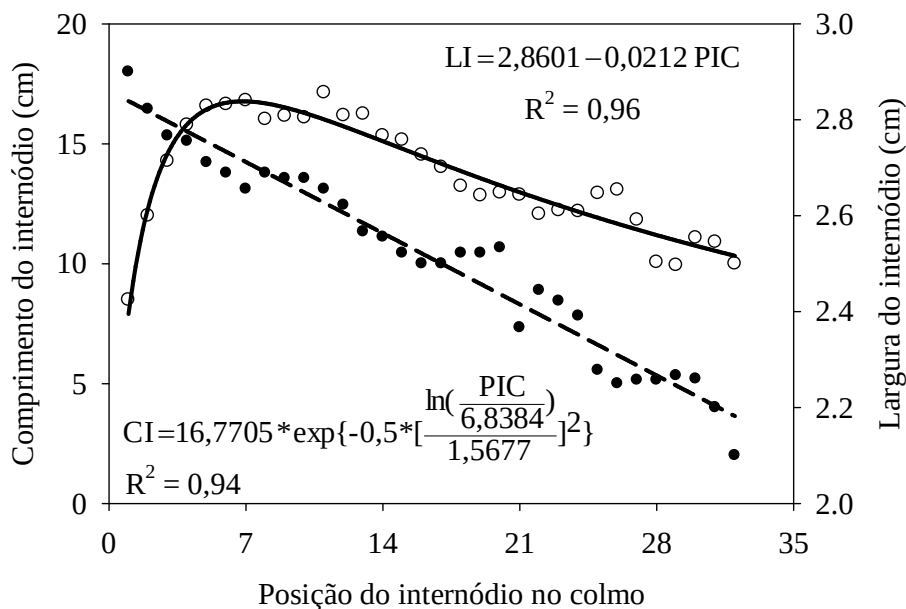


Figura 15. Comprimento (CI) e largura (LI) dos internódios da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função de suas posições no colmo (PIC).

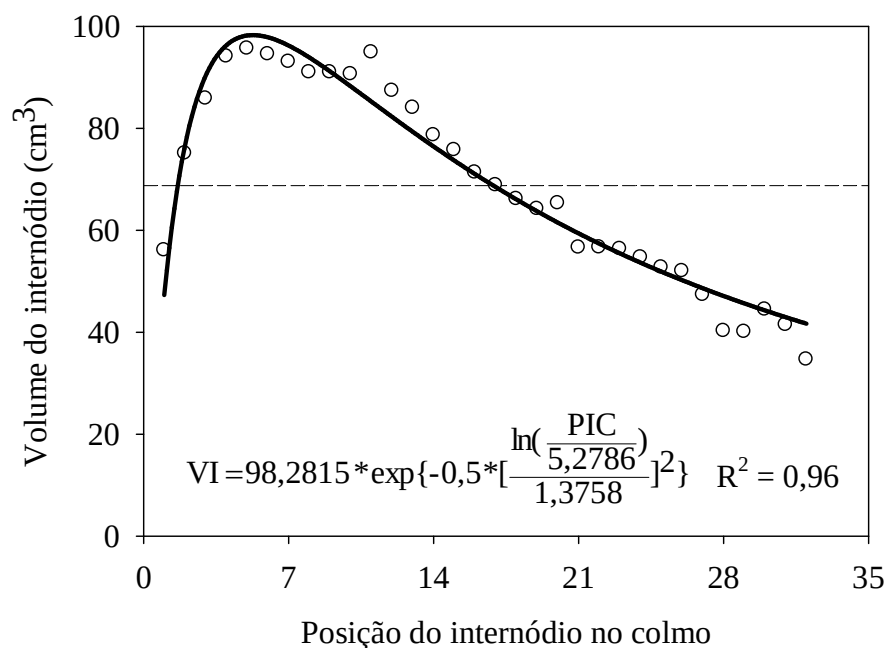


Figura 16. Volume dos internódios (VI) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função de suas posições no colmo (PIC).

Os valores de CI e LI variaram entre 8,5 e 17,1 cm (média de 13,6±2,4 cm) e 2,1 e 2,9 cm (média de 2,5±0,2 cm) (Figura 15), respectivamente. Em contraste, os de VI variaram de 34,6 e 95,6 cm³, com média em torno de 68,8±19,5 cm³ (Figura 16).

O volume máximo (95,6 cm³) ocorreu no internódio número 5, devido à alta taxa de expansão do diâmetro médio dos colmos observada no início do ciclo, em conjunto com o subsequente aumento da taxa de elongação (Figura 10). Sinclair et al. (2005) constataram, para as variedades CP80-1743, CP89-2143, CP88-1762 e CP72-2086, que o volume máximo ocorreu nos internódios 14, 15, 16 e 16, respectivamente, com um número total de internódio variando entre 30 e 35. Por outro lado, verificou-se uma correlação dos valores do VI com a posição dos internódios nos colmos (Figura 16). Relacionando-se o volume total do colmo (VTC), considerando os volumes de cada um dos internódios, verificou-se, também, uma ótima relação entre o VTC e os dados de biomassa fresca dos colmos (BFC), como pode ser verificada na Figura 17.

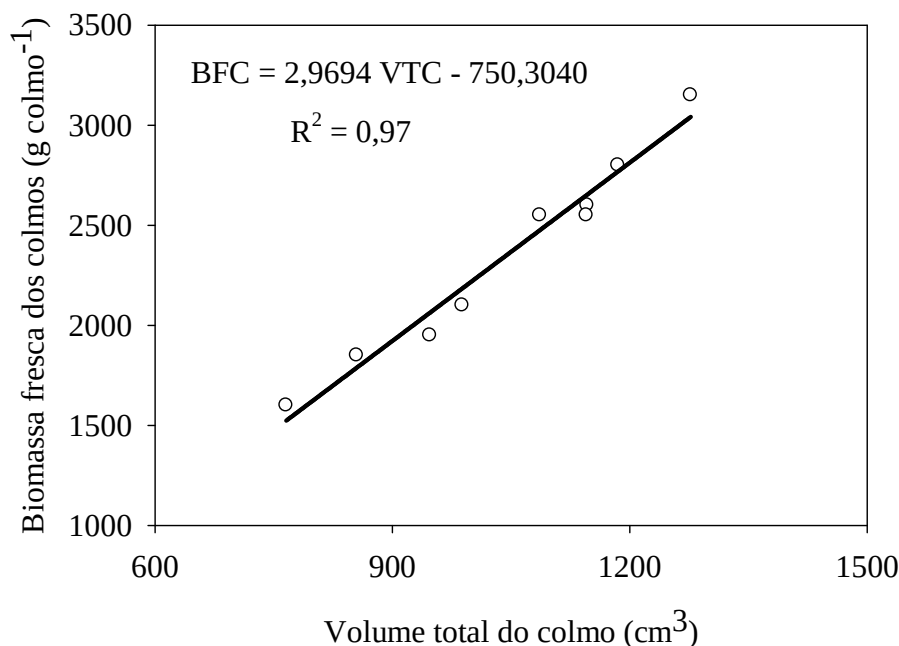


Figura 17. Biomassa fresca dos colmos da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função do volume total dos colmos (VTC).

5.2.3. Número de folhas, área foliar e índice de área foliar

O número de folhas verdes abertas por colmo (NFVA) pode ser visualizado na Figura 18. É possível observar que o NFVA variou entre 6 e 8 folhas por colmo, apresentando redução ao final do ciclo, em decorrência da diminuição da emissão pelas plantas e do aumento da taxa de mortalidade. O maior valor de NFVA (8 folhas colmo⁻¹) foi verificado entre 200 e 250 DAC, quando a emissão era máxima, em termos de número de folhas emergentes (NFE) (Figura 19).

Nota-se que o NFE variou ao longo do ciclo da cultura em função da dinâmica foliar (Figura 19), contrariando os valores de NFE adotados em modelos de estimativa do IAF da cana-de-açúcar, que assumem valores iguais a 2, como utilizados por vários autores (HERMANN & CÂMARA, 1999; OLIVEIRA et al., 2007; SILVA et al., 2005).

A cultura da cana-de-açúcar irrigada teve um número de folhas verdes abertas acumuladas (NFVA_{AC}) em torno de 24, ao longo do seu ciclo, tendo-se observado dois intervalos distintos, caracterizados por taxas diferentes de aparecimento foliar (Figura 20). No primeiro intervalo, pode-se constatar uma taxa de aparecimento foliar mais pronunciada, por ser um período em que a cultura amplia sua área foliar, visando aumentar a quantidade de radiação interceptada e, conseqüentemente, a fotossíntese

(TEJERA et al., 2007). Por outro lado, o segundo intervalo caracterizou-se por uma taxa de aparecimento foliar reduzida, resultando em um pequeno incremento do IAF (SINCLAIR et al., 2005). O ponto de transição entre esse dois intervalos é representado por uma quebra no gráfico de regressão entre NFVA_{AC} e GDA (Figura 20). Este ponto ocorreu em torno da folha 17. Inman-Bamber (1994) constatou para as variedades NCo376 e N12, cultivadas sem irrigação, que o ponto de quebra ocorreu na folha 14, enquanto Bonnett (1998), analisando 9 variedades de cana-de-açúcar, observou o ponto de quebra na folha 10.

A partir da relação entre os dados de NFVA_{AC} e GDA, foi encontrada uma taxa de aparecimento foliar de 0,0079 folhas °Cdia⁻¹, que equivale a um filocrono de 127 °Cdia⁻¹ folha⁻¹. Sinclair et al. (2005) encontraram valores de filocrono variando entre 136 a 151 °Cdia⁻¹ folha⁻¹ para as variedades NCo376 e CP66/1043, respectivamente. Inman-Bamber (1994) constatou, para a variedade NCo376 não irrigada, valores variando de 69 a 170 °Cdia⁻¹ folha⁻¹. A variação do número de folhas mortas acumuladas (NFM_{AC}) foi semelhante ao observado para o NFVA_{AC} (Figura 21).

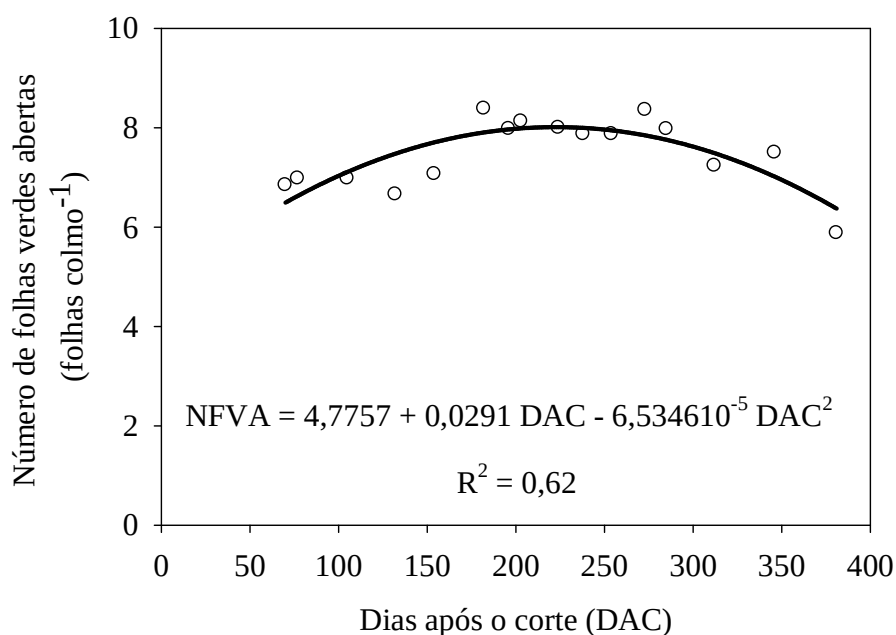


Figura 18. Número de folhas verdes abertas por colmo (NFVA) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).

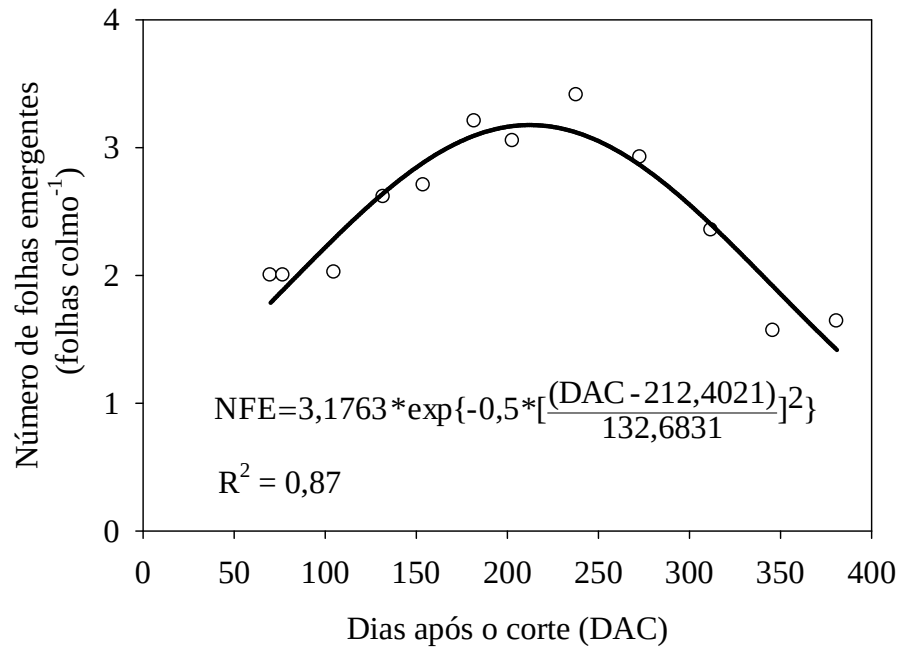


Figura 19. Número de folhas emergentes por colmo (NFE) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).

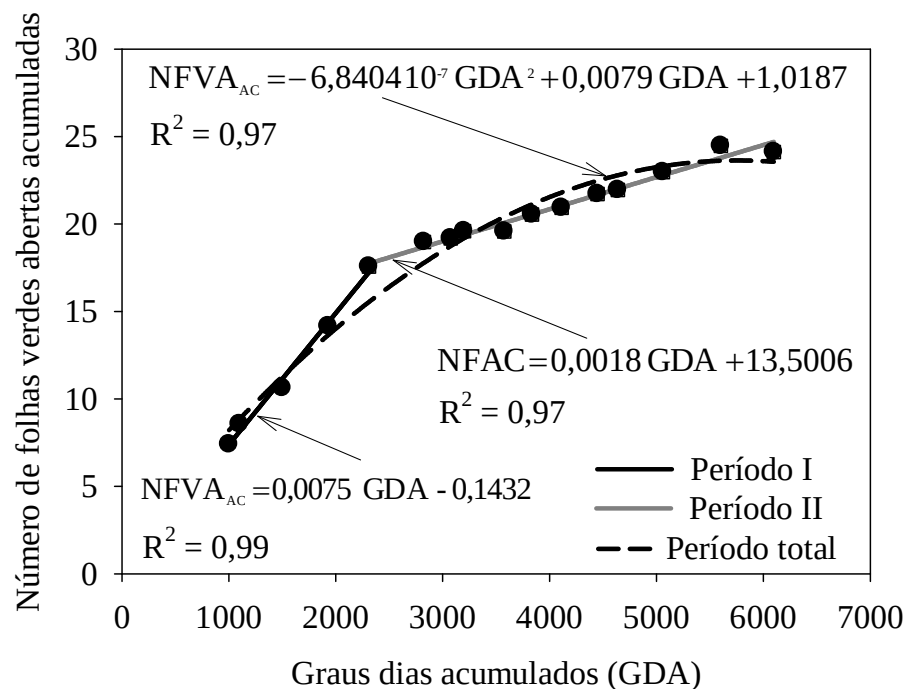


Figura 20. Número de folhas verdes acumuladas ($NFVA_{AC}$) ao longo do ciclo para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos graus dias acumulados (GDA).

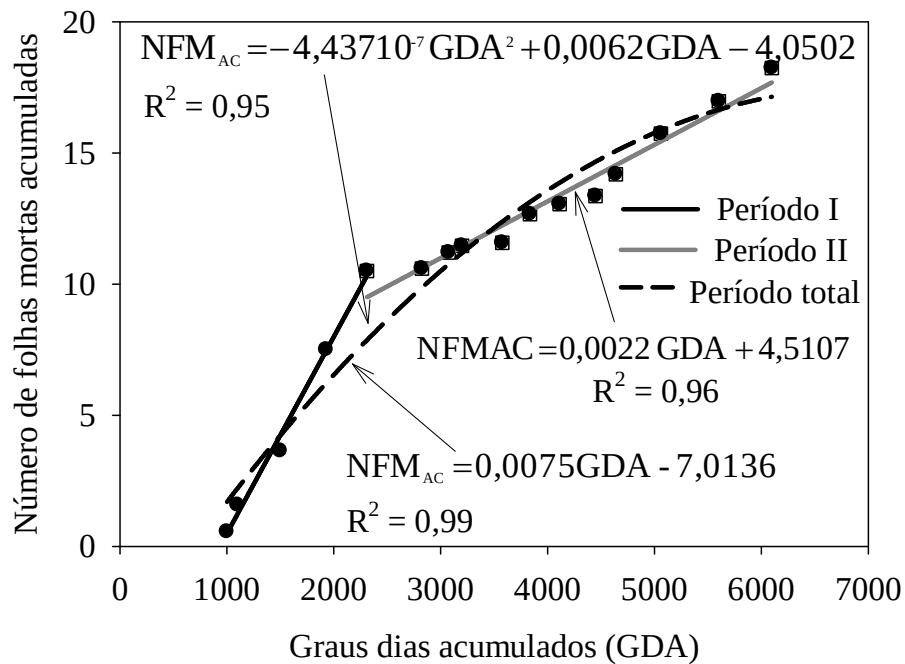


Figura 21. Número de folhas mortas acumuladas (NFM_{AC}) ao longo do ciclo para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos graus dias acumulados (GDA).

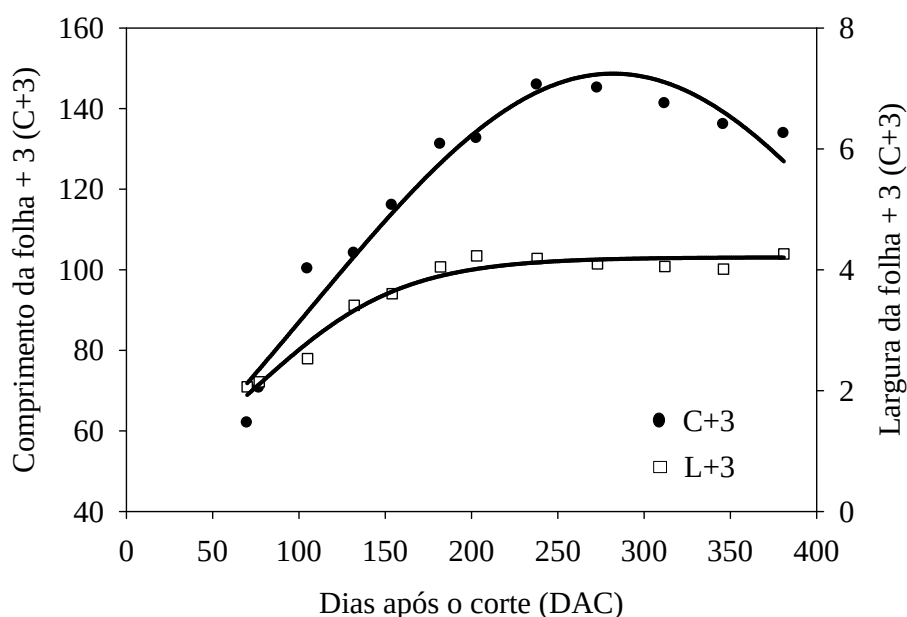
A área individual da folha +3 da cana-de-açúcar foi obtida ao longo do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, utilizando o comprimento (C+3) e a largura (L+3) da folha +3 (AFo+3) e um fator de forma. A análise da folha +3, juntamente com o NFVA, permite entender melhor o desenvolvimento temporal e espacial da superfície foliar desta cultura ao longo do ciclo, logo que uma folha que passa de emergente para uma completamente expandida, não crescerá mais, e sua posição no colmo será modificada com o surgimento de novas folhas, até o momento em que ocorra a sua senescência.

Assumindo os valores de L+3 e C+3, observa-se que o L+3 tendeu a se estabilizar a partir dos 180 DAC, com valores em torno de 4 cm, enquanto o C+3 alcançou valor máximo, em torno dos 146 cm, aos 238 DAC (Figura 22).

Para o cálculo da AFo+3 estimou-se primeiramente o fator de forma específico para a variedade RB 92579. Este fator representa a área da folha, logo que a mesma não é retangular, tendo sido obtido por meio das amostragens de plantas e análises em laboratório. Nestas análises, foram medidos os comprimentos e as larguras das folhas +3 de cada planta, utilizando uma trena, e as suas respectivas áreas foliares, por meio de integrador de área foliar LAI 3000. Com base no coeficiente angular da regressão obtido entre o produto de C+3 e L+3 e a área foliar da folha +3, determinou-se o valor do fator de forma, que foi igual a 0,69 (Figura 23). Robertson et al. (1998) obtiveram valores do

fator de forma para a variedade Q117 igual a 0,62, enquanto Sinclair et al. (2005) constatarem valores iguais a 0,71, 0,72, 0,71 e 0,73, correspondentes às variedades CP80-1743, CP89-2143, CP88-1762 e CP72-2086, respectivamente.

Na Figura 24, está apresentada a área foliar (AFo) da cana-de-açúcar ao longo do seu ciclo, onde é possível evidenciar um incremento da AFo com o decorrer do tempo, principalmente até 250 DAC (02/02/2008), resultando em valores máximos entre 250 e 300 DAC. De acordo com Smit & Singels (2006), a área máxima de uma folha individual depende da disponibilidade de radiação, temperatura, água e nutrientes. Contudo, também é função da sua posição na planta. Pode-se observar que a folha com maior área foi a número 15, cujo valor de AFo foi de 410 cm². Este resultado é devido ao aumento do C+3, logo que em termos de L+3, as mesmas apresentaram uma tendência de estabilização (Figura 24). A partir da folha número 15, verificou-se uma pequena redução da área foliar, decorrente da diminuição dos valores C+3 até o final do ciclo da cana-de-açúcar.



$$L(+3) = \frac{4,2058}{\{1 + \exp[-\frac{(DAC - 76,8827)}{41,5043}]\}} \quad R^2 = 0,96$$

$$C(+3) = 148,6690 * \exp\{-0,5 * [\frac{(DAC - 282,0409)}{175,7991}]^2\} \quad R^2 = 0,95$$

Figura 22. Comprimento (C+3) e largura (L+3) das folhas +3 para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).

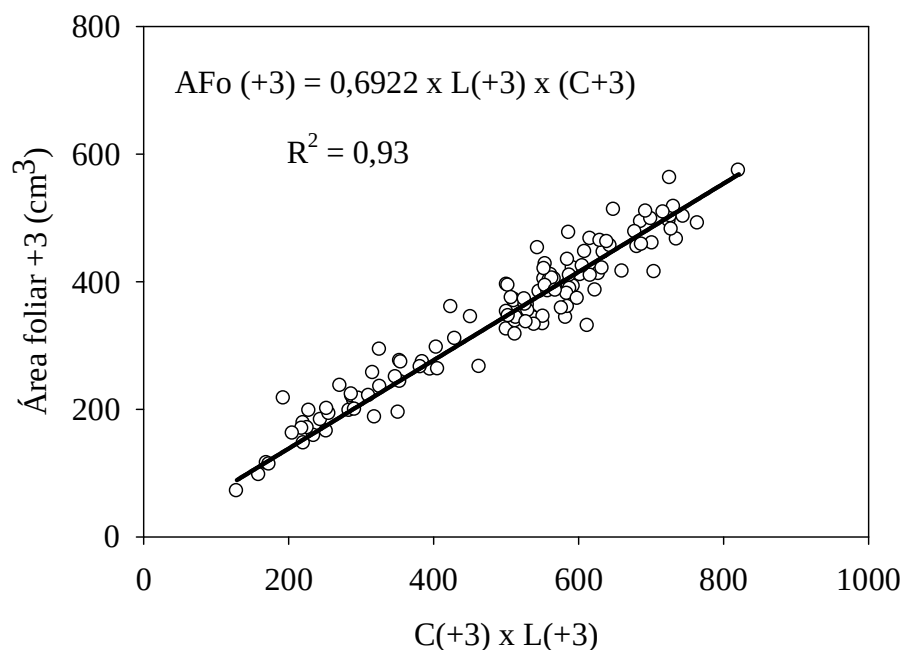


Figura 23. Fator de forma da folha (coeficiente angular da equação de regressão), obtido para estimativa da área média de uma folha individual para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

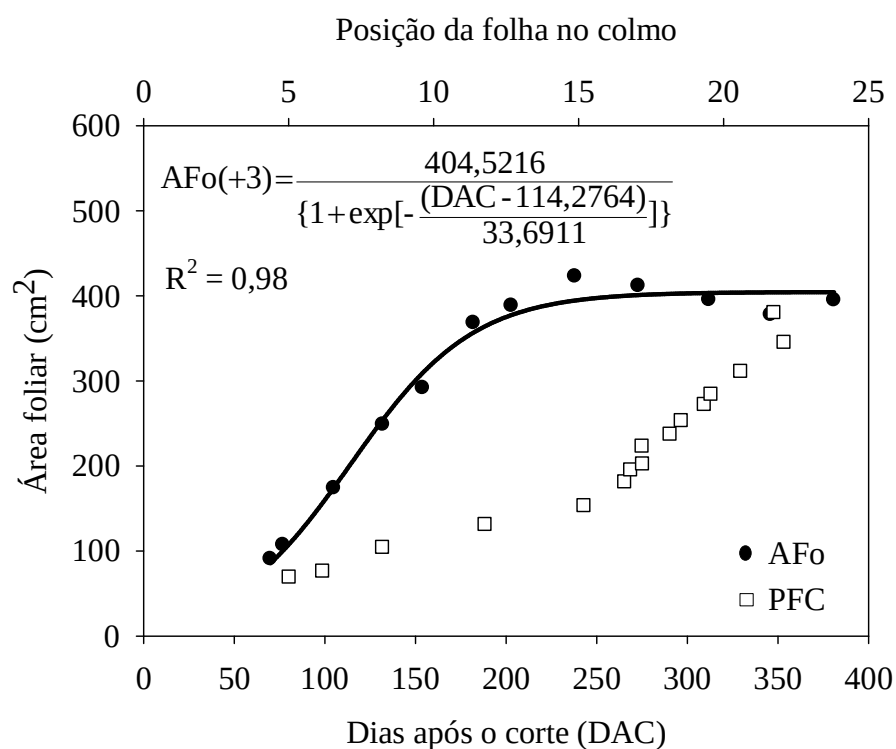


Figura 24. Área foliar (A_Fo) de uma folha individual para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função da posição da folha no colmo (PFC) e dos dias após o corte (DAC).

Singels et al. (2005) constataram que a área foliar máxima da cana-de-açúcar variou com a variedade e com a época de início do ciclo. Para as variedades NCo376 e a CP66/1043 cultivadas nas condições climáticas de Mount Edgecombe, África do Sul, estes autores verificaram que os valores de área foliar foram menores para os ciclos de cultivo iniciados no mês de junho (menor radiação solar global e temperatura do ar), quando comparados àqueles iniciados em dezembro (340 cm² para a NCo376 e 500 cm² para a CP66/1043).

Nas Figuras 25 e 26, são mostrados os valores do índice de área foliar (IAF) em função dos dias após o corte (DAC) e graus dias acumulados (GDA), respectivamente. Concomitantemente, na Figura 27, são demonstradas as relações do IAF com os valores de NFVA, AFo e NPI.

O IAF da cana-de-açúcar irrigada variou de 1,07 m² m⁻², aos 108 DAC, até o máximo de 5,55 m² m⁻² aos 332 DAC. A partir daí, verificou-se uma redução dos seus valores atingindo 4,33 m² m⁻² (Figuras 25 e 26). Almeida et al.(2008) obtiveram valores máximos de IAF de 4,50 m² m⁻² para a variedade 92-579 irrigada. Para esta mesma variedade, sob condições irrigadas, Ferreira et al. (2008) encontraram valores máximos em torno de 4,56 m² m⁻². Observa-se pelas Figuras 25 e 26 que, na amostragem aos 234 DAC, o IAF apresentou um aumento menos acentuado no seu valor, o que esteve associado ao tombamento da cana-de-açúcar, evidenciado em período antecedente aos 238 DAC.

A variação do IAF mostrou uma correção positiva com o número de folhas verdes abertas (NFVA) e com a área individual das folhas. Pode-se observar pela Figura 27, que, quando o valor do IAF foi próximo de 1 m² m⁻², o do NFVA foi de 7,2, e quando o IAF foi próximo de 4 m² m⁻², o NFVA tornou-se igual 8,0. Estes resultados demonstram, para esse intervalo, que o incremento do IAF estava associado ao aumento do NFVA. Concomitantemente, constata-se que o incremento do IAF, deve-se também ao aumento da AFo, ou seja, da expansão da área individual das folhas. Esta passou de 200 cm², quando o IAF situava-se em torno de 1,0 m² m⁻², para 400 cm², quando o valor do IAF aumentou para 4,0 m² m⁻². Em relação ao NPI, observou-se uma correlação negativa com o número de perfilhos m⁻², de modo que não influenciou diretamente nos valores de IAF. Pode-se observar na Figura 27 que, quando o IAF aumentou, o NPI diminuiu em decorrência da intensa mortalidade de perfilhos, a partir dos 96 DAC (Figura 9). Na Figura 27, verificou-se que essa redução ocorreu, especialmente, devido à redução do NFVA, logo que quando o IAF era de 5,33 m² m⁻², o valor do NFVA era de 7,7. Por outro lado, quando o NFVA reduziu-se para 6,2, o valor de IAF diminuiu para

4,33 m² m⁻². Como citado anteriormente, esse menor NFVA é decorrente de uma menor emissão de folhas pela planta (NFE baixo) (Figura 19) e do aumento do NFM (Figura 21). Ao final do ciclo, a redução dos valores de IAF, foi decorrente também do tombamento da cultura.

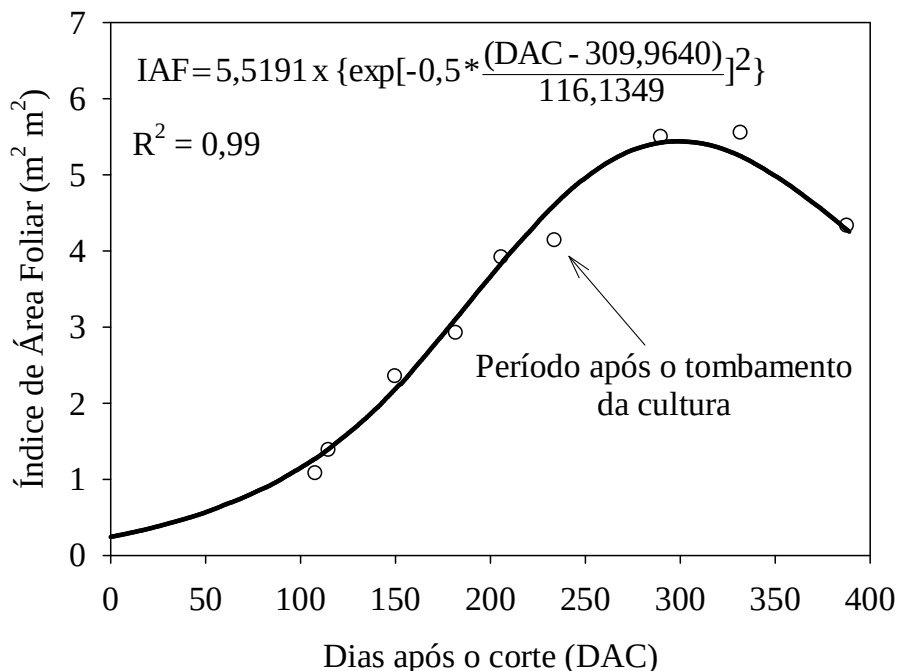


Figura 25. Índice de área foliar (IAF) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).

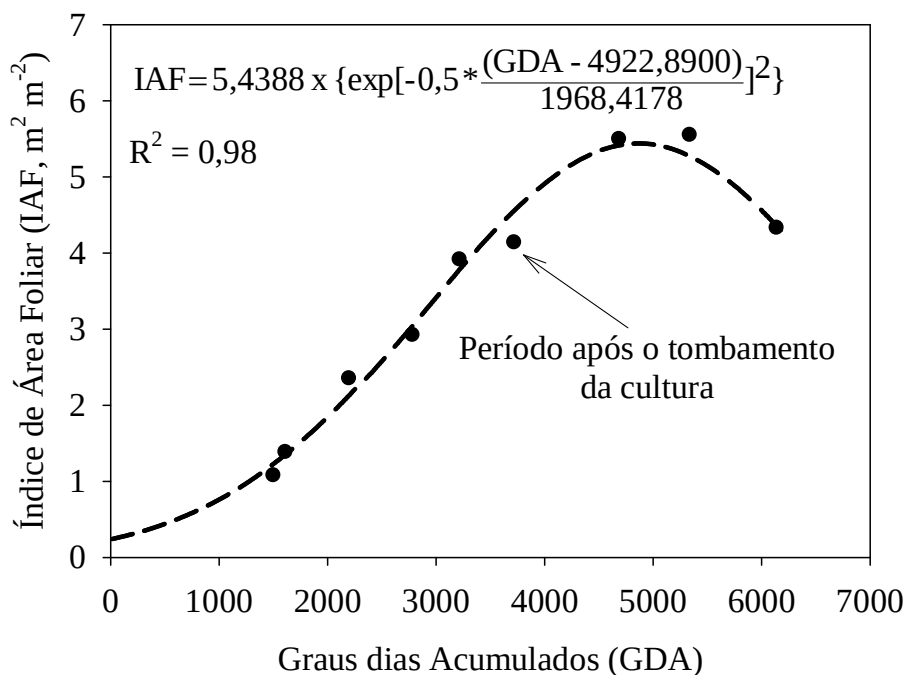


Figura 26. Índice de área foliar (IAF) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos graus dias acumulados (GDA).

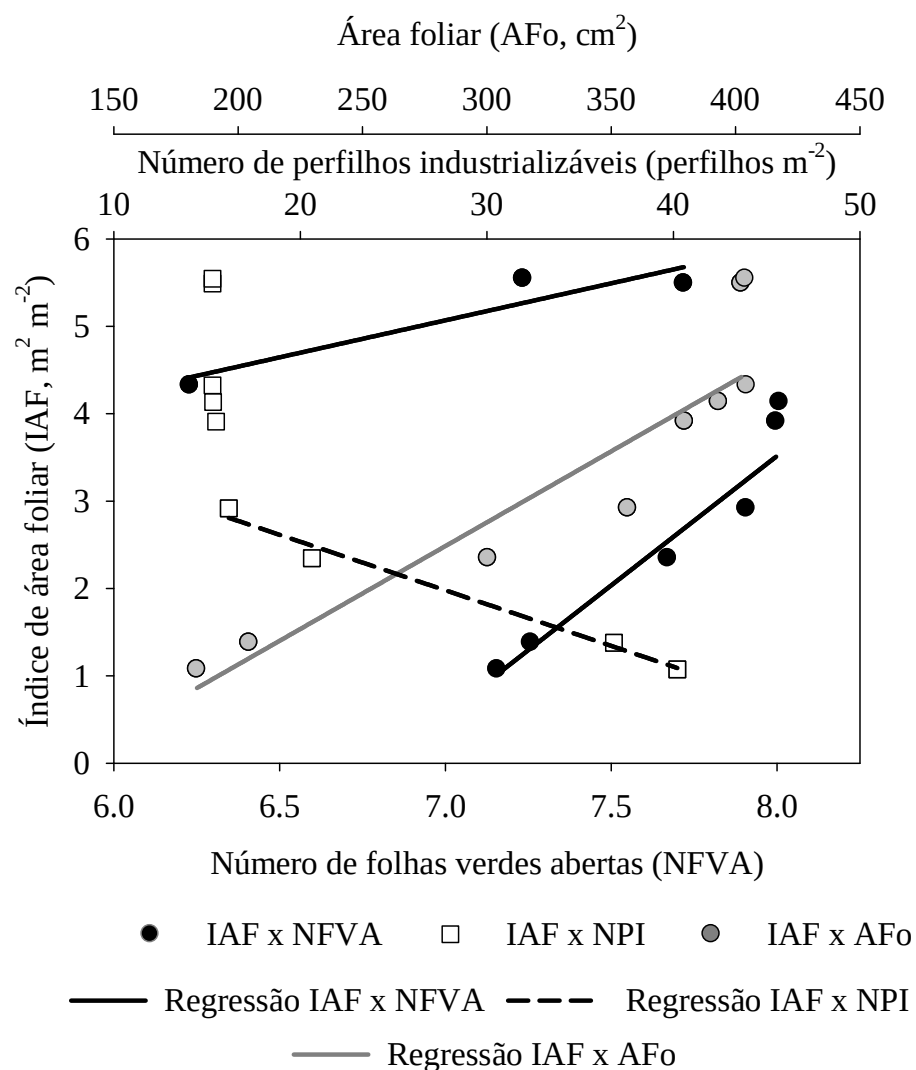


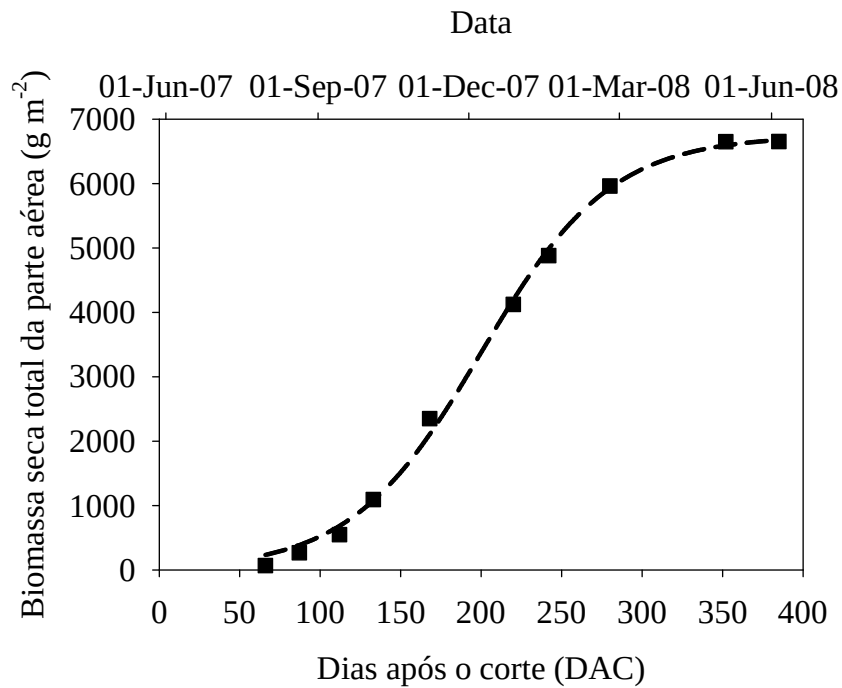
Figura 27. Interação entre o índice de área foliar (IAF) e o número de folhas verdes abertas (NFVA), número de perfilhos industrializáveis (NPI) e área foliar (AFo) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

5.2.4. Biomassa seca da cana-de-açúcar e suas partições

A biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) para a cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, foi de 6653 g m^{-2} (Figura 28). Este resultado é semelhante ao observado por Inman-Bamber et al. (2002), para as variedades Q96 e Q117 cultivadas sob diferentes épocas, num ciclo de cana-soca irrigado, com duração de 12 meses, cujos valores variaram de 5000 a 6800 g m^{-2} . Ferreira Júnior et al. (2008), para as condições irrigadas do município de Rio Largo-AL, em ciclo de cana-soca de 13 meses, obtiveram uma biomassa seca acumulada de 6600 g m^{-2} . Contudo, nas condições de sequeiro no Estado de São Paulo, Almeida et al. (2008) verificaram valores de 3500 g m^{-2} para a variedade RB 92579. Estes resultados mostram que a maior eficiência produtiva da cana-de-açúcar, nas condições do Submédio São do Vale do São Francisco, provavelmente esteve associada aos aspectos varietal e ao sistema de produção irrigado.

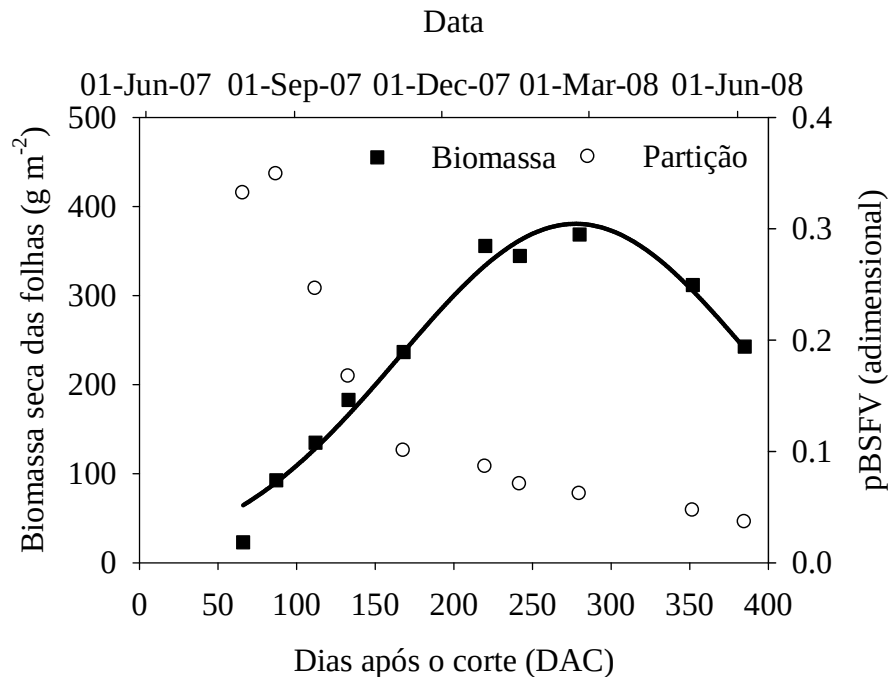
Na Figura 29 é demonstrada a biomassa seca acumulada das folhas verdes (BSFV) e sua partição (pBSFV) em relação à biomassa total da parte aérea (BSTPA). Verificou-se que, entre os 66 e 87 DAC, a BSFV variou de 23 a 93 g m^{-2} , correspondendo a uma fração média $0,34 \pm 0,01$ da BSTPA (em torno de 69 g m^{-2}). Estes valores foram inferiores aos observados por Robertson et al. (1996a), que constatarem valores de até 0,62 para a pBSFV.

A partir dos 87 DAC, observou-se um crescimento acentuado da BSFV, alcançando valores médios de 369 g m^{-2} , de 250 a 300 DAC. Este período foi caracterizado por elevados valores de temperatura do ar e de radiação solar global (Figura 7A e 7B). Contudo, nota-se que a fração destinada a BSFV (pBSFV) reduziu-se para 0,06 em relação à BSTPA. No período subsequente, constatou-se uma diminuição da BSFV, em conformidade com a redução do IAF (Figuras 25 e 26), resultando, ao final do ciclo, valores de BSFV e de pBSFV iguais a 243 g m^{-2} e a 0,04, respectivamente. Inman-Bamber et al. (2002) verificaram, para as variedades Q36 e Q117, que a pBSFV esteve em torno de 0,1, quando a BSTPA foi superior a 4000 g m^{-2} , e 0,40 quando a BSTPA foi inferior a 4000 g m^{-2} .



$$BSTPA = \frac{6743,9809}{\{1 + \exp[-\frac{(DAC - 199,9846)}{40,3378}]\}} \quad R^2 = 0,99$$

Figura 28. Biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.



$$BSFV = 380,5704 * \exp\{-0,5 * [\frac{(DAC - 277,4524)}{112,2953}]^2\} \quad R^2 = 0,97$$

Figura 29. Biomassa seca acumulada das folhas verdes (BSFV) e sua partição (pBSFV) em relação à biomassa total da parte aérea, para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

No que se concerne à biomassa seca das folhas e das bainhas mortas (BSFBM), verificou-se que a mesma mostrou um desempenho ascendente (Figura 30). No início do ciclo, quando a cultura ainda apresentava um IAF baixo (Figura 25 e 26), observou-se que a BSFBM foi apenas expressiva a partir do DAC 112, quando atingiu um valor de 39 g m^{-2} . Nesse momento (112 DAC), a BSFBM respondia por 0,07 da BSTPA. Com o decorrer do ciclo, o surgimento de novas folhas (NFE) (Figura 19) promoveu um aumento da quantidade de BSFBM, atingindo valores máximos de 1010 g m^{-2} , quando então o valor de pBSFBM alcançou 0,15 da BSTPA (Figura 30). Inman-Bamber et al. (2002) contataram valores de pBSFBM, ao final do ciclo, variando entre 0,18 e 0,22, para as variedades NCo376 e N12, respectivamente. Sob condições de sequeiro, cuja precipitação pluviométrica foi em torno de 669 mm, os valores de pBSFBM tenderam a aumentar, atingindo 0,36 para a variedade N16 e 0,31 para a NCo376, como respostas às diferenças dos mecanismos de tolerância à seca.

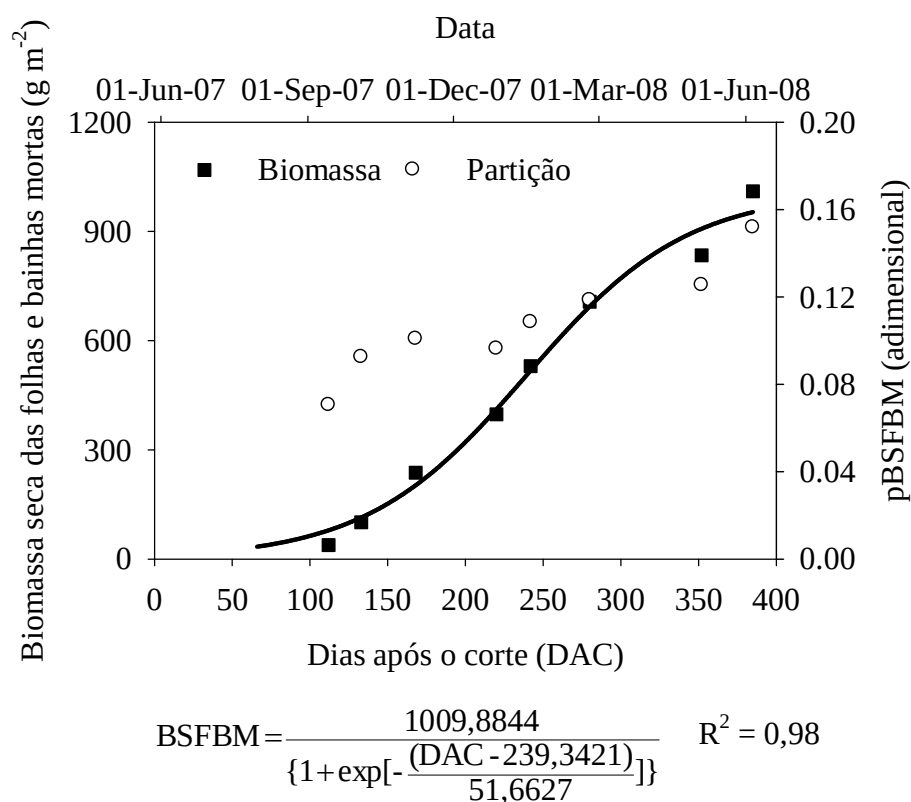
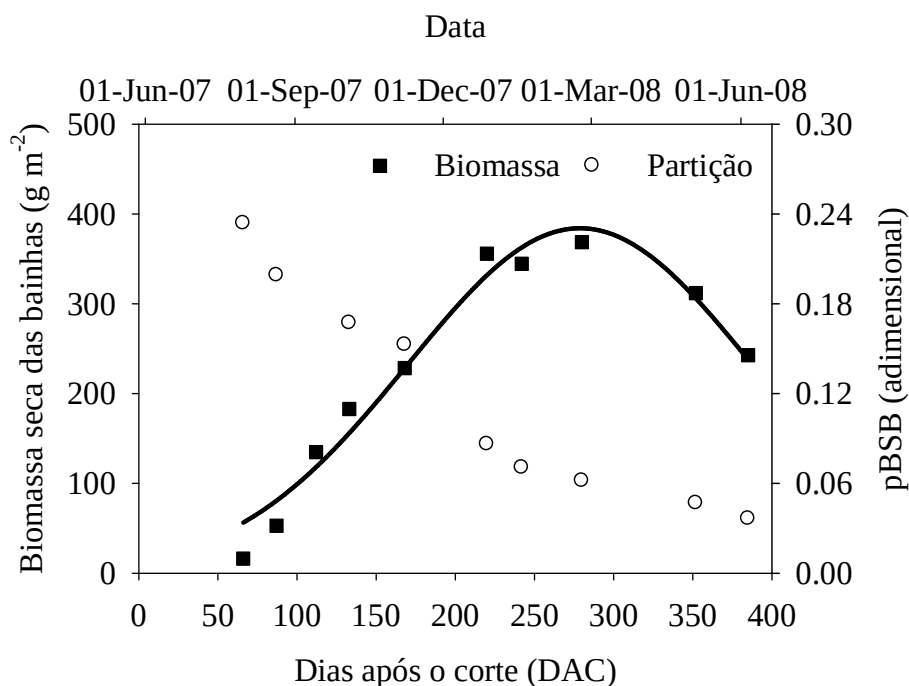


Figura 30. Biomassa seca acumulada das folhas e bainhas mortas (BSFBM) e sua partição (pBSFBM) em relação à biomassa total da parte área para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

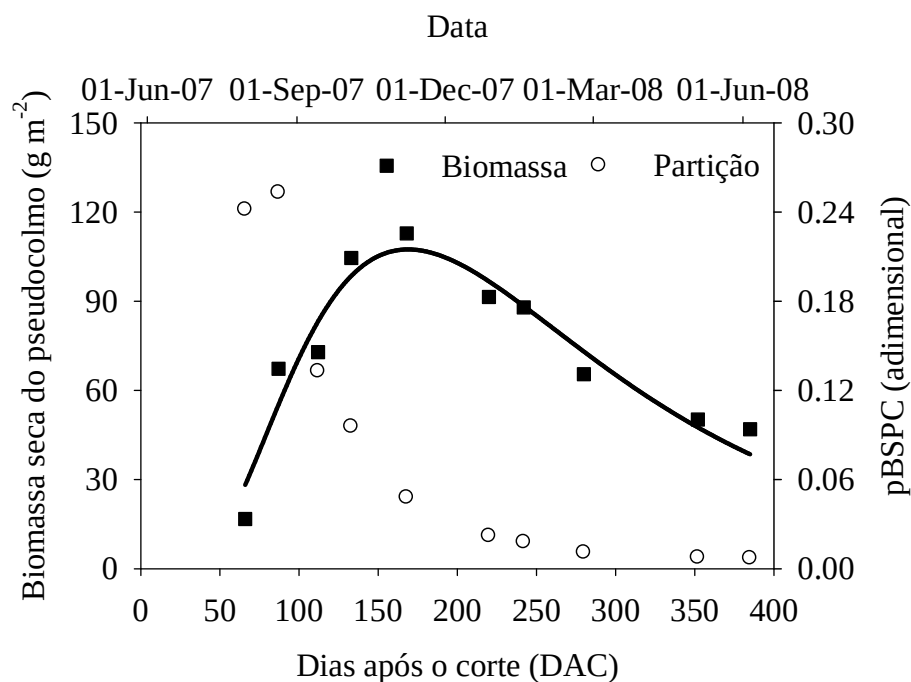
Em relação à biomassa seca acumulada para as bainhas (BSB) (Figura 31), observou-se um comportamento similar ao obtido para a BSFV. Contudo, a fração destinada a BSB (pBSB) foi inferior ao da BSFV. A pBSB era de 0,23 aos 66 DAC, enquanto o valor de pBSFV era de 0,33. A partir dos 112 DAC, o valor de BSB mostrou-se muito próximo ao da BSFV, ambas apresentando, praticamente, o mesmo valor de biomassa seca acumulada, quando passaram de 135 g m⁻² para um valor máximo de 356 g m⁻² (aos 220 DAC). No entanto, este foi reduzido para 243 g m⁻² ao final do ciclo, quando então o valor de pBSB era igual a 0,04 (Figura 31).

Na Figura 32, é demonstrada o desempenho da biomassa seca acumulada do pseudocolmo (BSPC) e sua partição (pBSPC) em relação à biomassa seca total da parte área da cana-de-açúcar. Observou-se, no início do ciclo, que os valores médios foram de 0,24±0,01. Aos 66 DAC, o valor da BSPC era de 17 g m⁻², mas alcançou 113 g m⁻² até os 168 DAC. Este período coincide com a fase de maior taxa de elongação média dos colmos (Figura 10), de grande importância para o rendimento final desta cultura. A partir deste momento, verificou-se que houve uma redução dos valores de BSPC para 47 g m⁻², o que correspondeu a 0,01 da BSTPA no final do ciclo.



$$BSB = 384,0967 * \exp\left\{-0,5 * \left[\frac{(DAC - 108,5710)}{278,7345}\right]^2\right\} \quad R^2 = 0,96$$

Figura 31. Biomassa seca acumulada das bainhas (BSB) e sua partição (pBSB) em relação à biomassa total da parte área para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.



$$BSPC = 107,4264 * \exp \left\{ -0,5 * \left[\frac{\ln \left(\frac{DAC}{168,9519} \right)}{0,5750} \right]^2 \right\} \quad R^2 = 0,90$$

Figura 32. Biomassa seca acumulada do pseudocolmo (BSPC) e sua partição (pBSPC) em relação à biomassa total da parte aérea para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Notoriamente, a maior partição de biomassa ocorreu para os colmos (Figura 33). Pode-se perceber uma simetria entre os valores de pBSC e de pBSPC (Figura 32), de modo que fortalece a teoria da relação fonte-dreno entre essas duas estruturas (LIU & BULL, 2001). Entre os 66 e 87 DAC, não foi verificada nenhuma formação pronunciada de BSC, de modo que toda a biomassa era destinada a BSPC (Figura 32). Entretanto, a partir dos 113 DAC, observou-se que a BSC já era de 130 g m⁻², tendendo a aumentar rapidamente. Fato semelhante foi observado com a elongação dos colmos (Figura 10), resultando uma produção da ordem de 5037 g m⁻² ao final do ciclo, decorrente de uma maior partição para os colmos que foi em torno de 0,76. Inman-Bamber et al. (2002) constataram, nas condições climáticas da África do Sul, valores médios de pBSC em torno de 0,85, para várias variedades e locais de cultivo. Para um ano mais seco (~ 669 mm), estes autores notaram que a BSC variou entre 2000 e 3000 g m⁻², enquanto para um ano mais chuvoso (~1098 mm), a cultura apresentou valores de BSC variando entre 3000 a 4000 g m⁻². Para as condições climáticas da Austrália, quando o rendimento foi de 5000 a 6000 g m⁻², os valores médios de pBSC oscilaram em torno de 0,80.

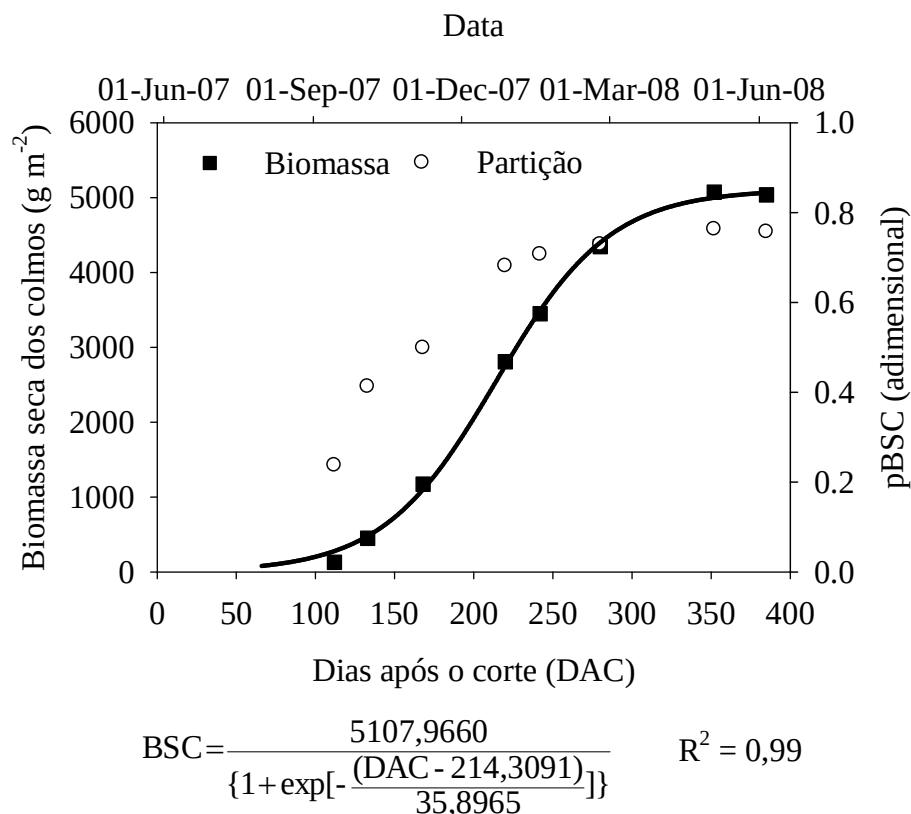


Figura 33. Biomassa seca acumulada dos colmos (BSC) e sua partição (pBSC) em relação à biomassa total da parte área para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

A biomassa seca acumulada da parte emergente (BSPE) e sua partição (pBSPE) em relação à BSTPA (Figura 34) apresentaram comportamento semelhante ao da BSPE (Figura 32). Aos 66 DAC, a BSPE foi 13 g m^{-2} e a sua partição 0,19, atingindo valor máximo de 125 g m^{-2} aos 242 DAC, com um pBSPE de 0,03. Analogamente, observou-se que, nesse período, ocorreu a maior emissão de folhas pela cultura (NFE) (Figura 19). Ao final do ciclo, os valores de BSPE e de pBSPE foram iguais a 74 g m^{-2} e 0,01, respectivamente. Inman-Bamber et al. (2002), em experimentos realizados na África do Sul, verificaram valores máximos de 0,05 no início do ciclo. No entanto, seus valores tenderam a aproximar-se de zero ao final do ciclo.

A soma dos valores da BSPE e da BSPE resulta num componente denominado internacionalmente como “cabbage”. No presente experimento, seus valores responderam por 0,43 (30 g m^{-2}), reduzindo a 0,02 (120 g m^{-2}) da BSTPA ao final do ciclo. Para variedades com produção de BSTPA acima de 5000 g m^{-2} , Robertson et al. (1996a) citam valores de “cabbage” em torno de 0,05 no final do ciclo. Inman-Bamber et al. (2002) informam valores de 0,10 para variedades de cana-de-açúcar com produção

de BSTPA até 3000 g m⁻². Contudo, à medida que ocorre aumento da BSTPA (de 3000 a 6000 g m⁻²), maior quantidade de BSPC é convertida em rendimento final, de modo que os valores de “cabbage” podem reduzir para a faixa de 0,05 a 0,07.

A biomassa seca total da parte área, subtraída da biomassa dos colmos, é conhecida como “palhada”, que corresponde aos demais componentes da planta, a qual pode ser incorporada ao solo como matéria orgânica ou utilizada para a produção de energia em termoelétricas (OLIVEIRA et al., 1999). No presente experimento, verificou-se uma redução pronunciada da palhada com o decorrer do ciclo, em decorrência do aumento da BSC. Ao final do ciclo produtivo, a biomassa de palhada correspondeu a aproximadamente 0,24 da BSTPA.

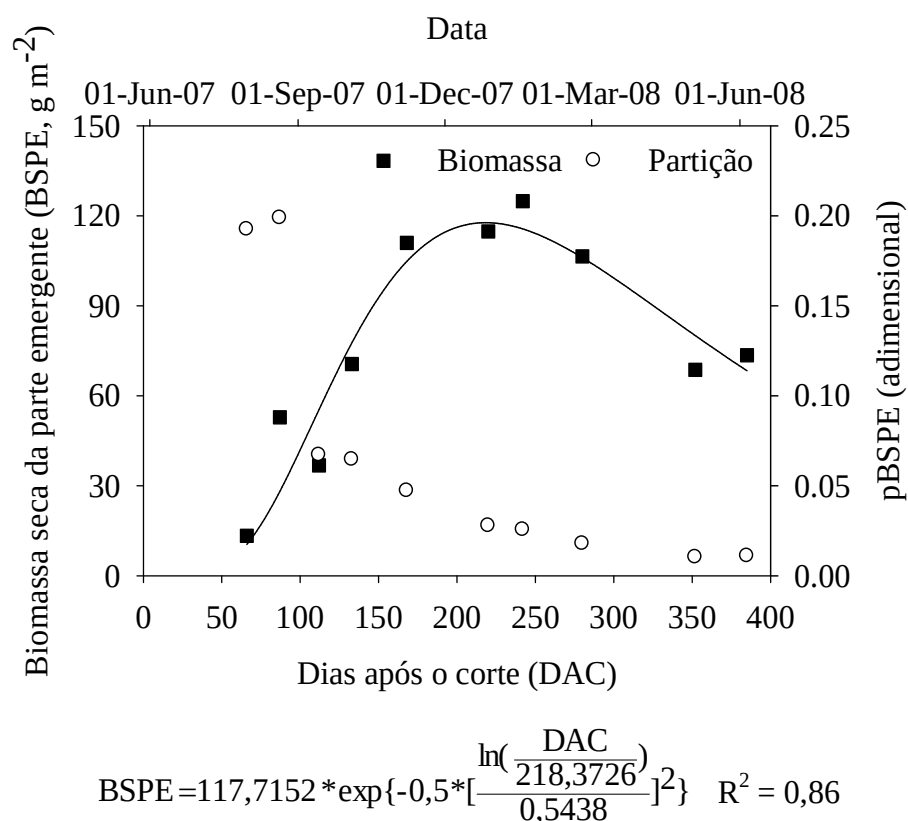


Figura 34. Biomassa seca acumulada da parte emergente (BSPE) e sua partição (pBSPE) em relação à biomassa total da parte área para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

5.2.5. Índices morfofisiológicos

A partir dos dados de biomassa seca acumulada, do índice de área foliar e de suas respectivas equações ajustadas por meio do modelo sigmoidal, foram obtidas as curvas da taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa

de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE) e a razão de massa foliar (RMF), como apresentadas nas Figuras 35 a 40, nessa ordem.

Analisando a Figura 35, pode-se observar que a TCA ainda é baixa antes dos 87 DAC, com valores inferiores a $9,0 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, caracterizando-se um período de incremento reduzido de biomassa, como foi verificado na Figura 28. Nesta fase de crescimento, a temperatura média do ar foi de $24,1^{\circ}\text{C}$ e o suprimento médio de radiação na ordem de $16,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figuras 7A e 7B). A partir desse momento, a TCA tendeu a aumentar substancialmente, até atingir o valor máximo de $41,8 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, em torno dos 200 DAC (entre os meses de dezembro e janeiro), em que a temperatura média do ar alcançou valores médios de $28,0^{\circ}\text{C}$ e o suprimento médio de radiação solar na ordem de $23,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Na fase subsequente, verificou-se uma redução acentuada da TCA, tendo o seu valor médio em torno de $4,7 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ aos 348 DAC, quando foi realizado o último evento de irrigação (Figura 7F). Na fase final do ciclo (348 a 385 DAC), constatou-se uma redução pequena da TCA, cujo valor médio foi na ordem de $1,7 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 32). Esse resultado mostra que as plantas continuaram crescendo, mesmo com a suspensão da irrigação, em virtude da alta capacidade de retenção de água dos vertissolos.

O comportamento observado para a TCA foi análogo ao constatado por Vitti et al. (2008) para a variedade SP 813250, no ciclo de cana-planta, submetida a quatro tratamentos de doses de nitrogênio, sob as condições climáticas de Pradópolis-SP. Nestas condições, esses autores observaram valores máximos de TCA oscilando entre 35 e $43 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Por outro lado, sob as condições climáticas do Noroeste do estado do Paraná, Oliveira (2005) cita valores de TCA variando entre 3 e $27 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, para diferentes variedades de cana-de-açúcar, durante o ciclo de cana-planta.

Analisando-se a TCR, constatou-se que, na fase inicial da cana-de-açúcar, o seu valor era de $0,024 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, aos 87 DAC (Figura 36). Contudo, com o decorrer do ciclo, verificou-se uma redução nos valores, atingindo $0,001 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ aos 348 DAC, e sendo, praticamente desprezíveis no final do ciclo (385 DAC). Silva (2005), analisando o crescimento das variedades, RB855113, RB 72454, RB 83594, RB855536 e SP81-3250, no ciclo de cana-soca, sob condições de sequeiro no estado do Paraná, encontrou valores máximo de TCR variando entre 0,0025 e $0,0034 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ aos 100 DAC, e, ao final do ciclo, valores inferiores a $0,005 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Oliveira et al. (2004) obtiveram valores máximos de TCR inferiores a $0,10 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, para a cana-planta, a depender da variedade.

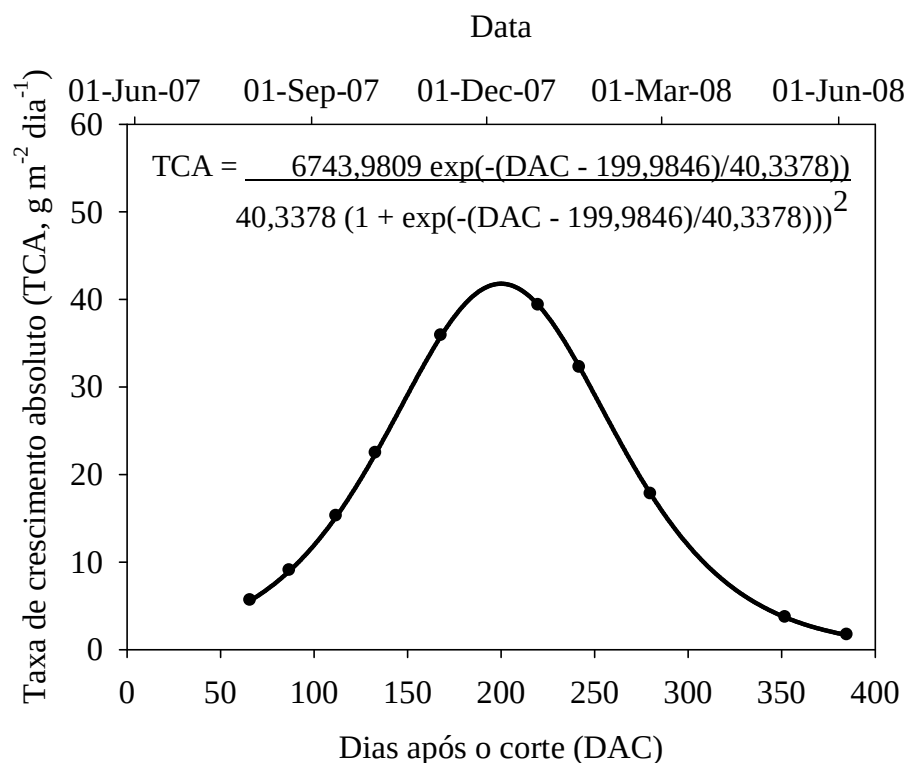


Figura 35. Taxa de crescimento absoluto (TCA) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

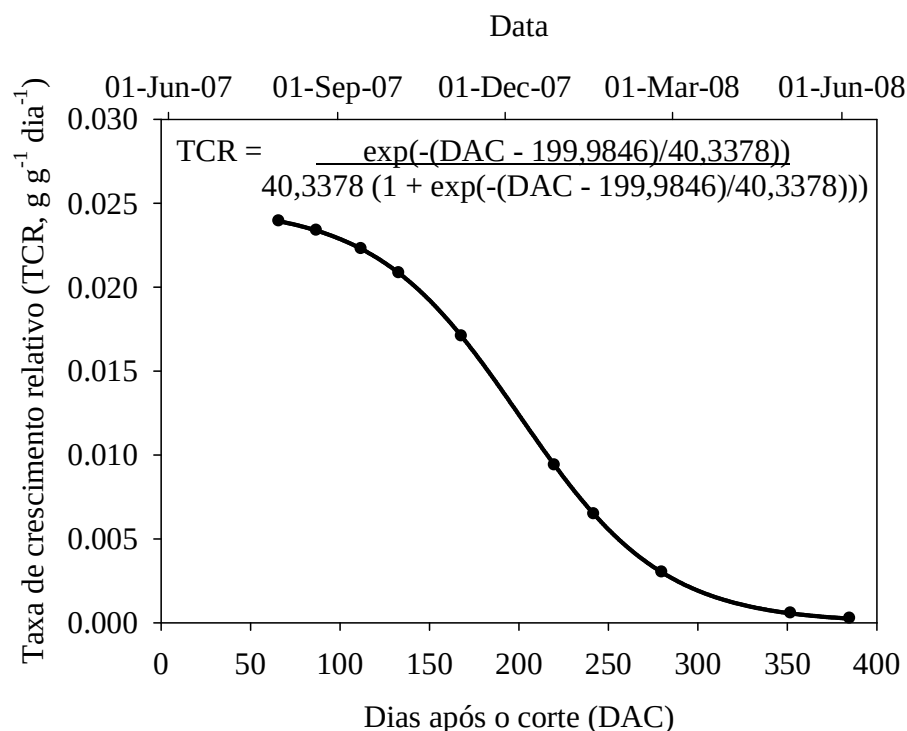


Figura 36. Taxa de crescimento relativo (TCR) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Os aumentos pronunciados dos valores de BSTPA (Figura 28) e do IAF (Figura 25 e 26), observados no início do ciclo, promoveram o aumento da taxa de assimilação líquida (TAL) da cana-de-açúcar irrigada até próximo dos 168 DAC (TAL ~ 13,8 g m⁻² dia⁻¹). Provavelmente, como resposta da alta conversão de energia das estruturas foliares (BSFV e BSPE), que permitiram o aumento da eficiência fotossintética (BENINCASA, 1988; RAMESH, 2000). Este valor ocorreu em torno do mês de novembro/2007, indicando que é possível aumentar a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar, com deslocamento do início do ciclo. Assim, pode-se selecionar um período em que ocorre maior disponibilidade de radiação solar na região, em vez de iniciar o cultivo quando o suprimento é ainda ascendente, como foi constatado no presente experimento, que começou no mês de junho/2007.

No período seguinte (aos 168 DAC), observou-se uma redução nos valores de TAL, o que pode estar relacionado com um aumento do auto-sombreamento das folhas, condicionando a redução da interceptação de radiação fotossinteticamente ativa em uma maior camada do dossel. Outros aspectos, que podem estar relacionados com esta redução do TAL são a progressiva expansão foliar (Figura 24), o aumento da taxa de respiração de manutenção e a elevação da temperatura ambiente (Figura 7A) (PARSONS et al., 1983; WOLDGE & LEAFE, 1976; GOMIDE & GOMIDE, 1999). Adicionalmente, tem-se que a redução da eficiência fotossintética do dossel é decorrente da senescência das folhas, como pode ser verificado para esse período (em torno de 168 DAC), quando então o NFVA e o NFE tornaram-se praticamente constantes (Figuras 18 e 19). Notou-se, também, nesse período, que a BSPC apresentou valores máximos, seguida de uma contínua redução (Figura 32). Além do mais, os valores de TEMC (Figura 10) e da BSC (Figura 33) tenderam a aumentar mais expressivamente, indicando, provavelmente, que a produção fotossintética das plantas, a partir desse momento, foi destinada principalmente para a produção dos colmos.

Verificou-se que a TAL variou de 13,8 g m⁻² dia⁻¹, aos 168 DAC, até 0,8 g m⁻² dia⁻¹ aos 348 DAC (Figura 37). A partir deste momento, semelhante ao comportamento dos outros índices morfofisiológicos citados anteriormente, constatou-se que os valores de TAL apresentaram pouca variação, alcançando valor mínimo de 0,4 g m⁻² dia⁻¹. Silva (2005) obteve valores de TAL variando de 6 a 12 g m⁻² dia⁻¹, dependendo da variedade de cana-de-açúcar. Ao final do ciclo, os valores de TAL oscilaram entre 0 e 6 g m⁻² dia⁻¹.

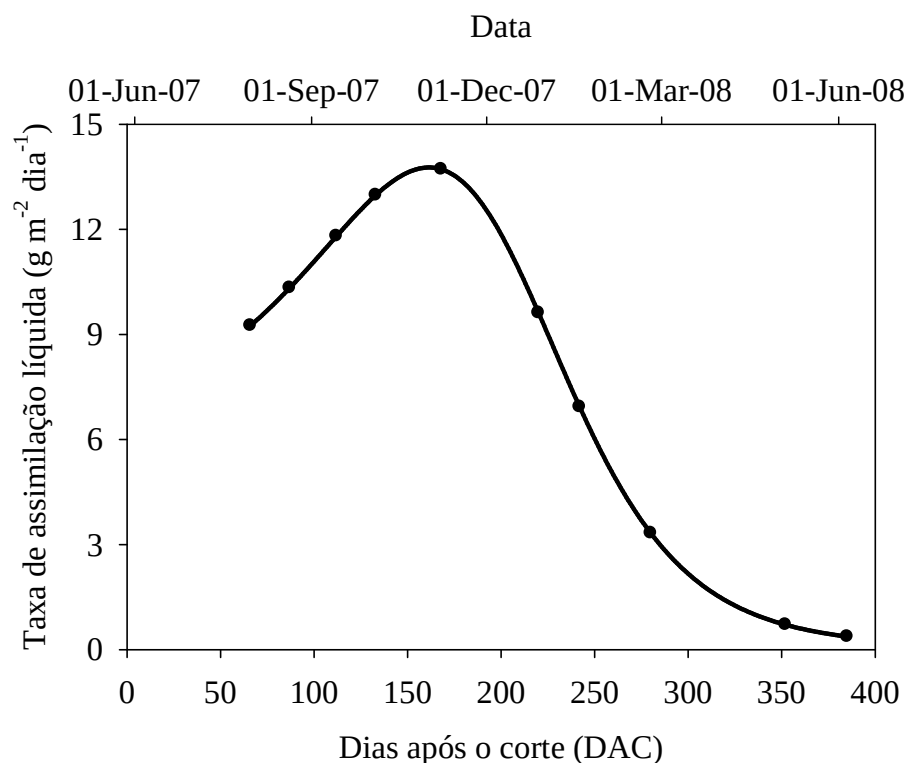


Figura 37. Taxa de assimilação líquida (TAL) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Na Figura 38, é demonstrada a razão de área foliar (RAF) para a cana-de-açúcar irrigada, indicando que, no início do ciclo da cultura, a maior parte da produção fotossintética da planta foi destinada à formação da área foliar. Estes resultados estão em conformidade com a partição da BSFV (pBSFV) e da BSPE (pBSPE) (Figuras 29 e 34). Por outro lado, na presente análise, a razão de massa foliar (RMF) (Figura 39) representa a própria pBSFV (Figura 29), que alcançou valores máximos no início do ciclo, mas que se reduziu com o decorrer do tempo, devido à elevada conversão de fotoassimilados em biomassa de colmos. Quando se considerou a RAF, observou-se que os valores máximos da ordem de $0,0026 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, no início do período de crescimento. Contudo, reduziu-se para $0,007 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ao final do ciclo de cultivo. Oliveira (2005) obteve valores máximos de RAF oscilando entre $0,0025$ e $0,0045 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ para diversas variedades de cana-de-açúcar, no ciclo de cana-planta, sob condições de sequeiro.

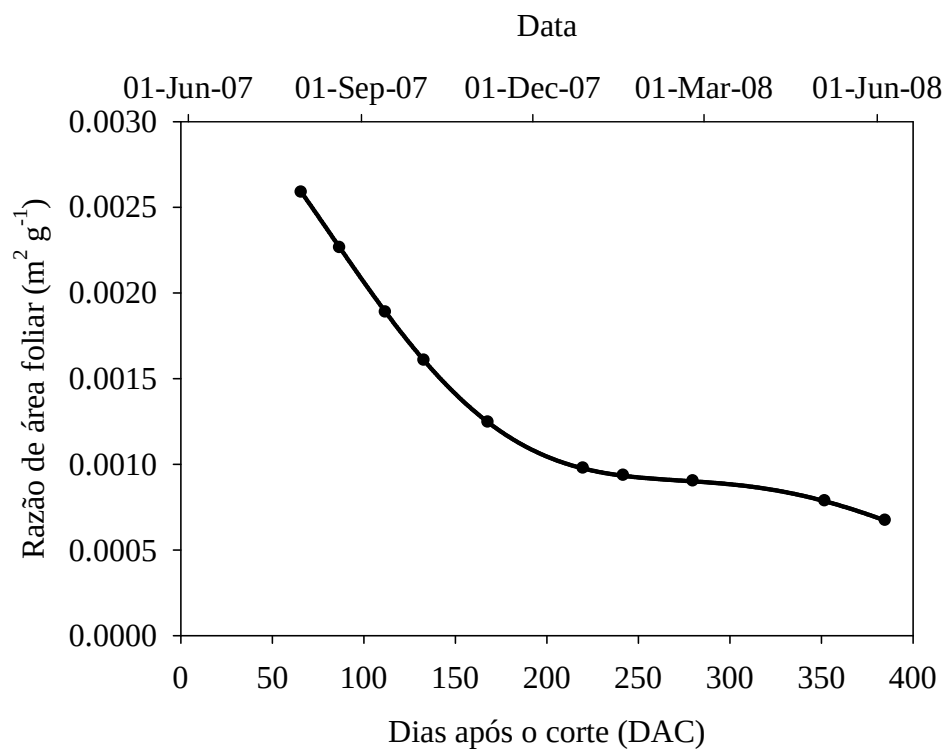


Figura 38. Razão de área foliar (RAF) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

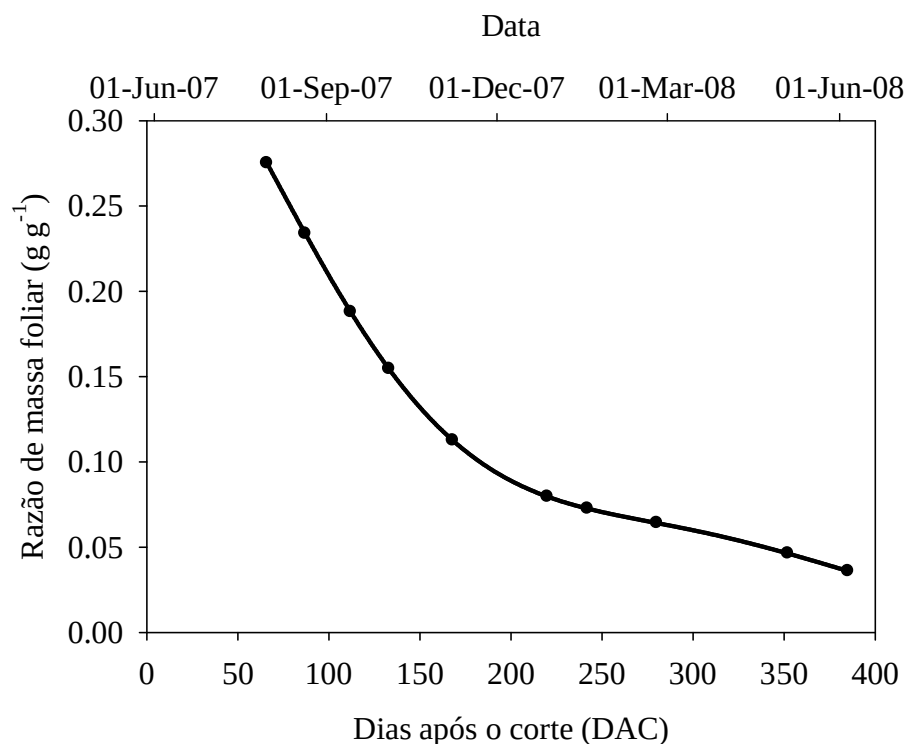


Figura 39. Razão de massa foliar (RMF) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Analisando-se a área foliar específica (AFE) da cultura (Figura 40), constatou-se que houve um ligeiro aumento com o decorrer do tempo, indicando que as folhas tornaram-se menos espessas, decorrente da menor fração de fotoassimilados destinada à formação da estrutura foliar (BSFV e BSPE). Este resultado é contrário ao observado por Silva (2005) para a cana-soca e Oliveira (2005) para a cana-planta, indicando que a cultura, provavelmente, apresentou um aumento da eficiência fotossintética ao longo do seu ciclo. Aos 66 DAC, o valor da AFE oscilou próximo de $0,010 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, aumentando para $0,018 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ao final do ciclo (Figura 37). Silva (2005) observou variações mais pronunciados dos valores da AFE entre a fase inicial ($0,0025$ a $0,0045 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e final ($0,005$ a $0 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) do ciclo da cana-de-açúcar.

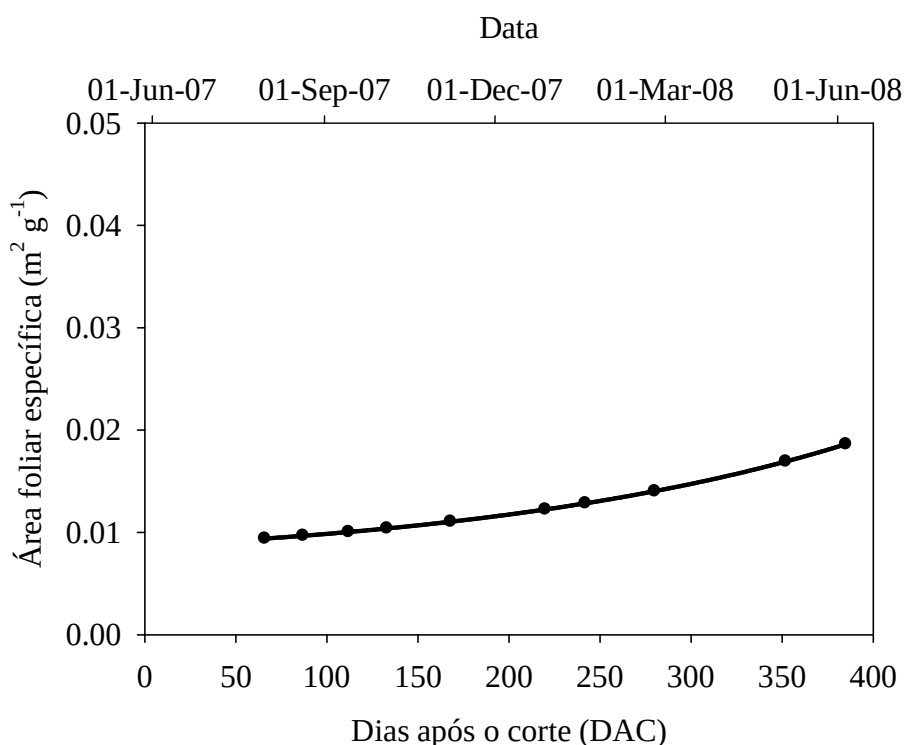


Figura 40. Área foliar específica (AFE) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

5.2.6. Radiação fotossinteticamente ativa interceptada e coeficiente de extinção

A fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}) pela cana-de-açúcar irrigada, pode ser observada nas Figuras 41 e 42, em função dos dias após o corte (DAC) e graus dias acumulados (GDA), respectivamente.

No início do ciclo da cultura (< 30 DAC, Fase I), caracterizado por um baixo índice de área foliar (IAF) (Figura 25 e 26), verificou-se que o valor máximo de f_{RFA} foi de apenas 6%. No período subsequente (30 a 109 DAC, Fase II), os valores de f_{RFA} variaram de 6% a 59%, sendo que a cobertura total do solo ($f_{RFA} > 80\%$) ocorreu nos primeiros 132 dias do ciclo ou aos $1132^{\circ}\text{C dia}^{-1}$. Neste período, considerou-se a t_{base} de 16°C , com valores médios de temperatura média do ar em torno de $24,5^{\circ}\text{C}$. Para as cultivares NCo376 e CP66/1043, no ciclo de cana-soca, cultivadas em Mount Edgecombe, África do Sul, Singels et al. (2005) verificaram que foram necessários 100 e 120 DAC, respectivamente, para que a f_{RFA} atingisse 80%, com início do ciclo no mês de dezembro (temperatura média do período igual a $23,3^{\circ}\text{C}$). Por outro lado, quando o ciclo foi iniciado no mês de junho (temperatura média do período igual a $18,0^{\circ}\text{C}$), necessitou-se de 180 e 230 DAC, respectivamente, para que ocorresse a cobertura total do solo. Constatou-se, também, que o valor máximo de f_{RFA} foi de aproximadamente 99%, ocorrendo aos 213 DAC ($\sim 2096^{\circ}\text{C dia}^{-1}$, t_{base} de 10°C) durante a Fase III. Na Fase IV, cuja duração foi de apenas 41 dias (DAC 348 – 389), apesar da redução do índice de área foliar (Figura 22 e 23), os valores de f_{RFA} permaneceram inalterados.

O valor médio de f_{RFA} para o ciclo completo da cana-de-açúcar foi de 73%, que foi superior aos observados para as cultivares NCo376 e CP66/1043 no ciclo de cana-soca, para os cultivos iniciados em julho, como informado por Singels et al. (2005). Segundo estes autores, a variedade NCo376, no ciclo de cana-soca e de cana-planta, com início de cultivo em dezembro, apresentou valores médios de f_{RFA} iguais a 75% e 79%, respectivamente, e de 65% no ciclo de cana-soca, com início de cultivo em junho. Já para a variedade CP66/1043, no ciclo de cana-planta e de cana-soca, com início em dezembro, os valores de f_{RFA} foram iguais a 65% e 74%, respectivamente. Porém, para o ciclo de cana-soca iniciado em junho, foi igual a 57%.

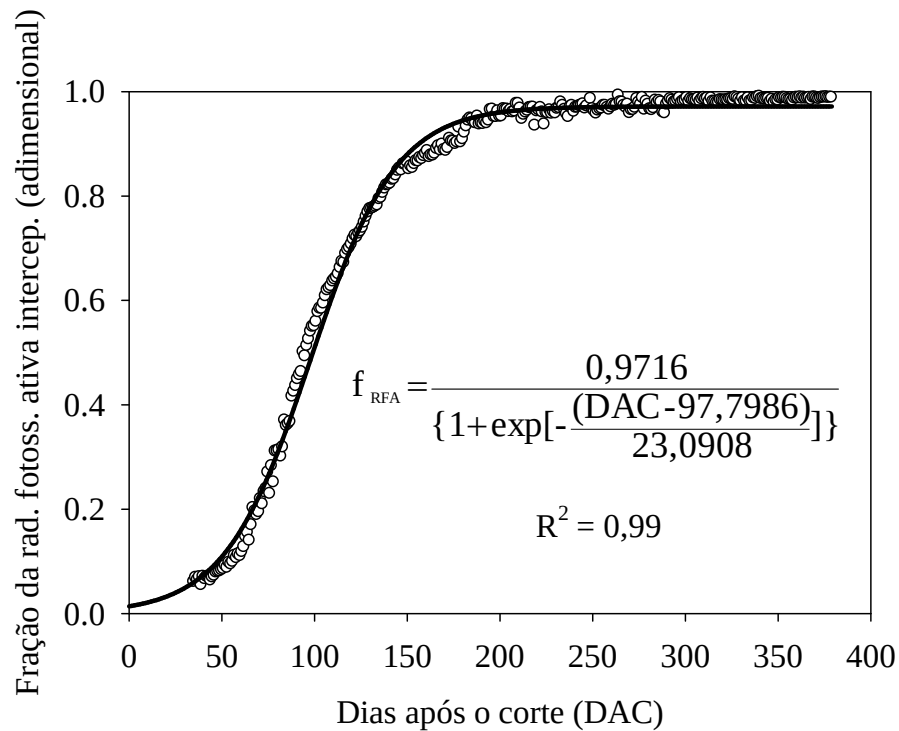


Figura 41. Fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos dias após o corte (DAC).

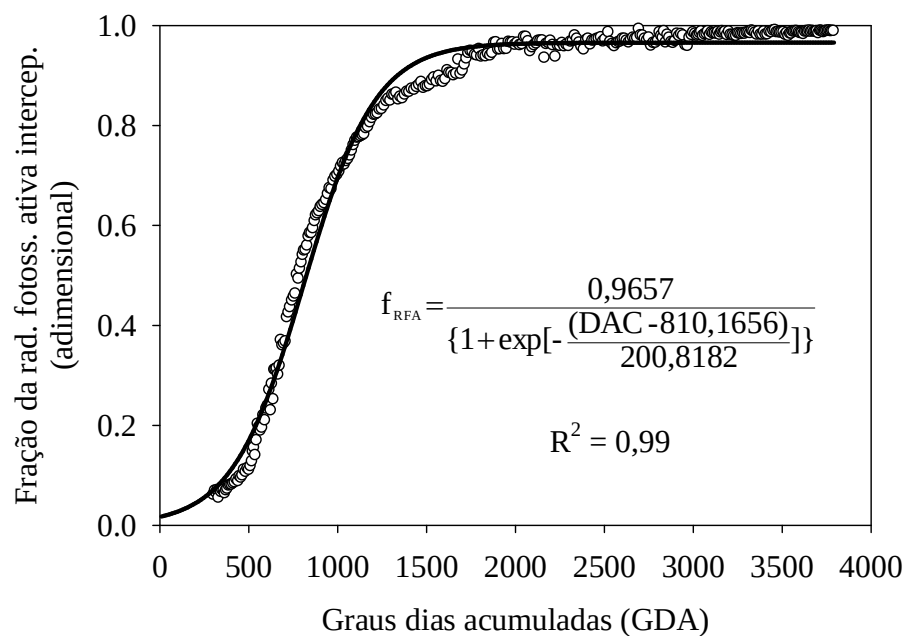


Figura 42. Fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}) pela cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em função dos graus dias acumuladas utilizando a temperatura base de 16°C.

Na Figura 43, é demonstrada a relação entre a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}) e o índice de área foliar (IAF) para a cultura da cana-de-açúcar irrigada. Nesta relação, foi considerada a equação da Lei de Beer para a determinação do coeficiente de extinção (k_e), cujo valor médio de k_e foi de aproximadamente 0,72. Este valor está inserido no intervalo de k_e informado por Singels et al. (2008), que assume valores variando entre 0,58 e 0,86, para diferentes variedades de cana-de-açúcar, considerando-se a faixa espectral de radiação de 400 a 700 nm.

Na literatura internacional, vários trabalhos foram publicados com o objetivo de determinar os valores de k_e e, conseqüentemente, o uso eficiente da radiação (UER), utilizando a faixa da radiação global. No entanto, esta faixa compreende os comprimentos de onda situados entre 300 e 3000 nm (SINGELS et al., 2005), o que implica em resultados inferiores aqueles determinados com base na RFA. Muchow et al. (1994), utilizando a faixa espectral da radiação global, obtiveram um valor de k_e de 0,38. PARK et al. (2005) encontraram, para cinco variedades de cana-de-açúcar submetidas a diferentes condições de cultivo, valores de k_e variando entre 0,37 e 0,53. Similarmente, os valores de UER também foram inferiores quando comparados aos obtidos com base na RFA (SINCLAIR & MUCHOW et al., 1996).

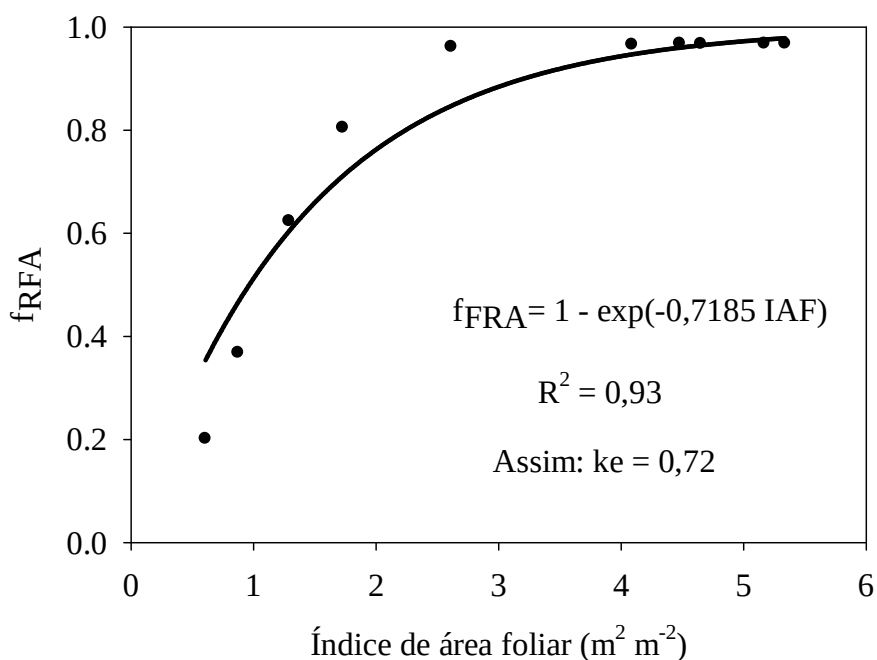


Figura 43. Determinação do coeficiente de extinção (k_e) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

5.2.7. Eficiência do uso de radiação

As relações entre a biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) e os valores acumulados de radiação solar global interceptada ($R_{g_{ia}}$) e entre a BSTPA e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{ia}) estão demonstradas na Figura 44, resultando no uso eficiente de radiação (UER) e na eficiência fotossintética (EFT).

Observou-se que a biomassa, ao longo do ciclo da cultura, respondeu ao acúmulo de RFA_{ia} praticamente de forma linear, até a oitava amostragem (DAC 280), quando o valor era de 1949 MJ m^{-2} e o da BSTPA de 5963 g m^{-2} . A partir daí, constatou-se uma variação pequena da BSTPA (690 g m^{-2}), de modo que a resposta ao incremento de 829 MJ m^{-2} foi relativamente baixa durante os últimos 105 dias do ciclo de cultura. Quando se considerou os dados correspondentes às 10 amostragens, verificou-se que o valor do EFT_{BSTPA} foi, em torno, de $2,67 \text{ g MJ}^{-1}$, aproximadamente (Figura 44). Por outro lado, quando se considerou o UER_{BSTPA} , verificou-se que o seu valor foi de $1,29 \text{ g MJ}^{-1}$.

Ferreira Júnior et al. (2008), analisando a EFT_{BSTPA} para quatro variedades de cana-de-açúcar sob sistema de produção irrigado, em Rio Largo-AL, encontraram valores de EFT_{BSTPA} de $3,12 \text{ g MJ}^{-1}$ para a RB92-579. Para as variedades SP791011, RB93509 e RB931530, os mesmos autores obtiveram valores de EFT_{BSTPA} de 2,06, 3,10 e $1,66 \text{ g MJ}^{-1}$, respectivamente. Singels & Bezuidenhout (2002) informam valores de UER_{BSTPA} variando entre 1,2 e $1,5 \text{ g MJ}^{-1}$, a depender da fase de crescimento e do tipo de ciclo (cana-planta ou cana-soca). Singels et al. (2005) encontraram valores de UER_{BSTPA} entre 0,8 e $1,5 \text{ g MJ}^{-1}$ para as variedades N26 e NCo376, no ciclo de cana-soca e cana-planta, respectivamente, cultivadas em Pongola, África do Sul. Para a variedade Q96, no ciclo de cana-planta, Muchow et al. (1994) observaram que o UER_{BSTPA} foi de $1,75 \text{ g MJ}^{-1}$.

Analisando-se, também, a EFT_{BSC} e a UER_{BSC} , com base nos dados de biomassa dos colmos, verificou-se que o comportamento da relação entre a radiação interceptada acumulada (Figura 45) e a BSC, mostrou-se bastante semelhante ao observado para a EFT_{BSTPA} e a UER_{BSTPA} (Figura 44). Este resultado demonstra que a maior parte da radiação interceptada pela cultura, a partir dos 280 DAC, pode estar sendo utilizada para a conversão de biomassa de colmos em sacarose, ao invés de biomassa para as demais estruturas da planta. Assim, neste período, a cana-de-açúcar tende a aumentar a concentração de sacarose nos colmos, de maneira mais efetiva (INMAN-BAMBER et al., 2002; ROBERTSON et al., 1996a).

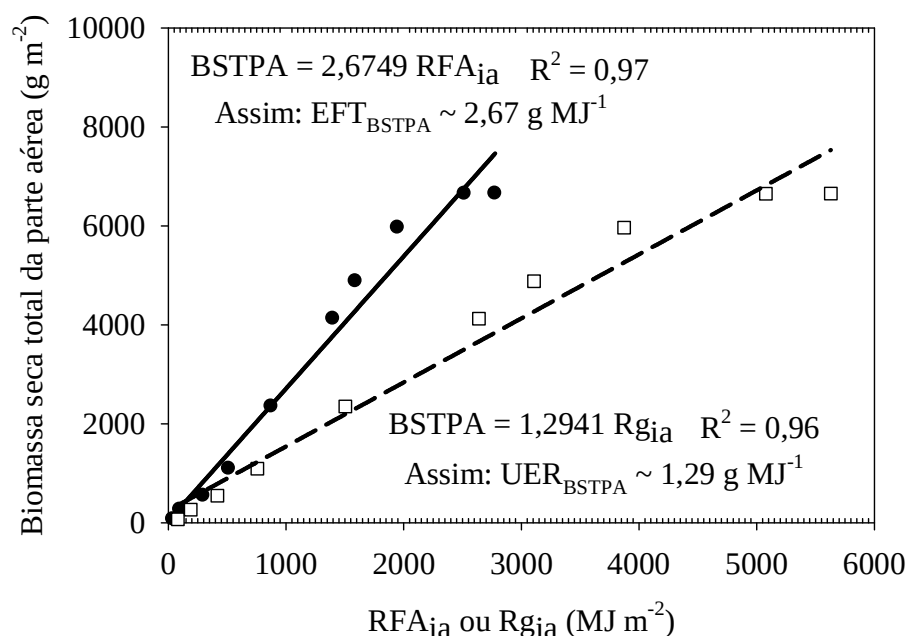


Figura 44. Uso eficiente da radiação (UER) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Os resultados referem-se a relação da biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA_{ia}) e com a radiação global (Rg_{ia}) acumuladas ao longo do ciclo pelo dossel da cultura.

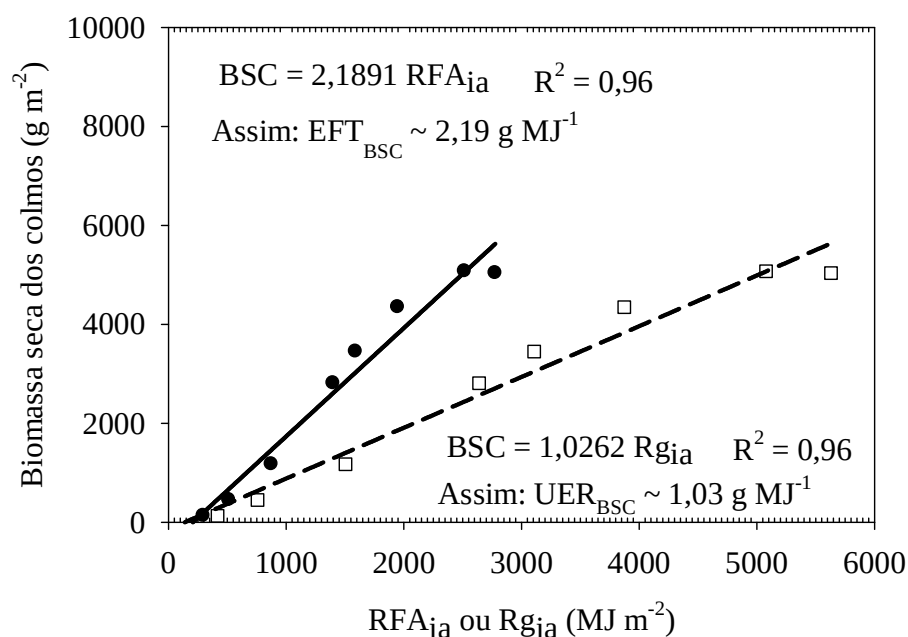


Figura 45. Uso eficiente da radiação (UER) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Os resultados referem-se a relação da biomassa seca dos colmos (BSC) com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA_{ia}) e com a radiação global (Rg_{ia}) acumuladas ao longo do ciclo pelo dossel da cultura.

Nas Figuras 46 e 47 são destacadas a EFT e o UER ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada, com base na biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) e dos colmos (BSC), respectivamente. Em ambos os casos, pode-se observar que a maior eficiência compreendeu o período entre 200 e 300 DAC, caracterizado por um crescente acúmulo de BSTPA, resultando em valores médios da EFT_{BSTPA} de $3,02 \pm 0,07 \text{ g MJ}^{-1}$ e de EFT_{BSC} $2,14 \pm 0,12 \text{ g MJ}^{-1}$. No início do ciclo, constatou-se um rápido crescimento da cultura, evidenciando uma alta eficiência do uso de radiação para a BSTPA, contudo, ainda, reduzida para os colmos. A partir dos 352 DAC, durante o período da suspensão da irrigação, observou-se uma diminuição da eficiência do uso de radiação, cujos valores foram de $2,40 \text{ g MJ}^{-1}$ para a EFT_{BSTPA} e de $1,81 \text{ g MJ}^{-1}$ para a EFT_{BSC} .

Quando se assumiu os valores de UER_{BSTPA} e do UER_{BSC} , verificou-se o mesmo comportamento obtido para os valores de EFT_{BSTPA} e da EFT_{BSC} . No entanto, no período de maior eficiência de radiação (entre 200 e 300 DAC), os valores de UER_{BSTPA} e do UER_{BSC} foram de $1,56 \pm 0,02 \text{ g MJ}^{-1}$ e $1,07 \pm 0,06 \text{ g MJ}^{-1}$, respectivamente. No início do ciclo, o UER_{BSTPA} variou de 0,85 a $1,56 \text{ g MJ}^{-1}$, enquanto a partir dos 352 DAC, reduziu-se de $1,31 \text{ g MJ}^{-1}$ para $1,18 \text{ g MJ}^{-1}$. Em termos de UER_{BSC} , observou-se um aumento de até $0,78 \text{ g MJ}^{-1}$, aos 168 DAC, sendo que, para o período subsequente, aos 350 DAC, o seu valor decresceu de $1,0 \text{ g MJ}^{-1}$ para $0,89 \text{ g MJ}^{-1}$.

Em termos de UER_{BSTPA} , Park et al. (2005), trabalhando com seis variedades de cana-de-açúcar, cultivadas em diferentes regiões da Austrália, observaram durante a primeira fase da cultura, caracterizada por um crescimento rápido, valores variando entre 0,77 e $1,81 \text{ g MJ}^{-1}$. Na fase intermediária, encontraram valores de UER_{BSTPA} de $1,79 \pm 0,06 \text{ g MJ}^{-1}$ para a cana-planta e $1,19 \pm 0,06 \text{ g MJ}^{-1}$ para a cana-soca. Entretanto, na fase final, em que o crescimento é lento, a UER_{BSTPA} foi igual a $0,06 \pm 0,22 \text{ g MJ}^{-1}$ para a cana-planta e $-0,52 \pm 0,51 \text{ g MJ}^{-1}$ para a cana-soca. Este valor negativo indica que a cultura apresentou redução expressiva de biomassa, mesmo com o aumento da radiação interceptada.

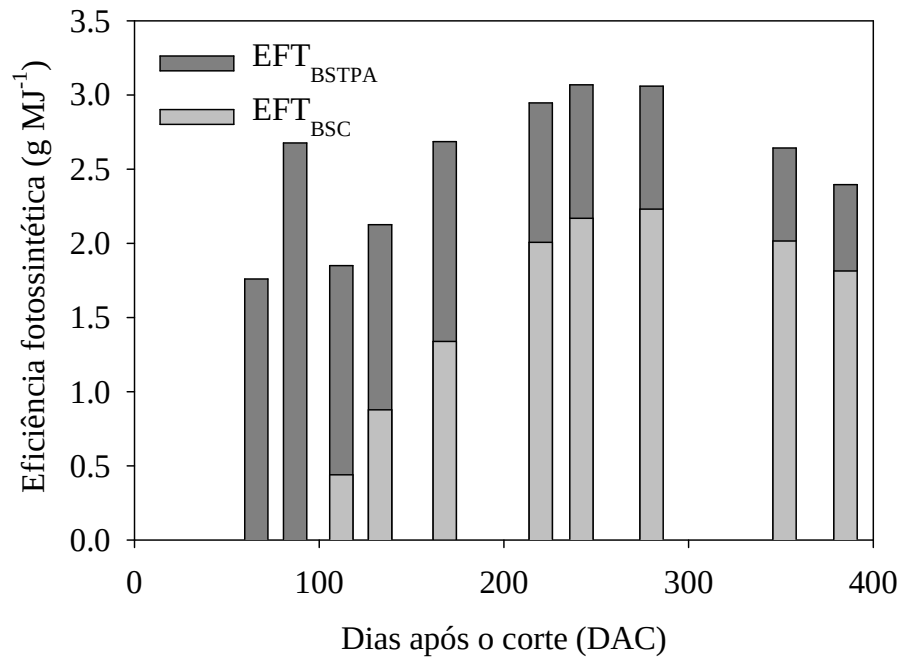


Figura 46. Eficiência fotossintética (EFT) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, com base na biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) e dos colmos (BSC).

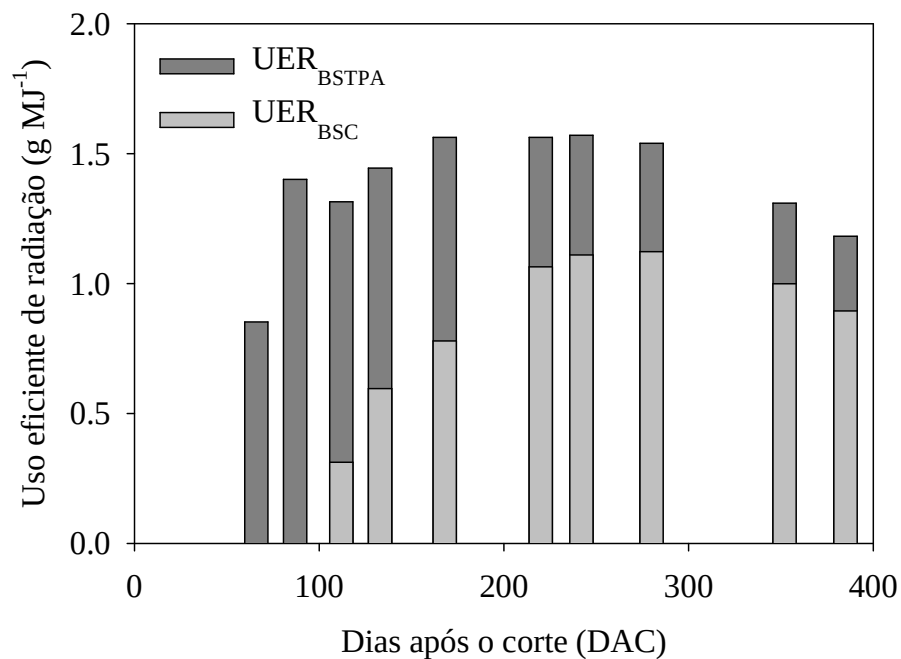


Figura 47. Uso eficiente de radiação (UER) para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, com base na biomassa seca total da parte aérea (BSTPA) e dos colmos (BSC).

5.2.8. Análise do rendimento industrial

A partir dos índices tecnológicos obtidos ao final do ciclo de cultivo, foi possível analisar o rendimento industrial da cana-de-açúcar irrigada, como pode ser observado na Tabela 5. Estes dados foram obtidos junto à empresa Agrovale, dos quais alguns indicadores (NCH, CC, PC e NIC) são análogos aos obtidos na biometria de campo, anteriormente discutida. No entanto, os mesmos foram coletados após o corte da cultura, ao passo que algumas diferenças nos valores podem ser observadas.

Dentre os índices de interesse para análise no presente estudo, concernente ao cálculo da eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada, considerou-se a TCH (toneladas de colmos por hectare), o RBAÇ (rendimento bruto de açúcar) e o RBAL (rendimento bruto de álcool). Adicionalmente, analisou-se o teor de fibras (TF), devido sua importância na eficiência do processo industrial (CASTRO & KLUGE, 2001), e o teor de açúcar com base na biomassa seca dos colmos.

A TCH foi igual a $162,75 \text{ t ha}^{-1}$, valor esse superior ao informado por Almeida et al. (2008), que observaram um rendimento de TCH de $136,22 \text{ t ha}^{-1}$, para a mesma variedade (RB 92579), sob as condições irrigadas do Estado de São Paulo. Em termos de RBAÇ, verificou-se que rendimento foi de $20,89 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto que o RBAL foi de $15,01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Tabela 3). Dantas Neto et al. (2006), trabalhando com a variedade SP 791011, submetida a várias lâminas de irrigação sob as condições climáticas de Capim-PB, obtiveram valores de RBAÇ entre 9 e $12,58 \text{ t ha}^{-1}$ e de RBAL entre 6,25 e $8,91 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Azevedo (2002) encontrou valor médio de RBAÇ da ordem de $14,71 \text{ t ha}^{-1}$ para a cana-planta, enquanto Wiedenfeld (2000), trabalhando com a cana-de-açúcar sob três condições de irrigação (95, 85 e 65% do limite crítico de água no solo para a cultura), constatou rendimentos de 13, 10 e 8 t ha^{-1} de açúcar, respectivamente.

Comparando estes dados, aos obtidos no presente estudo, é possível inferir que a cana-de-açúcar irrigada, sob as condições do Submédio do Vale do São Francisco, possui uma alta capacidade de conversão de biomassa dos colmos em sacarose, logo que apresentou um alto rendimento industrial. Por outro lado, o teor de fibras (TF $\sim 13,74\%$) (Tabela 5) foi comparável aos obtidos por diferentes autores, como por exemplo, Carvalho et al. (2008) que citam valores de TF variando entre 13,91 e 13,32%, para a variedade SP 791011, dependendo dos níveis de água aplicados via irrigação. Silva (2002), avaliando a resposta da variedade SP 716949 sob diferentes níveis de adubação nos tabuleiros costeiros da Paraíba, encontrou valores de TF em torno de 14,20%. Marques et al. (2007), analisando os índices tecnológicos de 6 variedades de cana-de-

açúcar (SP 801816, RB 845210, SP 813250, RB 855536, RB 867515 e RB72454), verificaram valores de TF variando entre 12,02 e 13,83%.

Em termos de concentração de açúcar nos colmos, observou-se que os valores foram em torno de 0,41 g de açúcar por g de matéria seca (g g^{-1}). Este valor é semelhante aos citados por Inman-Bamber et al. (2002), que variaram entre 0,35 e 0,50 g g^{-1} , e inferiores aos valores obtidos por ROBERTSON et al. (1999), para a variedade Q96 irrigada, sob as condições climáticas da Austrália, em que os valores variaram entre 0,47 e 0,53 g g^{-1} .

Tabela 5. Indicadores de rendimento obtidos ao final do período de cultivo para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579) no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Indicadores	NCH	CC*	PC*	NIC*	DC**	SST	TF
Unidades	unid. ha^{-1}	cm	g	unid.	cm	Brix	%
Valores	22,4	2,52	1021	16,7	1,78	19,82	13,74

Indicadores	TP	TCH****	POL	AR	PCC	RBAÇ	RBAL
Unidades	%	ton. ha^{-1}	%	%	%	ton. ha^{-1}	$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$
Valores	82,64	162,75	15,63	0,74	12,84	20,89	15,01

* Medido após o corte; ** Diâmetro obtido na metade do colmo; *** Teor de umidade: 69,90%.

Obs.: NCH, Número de colmos por hectare; CC, comprimento dos colmos; PC, peso fresco por colmo; NIC, número de internódios; SST, sólidos solúveis totais; TF, teor de fibras; TP, teor de pureza; TCH, toneladas de colmos por hectare; POL, porcentagem de sacarose no caldo; AR, açúcares redutores; PCC, porcentagem bruta de açúcar; RBAÇ, rendimento bruto de açúcar; e, RBAL, rendimento bruto de álcool.

5.3. Balanço de radiação e de energia e suas partições

Antes da análise dos componentes do balanço de radiação (BR) e de energia (BE), realizou-se um diagnóstico da consistência dos valores estimados da razão de Bowen (β), os quais, em seguida, foram utilizados para o cálculo dos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H). Uma vez realizado este diagnóstico, os valores de LE e H, juntamente com os demais componentes do BR e do BE (R_g , R_n , R_r , RFA, BOC, BOL, albedo, G), foram analisados para 5 períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar (julho/2007, outubro/2007, janeiro/2008, abril/2008 e maio-junho/2009), os quais compreenderam três fases de crescimento desta cultura (Fase II – estabelecimento e perfilhamento; Fase III – crescimento máximo; e, Fase IV - amadurecimento). Foram utilizados os valores médios horários dos dias, compreendidos nestes períodos, para analisar os dados do BR e do BE e de suas partições. Adicionalmente, foram selecionados dias específicos para análises das variações dos valores de LE e H como resposta à disponibilidade de energia (nebulosidade variável) e à influência dos eventos de irrigação. Finalizando, realizou-se uma análise sazonal, utilizando os dados diários ao longo do ciclo da cultura.

5.3.1. Análise da consistência física dos dados da razão de Bowen

A partir dos critérios propostos por Perez et al. (1999) e assumindo a rejeição dos valores da razão de Bowen (β) quando inferiores a -0,75, observou-se que 65,7% dos dados analisados (34272, dados médios de 15 minutos) foram considerados fisicamente consistentes. No próprio estudo realizado por estes autores, valores consistentes somente foram observados entre 56 e 70% do total de dados medidos em quatro localidades situadas em regiões semi-áridas. Pela Tabela 6, é possível constatar, para os períodos de crescimento analisados, que os dados com consistência física variaram entre 52,4% (abril/2008) e 77,1% (julho/2007).

De modo geral, o período noturno foi o que apresentou maior rejeição dos dados de β , por ocorrerem, principalmente, sob condições de atmosfera estável, em que os valores dos gradientes de temperatura e pressão de vapor tornam-se pequenos e aproximam-se da faixa de resolução dos sensores (PEREZ et al., 1999; OHMURA, 1982). Na Tabela 6, percebe-se, também, que os erros mais comuns foram do tipo “C”, igual a 32,2%, tendo variado de 8,2% a 47,6%, com um valor médio de 32,2%. Outro

erro, que também ocorre durante o período em que $(R_n - G)$ é negativo, é do tipo “D”, que correspondeu em apenas 0,1% do total (variando entre 0,0% e 0,5% nos períodos).

O erro tipo “A” que ocorre quando $(R_n - G)$ é positivo, semelhante ao Erro tipo “D”, variou de 0,0% e 0,5% entre os períodos analisados, cuja média para o ciclo de cultivo foi de 0,2%. Este erro ocorre, especialmente, após eventos de irrigação ou precipitação, condicionando a obtenção de valores de H menores que zero, logo que os valores do gradiente são negativos. De acordo com Perez et al. (1999) para serem considerados consistentes, os valores de H deveriam ter sido positivos quando os gradientes eram negativos (PEREZ et al., 1999).

Em relação ao erro tipo “B”, verificou-se que o mesmo respondeu por 4,9%, devido, especialmente, ao maior número de dados rejeitados durante o período diurno entre maio-junho/2008, que atingiu 34,5%.

Tabela 6. Resumo da análise de consistência física dos dados da razão de Bowen (β). Obs.: valores expressos em porcentagem.

Período	PDC*	Tipo de Erro				$(-1 - \partial\epsilon) < \beta < (-1 + \partial\epsilon)^*$	$\beta < -0,75^*$	PDV**
		A*	B*	C*	D*			
Julho/2007	77,1	0,5	0,4	20,4	0,1	23,7	1,5	100,0
Outubro/2007	56,7	0,1	0,4	42,6	0,1	12,7	0,0	100,0
Janeiro/2008	64,2	0,1	0,2	34,0	0,5	14,5	1,5	100,0
Abril/2008	52,4	0,0	0,0	47,6	0,0	6,1	0,0	100,0
Maio-Junho/2008	57,3	0,0	34,5	8,2	0,0	2,1	0,0	80,0
Ciclo	62,1	0,2	4,9	32,2	0,1	12,9	0,4	88,0

Obs.: PDC = percentual de dados consistentes, PDV = percentual de dias válidos

* Número total de dados medidos a cada 15 minutos: 34272

** Número total de dias monitorados: 357

Erro “A”: $(R_n - G) > 0$, $\Delta e > 0$, $\beta < -1 + |\epsilon|$; Erro “B”: $(R_n - G) > 0$, $\Delta e < 0$, $\beta < -1 - |\epsilon|$; Erro “C”: $(R_n - G) < 0$, $\Delta e > 0$, $\beta < -1 - |\epsilon|$; Erro “D”: $(R_n - G) < 0$, $\Delta e < 0$, $\beta < -1 + |\epsilon|$

Dos dados considerados inconsistentes, verificou-se que 12,9% foram devidos à ocorrência de valores de β dentro da faixa de rejeição de dados. O total descartado variou a depender do período analisado, logo que foram observados valores de rejeição, variando entre 2,1% (maio-junho/2008) e 23,7% (julho/2007). Por outro lado, adotando-se valores de $\beta < -0,75$ como inconsistentes (MARIN, 2003; ORTEGA et al., 1996), quando o critério de Perez et al. (1999) não os considera como dados incoerentes, pode-se observar, que poucos dados foram rejeitados ao longo do ciclo, variando entre 0 e 1,5% para os períodos analisados, cuja média foi de 0,4%.

A partir da análise de valores médios para cada período de 15 min e assumindo que, o dia válido refere-se aquele em que pelo menos 80% dos dados diurnos apresentaram consistência física, constatou-se que 88% dos dias (total de 357 dias monitorados) foram caracterizados como válidos para serem utilizados na estimativa dos valores de LE e H nos períodos representativos do crescimento da cultura e para todo o ciclo. Este procedimento foi realizado, considerando-se que a inconsistência dos dados no período diurno ocorre especialmente ao amanhecer e ao entardecer. Este fato está relacionado a inversão térmica, ao passo que, nestes períodos, também ocorrem valores pequenos do LE, de modo que as suas estimativas não proporcionarão mudanças expressivas nos valores diários (OHMURA, 1982; MARIN, 2003; RIGHI, 2004). Os 20% de dados rejeitados, para o período diurno, foram estimados por interpolação, considerando que o $(R_n - G)$ é representado apenas por LE, e o H é igual a zero, quando ocorre a transição de valores de $(R_n - G)$ de positivos para negativos. Adotando este procedimento, verificou-se que o único período em que tiveram valores diários rejeitados foi aquele compreendido entre maio e junho/2008, de modo que 20% dos dias foram considerados inválidos. Ao final do ciclo, observou-se que apenas 12% dos dias foram rejeitados, ou seja, 88% dos dias foram utilizados para análise dos valores do BR e do BE.

Analisando-se os dados de β , LE e H para um dia específico (23/06/2007), nota-se que a maioria dos valores inconsistentes ocorreu no período noturno, onde foram constatados dados de β dentro da faixa de rejeição e inferiores a $-0,75$ (Figuras 48A e 48B), especialmente no período horário entre 18 e 0 h. Neste intervalo, os valores de H foram predominantemente maiores do que zero, enquanto os valores de LE foram negativos. Tal condição ($LE < 0$ e $H > 0$) caracterizou-se como inconsistente do ponto de vista físico. De acordo com os critérios propostos por Perez et al. (1999), quando $(R_n - G) < 0$ e $\beta < -1$, apenas os casos $LE > 0$ e $H < 0$ são possíveis.

Por outro lado, entre às 0 e 8 h, verificou-se que alguns valores de β foram considerados como consistentes ($\beta > 1$), resultando em valores de $LE < 0$ e de $H < 0$. Entretanto, observa-se pela Figura 48B, que a maioria dos valores de β referente ao período diurno apresentaram consistência física, resultando em valores de $LE > 0$ e de $H > 0$, quando $\beta > 0$. Esta situação, ocorrida no dia 23/06/2007, caracterizou-se como uma condição típica, quando comparada aos demais dias monitorados ao longo do ciclo.

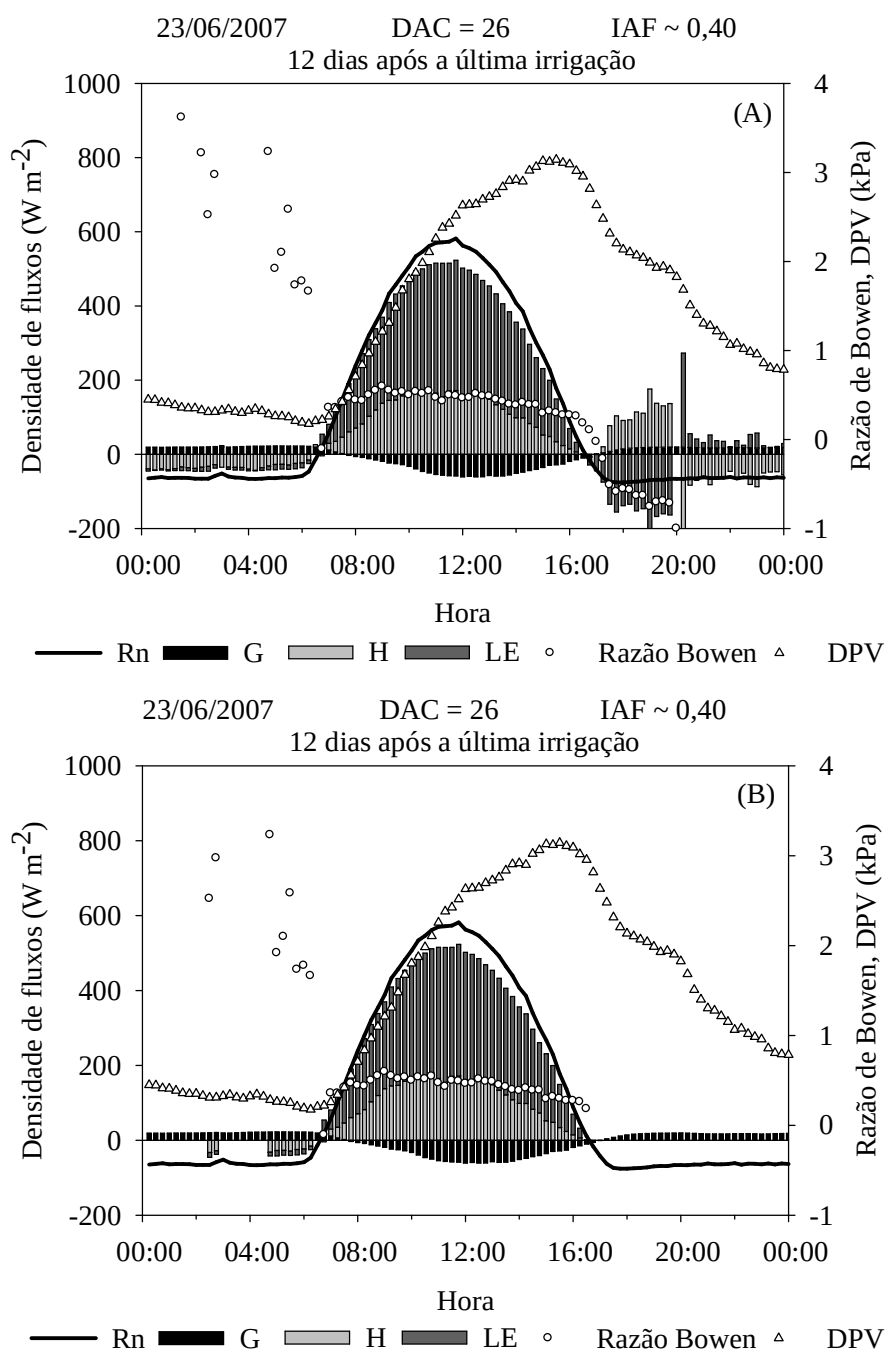


Figura 48. Análise de consistência do método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) para um dia específico (23/06/2007). Assumiu-se os critérios de Perez et al. (1999) e a rejeição dos dados de $\beta < -0,75$. (A) Dia sem análise de consistência, (B) Dia com análise de consistência.

5.3.2. Componentes dos balanços de radiação e de energia

5.3.2.1. Padrões para períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar

A quantificação dos componentes do balanço de radiação e de energia à superfície da cana-de-açúcar é importante para se determinar o uso de água, a eficiência fotossintética e o microclima no dossel da cultura. Os valores médios dos componentes do balanço de radiação e de energia e suas relações para os 5 períodos representativos do crescimento da cultura estão apresentados na Tabela 7. Para estes períodos, considerou-se apenas os dias caracterizados como “válidos”, de acordo com a metodologia proposta por Perez et al. (1999).

O período compreendido entre 34 e 64 DAC (julho/2007) foi caracterizado por valores de radiação solar global (R_g) reduzidos ($16,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), baixo IAF ($\sim 0,6 \pm 0,1$) e ocorrência de apenas um evento de irrigação (90,9 mm) (Figura 5E). Constatou-se, também, que a fração da radiação solar global refletida (R_r), ou seja, o albedo, correspondeu a 16%, em média, devido à baixa cobertura do solo (Figura 38 e 39). Neste mesmo período, o balanço de ondas longas (BOL), durante o período diurno, tornou-se mais negativo ($-4,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (Tabela 7), logo que uma maior quantidade de energia foi perdida pela superfície.

Como resultado, verificou-se que o saldo de radiação (R_n) representou 54% da radiação solar global (R_g) ($\sim 9,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), enquanto o valor do balanço de ondas curtas (BOC) ($13,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi superior ao de R_n . A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) correspondeu, em média, a 47%, visto que este período era caracterizado por uma baixa ocorrência de nebulosidade. Em termos do balanço de energia, o valor de G/R_n foi, em média, igual a 7%, em decorrência da alta incidência de radiação sobre a superfície e o número de eventos de irrigação reduzidos durante este período (Figura 7F). Para um cultivo de cana-de-açúcar sob as condições de sequeiro no município de Sertãozinho-SP, Cabral et al. (2003) observaram, para três dias consecutivos de solo descoberto, valores máximos de G , correspondendo a 30% do R_n . Estes valores são bem superiores aos observados neste estudo e aos determinados por Bastable et al. (1993), para a região amazônica, cujos valores foram de 1% e 5% para um cultivo de pastagem e para floresta, respectivamente.

Tabela 7. Dados médios e partição dos componentes do balanço de radiação e de energia para 5 períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Variáveis	Períodos					Ciclo
	Julho/07	Outubro/07	Janeiro/08	Abril/08	Maio-Junho/08	
DAC	34 a 64	126 a 156	218 a 248	309 a 338	339 a 378	-
IAF	0,6	1,9	4,5	5,3	5,0	-
t _{ar}	23,4	27,1	28,1	25,7	24,4	25,9
DPV	1,30	2,10	2,13	1,01	1,14	1,57
P	3,1	0,0	84,3	13,2	3,1	523,2
I	90,9	363,6	293,2	90,9	90,9	2515
P+I	94,0	363,6	377,5	104,1	94	3038
Rg	16,3	22,8	22,6	17,2	15,38	19,8
Rn	9,1	13,6	13,5	10,9	8,87	11,8
BOC	13,8	17,6	16,9	13,1	11,6	15,8
BOL	-4,2	-4,0	-3,3	-2,2	-2,7	-3,8
Rn/Rg	0,54	0,60	0,60	0,64	0,57	0,59
Rr/Rg	0,16	0,23	0,25	0,24	0,25	0,23
RFA/Rg	0,47	0,49	0,51	0,49	0,46	0,48
LE/Rn	0,69	0,86	0,80	0,84	0,74	0,81
FE*	0,75	0,90	0,82	0,85	0,75	0,81
H/Rn	0,25	0,11	0,17	0,15	0,25	0,16
G/Rn	0,07	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03
β**	0,36	0,10	0,27	0,19	0,41	0,27

DAC = Dias após o corte; IAF = índice de área foliar (m² m⁻²); t_{ar} = temperatura média do ar (°C); DPV = déficit de pressão de vapor d'água (kPa); P = precipitação (mm); I = irrigação (mm).

Unidades: Rg, Rn, BOC e BOL, em MJ m⁻² dia⁻¹; Rn/Rg, Rr/Rg, RFA/Rg, LE/Rn, FE, H/Rn, G/Rn e β, adimensional.

* FE = LE/(Rn-G); ** valores médios obtidos a partir dos dados das 8 às 16 h.

Assumindo apenas os valores do LE e do H, como resultado do saldo da energia disponível (Rn – G) e desprezando àquela armazenada pela vegetação e utilizada na fotossíntese, tem-se que a magnitude dos valores de LE e H pode variar de acordo com as condições de disponibilidade de energia e do conteúdo de água no solo (ORTEGA et al., 1996). Verificou-se, para o período inicial do ciclo da cultura, que os valores de H apresentaram contribuição expressiva no balanço de energia, respondendo por 25% de Rn (Tabela 7), com valores variando entre 1,0 e 5,9 MJ m² dia⁻¹. Sob esta condição, uma maior fração da radiação solar tende aquecer a superfície da cultura e do solo, o que promove uma elevação do fluxo de calor sensível para a atmosfera e, conseqüentemente, um aumento da temperatura do ar (WU et al., 2006).

Notou-se, para o período de julho/2007 (34 a 64 DAC), que os valores médios diários da razão de Bowen ($\beta = H/LE$) mostraram-se elevados (0,36) para o horário entre às 8 e 16 h. De acordo com Cabral et al. (2003), valores de β elevados durante esta fase do crescimento da cana-de-açúcar são comumente observados, logo que as taxas de transpiração das plantas e da evaporação de água no solo são baixas, em decorrência do reduzido nível de cobertura da superfície e da limitada disponibilidade de água no solo. Estes autores obtiveram valores de H variando entre 4 e 6 MJ m² dia⁻¹ ao longo do ciclo da cana-de-açúcar não irrigada, implicando em valores de $\beta > 1$. Por outro lado, nos períodos subsequentes à ocorrência de precipitação, proporcionou determinação de valores de $\beta < 0,50$, mas aumentando, especialmente, nos períodos de entressafras (intervalos entre ciclos de cana-de-açúcar) e na fase de maturação, quando a redução na disponibilidade de água no solo, tornou-se mais efetiva.

Quando se analisou o fluxo de LE , constatou-se que seu valor respondeu por 69% do R_n , em sua maior parte, resultante da evaporação de água do solo, perante a sua alta exposição à radiação solar (Figura 41 e 42). Durante esta fase, verificou-se que os valores de LE variaram entre 3,8 e 13,4 MJ m² dia⁻¹. Notou-se, também, uma maior magnitude dos valores de LE/R_n em comparação à fração evaporativa ($FE = LE/(R_n - G)$) (Tabela 7), que apresentou valores médios da ordem de 75%, em decorrência da maior quantidade do fluxo de calor que penetrou no solo sob condições de baixo nível de cobertura (LI et al., 2006).

No período subsequente (126 a 156 DAC, outubro/2007), observou-se que os eventos de irrigação tornaram-se mais frequentes (turno de rega, em média, de 8 dias), enquanto o IAF foi de $1,9 \pm 0,2$ m² m⁻² e os valores de radiação solar global (R_g), bem como do déficit de pressão de vapor d'água (DPV), foram superiores quando comparados aos valores do período anterior (Figuras 7B e 7C). Como, nesta fase, a cobertura do solo já se apresentava completa ($f_{RFA} > 80\%$) (Figura 41 e 42), uma maior quantidade de radiação era interceptada pela cultura (Figura 25 e 26), resultando em valores menos negativos de BOL ($-4,0$ MJ m⁻² dia⁻¹) (Tabela 7), cuja variação foi entre -2,2 e $-4,7$ MJ m⁻² dia⁻¹. Como decorrência, o valor da relação R_n/R_g alcançou 60%, enquanto, no período diurno, o R_n foi representado, em sua maior parte, pelo BOC ($17,6$ MJ m⁻² dia⁻¹). A RFA disponível para a cultura foi 49% da R_g , enquanto a radiação refletida correspondeu a 23% (Tabela 7).

Os valores de G tornaram-se menores em relação aos obtidos no período antecedente, respondendo por 3% do R_n , o mesmo ocorrendo com os valores de H/R_n que foram de 11%. Os valores diários de G variaram de $-0,8$ a $0,6$ MJ m⁻² dia⁻¹. Por

outro lado, a magnitude dos valores de H foi de 0,8 a 3,4 MJ m⁻² dia⁻¹. Neste período, o aumento da superfície vegetada, a maior disponibilidade de água no solo e os altos valores de Rg favoreceram a partição do Rn para o LE, de modo que foram evidenciados os maiores valores médios (86%) (Tabela 7), com os fluxos variando entre 9,2 e 18,1 MJ m⁻² dia⁻¹. Resultados similares foram obtidos por Cabral et al. (2003), que obtiveram valores máximos de LE, em torno de 16 MJ m⁻² dia⁻¹, como resposta ao aumento do conteúdo de água no solo e ao IAF da cana-de-açúcar não irrigada.

Em decorrência da menor contribuição dos valores de G em relação à energia disponível (Rn - G), foi evidenciado que os valores de FE mostraram-se muito mais próximos aos valores de LE/Rn. Os valores de β apresentaram-se, em média, iguais a 0,10. Para o mesmo período do ciclo da cana-de-açúcar não irrigada (126 a 156 DAC), variedade SP 70-1143, cultivada no município de Pilar-AL, durante a estação chuvosa, Toledo Filho (2001) obteve valores de LE variando entre 8,88 e 10,96 MJ m⁻² dia⁻¹, resultando em uma relação de LE/Rn entre 63% e 71%. A fração de H em relação aos valores de Rn variaram entre 26% e 28%, possuindo magnitudes médias de 3,3 e 4,9 MJ m⁻² dia⁻¹. Por outro lado, uma maior quantidade de energia penetrou no solo, respondendo por um G entre 0,6 e 1,6 MJ m⁻² dia⁻¹, os quais corresponderam por um fração de 5% a 9% de Rn, respectivamente.

Entre os 218 e 248 DAC (janeiro/2008), a fração Rn/Rg não variou em relação ao período anterior, correspondendo a 60%. Contudo, um ligeiro aumento da fração da radiação refletiva foi observado (25%). O BOC e BOL variaram pouco em resposta das mudanças das características da superfície, quando comparados ao período precedente, apresentando valores de 16,9 e -3,3 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente (Tabela 7). Com o aumento da nebulosidade local, percebeu-se uma elevação nos valores da relação entre a RFA e Rg (em torno de 51%), tendo o valor médio de Rg sido igual a 23,1 MJ m⁻² dia⁻¹. Nesse período, apesar da fração de interceptação da cultura ter sido elevada ($f_{RFA} > 96\%$), o valor médio de G ainda representou 3% do Rn (Tabela 7), com valores variando de -0,6 a 0,2 MJ m⁻² dia⁻¹. A relação H/Rn aumentou, como resposta do tombamento da cana-de-açúcar, que promoveu uma redução da área foliar exposta à atmosfera (Figuras 25 e 26), resultando em redução da troca de vapor d'água entre a cultura e a atmosfera. Por outro lado, não foram observadas reduções da disponibilidade de água para a cultura (Figura 7F).

Durante este período, os valores mínimos e máximos observados de H foram de 1,0 e 7,24 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Como resultado, constatou-se que os valores de β mostraram-se maiores aos obtidos no período anterior, alcançando valores médios

de 0,27. Devido o aumento de H, a partição de Rn para LE foi de 80%, enquanto os valores de FE foram, em média, iguais a 82%. Toledo Filho (2001) verificaram que, apesar do aumento do IAF da cana-de-açúcar, cultivada em sequeiro, não houve aumento da relação LE/Rn, quando comparada à fase de perfilhamento e estabelecimento da cultura, mesmo durante a estação chuvosa, cujo valores médios variaram entre 65% e 71%. Entretanto, os valores de H/Rn aumentaram (entre 27% e 29%), como resultado da diminuição da relação G/Rn, cujos valores oscilaram entre 3% e 8%.

No período entre os 309 e 338 DAC (abril/2008), o IAF da cana-de-açúcar atingiu o valor de $5,3 \pm 0,1$, próximo ao IAF máximo da cultura que foi de $5,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Figuras 25 e 26), quando então a disponibilidade de radiação, em termos de Rg, foi de $17,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 7B). Este período caracterizou-se, também, por compreender parte da estação chuvosa e, por conseguinte, não terem ocorridos eventos reduzido de irrigação (Figura 7F). Em escala diária, o BOC e o BOL apresentaram valores de $13,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $-2,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Tabela 7), respectivamente. Diferentemente dos três períodos precedentes, neste observou-se uma redução mais evidente dos valores de BOL durante a noite, provavelmente, como resultado de uma redução da emissão efetiva de radiação de ondas longas pela atmosfera. Por outro lado, evidenciou-se uma ligeira redução da relação Rr/Rg (24%), em decorrência do acúmulo de água da precipitação no dossel e na superfície do solo, que promoveu uma redução da radiação refletida. Como resultado das mudanças nos valores de BOC, BOL e Rg, a relação entre Rn/Rg apresentou um aumento quando comparado ao período anterior, respondendo por 64%. Neste mesmo período, a RFA respondeu por 49% da Rg.

Em termos do balanço de energia, a relação entre G/Rn foi reduzida em comparação aos períodos anteriores, tendo seus valores médios diários oscilado entre $-0,2$ e $0,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, e representando, em média, 1% dos valores de Rn (Tabela 7). O valor de H foi em torno de 15% de Rn ($0,09$ e $3,11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Por outro lado, a magnitude dos valores de LE foi de $2,9$ a $12,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respondendo por 84% dos valores de Rn. Como resposta da menor contribuição de G, os valores da fração evaporativa foram, em média, iguais a 85%. Combinando os valores de H e LE, percebe-se que os valores de β foram em média iguais a 0,19.

No período compreendido entre os 339 e 378 DAC (maio-junho/2008), observou-se que o valor de BOL foi mais negativo ($-2,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), como resposta da suspensão da irrigação (Figura 7F), visando promover a maturação da cultura, e devido à redução do IAF ($5,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) (Figuras 25 e 26). Por outro lado, o BOC foi, em média,

igual a $11,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Tabela 7). Apesar da redução da radiação solar global ($15,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) durante o período, foi constatado uma redução na relação R_n/R_g (57%). Em relação aos períodos anteriores, a relação R_r/R_g apresentou um pequeno aumento (25%). A relação entre R_{FA}/R_g tendeu a reduzir, por compreender um período de diminuição da nebulosidade, atingindo o valor médio de 48%. Verificou-se que os valores de H responderam por 25% do R_n , resultando em valores de H entre 1,2 e $8,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, enquanto o G oscilou entre -0,2 e $0,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Desta forma, os valores de LE/R_n e da FE foram menores em relação ao período anterior, correspondendo a 74% e 75%, respectivamente. Os valores de LE variaram entre 2,9 e $12,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Nesse período, os valores médios de β foram iguais a 0,41.

5.3.2.2. Padrões médios horários

Exemplos dos padrões médios horários da densidade de fluxos dos componentes do balanço de radiação e de energia estão demonstrados nas Figuras 49 e 50. Concomitantemente, na Figura 51, é possível observar as suas partições horárias, que foram calculadas para o intervalo em que a R_g apresentou valores positivos. Os resultados são semelhantes àqueles observados em outros estudos de micrometeorologia. Contudo, suas magnitudes variaram expressivamente com o ângulo de inclinação dos raios solares, condições de nebulosidade e com a sazonalidade. Os componentes que dependem das características dossel da cana-de-açúcar sofreram também alterações por causa de modificações da cobertura e do conteúdo de água no solo, como foram os casos da radiação refletida, da radiação de ondas longas emitida pela superfície, do saldo de radiação e suas partições em fluxo de calor no solo, sensível e latente.

Analisando-se a disponibilidade média de radiação solar global (R_g), no horário de 11h45 e às 12h15, constatou-se valores iguais a $658 \pm 170 \text{ W m}^{-2}$, para o período de 339 a 378 DAC (maio-junho/2008) (Figura 49E). Por outro lado, mostrou-se inferior ao observado no período de 126 a 156 DAC (outubro/2007) (Figura 49B), cujo valor foi de $920 \pm 73 \text{ W m}^{-2}$, ambos ocorridos em resposta ao ângulo de declinação solar e à condição atmosférica local. Observou-se para este último período, um baixo desvio padrão, o que caracteriza a predominância de condições de céu claro. O mesmo comportamento foi constatado para os valores do saldo de radiação (R_n), em que as maiores magnitudes ocorreram no período de 126 a 156 DAC (outubro/2007), resultando em valores

máximos médios (entre às 11h45 e 12h15) de $748 \pm 68 \text{ W m}^{-2}$. Por outro lado, no período de 339 a 378 DAC (maio-junho/2008), os seus valores decresceram para $513 \pm 149 \text{ W m}^{-2}$ (Figura 49E).

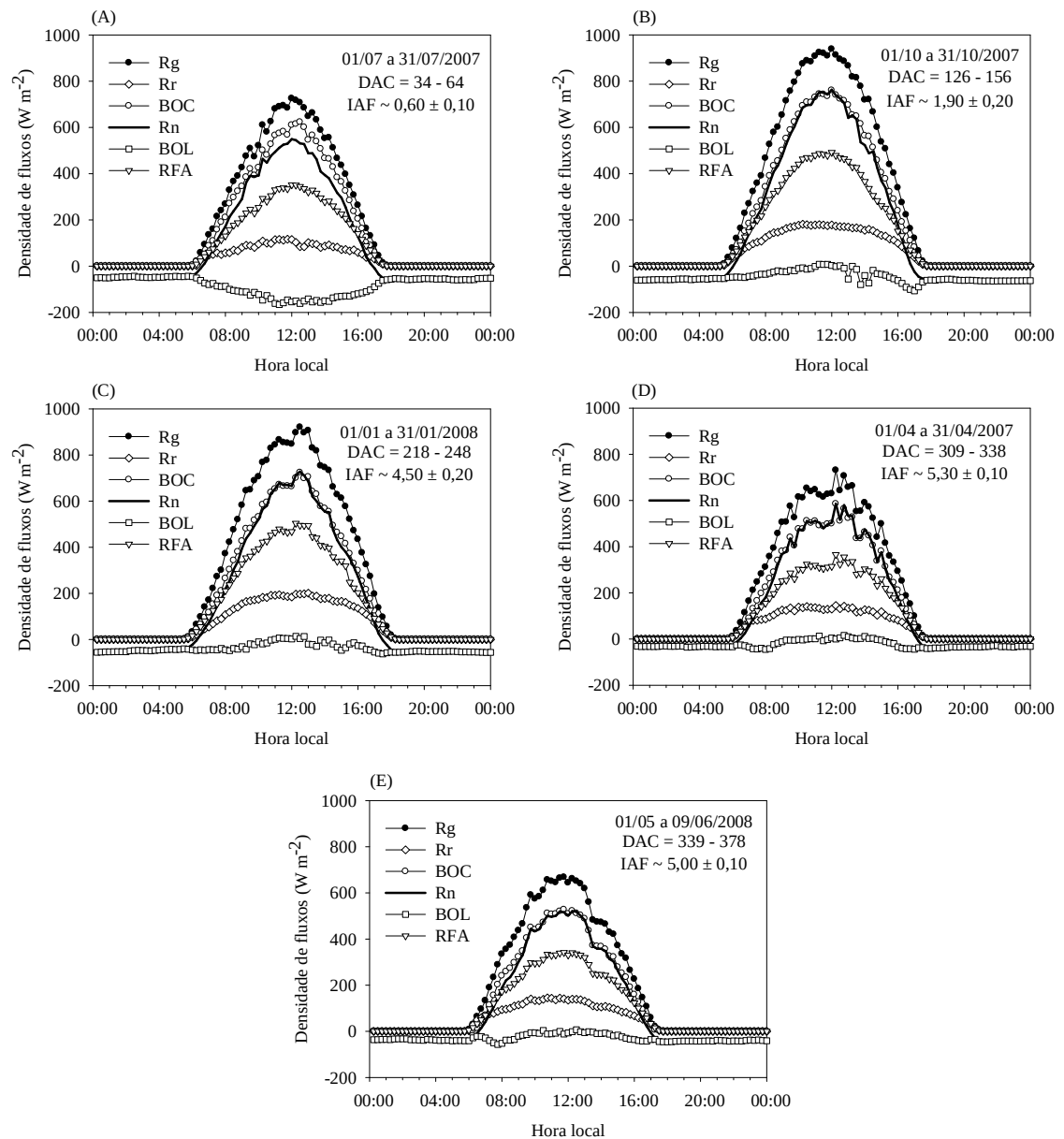


Figura 49. Padrões médios horários da densidade de fluxos dos componentes do balanço de radiação para 5 períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

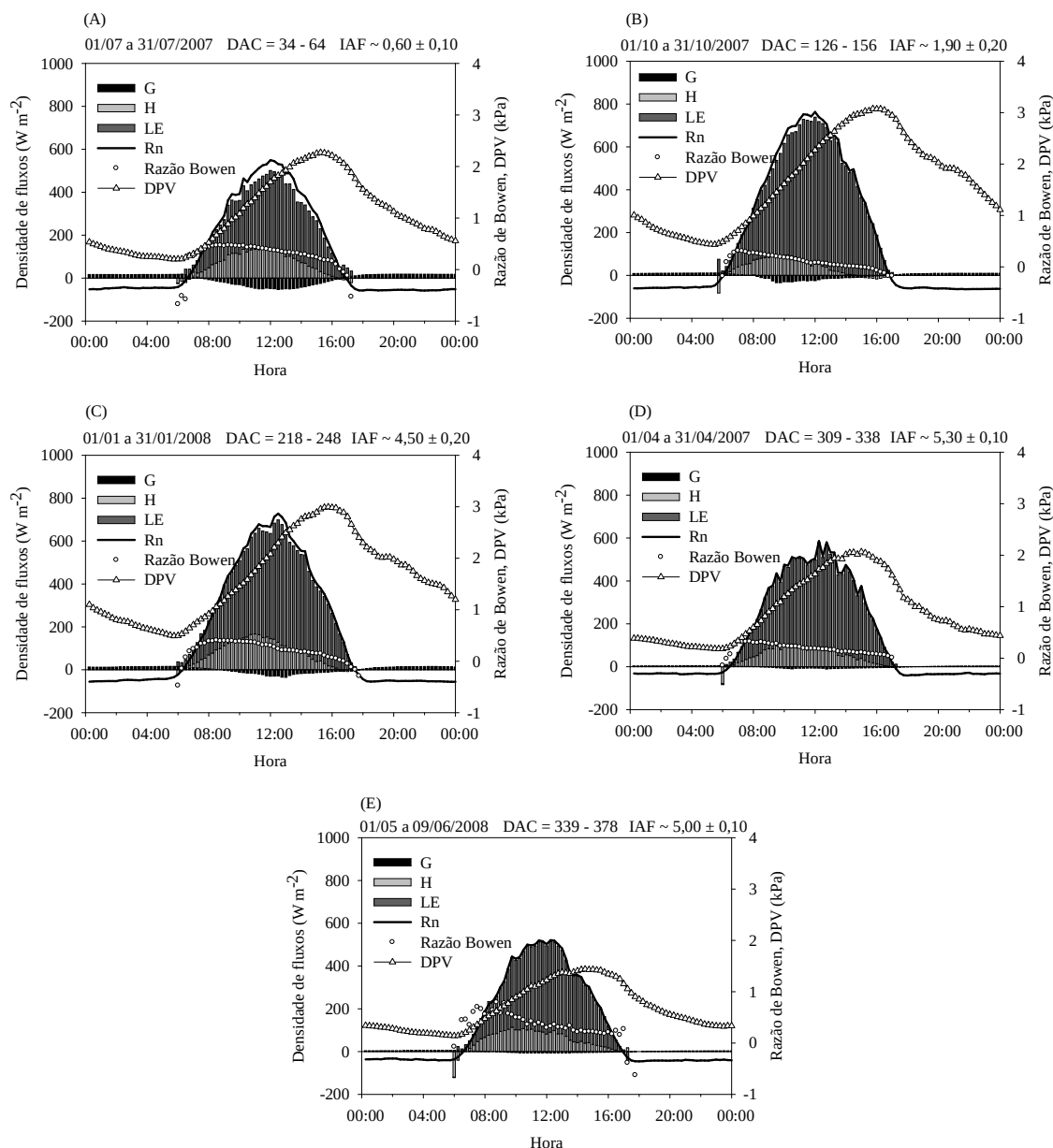


Figura 50. Padrões médios horários da densidade de fluxos dos componentes do balanço de energia para 5 períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

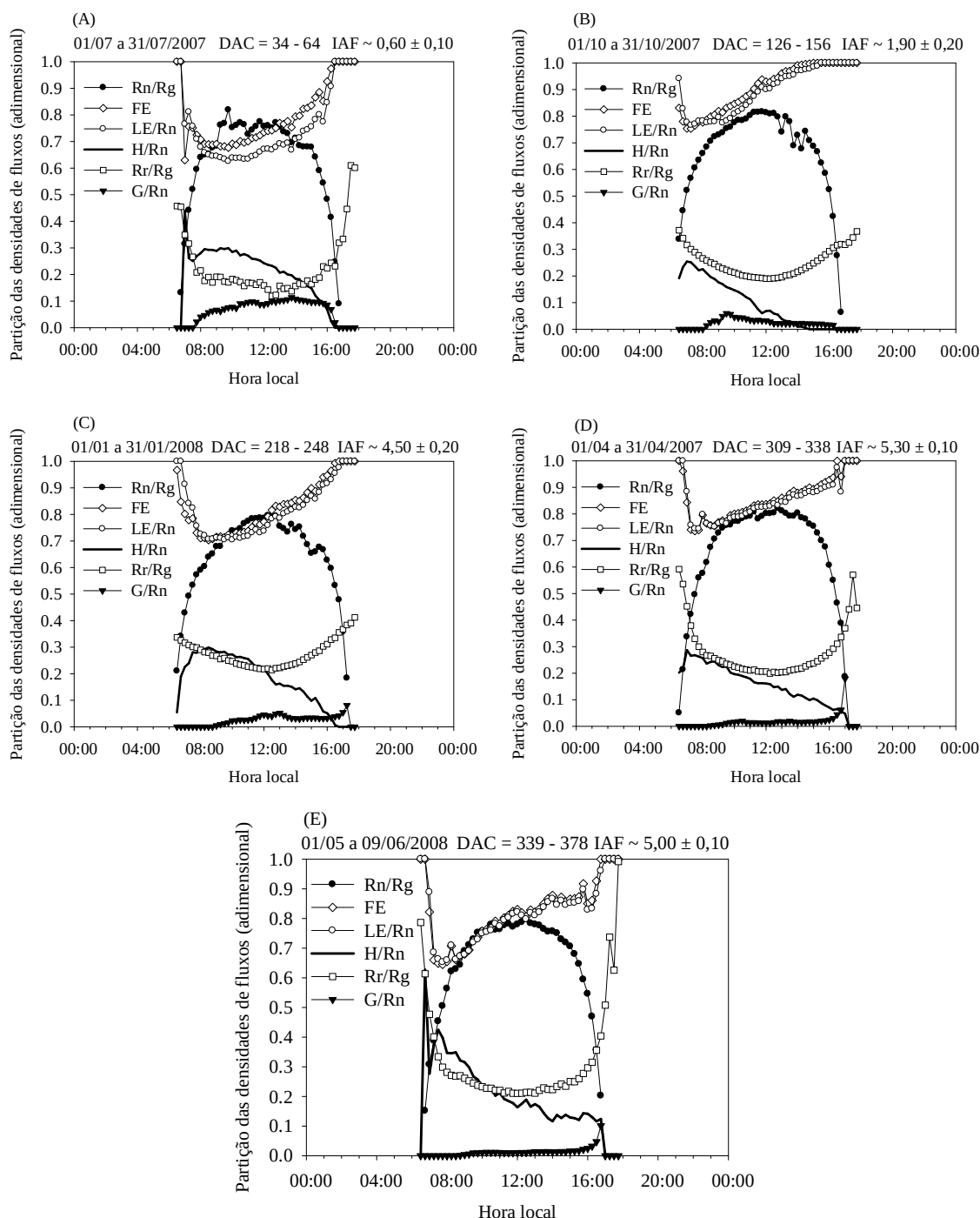


Figura 51. Partição média horária dos componentes do balanço de radiação e de energia para 5 períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Ao longo do dia, observou-se que a fração de R_n/R_g tendeu a ser baixa no início e final do período diurno, logo que a quantidade de energia incidente na superfície era inferior àquela emitida pela mesma. Este comportamento foi notoriamente observado para todos os períodos. Concomitantemente, a partir dos valores de R_g e R_n , foram determinadas as suas partições diárias em relação aos componentes dos balanços de radiação (R_r) e de energia (LE , H , G) (Figura 51), com o objetivo de se melhor conhecer a importância de cada um dos seus componentes nos diferentes processos e respostas das plantas às condições ambientais vigentes (BADOCCHI et al., 2001; STEDUTO & HSIAO, 1998a).

De modo geral, verificou-se que a fração da radiação refletida (R_r) em relação a R_g (R_r/R_g) foi influenciada pela inclinação do ângulo solar. Assim, foram encontrados valores mais baixos ao meio-dia, quando então a quantidade de radiação refletida era pequena, enquanto ao nascer e ao pôr-do-sol, os valores de R_r/R_g eram altos. No período compreendido entre 34 e 64 DAC (julho/2007), os valores médios de R_r/R_g foram iguais, em média, a $16 \pm 1\%$, entre às 11h45 e 12h15 (Figura 51A), correspondendo a $112 \pm 8 \text{ W m}^{-2}$ (Figura 49A). Em contraste, no início e no final do período diurno, foram verificados valores iguais a $42 \pm 6\%$ e $55 \pm 9\%$, respectivamente.

Por outro lado, nos dois períodos seguintes (126 – 156 DAC, outubro/2007, e 218 – 248 DAC, janeiro/2008), os efeitos do ângulo solar sobre a relação R_r/R_g foram reduzidos, de modo que ao nascer e ao pôr-do-sol os valores foram iguais a $34 \pm 3\%$ e $35 \pm 2\%$, para outubro/2007, e a $33 \pm 1\%$ e $40 \pm 1\%$, para janeiro/2008 (Figuras 51B e 51C). Os valores máximos médios de R_r/R_g (entre às 11h45 e 12h15) foram de $19 \pm 0\%$ e $22 \pm 0\%$, correspondendo a $175 \pm 3 \text{ W m}^{-2}$ e $189 \pm 7 \text{ W m}^{-2}$ (Figuras 49B e 51C) para os dois períodos, respectivamente.

Com o decorrer do ciclo, observou-se que as diferenças entre os valores de R_r/R_g ao nascer e pôr-do-sol, para os períodos de 309 a 338 DAC (abril/2008) e de 339 a 378 DAC (maio-junho/2008), voltaram a aumentar, devido o efeito da inclinação dos raios solares, alcançando $53 \pm 1\%$ e $49 \pm 1\%$ e $63 \pm 15\%$ e $78 \pm 19\%$ (Figuras 51D e 51 E), respectivamente. Por outro lado, os valores máximos médios do dia (entre às 11h45 e 12h15) foram de $20 \pm 0\%$ e $21 \pm 0\%$, os quais correspondem a $135 \pm 9 \text{ W m}^{-2}$ e $139 \pm 3 \text{ W m}^{-2}$ (Figuras 49D e 49E), respectivamente.

Com relação aos componentes do balanço de energia, foi possível notar que, nas primeiras horas após o amanhecer (antes das 8 h), a maior parte da energia disponível ($R_n - G$) era utilizada pelo LE para promover, provavelmente, a evaporação da água existente tanto na superfície do solo quanto no dossel da cultura. A partir deste

momento, constatou-se que o H ganha importância, uma vez que a superfície começa a tornar-se mais aquecida. Contudo, verificou-se que a contribuição de H sempre foi inferior a do LE (Figuras 50 e 51). Para o período entre 34 e 64 DAC (julho/2007), quando a radiação solar global ainda era baixa, foi possível identificar um fluxo maior de H da superfície para a atmosfera entre às 10 e 12 h, respondendo por $29\pm 1\%$ do R_n . Uma redução mais lenta é evidenciada até o pôr-do-sol (Figura 51A). Como consequência, pode-se verificar que a contribuição do LE, nesse período, torna-se cada vez mais pronunciada quando comparada a do H (Figura 51A). O LE apresentou valores maiores durante o período da tarde, comparado aos horários da manhã, logo que o déficit de pressão de vapor (DPV) era elevado, condicionando um aumento da taxa de evapotranspiração.

Como resultados das contribuições de H e LE ao longo do período diurno, os valores de β tornaram-se baixos ao amanhecer, aumentando no período entre as 8 e 12 h da manhã ($\beta \sim 0,44\pm 0,03$) e, em seguida, reduzindo até o entardecer ($0,28\pm 0,07$) (Figura 50A). Comportamento similar foi constatado para os demais períodos (Figuras 50B a 50E). Por outro lado, antes e depois do amanhecer e entardecer, foram obtidos valores negativos de β , indicando que a superfície da cultura e, ou, do solo estavam mais frias do que a do ar, de modo que o fluxo de H ocorreu da atmosfera em direção às mesmas. O G tendeu a apresentar valores maiores durante o período da tarde (Figura 50A), mostrando a influência da arquitetura das plantas sobre a quantidade de radiação solar global que atinge a superfície do solo. Analisando-se a variação da relação LE/ R_n e da FE, ao longo do período diurno, constatou-se que os valores médios de LE foram de $65\pm 1\%$ e de $72\pm 5\%$, para os intervalos entre às 8 e 12 h e às 12 e 16 h, enquanto os de FE foram de $70\pm 2\%$ e de $80\pm 6\%$, respectivamente.

Para o período compreendido entre os 126 e 156 DAC (outubro/2007) (Figura 50B), as magnitudes dos valores de H mostraram-se maiores durante a manhã. No entanto, a partir das 15 h, os seus valores tornaram-se negativos, indicando que a superfície da cultura encontrava-se mais fria do que o ar, em função do aumento da evapotranspiração da cultura, decorrente da baixa nebulosidade e dos altos valores de radiação solar global e do elevado déficit de pressão de vapor d'água (DPV) (Figura 50B). Os valores de β tornaram-se maiores durante a manhã (entre 8 e 12 h, $\beta \sim 0,18$) reduzindo acentuadamente durante a tarde (Figura 50B). Resultados similares foram verificados por Steduto & Hsiao (1998a) para o milho, quando esta cultura apresentava cobertura completa do solo, em que os valores de β foram maiores durante a manhã, mas que reduziram no período da tarde até atingir valores negativos após as 15 h, como

resultado da inversão de H, caracterizando uma superioridade dos valores da temperatura do ar em relação à da superfície da cultura.

O aumento do IAF, associado com a arquitetura das plantas, influenciou para uma menor contribuição de G, resultando em uma maior interceptação de radiação pelo dossel da cultura, que promoveu uma redução dos valores de G, especialmente durante o período da tarde (Figura 50B). Esta influência, também esteve associada aos ângulos de declinação solar e azimutal em relação ao local de disposição dos fluxímetros de solo (latitude da área experimental: 9°28'07"S), logo que, durante o mês de outubro o sol estava mais próximo do zênite quando comparado aos demais períodos analisados. Estes resultados, proporcionaram a obtenção de pequenas diferenças entre os valores de LE/Rn e FE (Figura 51B). Isto se tornou, mais evidente ainda nos períodos seguintes: 218 – 248 DAC (janeiro/2008), 309 – 338 DAC (abril/2008) e 339 – 378 DAC (maio-junho/2008) (Figura 51C, 51D e 51E).

Analisando-se a Figura 51C, foi possível verificar, para o período 218 a 248 DAC (janeiro/2008), como já mencionado, um aumento de H, quando comparado com o período anterior, resultante, do tombamento da cana-de-açúcar. Neste período, entre as 10 e 12 h, os valores de H estiveram em torno de $27 \pm 3\%$, ao passo que nos horários da tarde foi de $14 \pm 5\%$. Por outro lado, os valores médios de LE foram de $72 \pm 1\%$, enquanto à tarde foi de $83 \pm 5\%$. Estes resultados indicam que uma maior parte da energia disponível ($R_n - G$) pode ter sido utilizada no aquecimento da superfície vegetada, em relação ao período antecedente. O G apresentou maiores valores, especialmente, após o meio-dia, em decorrência da inércia térmica (Figura 50C). Entre às 8 e 12 h, o valor médio de β foi, em média, igual a $0,37 \pm 0,03$, enquanto nos horários da tarde foi de $0,18 \pm 0,06$. Em termos de FE, constatou-se que os valores médios oscilaram em torno de $73 \pm 2\%$ pela manhã, enquanto que à tarde estiveram próximos de $86 \pm 5\%$ (Figura 51C).

No período de 309 a 338 DAC (abril/2008) (Figura 50D), mesmo compreendendo o final da estação chuvosa e a ocorrência de apenas um evento de irrigação no dia 29/04/2007, foi possível verificar que os valores médios diários de β não foram elevados em relação ao período anterior, o que, provavelmente, esteja associada à pequena redução da disponibilidade de água (Figura 7F), ao aumento do IAF (Figuras 25 e 26), à redução da quantidade de energia disponível ($R_n - G$) e ocorrência de valores menores de DPV (Figura 7C). Para a manhã, foram obtidos valores médios em torno de $0,25 \pm 0,04$, enquanto à tarde foi de $0,13 \pm 0,04$. Pela Figura 50D, percebe-se que o DPV máximo, ao longo do dia, foi em torno de 2 kPa. Constatou-

se, também, que a FE respondeu por $80\pm6\%$ e $88\pm3\%$, durante a manhã e à tarde, ao passo que o LE foi de $79\pm3\%$ e $87\pm3\%$ (Figura 51D), respectivamente.

Contudo, comparando estes resultados com os obtidos no período subsequente (339 – 378 DAC, maio-junho/2008) (Figura 51E), quando ocorreu a suspensão da irrigação (Figura 7F), verificou-se que os valores de FE foram menores ($74\pm6\%$ pela manhã e $85\pm3\%$ pela tarde). O fluxo de H aumentou neste período, resultando em elevação dos valores de β tanto no período entre 8 e 12 h (0,49) quanto no período da tarde (0,32) (Figura 50E).

5.3.2.3. Efeitos das condições de nebulosidade variável

Para analisar os efeitos da variabilidade das condições de nebulosidade sobre os componentes do balanço de energia, foram selecionados 2 dias consecutivos que representaram dois dos cinco períodos representativos do crescimento da cultura.

Os padrões horários para os dias parcialmente nublados (17/07/2007 e 05/01/2008) e os dias de céu claro (18/07/2007 e 06/01/2008) são demonstrados na Figura 52. Os dias 17/07/2007 e 18/07/2007 corresponderam aos 50 e 51 DAC, quando o IAF da cultura era reduzido (Figuras 25 e 26), sendo que o Rg apresentou valores de $16,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $20,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, nos dias 05/01/2008 (222 DAC) e 06/01/2008 (223 DAC), o IAF da cultura já estava bem desenvolvido, sendo que o Rg apresentou, nessa ordem, valores de $18,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $26,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Assumindo que a disponibilidade de água para a cultura não variou significativamente entre os dias sucessivos, de modo a promover efeitos expressivos sobre a resposta da cultura, observou-se que, sob condições de céu parcialmente nublado, uma menor quantidade de energia é destinada ao H. No dia 17/07/2007 (Figura 52A), das 8 às 12 h, verificou-se que o H foi reduzido quando comparado ao mesmo período do dia 18/07/2007 (Figura 52B), em decorrência da menor incidência de radiação, que resultou em um menor aquecimento da superfície do solo e da cultura e, conseqüentemente, baixo fluxo ascendente. Como resultado, os valores de β , durante este mesmo intervalo de tempo, tenderam a ser menores, indicando que uma maior fração da energia disponível foi destinada ao fluxo de LE.

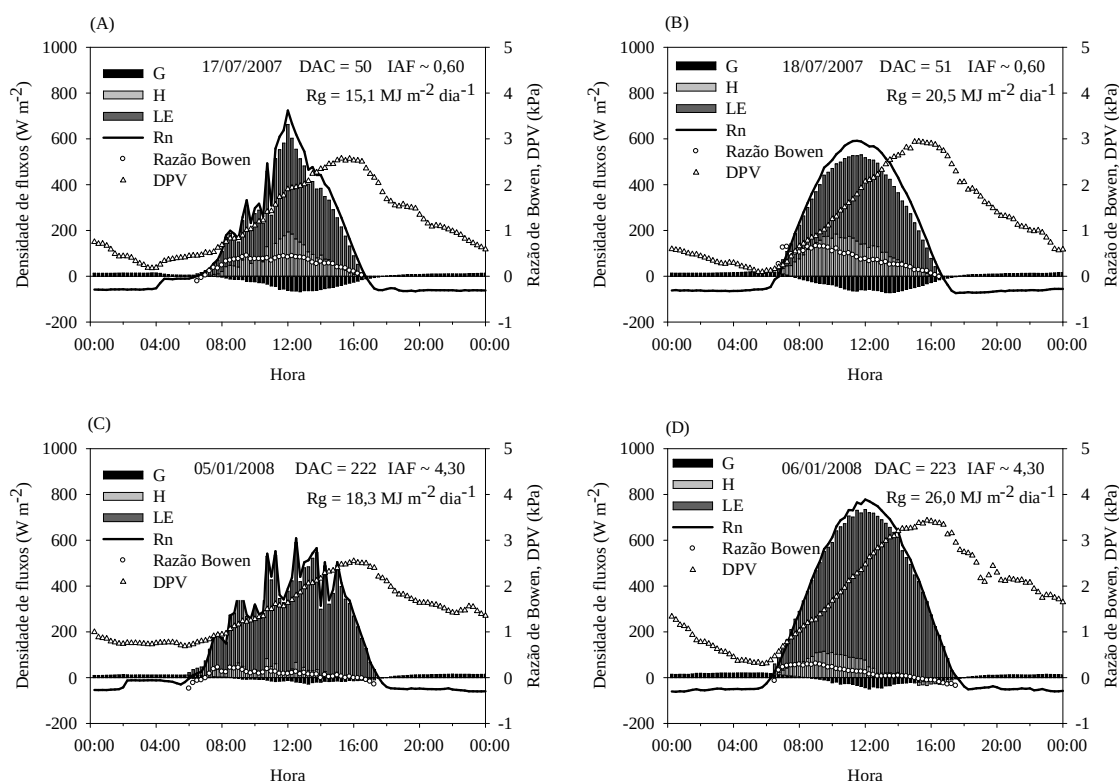


Figura 52. Padrões diurnos dos componentes do balanço de energia para dias com condições de nebulosidade variável, durante o ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Neste mesmo dia (17/07/2007), o valor máximo de H ocorreu em torno do meio dia, ao passo que no período da tarde, quando as condições de nebulosidade foram menores, os valores de H foram reduzidos em função do aumento do DPV e da diminuição da energia disponível. Ao final do dia, a partição em relação ao Rn foi de 70% para LE e de 19% para H, enquanto o G respondeu por 11%. Para o dia 18/07/2007, o valor de H foi maior entre 8 e 12 h, diminuindo durante o período da tarde devido ao aumento de G e LE. Em relação ao G, não foram verificadas influências expressivas em relação aos 2 dias, logo que o maior fluxo para o solo ocorreu durante o período da tarde, ao passo que os efeitos da nebulosidade ocorreram, de maneira mais pronunciada, durante o período da manhã. Os valores diários de LE, H e G responderam por 68%, 21% e 11% em relação ao Rn, respectivamente.

Por outro lado, quando o IAF da cultura e o conteúdo relativo de água no solo são maiores, sob condições de céu nublado, a partição durante o período da manhã tendeu a ocorrer especialmente para LE (Figura 52C e 52D). Para o dia 05/01/2008 (222 DAC), as condições de nebulosidade ocorreram praticamente durante todo o período diurno, de modo que resultaram em valores de H mais baixos, quando comparado ao dia

seguinte de céu claro (06/01/2008, 223 DAC). Uma maior partição de energia para LE foi verificada, de modo que os valores de β foram baixos ao longo do dia. No dia 06/01/2008, devido à maior incidência de radiação sobre a superfície, observou-se que o H foi maior entre 8 e 12 h, reduzindo no período da tarde, onde se verificou a inversão do sinal de H, demonstrando que a temperatura do ar tornou-se maior do que a temperatura da superfície.

Em relação ao G, observou-se que no dia 06/01/2008, quando a incidência de radiação foi maior, os valores foram superiores aos do dia 05/01/2008. Porém, quando a análise foi realizada em termos diários, verificou-se uma ligeira superioridade do H, sob condições de céu nublado, quando comparado com os dias de céu claro, devido neste último ter sido observado maior contribuição dos valores de LE durante o período da tarde e os maiores valores de G. O LE, H e G diários, em relação ao Rn, corresponderam a 73%, 25% e 2% para o dia 05/01/2008, respectivamente, enquanto que, para o dia 06/01/2008, responderam por 75%, 23% e 3%, respectivamente.

5.3.2.4. Efeitos da disponibilidade de água no solo

Na Figura 53 estão apresentados os padrões diurnos da densidade de fluxos dos componentes do balanço de energia para 4 dias do período inicial de crescimento da cana-de-açúcar, nos quais o IAF da cultura (variando entre 0,50 e 0,60 m² m⁻²) e o Rg (variando entre 19,2 e 19,9 MJ m⁻² dia⁻¹), ainda, eram semelhantes entre os dias. Contudo diferenciavam-se quanto ao número de dias após o último evento de irrigação (4, 12, 17 e 21 dias) e aos valores de DPV. Estes dias corresponderam a 02, 10, 15 e 19/07/2007, sendo que o último evento de irrigação ocorreu no dia 28/06/2007.

Inicialmente, observou-se que os valores de G foram de 5%, 7%, 11% e 13% para os 4, 12, 17 e 21 dias após a irrigação, demonstrando a influência do conteúdo de água no solo nas magnitudes deste componente. Por outro lado, ao analisar-se os valores de H, foi possível constatar que os mesmos aumentaram até os 17 dias após a irrigação, com valores em relação ao Rn na ordem de 13%, 26% e 33%, respectivamente. Em contraste, os valores de LE diminuíram, respondendo por 82%, 67% e 56%, respectivamente. Para os três primeiros dias (4, 10 e 17 dias após a irrigação), constatou-se que os valores médios diários de DPV foram baixos (1,15, 1,08 e 1,18 kPa, respectivamente) (Figura 53). No entanto, quando a demanda atmosférica aumentou para 1,48 kPa, aproximadamente, verificou-se uma ligeira elevação dos valores de LE

aos 21 dias após a irrigação, e redução dos valores de H, quando comparados àqueles obtidos aos 17 dias após a irrigação. Os valores dos fluxos aos 21 dias após a irrigação foram 67% para o LE e 20% para o H.

Estes resultados indicam que a cana-de-açúcar tendeu a fechar os estômatos, visando reduzir a troca de água com a atmosfera, à medida que a disponibilidade de água no solo foi reduzindo e o DPV, ainda era baixo. Esse fato proporcionou uma maior transferência de H do dossel da cultura para a atmosfera. Contudo, quando o DPV aumentou, o fluxo de LE foi maior, possivelmente, como artifício da cultura visando evitar o aquecimento do seu dossel.

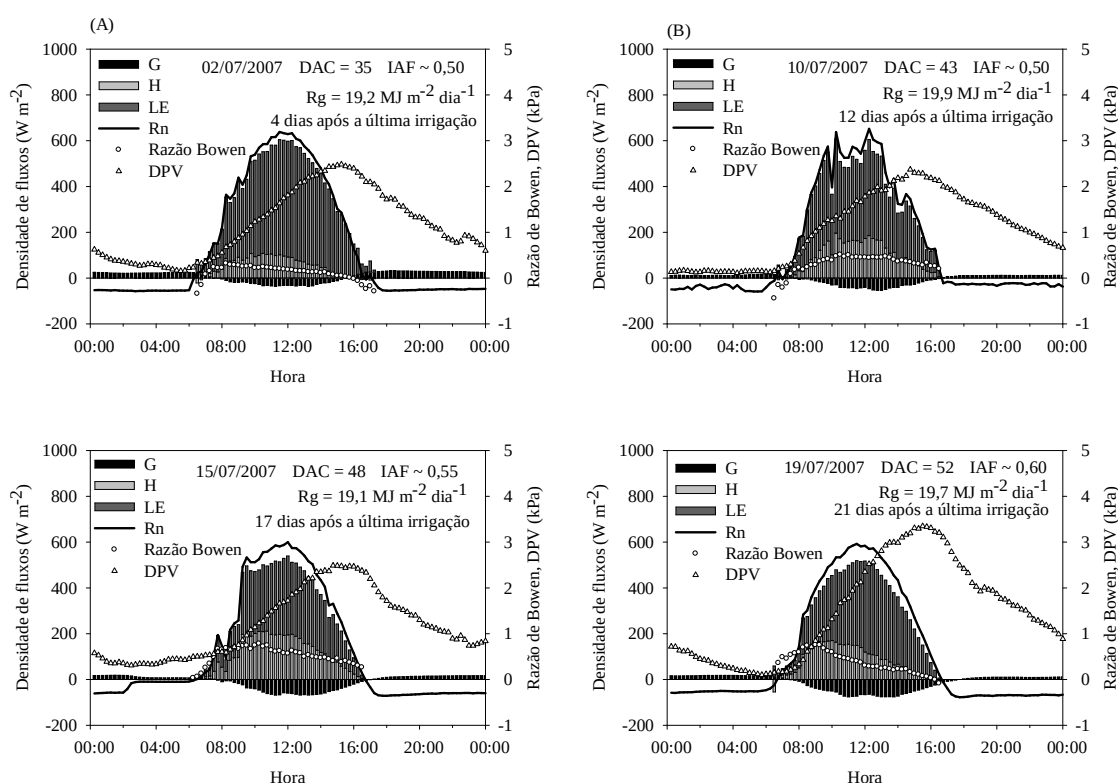


Figura 53. Padrões médios horários dos componentes do balanço de energia para diferentes dias após o último evento de irrigação, durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Em termos horários, observa-se pela Figura 53 que, durante os 4, 12 e 17 dias após a última irrigação, os valores de H tornaram-se maiores, especialmente entre o período compreendido entre às 10 e 14 h. Por outro lado, aos 21 dias após a irrigação, nos horários da tarde, os valores de LE foram mais pronunciados, como resposta do aumento do DPV. A relação entre a contribuição dos valores de LE e H, ao longo do dia, pode ser analisada por meio dos dados de β , quando se verificou, na maioria dos casos, os maiores valores ocorrendo entre os horários de 8 às 12 h, sendo igual a 0,24, 0,38, 0,68 e 0,56, para os 4, 12, 17 e 21 dias após a última irrigação. Em contraste, entre as 12 e 16 h, os valores foram de 0,10, 0,38, 0,48 e 0,19, respectivamente, com dados médios diários, nessa ordem, iguais a 0,17, 0,38, 0,58 e 0,38.

5.3.2.5. Análise sazonal dos componentes dos balanços de radiação e de energia

Durante o ciclo da cultura, a relação entre os componentes do balanço de radiação e de energia variaram em resposta ao nível de cobertura do solo, sazonalidade do suprimento de energia, conteúdo relativo de água e características da superfície cultura.

A relação entre o saldo de radiação (R_n) e radiação global (R_g) pode ser observada na Figura 54. Até próximo aos 132 DAC, quando a cultura atingiu a cobertura máxima do solo ($f_{RFA} > 80\%$), a razão R_n/R_g apresentou valores baixos, devido ao IAF ainda ser pequeno (Figuras 25 e 26). Assim, uma maior quantidade de radiação de ondas longas foi perdida pela superfície do solo para a atmosfera, ou seja, o BOL foi mais negativo (Figura 55), o que resultou em menores valores de R_n . A relação R_n/R_g foi igual a 56%. Neste mesmo período, o BOC (Figura 55) foi de $15,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, enquanto que o saldo médio diário do BOL foi igual a $-4,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Quando o valor máximo de f_{RFA} ($\sim 99\%$) foi atingido, depois do mês de dezembro/2007, mesmo aumentando a quantidade de radiação refletida (Figura 56), os valores de BOC foram maiores devido ao aumento da disponibilidade de radiação solar global (R_g) ao longo deste período. Como resultado, os valores de R_n/R_g foram superiores quando comparados ao valor médio do período precedente, em que a variação da cobertura do solo era ascendente (Figura 41 e 42). Por outro lado, por causa do aumento do IAF, a quantidade de radiação associada ao BOL apresentou uma tendência de redução, em função da menor incidência de radiação sobre o solo e maior retenção de energia pelo dossel da cultura.

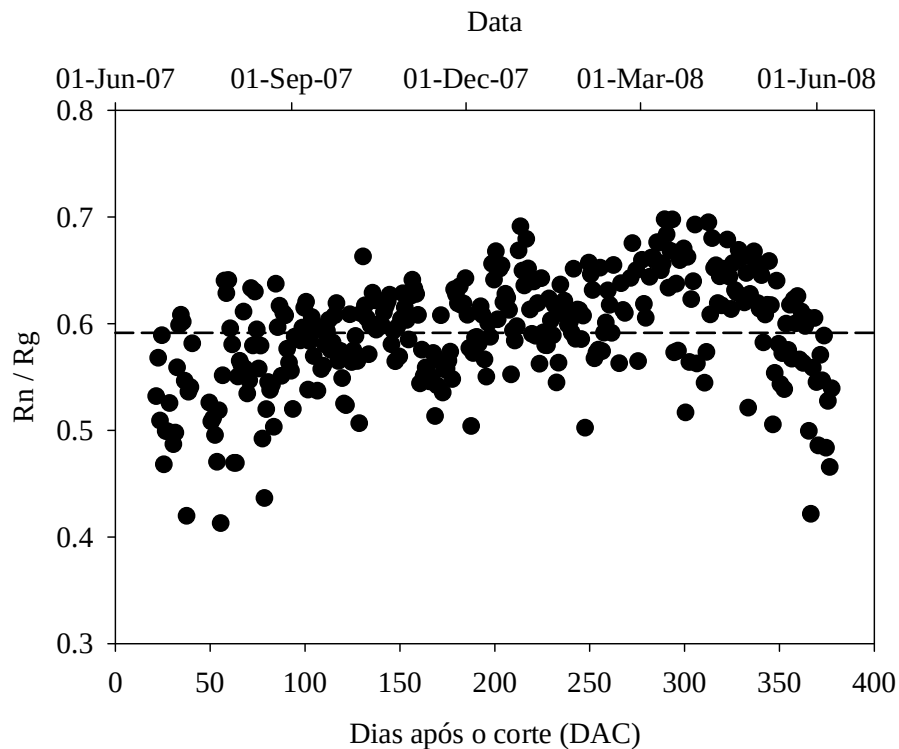


Figura 54. Relação entre o saldo de radiação (R_n) e a radiação solar global (R_g) ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

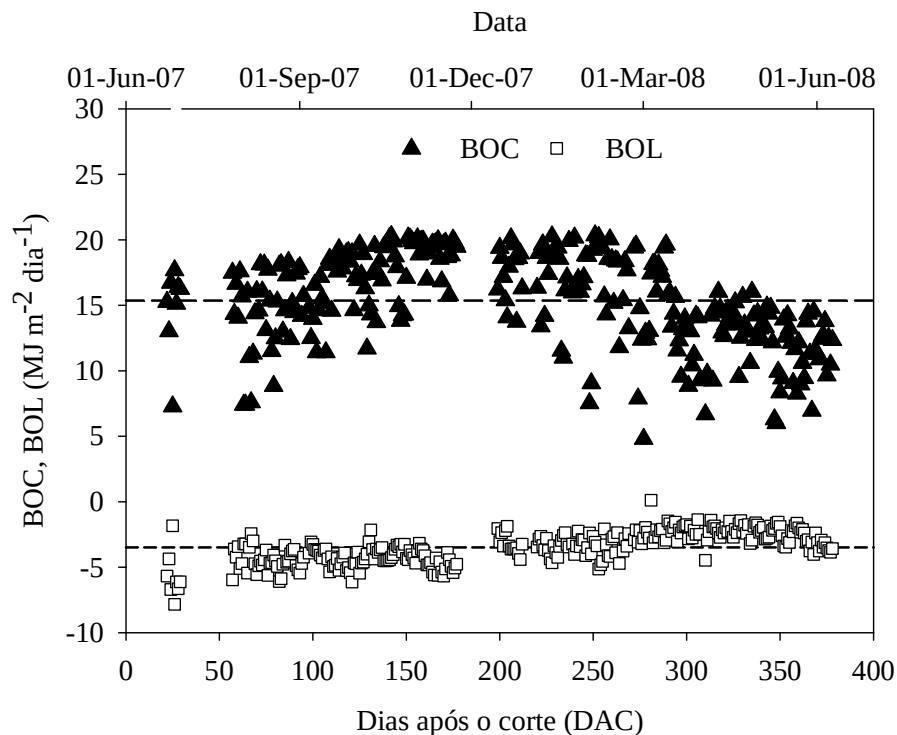


Figura 55. Balanço de ondas curtas (BOC) e de ondas longas (BOL) ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

Esta tendência foi verificada até em torno dos 300 DAC, quando, posteriormente, observou-se um ligeiro aumento dos valores de BOL (mais negativos), provavelmente como resultado da menor emissão efetiva de radiação de ondas longas pela atmosfera, como pode ser confirmado por meio da comparação das magnitudes dos valores de BOL noturno, no período de 339 a 378 DAC (maio-junho/2008), com os demais analisados (Figura 49). O aumento do BOL, associado com a redução dos valores de BOC, promoveu reduções na relação R_n/R_g ao final do ciclo da cultura. Como pode ser observado, pela linha tracejada na Figura 54, o valor médio de R_n/R_g para o ciclo foi de 59%, ao passo que os valores médios de BOC e BOL foram iguais a 15,76 e -3,81 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente (Figura 55).

A relação entre a radiação refletida (R_r) e a radiação solar global (R_g) ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada pode ser observada na Figura 56. Os menores valores de R_r/R_g ocorreram no início do ciclo, quando a superfície do solo estava mais exposta ($f_{RFA} < 80\%$, 132 DAC), apresentando, em média, um valor igual a 19%. Em seguida, verificou-se um aumento de R_r/R_g até próximo de 280 DAC. Em torno dos 300 DAC, foi possível observar uma ligeira redução (~ 2%) dos valores de R_n/R_g , em decorrência da redução da radiação refletida durante o período chuvoso da região, logo que a cana-de-açúcar, devido à sua arquitetura, comumente consegue interceptar em torno de 39,5% do volume de água precipitado (CASTILHO, 2000). Depois do período chuvoso, um novo aumento foi observado nos valores de R_r/R_g .

Em média, para o ciclo inteiro, esta relação foi de 23%. Este resultado é muito semelhante ao citado por JUÁREZ (2004), que obteve um valor médio de R_r/R_g igual a 21% para a cana-de-açúcar, com variações de 0,15 a 0,25, sendo que o padrão sazonal demonstrou valores mínimos na estação chuvosa e máximos na estação seca. Cabral et al. (2003) verificaram para a cana-de-açúcar não irrigada, valores variando em torno de 12% e 32%, a depender da fase de crescimento da cultura. Bastable et al. (1993) encontraram para pastagens valores de 21%.

Na Figura 57 são demonstradas as magnitudes dos fluxos de energia (LE , H e G). Em média, durante os períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar, o LE sempre apresentou valores superiores ao H . No entanto, durante os 3 períodos do ciclo (junho a setembro/2007, janeiro a março/2008 e maio a junho/2008), os valores de H tornaram-se ligeiramente maiores quando comparado aos outros meses do ciclo. Os valores de LE foram mais elevados (> 18 MJ m⁻² dia⁻¹) durante os meses de outubro/2007, enquanto que o G apresentou maior contribuição nos 3 primeiros meses.

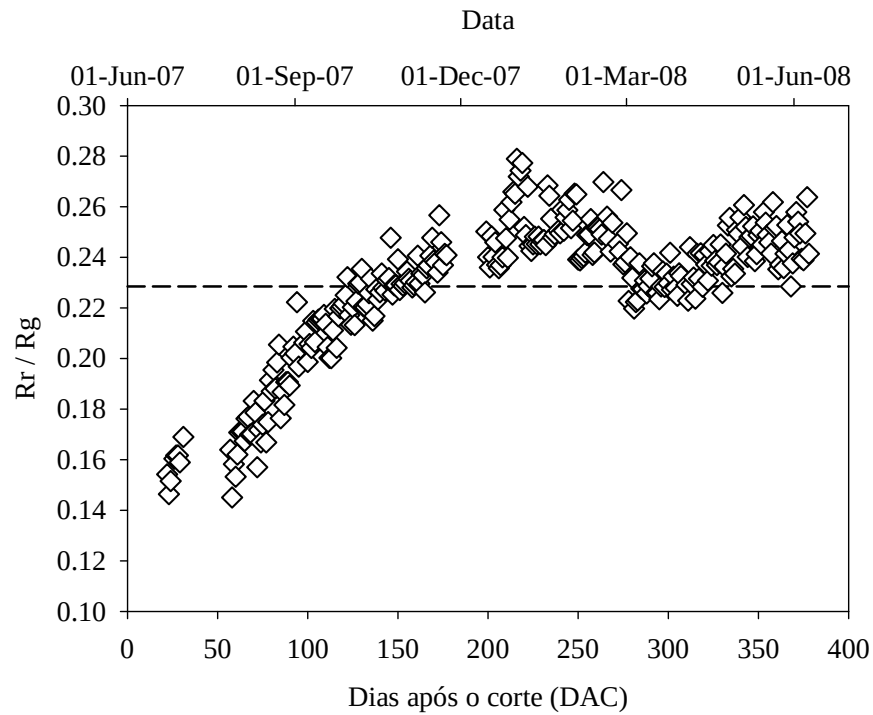


Figura 56. Relação entre a radiação refletida (R_r) e a radiação solar global (R_g) ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

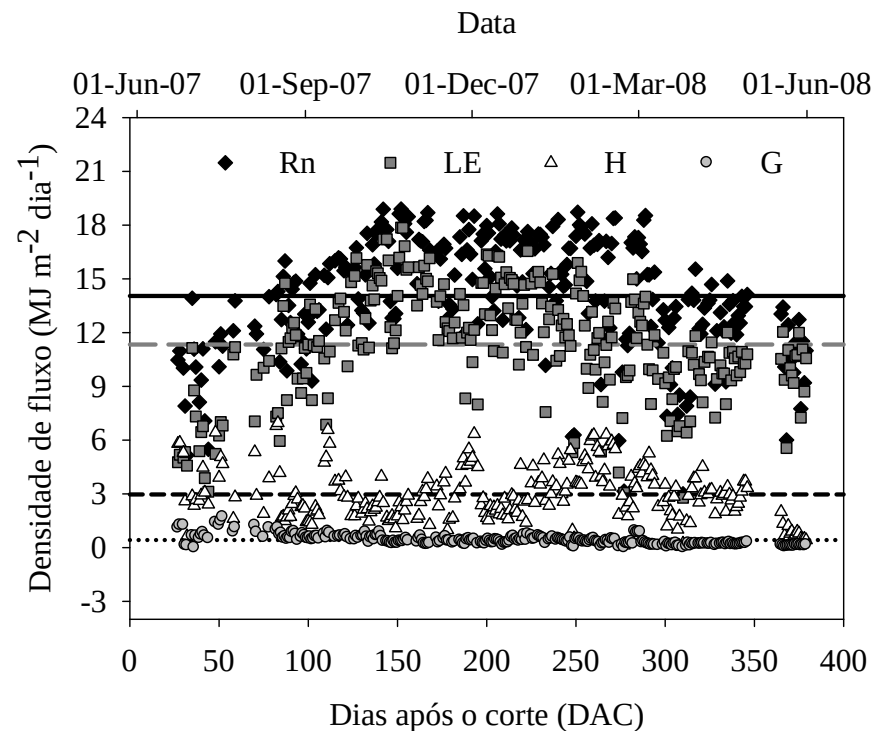


Figura 57. Densidade de fluxos de LE (calor latente), H (calor sensível) e G (calor no solo) ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

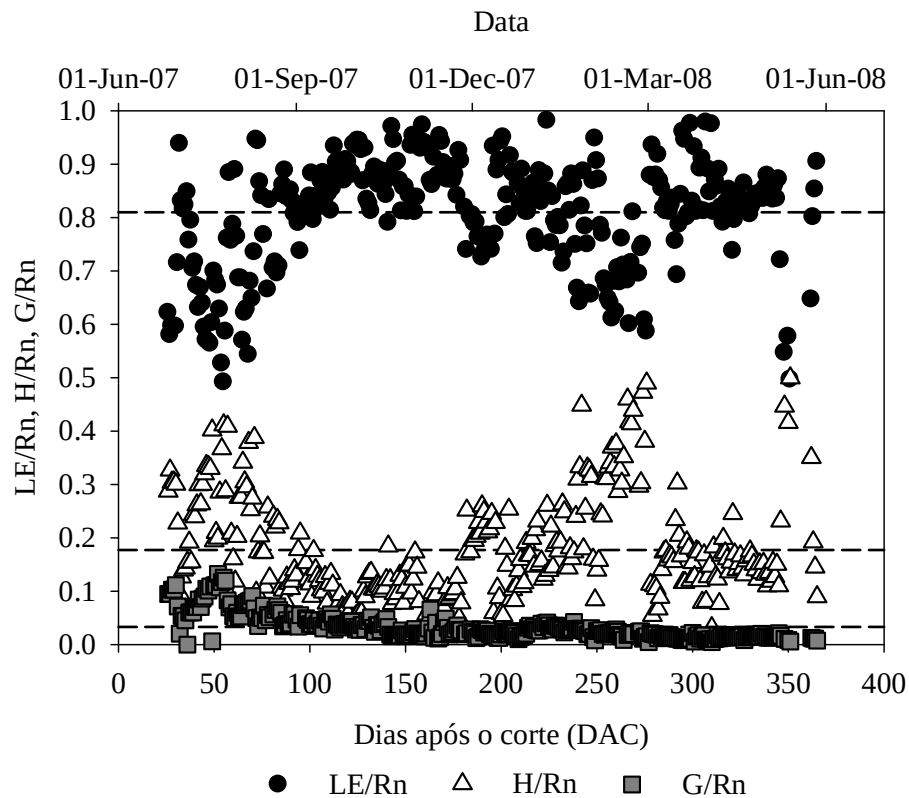


Figura 58. Partição do saldo de radiação (Rn) nos fluxos de LE (calor latente), H (calor sensível) e G (calor no solo) ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

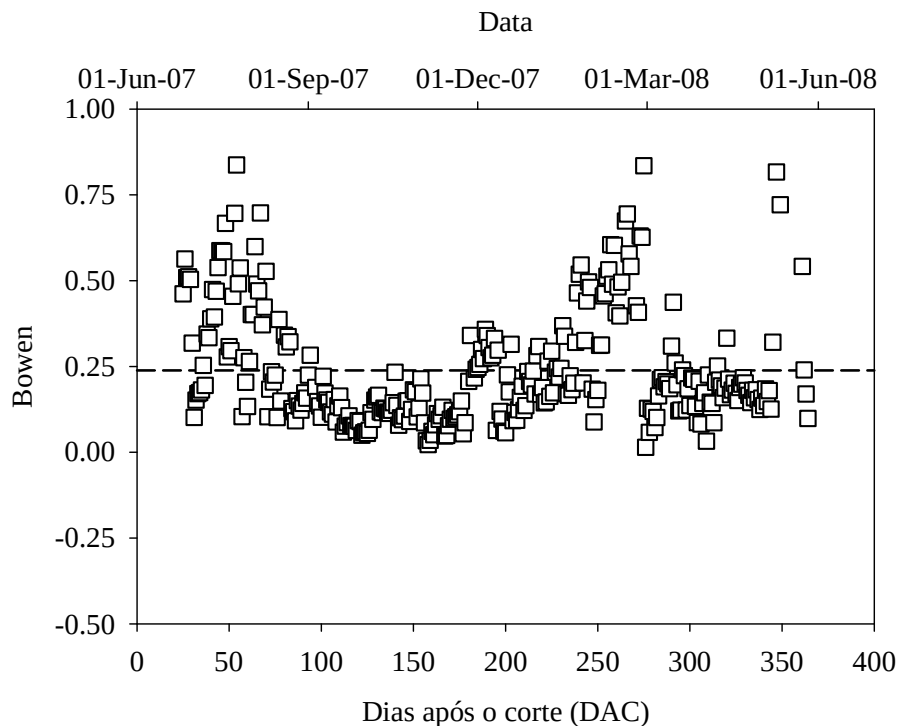


Figura 59. Variação da razão de Bowen ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

Observou-se que as partições para H atingiram em torno de 40% em agosto/2007 e foram inferiores a 50% em março/2008 (Figura 58). Na fase final (> 350 DAC), também foram verificados valores próximos a 50%. Em decorrência dos altos valores de H durante esses períodos, o β apresentou valores acima de 0,5. Em média, os valores de β para o ciclo foram de 0,27 (Figura 59).

Para o ciclo, os valores de LE, H e G corresponderam a 81%, 16% e 3% em relação ao R_n (Figura 58), respectivamente. Toledo Filho (2001) observou que os valores de LE, H e G responderam por 67%, 28% e 5% de R_n , respectivamente, para a cana-de-açúcar não irrigada, enquanto que, Cabral et al. (2003) verificaram que os valores de LE responderam por 70% da precipitação registrada (1351 mm), sob as condições de sequeiro. Por outro lado, Brauner et al. (2008) observaram para um cultivo de cana-de-açúcar não irrigado, sob condições climáticas do município de Pilar-AL, que o LE respondeu por apenas 37% de R_n , ao passo que a maior contribuição foi do H com 61% e apenas 2% para o G.

5.4. Interação da cana-de-açúcar com a atmosfera – fator de desacoplamento

Para analisar a interação da cana-de-açúcar com a atmosfera, utilizou-se o fator de desacoplamento (Ω). O mesmo foi calculado diariamente para 5 períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar (agosto/2007, outubro/2007, janeiro/2008, abril/2008 e maio-junho/2009). Adicionalmente, foram escolhidos dias específicos visando analisar a contribuição relativa da resistência do dossel da cultura e da radiação no processo de troca de vapor d'água entre a cana-de-açúcar e a atmosfera, em escala horária, bem como ao longo do ciclo. Os valores do fator de desacoplamento foram calculados para o período do dia, quando a energia disponível ($R_n - G$) era positiva.

No cálculo da resistência aerodinâmica (r_a), que foi utilizada na estimativa dos valores da resistência da cultura (r_c) e do Ω , foram considerados os dados do deslocamento do plano zero (d) e do parâmetro de rugosidade da superfície para o *momentum* (z_{om}), obtidos por meio de 67 perfis do vento medidos sob condições de atmosfera neutra. O resumo destes perfis e dos valores das características aerodinâmicas para a cana-de-açúcar irrigada pode ser observada em anexo (Tabela 1). Com base nos resultados, verificou-se que o valor médio de “d” em relação à altura do dossel da cultura (h_c) foi igual a 0,71. Por outro lado, a relação entre o valor de z_{om} estimado e a h ,

resultou em valores médios de 0,09 m, aproximadamente. Este valor foi próximo ao obtido utilizando a equação 49, que resultou em um valor médio de z_{om}/h igual a 0,08 m. A magnitude e o comportamento destes valores de “d” e z_{om} para a cana-de-açúcar foram semelhantes aos obtidos por Cabral et al. (2003) e Toledo Filho (2001).

5.4.1. Padrões médios para períodos representativos do crescimento da cultura

De modo geral, ao amanhecer e ao entardecer, observou-se que os valores do Ω foram menores ($\Omega < 0,4$) (Figura 60), indicando um maior acoplamento da cultura com a atmosfera. Esta tendência se deve aos altos valores da resistência do dossel (r_c), que ocorrem nesses horários por causa do fechamento estomático, como resultado da baixa disponibilidade de radiação solar global (NICOLÁS et al., 2008). Na Tabela 8 são apresentados os dados médios do Ω e de variáveis relacionadas para os 5 períodos representativos do crescimento e para o ciclo da cultura da cana-de-açúcar. Semelhante à análise realizada para os componentes do balanço de radiação e de energia, considerou-se apenas os dias caracterizados como “válidos”, de acordo com a metodologia proposta por Perez et al. (1999).

No início do ciclo (70 – 95 DAC, agosto/2007), quando a cana-de-açúcar possuía IAF em torno de $0,9 \pm 0,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e h_c de 0,58 m (Tabela 8), o Ω médio diário foi de 0,74, ou seja, o controle fisiológico do dossel ao processo de transpiração da planta foi de 0,26 ($1 - \Omega$), indicando que o desacoplamento entre a cultura e a atmosfera era de moderado a alto; assim, a troca de vapor d’água com a atmosfera foi decorrente da radiação disponível ($R_n - G$) (JONES, 1982). Estes resultados são normalmente evidenciados quando se tem o IAF e h pequenos. Contudo, os mesmos podem ser influenciados pelos valores de velocidade do vento (u) e do déficit de pressão de vapor (DPV), devido aos efeitos sobre a resistência aerodinâmica e, conseqüentemente, sobre a resistência da cultura (STEDUTO & HSIAO, 1998b).

Observou-se que a variável Ω apresentou um aumento até às 8 h (variando entre 0,5 e 0,6), devido à redução da r_c . Entretanto, a partir deste momento, um acréscimo no desacoplamento foi verificado entre às 8 e 10 h, atingindo valores em torno de 0,70, entre às 11 e 14 h. Este aumento provavelmente esteja associado à alta velocidade do vento ($> 4 \text{ m s}^{-1}$) durante o período diurno, que reduziu o acoplamento da cultura com atmosfera. Estes resultados são consistentes com os obtidos por Steduto & Hsiao (1998b) que, analisando o fator de desacoplamento para a cultura do milho, verificaram

valores de Ω acima de 0,40, quando a velocidade do vento apresentou valores entre 4 a 5 m s^{-1} . Entretanto, esses autores afirmam que, no início do ciclo da cultura (IAF de $0,58 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e h_c de 30 cm), os baixos valores de Ω podem aumentar (entre 0,45 e 0,65), quando os valores de velocidade do vento são muito baixos ($\sim 1,53 \text{ m s}^{-1}$).

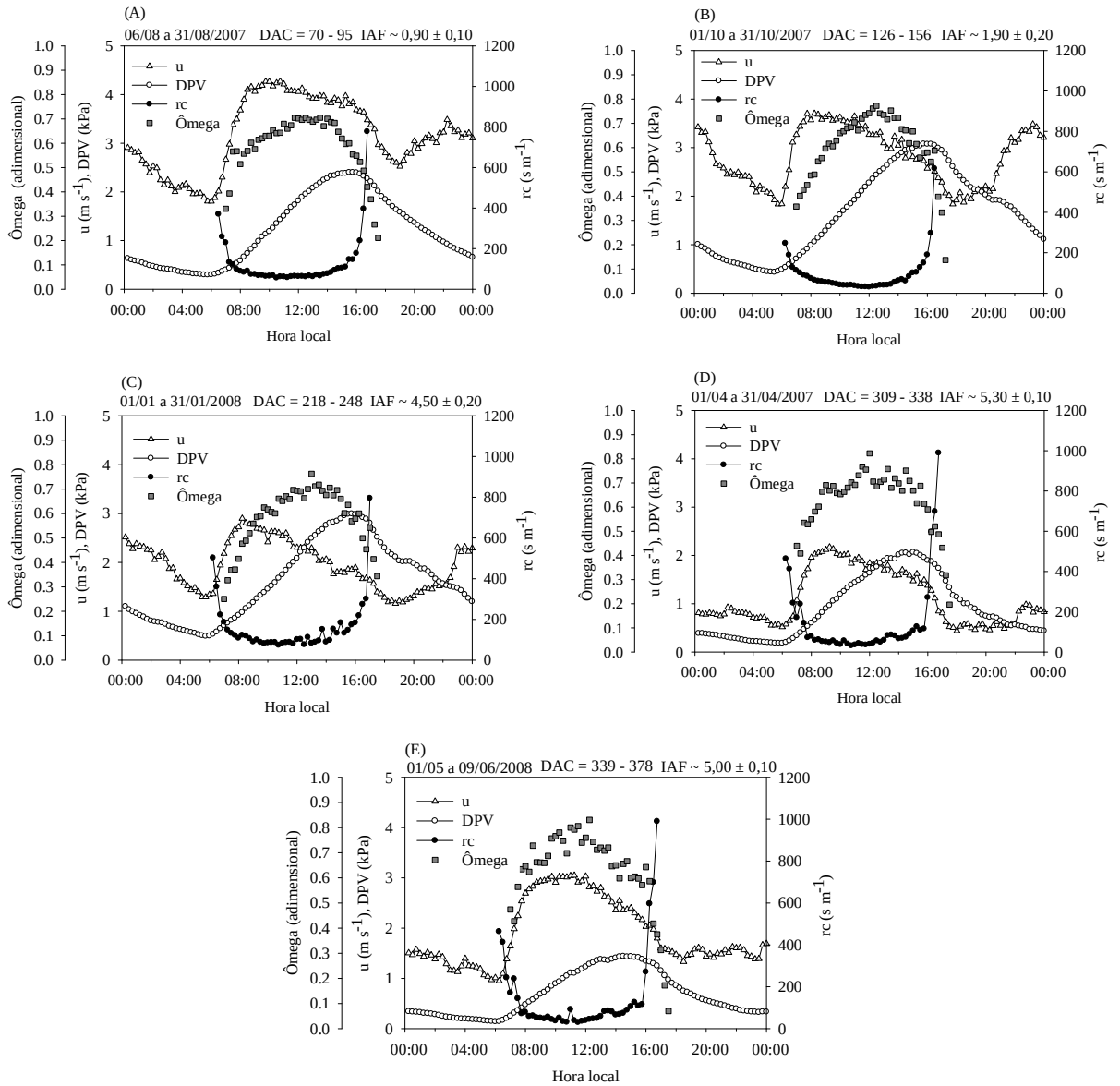


Figura 60. Padrões médios horários do fator de desacoplamento (Ω , $\hat{\omega}$), velocidade do vento (u), déficit de pressão de vapor (DPV) e resistência da cultura (r_c) para 5 períodos representativos do crescimento da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Tabela 8. Dados médios do fator de desacoplamento (Ω , ômega) e de variáveis relacionadas para 5 períodos representativos do crescimento da cultura da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Variáveis	Períodos					Ciclo
	Agosto/07	Outubro/07	Janeiro/08	Abril/08	Maio-Junho/08	
DAC	70 a 95	126 a 156	218 a 248	309 a 338	339 a 378	
Ω	0,74	0,70	0,61	0,75	0,69	0,68
IAF	0,90	1,90	4,50	5,30	5,00	-
h_c	1,00	2,35	3,95	4,32	4,35	-
DPV	1,45	2,07	2,13	1,01	1,14	1,57
u	3,10	2,55	1,86	1,34	1,81	2,10
u^*	0,37	0,42	0,37	0,33	0,40	0,39
Rg	16,3	22,8	22,6	17,2	15,4	19,8
z_{om}	0,08	0,10	0,27	0,17	0,51	0,43
r_c	53	49	80	39	50	58
r_a	46	29	32	30	27	31
β	0,39	0,13	0,28	0,18	0,55	0,25

Em média, ao longo do dia, os valores de velocidade do vento foram iguais a $3,10 \text{ m s}^{-1}$ (Tabela 8). Verificou-se que houve uma sustentação dos altos valores de Ω , entre às 11 e 14 h, que provavelmente esteja associada a elevada velocidade do vento (Figura 60A). A partir das 14 h, até aproximadamente às 16 h, observa-se um ligeiro acoplamento da cana-de-açúcar com a atmosfera, associado possivelmente ao aumento do DPV (Figura 60A). Durante o dia, o DPV foi, em média, igual a 1,45 kPa, com os maiores valores ocorrendo entre às 14 e 18 h. Contudo, a influência do DPV foi evidente apenas até às 16 h; a partir deste momento, observou-se que os valores da resistência do dossel da cultura (r_c) apresentaram maior importância, devido à diminuição da radiação disponível. Em média diária, para o período analisado (agosto/2007), a r_c foi de 53 s m^{-1} .

Quando o IAF e h aumentaram para $1,90 \pm 0,20 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e 2,35 m, respectivamente, compreendendo o período entre 126 e 156 DAC (outubro/2007) (Tabela 8), foi observado que o Ω aumentou continuamente até próximo do meio dia, onde atingiu os valores máximos (Figura 60B). Este mesmo comportamento foi evidenciado para os períodos subsequentes. Em seguida, foi verificada uma pequena redução de Ω até próximo às 16 h, provavelmente devido ao aumento dos valores de DPV ($> 3,0 \text{ kPa}$) e a velocidade do vento moderada (entre 2 e 3 m s^{-1} durante o horário de 12 às 14 h) (Figura 60B), que sob tal condição, pode aumentar o acoplamento da

cultura com a atmosfera (STEDUTO & HSIAO, 1998b). A partir das 16 h, Ω reduziu rapidamente devido a diminuição da disponibilidade de radiação (Figura 49B).

Diferentemente do período anterior, não foram verificadas influências dos valores de velocidade do vento sobre o acoplamento da cana-de-açúcar com a atmosfera, sendo que durante o período da manhã os valores estiveram compreendidos entre 3 e 4 m s⁻¹ (Figura 60B). Em escala diária, a velocidade do vento foi, em média, igual a 2,55 m s⁻¹ (Tabela 8). Durante este período, foi verificada pouca redução na resistência da cultura (~ 49 s m⁻¹), ao passo que, a resistência aerodinâmica reduziu expressivamente (de 46 s m⁻¹ para 29 s m⁻¹). Entretanto, verificou-se um aumento do DPV (média diária 2,07 kPa), o que resultou em pouca variação de Ω em relação ao período anterior. A disponibilidade de radiação foi superior, sendo, em média, igual a 22,8 MJ m⁻² dia⁻¹ (Tabela 8).

No período 218 – 248 DAC (janeiro/2008), os valores de Ω tenderam a ser ligeiramente menores (Figura 60C). Durante este período, a r_c foi maior, apresentando valores, em média, iguais a 80 s m⁻¹, em decorrência do tombamento da cultura. Este aumento em r_c resultou numa redução do fluxo de LE para atmosfera, provocando um aumento dos valores de β (de 0,11 para 0,25) (Tabela 7). Em escala horária, foram verificados elevação dos valores de r_c , quando o DPV atingiu valores maiores (em torno de 3,0 kPa durante o período da tarde); ao passo que se observou um maior acoplamento da cana-de-açúcar com a atmosfera, resultando em valores de Ω inferiores a 0,70. Em escala diária, os valores médios foram iguais a 0,61 (Tabela 8). Neste período, a velocidade do vento foi de 1,86 m s⁻¹, inferior ao verificado no período antecedente, enquanto a R_g não variou expressivamente, sendo igual a 22,64 MJ m⁻² dia⁻¹. Não foram verificadas modificações na disponibilidade de água para a cultura (Figura 7F), contudo os altos valores de R_g , associados ao DPV e a menor velocidade do vento, podem justificar os elevados valores de r_c .

Nos dois períodos seguintes (218 – 248 DAC, abril/2008; 339 – 378 DAC, maio-junho/2008), constatou-se um aumento dos valores de Ω , resultante, provavelmente, do retorno dos eventos de irrigação, da menor demanda atmosférica e da pouca redução verificada no IAF ao final do ciclo. O mês de abril/2008 (Figura 60D), foi caracterizado por estar situado compreendido na parte final da estação chuvosa, o que favoreceu o aumento de Ω devido à disponibilidade de água no solo, ao passo que o suprimento de radiação foi o principal responsável pelo processo de evapotranspiração. Neste período, os valores de r_c foram, em média, iguais a 39 s m⁻¹, indicando o baixo estresse sofrido pela cultura (MEINZER & GRANTZ, 1989), bem como se observou

uma redução no DPV. Como decorrência da maior utilização de energia disponível para LE, os valores de β foram menores quando comparados aos do período antecedente (em torno de 0,18). Em escala horária, o comportamento de Ω foi similar ao observado para o período anterior, contudo os valores próximos ao meio dia foram maiores. Neste período, a velocidade do vento média foi menor, apresentando valores máximos pela manhã, próximos a $2,0 \text{ m s}^{-1}$. Conforme mencionado, os baixos valores de velocidade do vento também podem ter reduzido o acoplamento da cultura com a atmosfera.

Entre os 339 e 378 DAC (maio-junho/2008) (Figura 60E), devido à suspensão da irrigação, foi verificada uma redução dos valores de Ω , sendo em média igual a 0,69 (Tabela 8). Vários aspectos podem estar relacionados a este comportamento. O primeiro possivelmente esteja associado ao tombamento da cana-de-açúcar, também, comumente evidenciado, ao final do ciclo, nos cultivos bastante produtivos, como foi verificado no presente trabalho. Para esse período, verificou-se que z_{om} foi, em média, igual a 0,51 m (Tabela 8), resultado confirmado por Cabral et al. (2003), que devido ao tombamento da cultura, a rugosidade da superfície aumentou atingindo, em média, valores iguais a 0,50 m. Associado a estas informações, também, tem-se que, durante esse período, a velocidade do vento ($1,81 \text{ m s}^{-1}$) juntamente com o DPV ($1,14 \text{ kPa}$) foram superiores ao do período antecedente, de modo que promoveram para um aumento da r_c ($\sim 50 \text{ s m}^{-1}$) (Tabela 8), resultando em efeitos sobre os valores Ω .

Meinzer & Grantz (1989) citam que, sob condições de estresse hídrico severo, a cana-de-açúcar tende a apresentar valores de Ω em torno de 0,20. Assim, apesar da redução dos valores de Ω , no período entre os 339 e 378 DAC (maio-junho/2008), verificou-se que o desacoplamento foi caracterizado como sendo moderado (STEDUTO & HSIAO, 1998b). Tal resultado pode estar relacionado a aspectos como, o fato do IAF não ter apresentado reduções expressivas ($5,55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para $4,30 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), logo que, os vertissolos tendem a armazenar volumes consideráveis de água. Além do mais, a cultura não foi submetida, por tempo muito prolongado a condições de suspensão de irrigação (< 44 dias), de modo que não foram evidenciadas condições de estresse severo, uma vez que a cana-de-açúcar poderia ter apresentado diminuições no acúmulo de sacarose (INMAN-BAMBER, 2004; ROBERTSON et al., 1998). Segundo Steduto & Hsiao (1998b), reduções nos valores de Ω são observadas apenas quando restrições severas de água no solo promovem reduções significativas sobre os valores de IAF ($5,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para $2,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), de maneira que a planta tende a controlar a transferência de água por meio do fechamento dos estômatos.

5.4.2. Efeitos da disponibilidade de água no solo

Embora não tenham sido observados efeitos expressivos da redução da disponibilidade de água no solo sobre o Ω para um período de tempo maior (339 – 378 DAC, maio-junho/2008), realizou-se uma análise para 2 dias distintos em relação ao último evento de irrigação. O primeiro dia (12/02/2008) foi caracterizado pela ocorrência de 13 dias após o último evento de irrigação, enquanto que o segundo (15/02/2008) há 2 dias após a última irrigação. Os dias foram escolhidos para o mesmo período de crescimento e com valores similares de radiação solar global, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor, como podem ser observadas nas Figuras 61A e 61B.

Verifica-se que a variação dos valores de “u” e DPV são bem semelhantes, de modo que os maiores valores de “u” ocorreram durante o período da manhã, enquanto que os do DPV ocorreram nos horários da tarde, atingindo valores máximos bem próximos, para os 2 dias analisados. Por outro lado, em relação ao Ω , é possível observar para o dia 12/02/2008, que os valores são bem menores quando comparados aos do dia 15/02/2008. Verificou-se, para o dia 12/02/2008 (Figura 61A), que os valores de Ω foram baixos entre às 8 e 10 h (0,2 a 0,3), caracterizando um forte acoplamento entre a cana-de-açúcar e a atmosfera, devido, possivelmente, aos valores de velocidade do vento, em torno de 2 m s^{-1} . Entre às 10 e 12 h, observou-se um aumento de Ω , provavelmente devido ao aumento na disponibilidade de energia.

Durante o período da tarde, foi possível perceber um maior acoplamento da cultura, em decorrência da elevação dos valores de r_c devido ao maior DPV. Em média, durante o dia, os valores de r_c foram iguais a 103 s m^{-1} , ao passo que os do Ω foram iguais a 0,41, indicado um controle expressivo da cultura ao processo de troca de vapor d’água com a atmosfera, ou seja, um acoplamento significativo (STEDUTO & HSIAO, 1998b).

Por outro lado, quando se analisou o dia 15/02/2008 (Figura 57B), foi possível verificar menor acoplamento da cana-de-açúcar com a atmosfera. Em média diária, o valor de Ω foi igual a 0,58, caracterizando um acoplamento moderado, enquanto que a r_c foi de 93 s m^{-1} . Durante este dia, o Ω aumentou rapidamente após às 8 h, mesmo com o aumento da r_c devido aos valores de DPV mais acentuados. Os valores máximos de Ω ocorreram entre às 12 e 14 h, com valores em torno de 0,5 e 0,7, sendo que uma pequena redução nos valores de r_c foi verificada neste período. Entre às 14 e 16 h, um reduzido acoplamento foi observado por causa do aumento da r_c , até atingir valores menores ao final da tarde (Figura 57B).

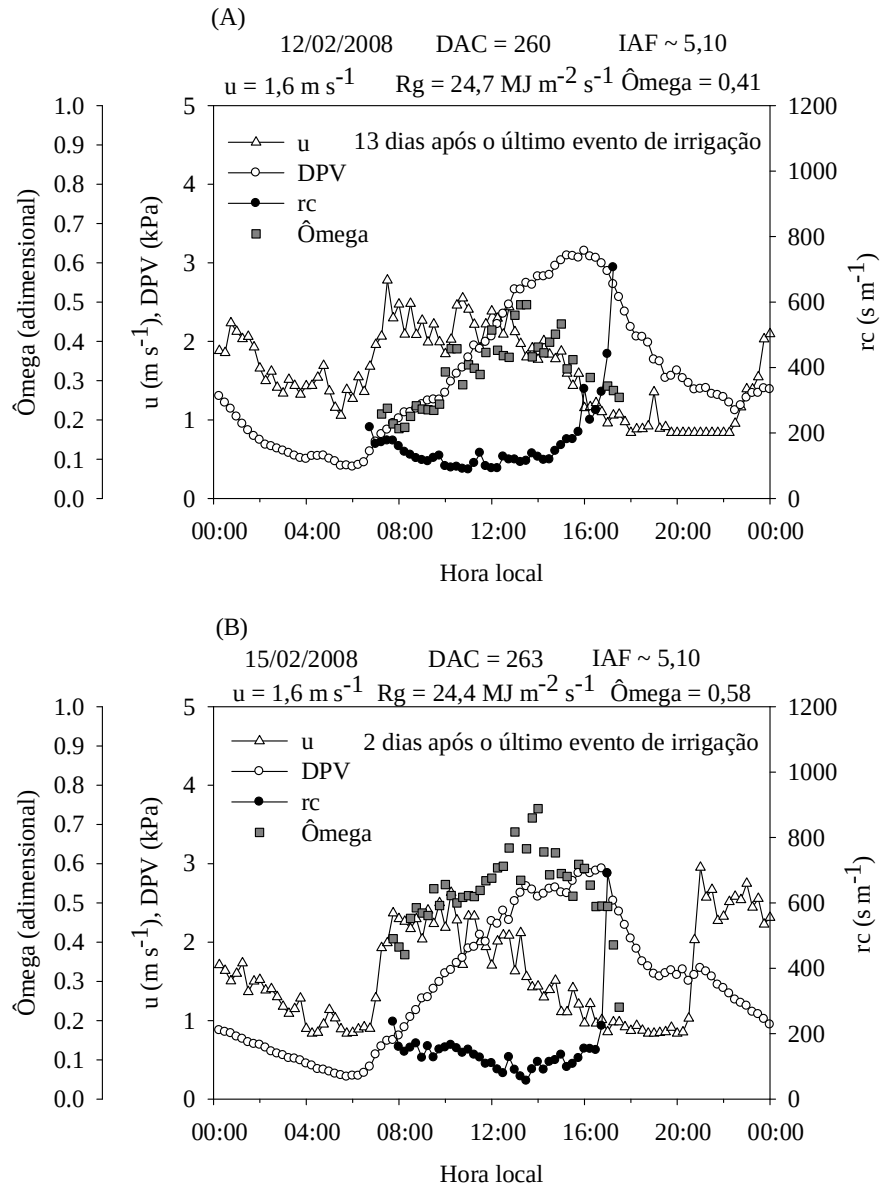


Figura 61. Padrões médios horários do fator de desacoplamento ($\hat{\Omega}$), velocidade do vento (u) e resistência da cultura (r_c) para 2 dias distintos, quanto ao último evento de irrigação em um cultivo de cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

5.4.3. Análise sazonal

Nas Figuras 62, 63, 64 e 65 são apresentadas as variações diárias do fator de desacoplamento (Ω) em comparação aos valores das resistências da cultura (r_c) e aerodinâmica (r_a), velocidade do vento (u), parâmetro de rugosidade para o *momentum* (z_{om}), velocidade de fricção (u_*) e a razão de Bowen ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada.

No início do ciclo (< 75 DAC), observou-se que houve uma tendência dos valores Ω serem maiores, indicando o menor acoplamento da cana-de-açúcar devido ao IAF ainda pequeno (Figuras 25 e 26). Contudo, ao longo do ciclo, verificou-se que seus valores tenderam a oscilar entre 0,60 e 0,80 (Figura 62), com uma ligeira redução nos valores ocorrendo entre os 200 e 300 DAC. Esta diminuição possibilitou inferir que, durante este período, o tombamento da cultura promoveu uma redução na troca de vapor d'água da cana-de-açúcar com a atmosfera, devido a redução da exposição da área foliar às condições ambientais.

Neste período (200 a 300 DAC), também foram constatados valores elevados de R_g e DPV (Figuras 7B e 7C) e baixos valores de velocidade do vento (Figura 63), ao passo que não foram verificadas reduções expressivas na disponibilidade de água para a cultura (Figura 7F). Por outro lado, mesmo sob estas condições de disponibilidade de água, a alta demanda atmosférica associada às características físico-hídricas dos vertissolos, que apresentam baixa condutividade hidráulica (AMARAL et al., 2007), podem restringir a captação de água pela cultura e, conseqüentemente, reduzir a sua capacidade de atender a demanda de água da atmosfera.

Para o ciclo, os valores de Ω foram, em média, iguais a 0,68, demonstrando um desacoplamento de moderado a alto da cultura. Entretanto, quando não se considerou o período após os 200 DAC, caracterizado pelo início do tombamento, visando retirar seus efeitos sobre os valores de Ω , observou-se pouca alteração no valor médio final, sendo igual a 0,69. Estes resultados indicam que, provavelmente, o sistema solo-clima induziu ao maior controle da cana-de-açúcar no processo de troca de vapor d'água com a atmosfera. Este valor é inferior ao informado por Meinzer & Grantz (1989), que citam para cultivos irrigados de cana-de-açúcar valores de Ω , em torno de 0,90; contudo mencionam que o uso de água pela cultura sofre variações expressivas apenas quando se tem condições severas de estresse hídrico ($\Omega \sim 0,20$). Para as condições climáticas de Araras-SP, Peres et al. (1997) encontraram valor médio de Ω igual a 0,76 para a cana-

de-açúcar irrigada, variedade NA56-79, cultivada em um Latossolo Vermelho-escuro, distrófico, com textura argilosa.

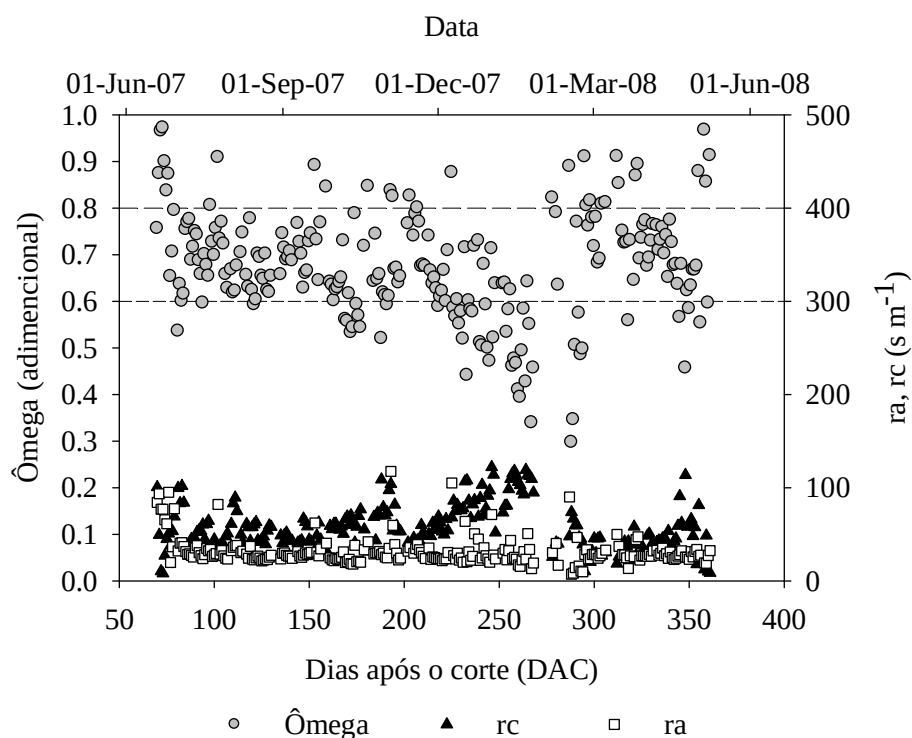


Figura 62. Variação diária do fator de desacoplamento (ômega), resistências da cultura (r_c) e aerodinâmica (r_a), ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

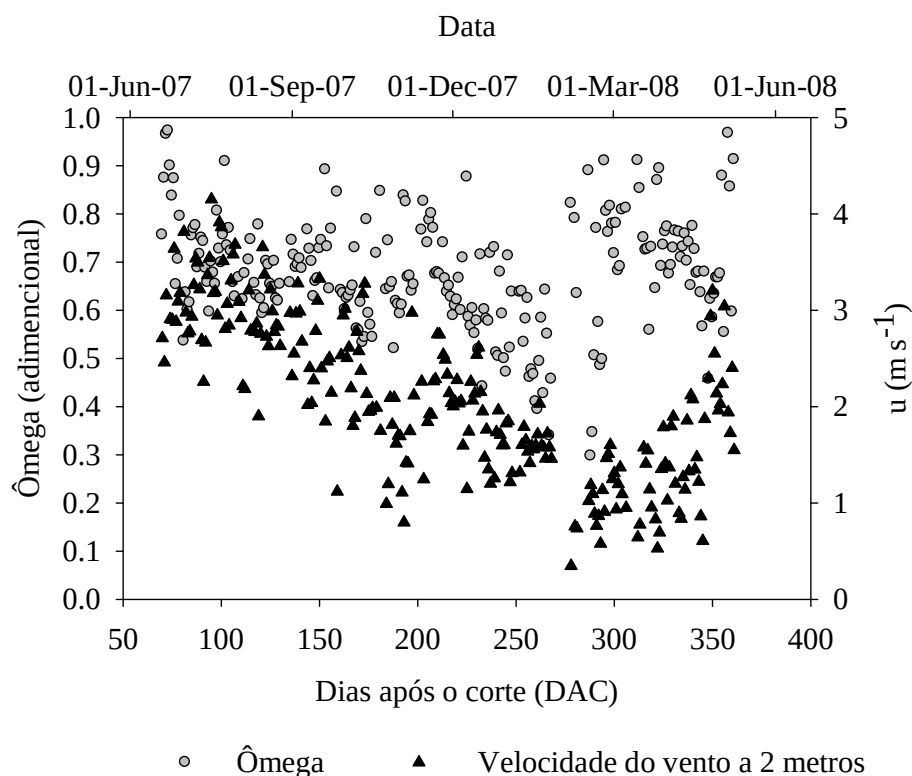


Figura 63. Variação diária do fator de desacoplamento (ômega) e da velocidade do vento (u), ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

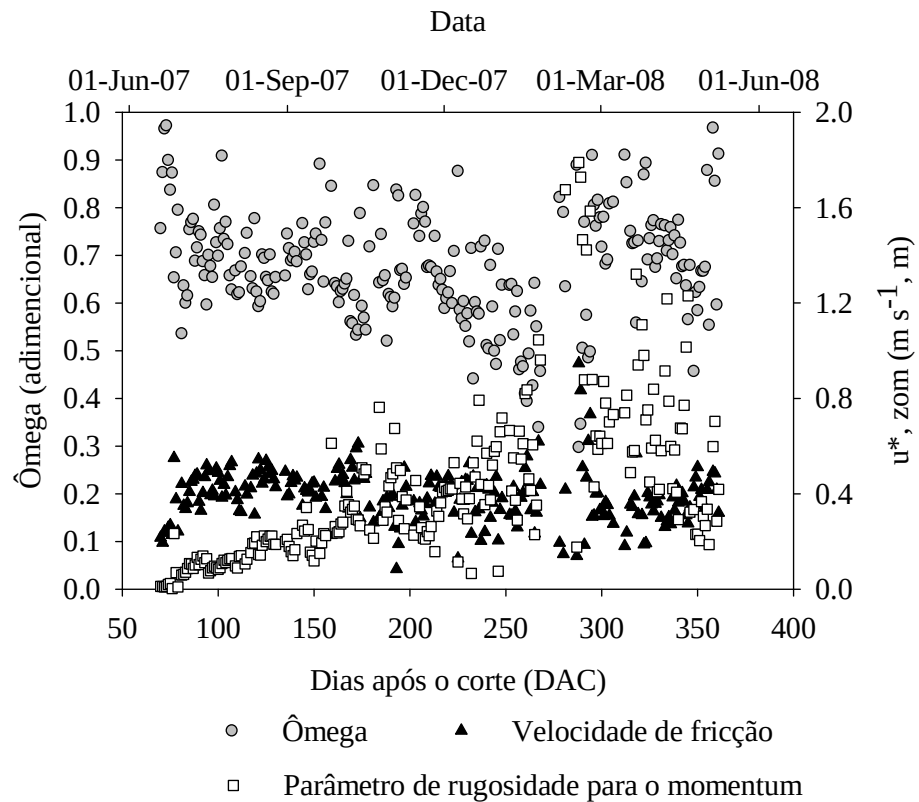


Figura 64. Variação diária do fator de desacoplamento ($\hat{\omega}$), velocidade de fricção (u^*) e parâmetro de rugosidade (z_{om}), ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

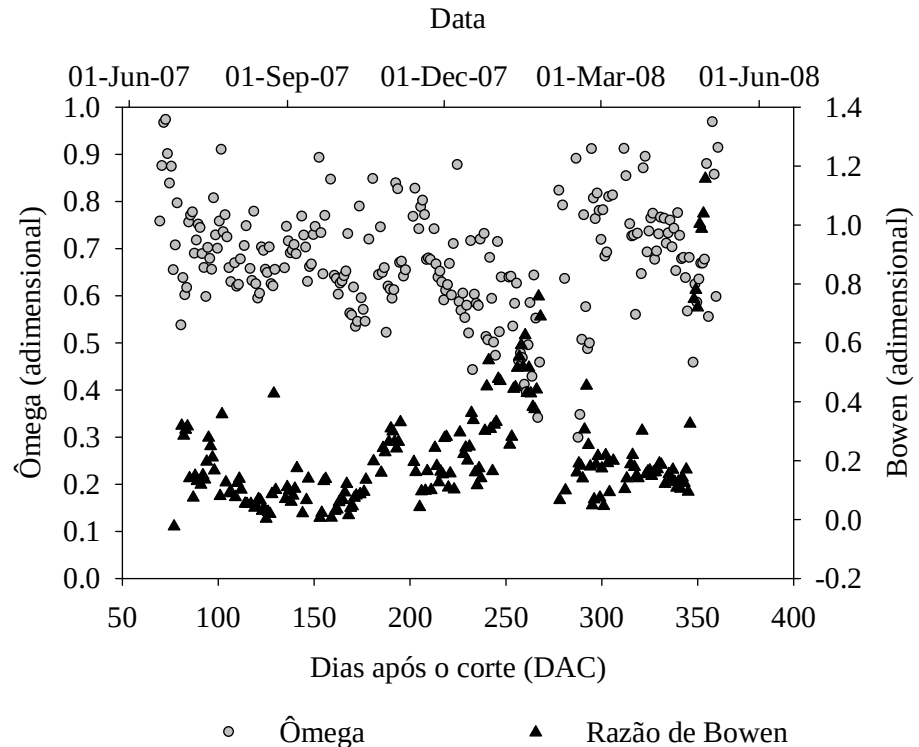


Figura 65. Variação diária do fator de desacoplamento ($\hat{\omega}$) e da razão de Bowen, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Notoriamente, a resistência da cultura foi elevada durante os 200 e 300 DAC, atingindo valores próximos de 100 s m^{-1} , ao passo que a resistência aerodinâmica não apresentou modificações relevantes nos seus valores (Figura 62). Ao longo do ciclo, os valores da r_a foram na sua maioria inferiores aos da r_c , indicando que as trocas de LE, por efeito de mecanismos turbulentos, foram mais eficientes, comparadas à transferência de vapor a partir do dossel da cultura (SANTOS & ANDRÉ, 1993; VERMA et al., 1976).

Em média, os valores da r_c foram iguais a 58 s m^{-1} , mostrando que a cana-de-açúcar apresentou uma leve resistência ao processo de evapotranspiração. Meinzer & Grantz (1989) obtiveram valores médios de r_c iguais a 34 s m^{-1} para a cana-de-açúcar irrigada, utilizando o método do balanço de energia com base na razão de Bowen. Em escala decenal e mensal, Peres et al. (1999) encontraram valores variando entre 3 e 82 s m^{-1} e 8 e 74 s m^{-1} , com valores médios de 43 s m^{-1} e 42 s m^{-1} , respectivamente, para um cultivo de cana-de-açúcar irrigada sob as condições climáticas de Araras-SP.

Pela Figura 63, observa-se que o menor acoplamento da cana-de-açúcar foi verificado quando a velocidade do vento foi maior, tanto no início do ciclo da cultura quanto no final, demonstrando a importância relativa da velocidade do vento na interação entre a biosfera e a atmosfera (STEDUTO & HSIAO, 1998b). Como mencionado, no final do ciclo, o acoplamento esteve associado com a suspensão dos eventos de irrigação e o tombamento da cultura. Entretanto, evidências do tombamento foram observadas a partir dos 200 DAC, confirmado em decorrência de um aumento mais pronunciado da rugosidade da superfície (Figura 64). No início do ciclo, a cultura mais homogênea e com h_c , ainda, reduzida, os valores de z_{om} tenderam a ser menores. Para o ciclo, z_{om} foi, em média, igual a 0,43 m (Tabela 8).

Em relação à velocidade de fricção, verificou-se que seus valores foram, em média, em torno de $0,39 \text{ m s}^{-1}$ (Tabela 8), porém, foram ligeiramente superiores antes dos 200 DAC (Figura 64). Finalmente, na Figura 65, verifica-se que, no período em que as trocas de vapor d'água entre a cana-de-açúcar e a atmosfera foram menores, especialmente entre os 200 e 300 DAC e na fase final do ciclo, em decorrência do maior controle da cultura, os valores de β foram maiores.

5.5. Requerimento hídrico e coeficiente da cultura da cana-de-açúcar irrigada

5.5.1. Evapotranspiração e requerimento da cultura

A evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (ET_c) e evapotranspiração de referência (ET_o), ao longo do ciclo, são apresentadas na Figura 66. Constatou-se que, os valores de ET_c correspondentes a Fase I (brotação e estabelecimento da cultura) oscilaram em torno de $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Na Fase II (estabelecimento e perfilhamento), o valor médio da ET_c aumentou para $3,8 \text{ mm dia}^{-1}$, especialmente, em decorrência do incremento do IAF da cana-de-açúcar (Figura 29).

Na Fase III, que é caracterizada pelo período de crescimento máximo, verificou-se que os valores da evapotranspiração atingiram, em média, $5,1 \text{ mm dia}^{-1}$, destacando-se como o mais elevado do ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Nesta fase, observou-se que, entre os 200 e 300 DAC, que a ET_c apresentou uma diminuição acentuada, provavelmente, devido ao tombamento que afetou o processo de evapotranspiração, como resultado de uma redução do seu índice de área foliar (Figuras 25 e 26). Concomitantemente, nesse período, obtiveram-se as taxas mais elevadas de alongação média dos colmos (Figura 10), quando então o valor da BFTPA era superior a 143 t ha^{-1} , em base fresca (dados não mostrados). No período subsequente, entre os 300 e 348 DAC, a ET_c volta a aumentar, devido ao aumento do IAF. Na Fase IV (maturação da cultura), em que ocorreu a suspensão da irrigação para promover o acúmulo de sacarose nos colmos e, conseqüentemente, a redução do IAF, os valores da ET_c tenderam a decrescer alcançando $3,1 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 66).

De modo geral, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, os valores mínimos e máximos da ET_c variaram, em média, entre $1,2 \text{ mm dia}^{-1}$ e $7,5 \text{ mm dia}^{-1}$, com média de $4,7 \text{ mm dia}^{-1}$. Esses valores são bastante próximos aos revisados por Santos (2005), que encontrou valores mínimos, médios e máximos de ET_c , variando de 0,52 a 4,10, 2,33 a 5,70 e de 3,70 a 8,60 mm dia^{-1} , respectivamente, em diferentes regiões do mundo, a depender da variedade, do local de cultivo e do sistema de produção. Souza et al. (1999), avaliando a influência da irrigação na produção de cana-de-açúcar, em Campos dos Goytacazes-RJ, obtiveram valores médios de ET_c oscilando em torno de $1,9 \text{ mm dia}^{-1}$, na fase I (agosto), e entre $3,2$ a $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$, na fase II (setembro a outubro). Durante a Fase III de crescimento máximo (novembro a maio), os valores de ET_c variariam entre $3,2$ e $6,3 \text{ mm dia}^{-1}$, sendo que na maturação (junho a agosto) foram

constatados valores entre 1,8 e 2,1 mm dia⁻¹. A partir de medições realizadas em lisímetros, Thompson & Boyce (1967) obtiveram valores máximos de ET_c igual a 6,8 mm dia⁻¹ para a cana-de-açúcar, sob as condições climáticas de Pongola, na África do Sul. Ham (1985), citado por Inman-Bamber & Smith (2005), utilizando sondas de nêutrons para o monitoramento de água no solo, constataram que a ET_c máxima para a cana-de-açúcar irrigada foi de 7,8 mm dia⁻¹.

O requerimento hídrico para cada uma das fases de desenvolvimento e para todo o ciclo da cana-de-açúcar pode ser observado na Figura 67. Na Fase I, quando a cultura apresenta área foliar reduzida (Figuras 25 e 26), a demanda hídrica foi de 50 mm, enquanto na Fase II o requerimento hídrico foi igual a 299 mm. Na Fase III, a cultura apresentou um requerimento de 1211 mm, enquanto na IV, em que houve a suspensão da irrigação, a evapotranspiração acumulada foi de 147 mm. Como resultado, foi possível verificar que o requerimento hídrico da cana-de-açúcar, ao longo do ciclo de cana-soca no Submédio do Vale do São Francisco, foi de 1710 mm, ligeiramente inferior ao valor acumulado da evapotranspiração de referência, que foi de 1743 mm.

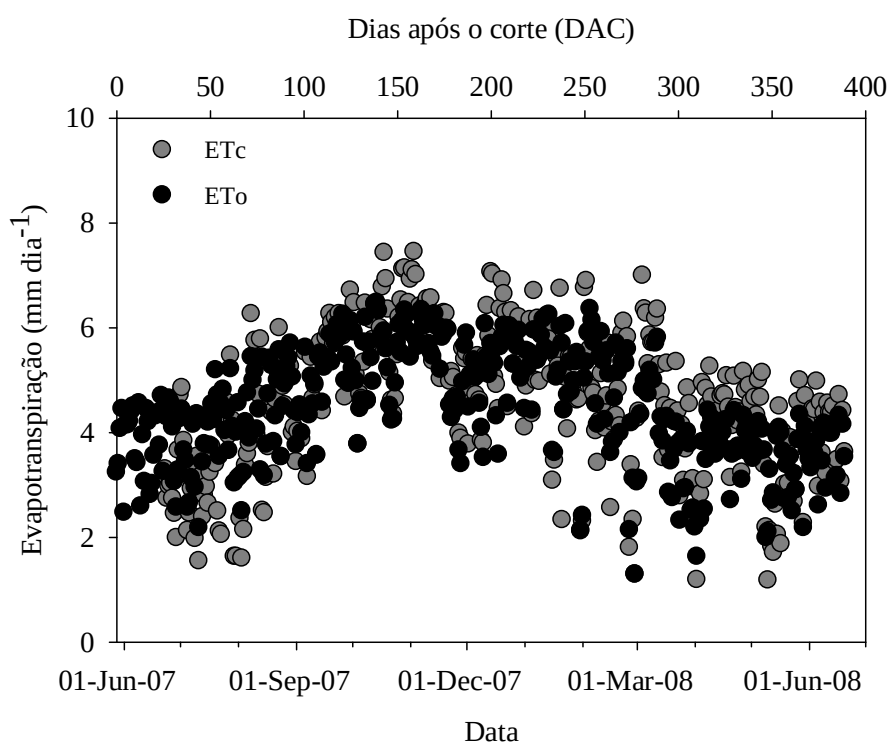


Figura 66. Evapotranspiração da cultura (ET_c) e de referência (E_{To}) ao longo do crescimento da cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

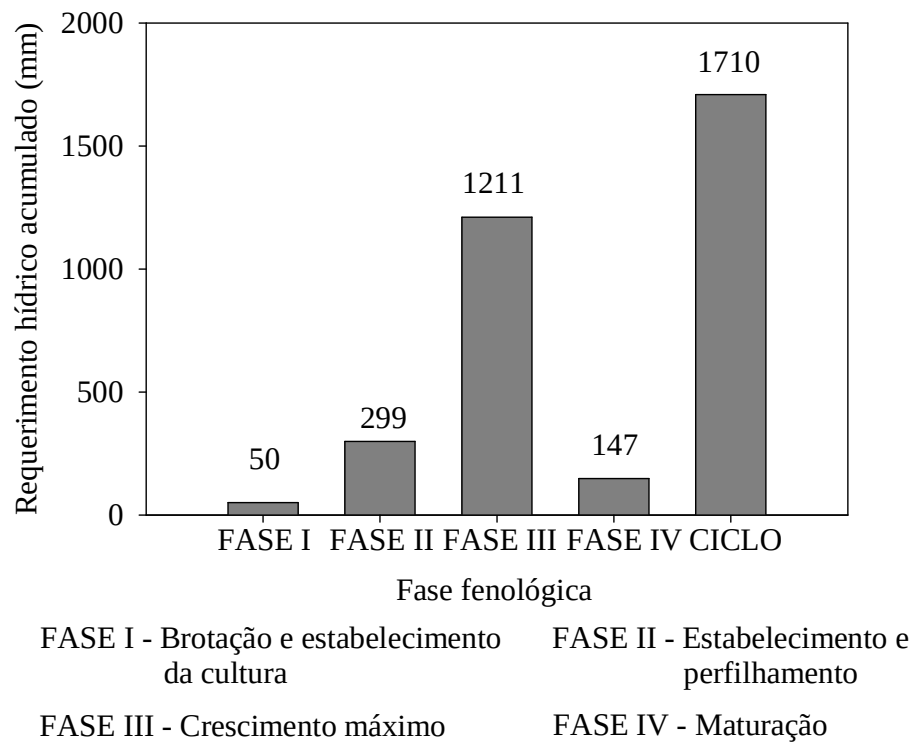


Figura 67. Requerimento hídrico por fase de desenvolvimento e para o ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Almeida et al. (2008), trabalhando com a mesma variedade (RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições irrigadas da região de Rio Largo-AL, encontraram a evapotranspiração acumulada de 1584 mm. Doorenbos & Kassam (1979) citam valores do requerimento hídrico da cana-de-açúcar situado entre 1500 e 2500 mm. Pacheco et al. (1983) mencionam que o requerimento hídrico da cultura da cana-de-açúcar possui grandes variações entre as regiões de produção, tendo oscilado entre 1600 e 1800 mm, na Província de Matanzas, em Cuba; de 1420 a 1650 mm, em Porto Rico; e de 1936 mm, na Argentina.

5.5.2. Coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada

A partir da relação entre os valores de ET_c e de ET_o , calculou-se os valores diários do coeficiente de cultura (K_c) ao longo do ciclo. Na Figura 68, são demonstrados os valores diários e as médias mensais. Constatou-se para a Fase I, que os valores variaram entre 0,64 e 0,71, com uma média de 0,65. Como se pode observar por esta figura, as medições tiveram início próximo do período de transição entre as Fases I e Fase II, logo que a instalação da torre micrometeorológica, bem como dos sensores só foram finalizadas aos 22 DAC. Verificou-se que o valor médio do K_c (0,65) foi superior ao sugerido no boletim 56 da FAO ($K_c \sim 0,40$) e por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003) ($K_c \sim 0,40$), porém semelhante aos informados por Doorenbos & Pruitt (1975, 1977) e Doorenbos & Kassam (1979) (K_c entre 0,40 e 0,60), Omary & Izuno (1995) (K_c igual a 0,47) e por Souza et al. (1999) (K_c igual a 0,60).

Na Fase II, o valor de K_c aumentou para a faixa de 0,85 a 1,0 (Figura 68), como resposta ao rápido incremento da área foliar (Figuras 25 e 26). Similarmente, Souza et al. (1999) observaram valores variando entre 0,85 e 1,02.

Na Fase III, constatou-se que o valor médio de K_c foi, aproximadamente, igual a 1,10. Este valor é inferior ao informado no boletim da FAO 56 (ALLEN et al., 1998) e citado por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003), sendo igual a 1,25. No entanto, o mesmo foi similar aos determinados por vários outros autores, para a cana-soca (DOORENBOS & PRUITT, 1977; DOORENBOS & KASSAM, 1979; OMARY & IZUNO, 1995; WATANABE et al., 2004). Souza et al. (1999), em experimento com duração de 13 meses (cana-soca), encontraram, para a fase de crescimento máximo (novembro a maio), valores de K_c compreendidos entre 1,10 e 1,15, em Campos dos Goytacazes-RJ. Omary & Izuno (1995) obtiveram, no período de máximo crescimento, um valor de K_c médio igual a 1,09, para a cana-de-açúcar com 12 meses. Wiedenfeld (2004) constatou que o valor de K_c , da cana-de-açúcar para a fase de máximo crescimento (maio a outubro), variou de 0,9 a 1,0.

Semelhante ao que foi discutido para a ET_c , também, foi observado uma redução seguida de um novo aumento dos valores de K_c , no período compreendido entre 200 e 300 DAC (Figura 68), como resultado do tombamento da cana-de-açúcar. Comportamento similar foi constatado no estudo desenvolvido por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003), onde se observou redução dos valores de K_c , próximo aos 200 DAC.

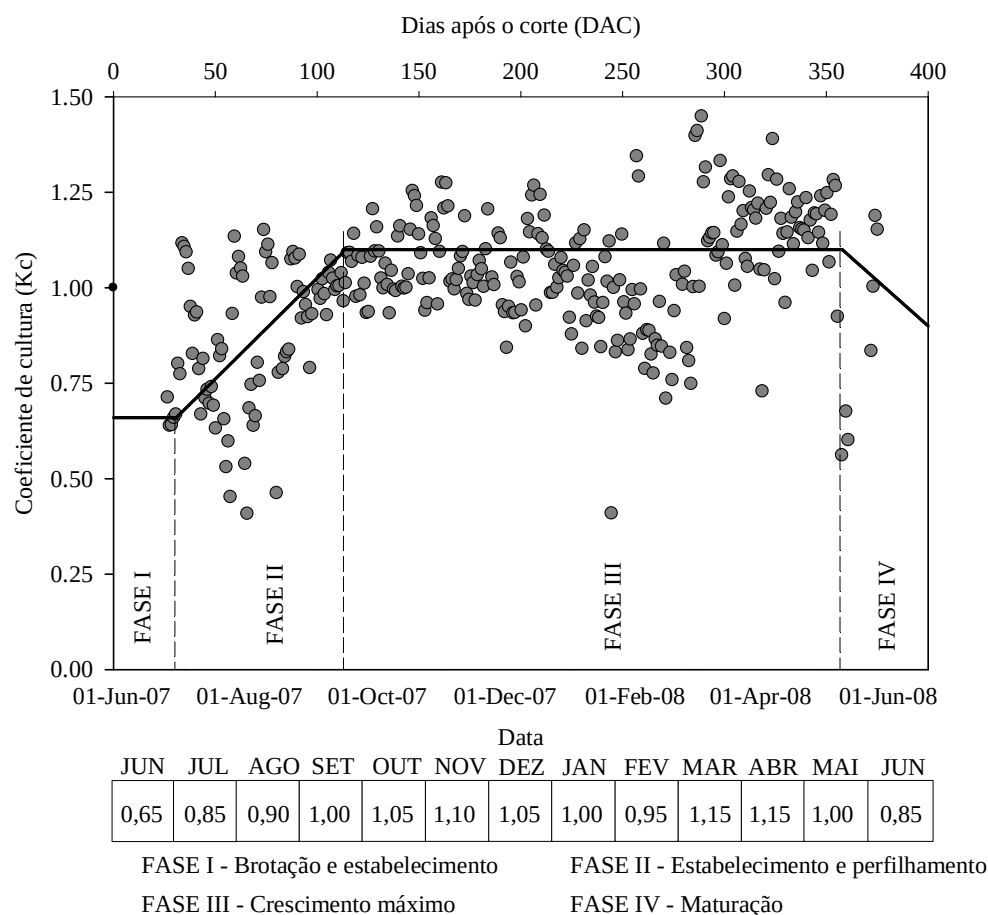


Figura 68. Coeficiente de cultura (K_c) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Na Fase IV, verificou-se que os valores de K_c reduziram, ao final do ciclo, para 0,85 (Figura 68), sendo este valor superior ao informado no Boletim 56 da FAO ($K_c = 0,70$). Este resultado pode estar associado ao fato do monitoramento micrometeorológico ter sido finalizado 20 dias antes da colheita da cana. Outra causa provável, é que o valor de 0,70 citado no boletim 56 da FAO, pode ter sido oriundo de dados médios de experimentos realizados sob condições de menor disponibilidade de água no solo, durante esta fase de crescimento da cultura (INMAN-BAMBER & MCGLINCHEY, 2003), quando comparado com o presente experimento (Figura 7F). Souza et al. (1997) obtiveram valores de K_c para esta fase (junho a agosto), reduzindo-se de 0,85 para 0,60. Ao final do ciclo (novembro a dezembro), Omary & Izuno (1995) determinaram um valor médio de K_c igual a 0,93.

Na Figura 69, estão demonstrados as equações empíricas ajustadas para estimativa do coeficiente de cultivo (K_c) da cana-de-açúcar, no ciclo de cana-soca. Esse tipo de informação torna-se de grande importância, pois permite calcular o valor de K_c

para qualquer idade da cana, visando a otimização do manejo da irrigação desta cultura, de uma maneira simples e prática (HANSON & MAY, 2006; SAMMIS et al., 2004). Para o ajuste das equações, foram considerados todos os dados médios mensais do Kc ao longo do ciclo da cultura, visando suavizar as variações diárias e possibilitar a obtenção de equações com melhor ajuste, bem como pelo fato de que, na prática, os produtores agrícolas utilizam dados médios durante períodos mais longos de tempo.

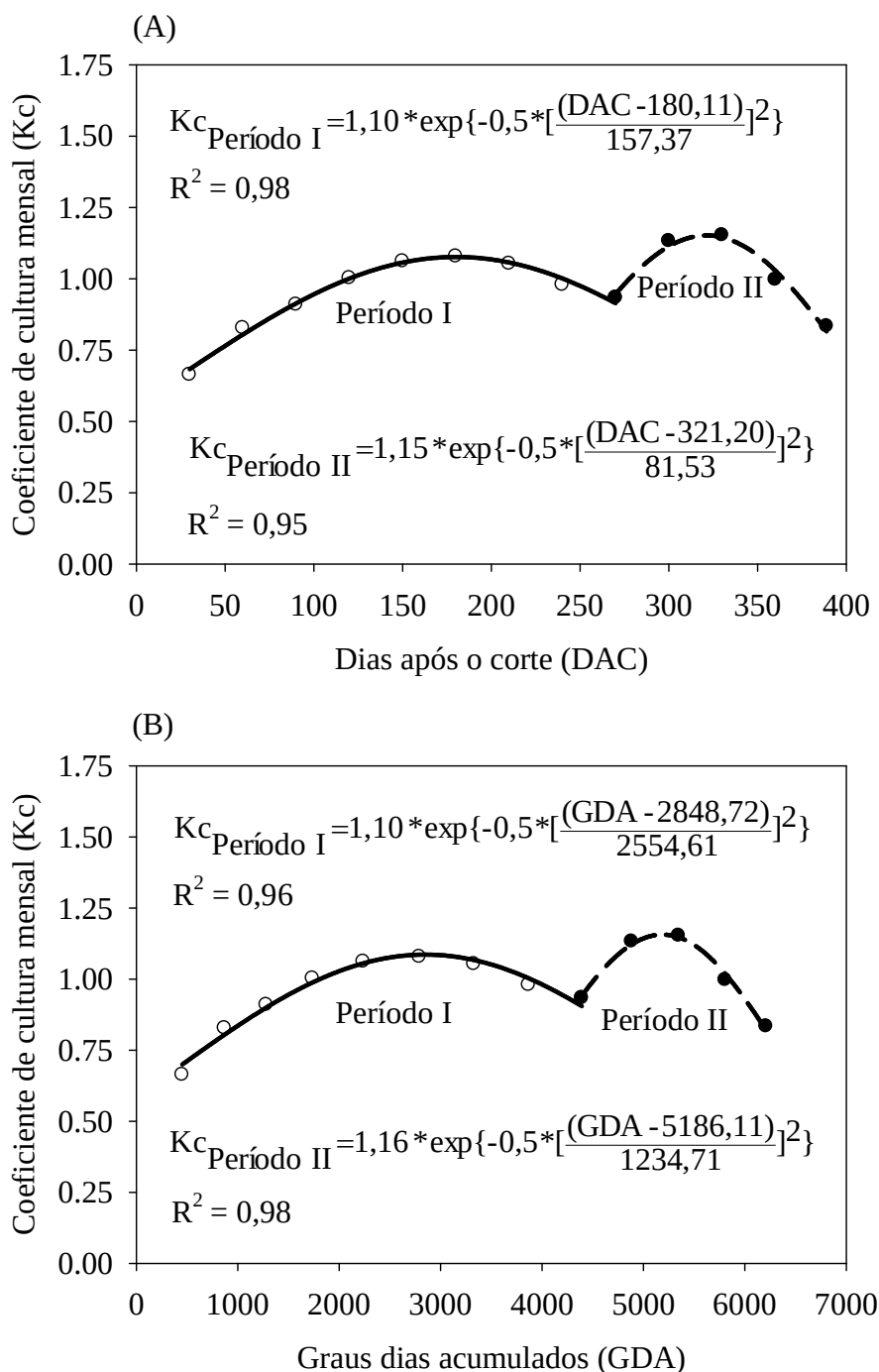


Figura 69. Ajuste do coeficiente de cultura (Kc) mensal para a cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, utilizando como variáveis independentes dias após corte (DAC) (A) e graus dias acumulados (GDA) (B), considerando os períodos, antes (período I) e depois (período II) do tombamento da cultura.

Considerou-se os períodos antes (período I) e depois (período II) do tombamento da cultura, para ajustar as equações de estimativa do Kc mensal, que apresentou o formato de uma dupla sigmóide. Adicionalmente, foram utilizados como variáveis independentes os valores dos dias após corte (DAC) (Figura 69A) e dos graus dias acumulados (GDA) (Figura 69B). A equação sigmoidal Gaussiana com três parâmetros foi a que apresentou os maiores valores dos coeficientes de determinação e os parâmetros das equações estatisticamente significativos ($P < 0,01$). Verificou-se, também, que os coeficientes de determinação das equações, utilizando os DAC e os GDA, mostraram-se bastante semelhantes, variando entre 0,95 e 0,98 (Figura 69A e 69B).

5.6. Análise da eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada

5.6.1. Dados das lâminas utilizadas no cálculo da eficiência do uso de água

Em termos de lâminas acumuladas, as entradas (irrigação e precipitação) e saídas (evapotranspiração da cultura e evapotranspiração máxima) de água do sistema de produção da cana-de-açúcar, para todas as fases fenológicas, podem ser observadas na Figura 70. Verificou-se que, a lâmina total de água que entrou no sistema de produção por precipitação e irrigação (P+I) no ciclo da cana-de-açúcar foi superior a ETc, totalizando 3073 e 1710 mm, respectivamente. Do volume de P+I, 2525 mm foram oriundos da irrigação e apenas 523 mm foram resultantes da precipitação (P), sendo que a maior parte deste valor ocorreu durante a Fase III (crescimento máximo). Constatou-se ainda que durante o ciclo, a ETc acumulada foi ligeiramente inferior a evapotranspiração máxima da cultura (ETm), que totalizou valores iguais a 1860 mm. Finalmente, a demanda atmosférica local, em termos de evapotranspiração de referência (ETo), foi de 1743 mm.

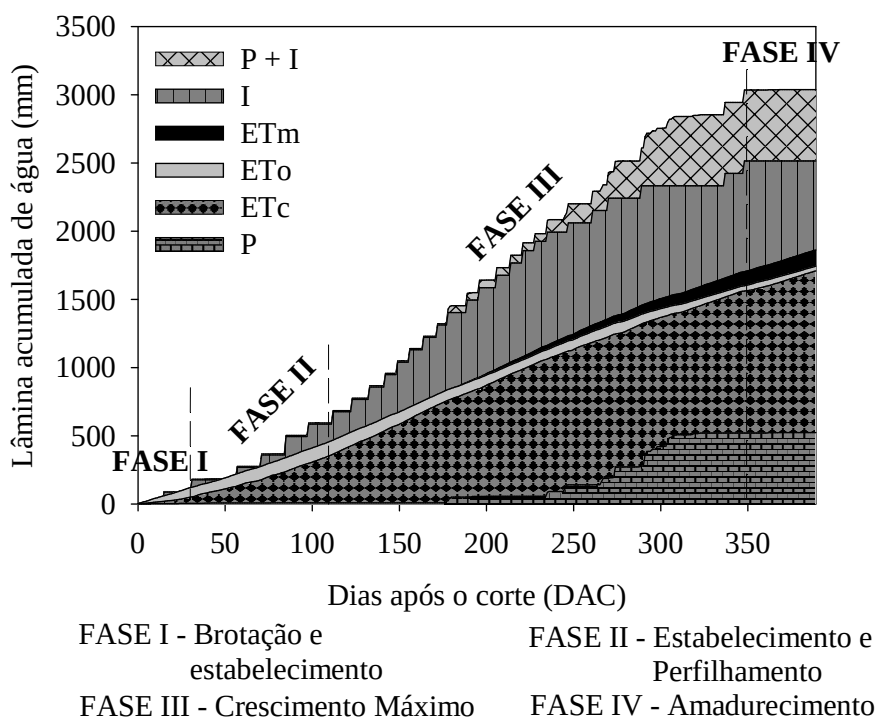


Figura 70. Entradas (irrigação e precipitação) e saída (evapotranspiração) acumuladas após o corte da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: P = precipitação, I = irrigação, ETm = evapotranspiração máxima da cultura, ETo = evapotranspiração de referência e ETc = evapotranspiração da cultura.

5.6.2. Eficiência do uso de água em relação à resposta produtiva da cultura

A partir dos dados acumulados de biomassa seca dos colmos (BSC), da palhada (BSPA) e do total da parte aérea (BSTPA) da cana-de-açúcar e das lâminas de água evapotranspirada pela cultura (ETc) e que entraram no sistema de produção por precipitação (P) e irrigação (I), calculou-se a eficiência do uso de água mensal da cultura, em termos de resposta produtiva, utilizando o uso eficiente de água (UEA). Os desempenhos de UEA em relação à ETc e (P+I) podem ser observados nas Figuras 71A e 71B, respectivamente.

Com base nestas figuras, constatou-se que os meses produtivos (MP) 7 e 8 (período inserido na Fase III) foram os que apresentaram os maiores valores de UEA_{BSTPA} , sendo de $7,88 \pm 0,10 \text{ kg m}^{-3}$ em relação à ETc e de $4,01 \pm 0,70 \text{ kg m}^{-3}$ quando relacionado com (P+I). Estes meses compreendem a fase de maior taxa média de alongação média dos colmos (TEMC), como resposta da alta disponibilidade de radiação solar e de água no solo. Verificou-se, também, que neste período obtiveram-se os maiores valores de UEA_{BSC} , que foram de $6,60 \pm 0,29 \text{ kg m}^{-3}$ em relação à ETc e de $3,35 \pm 0,39 \text{ kg m}^{-3}$ quando relacionado com (P+I). No período subsequente, dentro desta mesma fase, constatou-se, ainda, que os valores de UEA_{BSC} reduziram-se de $0,81 \text{ kg m}^{-3}$ para $0,48 \text{ kg m}^{-3}$, uma vez que a cana-de-açúcar apresentou uma redução contínua no seu crescimento (Figura 28). Na Fase IV (MP13), observou-se que o valor de UEA_{BSC} foi de $9,71 \text{ kg m}^{-3}$, considerando (P+I) (Figura 71B), em decorrência do longo período de suspensão da irrigação e do pequeno acúmulo de biomassa. Por outro lado, quando se considerou a ETc, observou-se o menor valor do ciclo ($0,26 \text{ kg m}^{-3}$). Para o ciclo como um todo, verificou-se que os valores de UEA_{BSC} foram de 2,95 e de $1,67 \text{ kg m}^{-3}$, em relação à ETc e a (P+I), respectivamente (Tabela 9).

Em base de palhada, constatou-se para a Fase III, que os valores máximos de UEA_{BSPA} ocorreram entre os meses produtivos MP4 e MP7, tendo sido de $1,51 \pm 0,20$ e de $0,85 \pm 0,12 \text{ kg m}^{-3}$, correspondentes à ETc e a (P+I), respectivamente (Figuras 71A e 71B). Em seguida, observou-se uma diminuição dos valores de UEA_{BSPA} , como resposta da maior fração de biomassa destinada aos colmos (Figura 33). A partir desse período, verificou-se que os seus valores reduziram-se até o MP12, passando de 0,99 para $0,07 \text{ kg m}^{-3}$, quando relacionado com a ETc, e de 0,90 para $0,04 \text{ kg m}^{-3}$, assumindo (P+I).

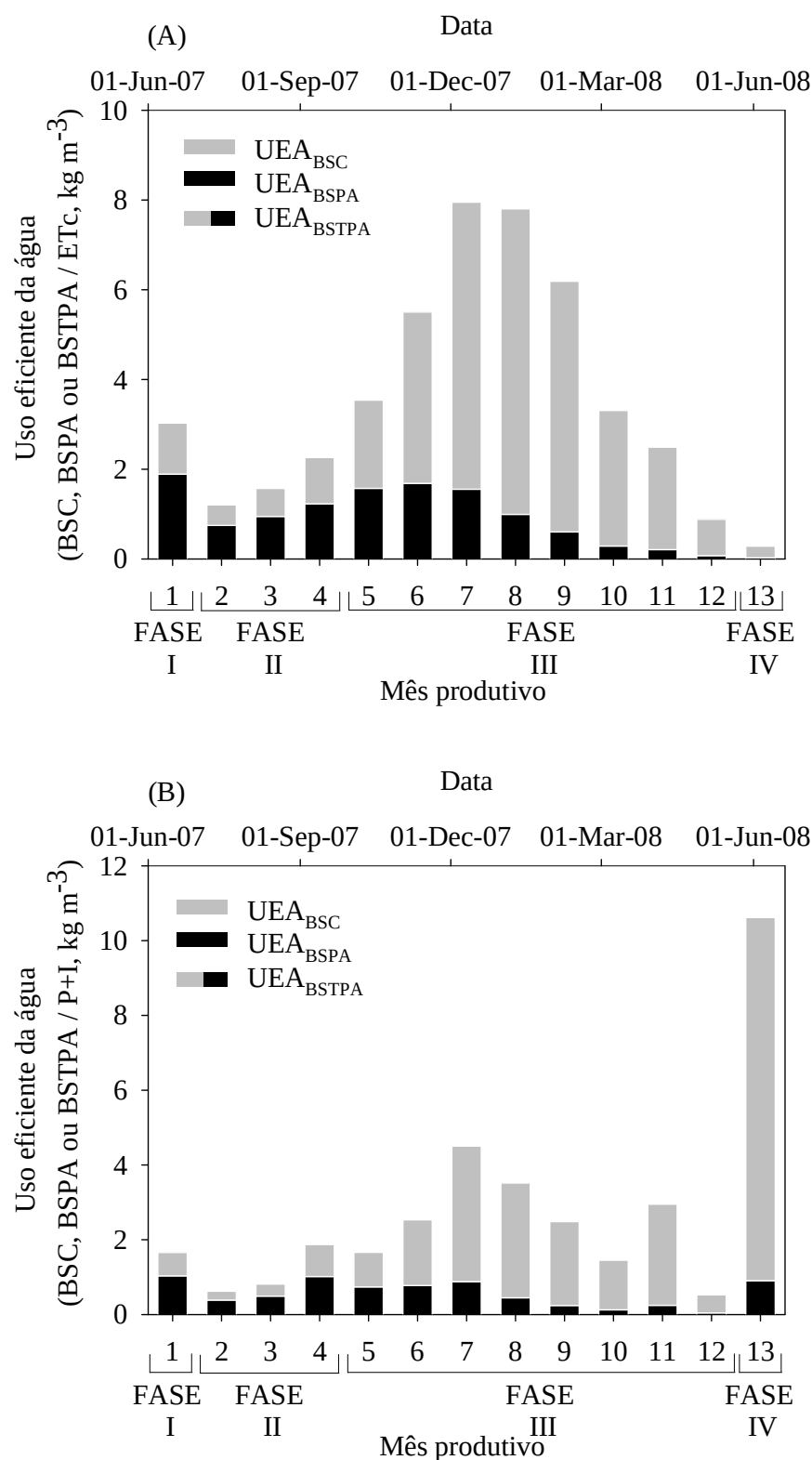


Figura 71. Uso eficiente de água (UEA) para os meses produtivos da cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, em relação à biomassa seca dos colmos (BSC), palhada (BSPA) e biomassa seca total da parte aérea (BSTPA), considerando a evapotranspiração da cultura (ETc) (A) e o volume de água que entrou no sistema por precipitação e irrigação (P+I) (B).

Tabela 9. Indicadores da eficiência do uso de água para a cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

SRA (adimensional)	1,63
ER (mm)	0,92
FRA (adimensional)	0,56
DHC (mm)	145,3
UEA _(ETc) , em base seca da parte aérea (kg m ⁻³)	3,93
UEA _(P+I) , em base seca da parte aérea (kg m ⁻³)	2,22
UEA _(ETc) , em base seca de colmos (kg m ⁻³)	2,95
UEA _(P+I) , em base seca de colmos (kg m ⁻³)	1,67
UEA _(ETc) , em base seca de palhada (kg m ⁻³)	0,94
UEA _(P+I) , em base seca de palhada (kg m ⁻³)	0,53
PA _{C(ETc)} , em base industrial de colmos (kg m ⁻³)	9,49
PA _{C(P+I)} , em base industrial de colmos (kg m ⁻³)	5,36
PA _{C(ETc)} , em base de açúcar (kg m ⁻³)	1,22
PA _{C(P+I)} , em base de açúcar (kg m ⁻³)	0,69
PA _{C(ETc)} , em base de álcool (ml m ⁻³)	875,23
PA _{C(P+I)} , em base de álcool (ml m ⁻³)	494,14

Obs.: SRA = suprimento relativo de água, ER = evapotranspiração relativa, FRA = fração de redução de água, DHC = déficit hídrico da cultura, UEA = uso eficiente de água, PA_C = produtividade da água da cultura, ET_c = evapotranspiração da cultura e P+I = volume de água da precipitação mais irrigação.

Verificou-se, também, que a UEA_{BSPA} apresentou um comportamento de modo semelhante à UEA_{BSC}, logo que os seus valores mais elevados alcançaram 0,90 kg m⁻³. Ao final do ciclo, o valor de UEA_{BSPA} foi de 0,94 kg m⁻³ em relação à ET_c e de 0,53 kg m⁻³ quando relacionado com (P+I) (Tabela 9).

Por outro lado, quando se relacionou o rendimento de colmos em base industrial (TCH), RBAÇ e RBAL com os valores de ET_c e de (P+I), a eficiência do uso de água foi analisada em termos de produtividade da água da cultura (PA_C). Observou-se que o valor de PA_C foi igual a 9,49 kg m⁻³, utilizando a ET_c, enquanto que foi de 5,30 kg m⁻³, quando se considerou (P+I) (Tabela 9). Inman-Bamber & Smith (2005) mencionam que a PA_C da cana-de-açúcar pode atingir valores elevados, variando entre 4,8 a 12,1 kg m⁻³ para o Sudeste da África, Havaí e Austrália, e de 5,3 a 15,4 kg m⁻³, a depender da faixa de acúmulo de biomassa da cultura e do déficit de pressão de vapor da região. Singh et

al. (2007), avaliando o planejamento da irrigação para cana-de-açúcar (variedade CoPant 84212), com base na relação entre as lâminas de irrigação e da evapotranspiração acumulada do tanque classe A, obtiveram valores de PA_C , variando entre 5,8 e 7,6 kg m⁻³. Doorembos & Kassam (1979) citam que a cana-de-açúcar, sob condições irrigadas nos trópicos e subtropicais secos, em solos com 80% de água disponível, pode apresentar entre 5 e 8 kg m⁻³, em termos de colmos, e de 0,6 a 1 kg m⁻³, em termos de sacarose.

Em termos de rendimento de açúcar e de álcool, a cana-de-açúcar irrigada apresentou uma PA_C de 1,22 kg m⁻³ e 875,23 ml m⁻³ quando foram considerados os valores de ET_c (Tabela 9). Quando se considerou a lâmina total aplicada ($P+I$), constatou-se que os seus valores foram de 0,69 kg m⁻³ e 494,14 ml m⁻³, respectivamente (Tabela 9). Farias et al. (2008) relatam, para a região norte paraibana dos tabuleiros costeiros, que a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar (variedade SP 791011) quanto às produções de colmo e de açúcar foram da ordem de 7,12 e 0,67 kg m⁻³, respectivamente. Estes resultados indicam que a cana-de-açúcar, variedade RB 92597, quando bem irrigada, sob as condições semi-áridas do Nordeste, podem apresentar uma alta eficiência de produção de açúcar e álcool, em comparação com outras regiões e variedades.

5.6.3. Eficiência do uso de água em relação ao desempenho de aplicação de água no sistema de produção

Os indicadores de eficiência do uso de água (SRA, ER, DHC e FRA), em relação ao desempenho de aplicação com base na demanda máxima requerida pela cultura, podem ser observados nas Figuras 72 a 75.

O suprimento relativo de água (SRA) variou entre 0,83 e 2,19 ao longo dos meses produtivos (MP) das Fases I, II, III e IV (Figura 72). No MP1 (junho/2007), verificou-se que o valor de SRA foi de 1,15, como resultado do baixo regime de chuvas nesse período e do grande intervalo entre os dois eventos consecutivos de irrigação.

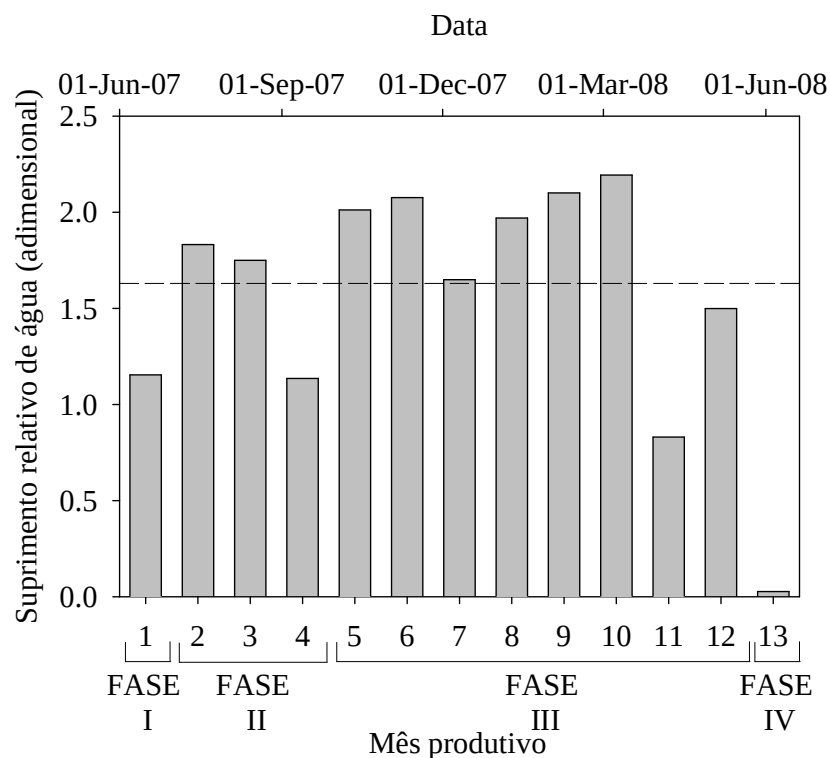


Figura 72. Suprimento relativo de água (SRA) para os meses produtivos da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

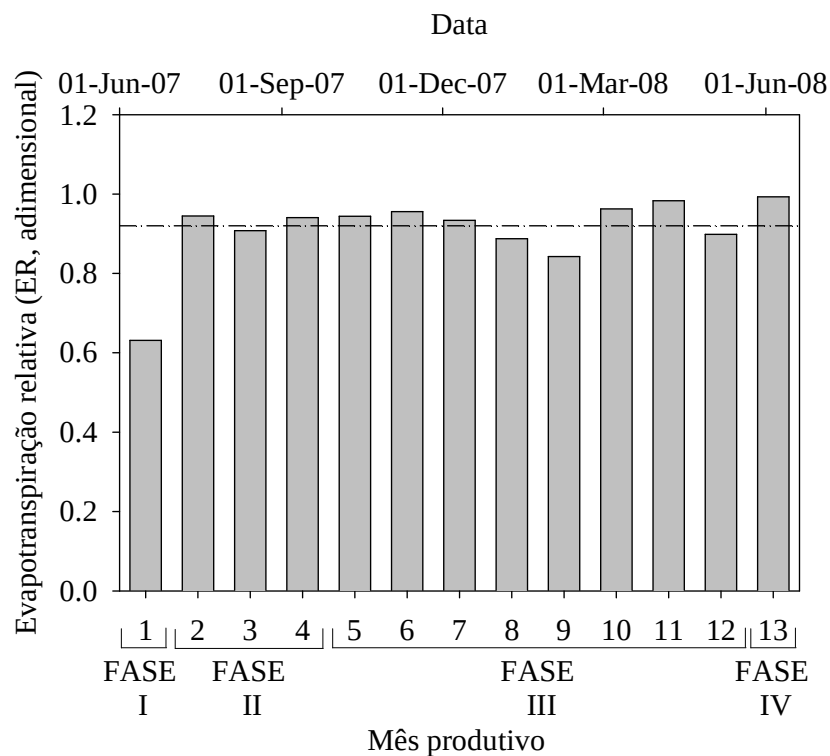


Figura 73. Evapotranspiração relativa (ER) para os meses produtivos da cultura da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

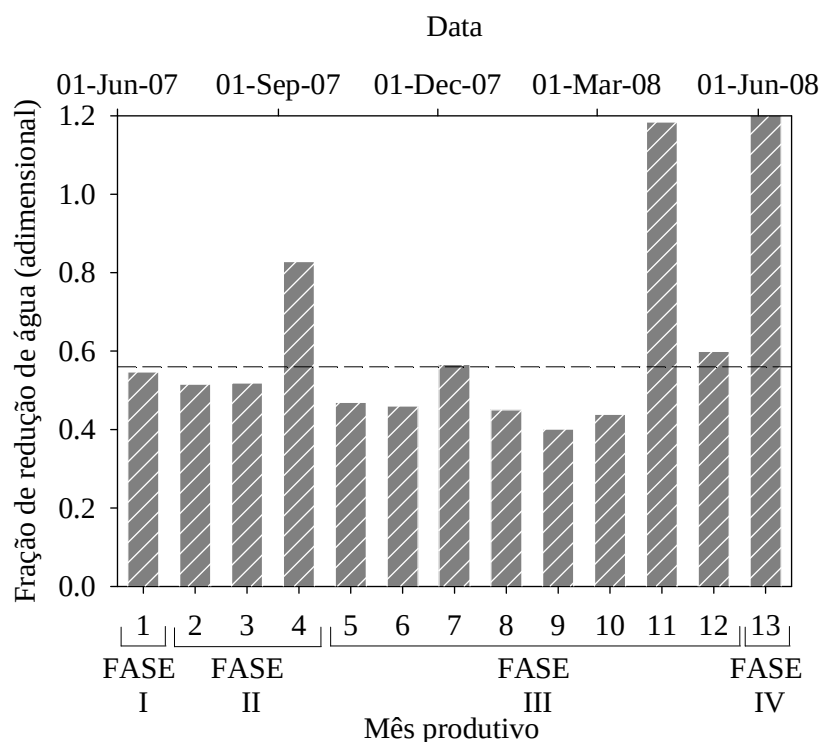


Figura 74. Fração de redução de água (FRA) para os meses produtivos da cultura da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

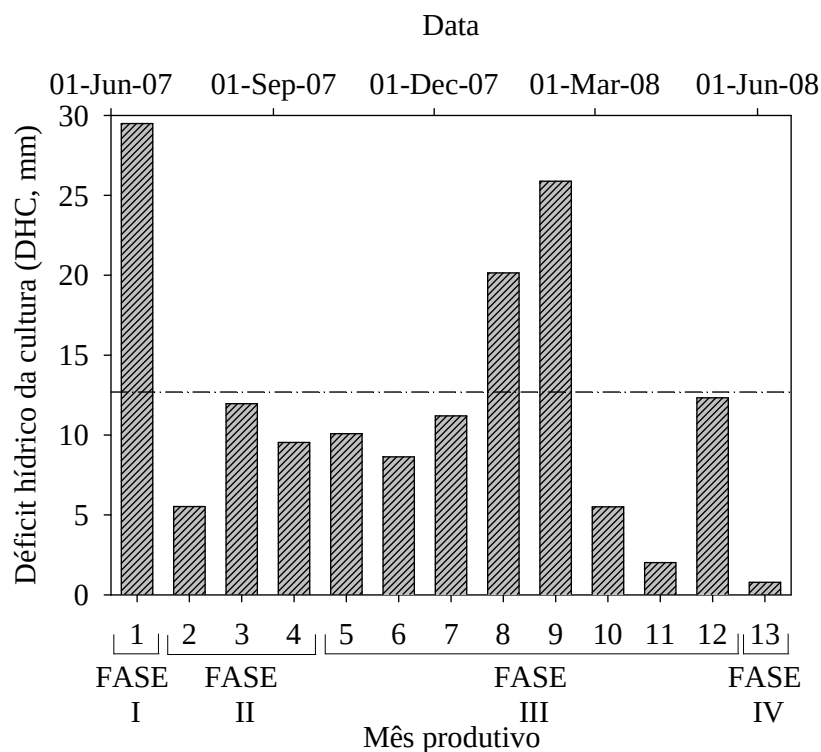


Figura 75. Déficit hídrico da cultura (DHC) para os meses produtivos da cultura da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo.

No MP2 e MP3, constatou-se que os valores de SRA são mais alto do que o MP1, sendo iguais a 1,83 e 1,75, mas que decresceu para 1,14 no MP4 (setembro/2007) (Figura 72). Este comportamento ocorre em decorrência do aumento da demanda máxima da cultura, como reposta da elevação da demanda atmosférica local (Figura 7C). Entretanto, na Fase III, os valores de MP5 a MP10 foram, em média, iguais a $2,0 \pm 0,19$. Contudo, o MP10 ocorreu dentro do período mais chuvoso desta região, que combinado com a redução da disponibilidade de radiação solar (Figura 7B) e, por conseqüente, diminuição da demanda atmosférica (Figura 7C), apresentou uma diminuição da demanda máxima pela cultura. Assim, o volume de água adicionado ao sistema, por precipitação e irrigação, resultou em elevados valores de SRA (2,19) (Figura 72). Segundo Molden et al. (1998), valores de SRA em torno de 2 são considerados ideais para o sistema de produção, e que valores muito acima indicam que um grande volume de água pode estar sendo perdido por drenagem profunda, aumentando o nível do lençol freático, ou sendo perdido escoamento.

Já o MP11 ocorreu no período final da estação chuvosa, quando então o número de eventos de irrigação era reduzido (Figura 7F). Apesar disto, verificou-se que a cana-de-açúcar apresentou uma UE_{ABSTPA} de $2,49 \text{ kg m}^{-3}$ (Figura 71A), indicando que um SRA igual a 0,83, foi ainda suficiente para aumentar a eficiência do uso de água pela cultura. Resultados similares foram observados por Teixeira et al. (2008), para a cultura da mangueira, os quais obtiveram um SRA igual a 0,80, considerado como limite crítico para promover o aumento da eficiência do uso de água pela cultura. No MP12 (maio/2008), ocorreram apenas 2 eventos de irrigação que foram realizados no começo do mês, que permitiram a reposição de água no solo, mas que na seqüência teve a irrigação suspensa, resultando num valor de SRA igual 1,50. Além disso, verificou-se a redução da demanda máxima da cultura (ET_m). O valor de SRA mais baixo (0,03) foi obtido no último mês produtivo (MP13), em decorrência do elevado déficit de água no solo, causado pela suspensão da irrigação.

O valor médio obtido para o ciclo da cana-de-açúcar foi de 1,63 (Tabela 9), que está situado dentro da faixa de valores de SRA informados por Karatas et al. (2009), para os distritos de Salihli RB (1,66) e Salihli LB (1,24) localizados na Turquia. Dentre os distritos avaliados pelos autores, estes apresentaram os melhores desempenhos quanto ao fornecimento de água para as culturas.

Quando se analisou a evapotranspiração relativa (ER) (Figura 73), constatou-se entre os meses produtivos que os menores valores foram o MP1 (junho/2007) com 0,63, MP8 (janeiro/2008) com 0,89 e MP9 (fevereiro/2008) com 0,84. Roerink et al. (1997)

citam que os valores aceitáveis de ER para áreas irrigadas devem ser superiores a 0,75. Com base neste valor de referência, apenas o MP8 e MP9 situaram-se acima de 0,75. Contudo, o valor de 0,63 pode ser considerado aceitável, logo que o UEA_{BSTPA} situou-se em torno de $3,03 \text{ kg m}^{-3}$. Constatou-se, também, que apesar da restrição do conteúdo de água, condicionado pela suspensão da irrigação no período de maturação da cultura (MP13), a ET_c alcançou valores muito próximos ao máximo esperado para esta fase, resultando em um valor de ER igual a 0,97 (Figura 73). Este resultado está associado com a demanda máxima da cultura da cana-de-açúcar, que foi relativamente baixa neste período, bem como devido à elevada capacidade de retenção de água dos vertissolos. Assim, mesmo sob condições de suspensão de água, o volume de água armazenado no solo atendeu à demanda evapotranspirométrica desta cultura na sua fase final de maturação.

Os MP8 e MP9 compreenderam meses em que a demanda máxima da cultura foi considerada alta, apesar da diminuição dos valores de ER. Este resultado é decorrente da redução de ET_c , devido, provavelmente, ao tombamento sofrido pela cultura, como já mencionado. Ao longo do ciclo, o valor médio de ER foi de 0,92 (Tabela 9). Bastiaanssen et al. (2001) observaram valores de 0,76 para fruteiras cultivadas no Submédio do Vale do São Francisco, enquanto Karatas et al. (2009) encontraram valores médios em torno de 0,70 para dez distritos irrigados na Turquia.

A fração de redução de água (FRA) (Figura 74) revelou um valor médio para o ciclo da cana-de-açúcar igual a 0,56 (Tabela 9), indicando que apenas 56% do volume total de água (P+I) que entrou no sistema de produção foi utilizado pela cultura. Este valor de FRA está dentro da faixa limite de 0,5 a 0,7 para regiões de clima semi-áridas (BASTIAANSSEN et al., 2001). Isto significa que 44% da lâmina de água aplicada deixou de ser efetivamente utilizada, sendo assim importante a redistribuição da aplicação de água para outros períodos do ciclo da cultura (BOS et al., 2005). Analisando-se a FRA para cada mês produtivo, observou-se que dez dos 13 meses produtivos apresentaram excesso de água, uma vez que os valores de FRA foram inferiores a 0,6 (valor médio limite). Entretanto, na Fase IV, os valores de FRA mostraram-se bastante elevados (Figura 74), logo que a entrada de água no sistema por P+I foi de 3 mm, proveniente apenas de dois eventos de precipitação.

Como o indicador DHC está relacionado com o SRA (Figura 75), é possível conhecer a magnitude da deficiência hídrica sofrida pela cultura ao longo dos meses produtivos, ou seja, quanto à mesma deixou de evapotranspirar em relação a sua demanda máxima (BASTIAANSSEN et al., 2001). Apesar dos altos valores de SRA

obtidos nos MP8 e MP9, decorrente do alto volume de água que entrou no sistema, constatou-se uma deficiência de água que pode estar relacionada a fatores intrínsecos do solo ou das condições meteorológicas vigentes, restringindo a absorção de água pelas plantas. Contudo esta deficiência foi pequena, atingindo valores de $20,2 \text{ mm mês}^{-1}$ para o MP8, e de $25,9 \text{ mm mês}^{-1}$ para MP9, sendo em média igual a $23,0 \pm 4,0 \text{ mm mês}^{-1}$. No MP1, verificou-se valores de DHC atingindo $29,5 \text{ mm mês}^{-1}$. Estes valores mostraram-se inferiores ao informado por Bastiaanssen et al. (2001), que assumem como valor crítico de DHC, 30 mm mês^{-1} . Entretanto, neste período, não se verificaram diminuições expressivas na disponibilidade de água (Figura 7F), ao passo que o tombamento da cultura condicionou uma pequena redução do seu IAF (Figuras 25 e 26), justificando a redução da evapotranspiração da cultura em relação a sua demanda máxima.

O DHC acumulado ao longo do ciclo foi de apenas $145,3 \text{ mm}$, correspondendo a $8,5\%$ da demanda máxima requerida pela cultura (Tabela 9). No MP1 (Fase I), em que a restrição hídrica foi de $29,5 \text{ mm mês}^{-1}$, a equivalência foi de $58,4\%$ em relação a sua demanda máxima acumulada para esta fase. No entanto, alcançou $89,15 \text{ mm mês}^{-1}$ ($7,4\%$), na Fase III, e apenas $11,0 \text{ mm mês}^{-1}$ ou $7,4\%$ da sua demanda máxima acumulada, na Fase IV.

6. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas neste estudo, foi possível concluir que:

1. a cana-de-açúcar irrigada apresentou excelentes padrões de crescimento, de produção de biomassa seca e de rendimento, quando cultivada sob as condições semi-áridas do Submédio do Vale do São Francisco;
2. a maior fração (81%) da energia disponível ($R_n - G$), na interface cana-de-açúcar/atmosfera, foi destinada ao fluxo de calor latente (LE). Porém, verificou-se, sobre os valores de LE, os efeitos da alta demanda atmosférica, da nebulosidade variável e da redução da disponibilidade de água no solo entre os eventos de irrigação;
3. o fator de desacoplamento foi de moderado a alto (0,6 a 0,8), indicando um controle do processo de troca de vapor d'água da cana-de-açúcar com a atmosfera, principalmente no período em que ocorreu o tombamento da cultura, verificado nos meses mais quentes, quando ocorreram altos valores de disponibilidade de radiação e de demanda atmosférica;
4. a interação entre a cana-de-açúcar e a atmosfera, no início do seu ciclo, foi menor, em decorrência do baixo índice de área foliar que inibem o contato entre a cultura e a atmosfera;
5. o processo de troca de vapor d'água da cana-de-açúcar com a atmosfera foi governado, especialmente, pela disponibilidade de energia, mesmo sob condições semi-áridas. Contudo foi possível verificar que o sistema solo-clima induziu a um maior controle da cultura ao processo de evapotranspiração, logo que apresentou valores do fator de desacoplamento ligeiramente inferiores ($\sim 0,68$) quando comparados aos informados na literatura;
6. Observou-se que os valores da evapotranspiração (ET_c) e do coeficiente de cultura (K_c) da cana-de-açúcar irrigada, no ciclo cana-soca, sob condição semi-árida do Submédio do Vale do São Francisco, foram ligeiramente inferiores aos recomendados no boletim 56 da FAO. Além do mais, verificou-se, em alguns períodos do ciclo produtivo, os efeitos do tombamento da cultura sobre os valores de ET_c e de K_c ;

7. a evapotranspiração diária média da cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, nas condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco, foi de 4,7 mm dia⁻¹, resultando em um requerimento total de 1710 mm;
8. os valores do coeficiente de cultura da cana-de-açúcar variaram de 0,65 a 1,10 entre as fases de brotação e estabelecimento, e crescimento máximo, reduzindo-se para 0,85 na fase de maturação da cultura;
9. as equações de estimativa do coeficiente de cultura mensal apresentaram excelentes ajustes com valores do coeficiente de determinação, variando entre 0,95 a 0,98, quando foram utilizados os dias após o corte e os graus dias acumulados como variáveis independentes;
10. a maior produção de palhada da cana-de-açúcar ocorreu até o sétimo mês produtivo, mas após este período, a maior partição (76%) foi para os colmos;
11. a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar demonstrou que a cultura se desenvolveu sob condições favoráveis de disponibilidade de água no solo, mesmo evidenciando alguma deficiência hídrica (< 30 mm mês⁻¹), decorrente do tombamento da cultura em alguns meses produtivos;
12. as eficiências de produção foram de 9,49 kg de colmos, 1,22 kg de açúcar e 875,23 ml de álcool por metro cúbico de água evapotranspirada pela cultura (ETc) e de 5,36 kg de colmos, 0,69 kg de açúcar e 494,14 ml de álcool por metro cúbico de água, que entrou na área de cultivo por precipitação e irrigação (P+I);
13. as informações obtidas poderão ser utilizadas para subsidiar novos experimentos, visando definir o período do ano em que a cultura pode apresentar maior eficiência produtiva, bem como pesquisas de modelagem que visem melhor entender os impactos dos agroecossistemas no clima local. Adicionalmente, estas informações auxiliarão os produtores no manejo de água nas propriedades agrícolas e na melhoria da eficiência do uso de água dos sistemas de produção de cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEGOKE, J. O.; PIELKE SR, R.; CARLETON, A. M. Observational and modeling studies of the impacts of agriculture-related land use change on planetary boundary layer processes in the central U.S. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.142, p. 203–215, 2007.
- AHMAD, M. D.; TURRAL, H.; NAZEER, A. Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 96, p.551-564, 2009.
- AHRENS, C. D. **Essentials of meteorology**: an invitation to the atmosphere. 3. ed. Belmont: Thomson Brooks Cole, 2000. 463 p.
- ALFONSI, R. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar: cana-de-açúcar: cultivo e utilização. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 42-55.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 326 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, A. C. dos S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.
- ALONSO-PIPPPO, W.; LUENGO, C. A.; KOEHLINGER, J.; GARZONE, P.; CORNACCHIA, G. Sugarcane energy use: the Cuban case. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 36, p. 2163- 2181, 2008.
- ALVAREZ, I. A.; CASTRO, P. R. C. Crescimento da parte aérea da cana crua e queimada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1069-1079, 1999.
- AMARAL, F. C. S. do; FERNANDES, L. A. C.; ARAÚJO FILHO, A. A.; VIEIRA, V. J. de S.; FARIA JÚNIOR, W. G. **Influência da irrigação na condutividade hidráulica de um vertissolo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 35 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 113).
- ANGUS, D. E.; WATTS, P. J. Evapotranspiration how good is the bowen ratio method?. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 8, p. 133-150, 1984.
- ASSENS, S.; HSIAO, T. C. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 67, p. 191-206, 2000.
- AYRA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 2001. 420 p.
- AZEVEDO, H. M. **Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba**. 2002. 112 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 58, p. 241–254, 2003.

- BAILLIE, C. **Strategies for Maximizing Sugarcane Yield with Limited Water in the Bundaberg District**. 2004. 183 f. Dissertation (Master's degree) – University of Southern Queensland, Queensland.
- BALDOCCHI, D. D.; XU, L.K.; NANCY, K. How plant functional type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 123, p. 13-39, 2004.
- BALDOCCHI, D.; KELLEHER, F.; BLZCK, T. A.; JARVIS, P. Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. **Global Change Biology**, Oxford, v. 6, n. 1, p. 69-83, 2000.
- BANDARA, K. M. P. S. **Assessing irrigation performance by using remote sensing**. 2006. 156 f. Ph.D. Thesis (Doctor) - Wageningen Agricultural University, Wageningen..
- BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 140 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BARBOSA, M. H. P.; BASTOS, I. T.; SILVEIRA, L. C. I.; OLIVEIRA, M. W. Análise de causa e efeito para produção de colmos e seus componentes na seleção de famílias de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 2002. p. 366-370.
- BASTABLE, H.; SHUTTLEWORTH, W. J.; DALLAROSA, R. L. G.; FISH, G.; NOBRE, C. A. Observations of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. **International Journal Climatology**, Chichester, v. 13, n. 7, p. 783-796, 1993.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; BRITO, R. A. L.; BOS, M. G.; SOUZA, R. A.; CAVALCANTI, E. B.; BAKKER, M. M. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation Drainage System**, New York, v. 15, p. 53–79, 2001.
- BELL, M. J.; GARSIDE, A. L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 231–248, 2005.
- BELTRÁN-PRZEKURAT, A.; PIELKE SR, R. A.; PETERS, D. P.C.; SNYDER, K. A.; RANGO, A. Modeling the effects of historical vegetation change on near-surface atmosphere in the northern Chihuahuan desert. **Journal of Arid Environments**, London, v. 72, p. 1897– 1910, 2008.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal, FUNEP, 1988. 44 p.
- BERNARDES, M. **Uma análise da variabilidade do fluxo de momentum na camada superficial atmosférica em condições instáveis**. 2008. 191 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BEZUIDENHOUT, C. N. **A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugarcane crop model**. 2000. 79 f.. M. Tech thesis - Technikon Natal, Durban, South Africa.

- BLAD, B. L.; ROSENBERG, N. J. Lysimetric calibration of the bowen ratio-energy balance method for evapotranspiration estimation in the Central Great Plains. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 13, p. 227-236, 1974.
- BONNETT, G. D. Rate of leaf appearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. **Australian Journal Plant Physiology**, Victoria, v. 25, p. 829-834, 1998.
- BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 57, p. 1087-1095, 2006.
- BONNEVILLE, M. C.; STRACHAN, I. B.; HUMPHREYS, E. R.; ROULET, N. T. Net ecosystem CO₂ exchange in a temperate cattail marsh in relation to biophysical properties. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 69-81, 2008.
- BOS, M.G.; BURTON, M. A.; MOLDEN, D. J. Performance indicators for irrigation and drainage. In: BOS, M. G.; BURTON, M. A.; MOLDEN, D. J. **Irrigation and drainage performance assessment: practical guidelines**. Wallingford: CABI, 2005., cap. 3, p. 26-61.
- BOS, M. G.; MURRAY-RUST, D. H.; MERREY, D. J.; JOHNSON, H. G.; SNELLEN, W. B. Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. **Irrigation and Drainage Systems**, New York, v. 5, p. 231-261, 1994.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional: ano base 2008: ano base 2007**. Rio de Janeiro: EPE, 2008. 244 p. il.
- BRAUNER, D. C.; COSTA, G. B.; LEÃO, I. B. Parâmetros meteorológicos na cultura da cana-de-açúcar, no município de Pilar-AL. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 9., 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008. p.734-739.
- BROTZGE, J. A.; CRAWFORD, K. C. Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and bowen ratio measurement systems. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 4, p. 160-178. 2003.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Boston: D. Reidel, 1982. 299 p.
- CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; LIGO, M. A. V.; BRUNINI, O.; DIAS, M. A. F. S. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 61-70, 2003.
- CALDAS, C. **Manual de análises selecionadas para indústrias sucroalcooleiras**. Maceió: Sindicato da Indústria e do Alcool do Estado de Alagoas, 1998. 438 p.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **Introduction to environmental biophysics**. New York; Springer, 1998. 286 p.
- CAMPOS, C. A. Response of soil surface CO₂-C flux to land-use changes in a tropical cloud forest (Mexico). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 234, p. 305-312, 2006.
- CARLIN, S. D.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R. Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 845-853, 2008.
- CARMO, J. F. A.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; BRANDÃO, E. O.; LIMA FILHO, J. M. P.; SOUZA, L. S. B.; SOARES, J. M. Relações hídricas na cultura da

- cana-de-açúcar irrigada sob as condições climáticas do Semi-Árido brasileiro. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMI-ÁRIDO, 3., 2008, Petrolina. **Anais...** Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2008. (Embrapa Semi-Árido. Documentos, 210).
- CARVALHO, C. M. de; AZEVEDO, H. M. de; DANTAS NETO, J.; MELO, E. P. de; SILVA, C. T. S. da; GOMES FILHO, R. R. Resposta dos parâmetros tecnológicos da terceira folha de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 4, p. 337-342, 2008.
- CASAGRANDE, A. A. Crescimento da cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, v.14, n. 15, p. 7-8, 1996.
- COELHO, S. T.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O.; GUARDABASSI, P. Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore, v. 10, n. 2, p. 26-39, 2006.
- COSTA, C. T. S.; FERREIRA, V. M.; ENDRES, L.; CRUZ, S. J. S.; CANTALICE-SOUSA, R.; FERREIRA, D. T. da R. G.; LIRA, E. dos S. Crescimento de quatro variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) no quarto ciclo de cultivo, no município de Rio Largo-AL. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 9., 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008. p. 610-615.
- DETAR, W. R. Yield and growth characteristics for cotton under various irrigation regimes on sandy soil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 69-76, 2008.
- DI PAOLO, E. D.; RINALDI, M. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.105, p. 202-210, 2008.
- DONALDSON, R. A.; REDSHAW, K. A.; SINGELS, A. In search of parameters to model cultivar-specific canopy development. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Durban, v. 77, p. 605-609, 2003.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (FAO. Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yields response to water**. Rome: FAO, 1979. 306 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 1975. 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- DUGAS, W. A.; FRITSCHEN, L. J.; GAY, L. W.; HELD, A. A.; MATTHIAS, A. D.; REICOSKY, D. C.; STEDUTO, P.; STEINER, J. L. Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 56, p. 1-20, 1991.
- EASTMAN, J.; OUGHENOUR, M. C.; PIELKE SR, R. The regional effects of CO₂ and landscape change using a coupled plant and meteorological model. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, p. 797-815, 2001.

- EVETT, S. R. Energy and water balances at soil-plant-atmosphere interfaces. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 2000. p.129-185.
- FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; DANTAS NETO, J. Y.; GHEYI, H. R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 28, n. 3, p. 494-506, 2008.
- FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L. de; TEODORO, I.; SANTOS, M. A. dos; ALMEIDA, A. C. S.; SANTOS, M. J. dos; PORFIRIO, A. C. S. Índice de área foliar, radiação interceptada e eficiência do uso da radiação em variedades de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 9., 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008. p. 728-733.
- FERREIRA, E. A.; ASPIAZÚ, I.; GALON, L.; CONÇENÇO, G.; SILVA, A. F.; SANTOS, F. C. M. T.; FERREIRA, F. A.; BARBOSA, M. H. P.; SILVA, A. A. Características fisiológicas de cinco cultivares de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL-STAB, 9., 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008. p. 598-601.
- FIGUEROLA, P.I.; BERLINER, P.R. Characteristics of the surface layer above a row crop in the presence of local advection. **Atmósfera**, México, v. 19, n. 2, p. 75-108, 2006.
- FINNIGAN, J. J. Turbulence in plant canopies. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 32, p. 519-571, 2000.
- FOKEN, T. **Micrometeorology**. Berlin: Springer Verlag, 2008. 320 p.
- GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.
- GAVILÁN, P.; BERENGENA, E. J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, New York, v. 25, p. 127-140, 2007.
- GILBERT, R. A.; SHINE JÚNIOR, J. M.; MILLER, J. D.; RAINBOLT, C. R. The effect genotype, environmental and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 95, p. 156-170, 2006.
- GOLDBERG, V.; BERNHOFER, C. Testing different decoupling coefficients with measurements and models of contrasting canopies and soil water conditions. **Annales Geophysicae**, Paris, v. 26, p. 1977-1992, 2008.
- GOMES, M. C. R. **Efeito da irrigação suplementar na produtividade da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes**. 1999. 51 f.. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro.
- GOMIDE, C. A. M.; GOMIDE, J. A. Morfogênese e análise de crescimento de cultivares de *Panicum maximum*. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 33., 1996, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBZ, 1996. p. 403-405.
- GRANTZ, D. A., MEINZER, F. C. Regulation of transpiration in field-grown sugarcane. Evaluation of the stomatal response to humidity with the bowen ratio

technique. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 53, p. 169–183, 1991.

HANSON, B. R.; MAY, D. M. Crop coefficients for drip-irrigated processing tomato. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, p. 381–399, 2006.

HAO, Y.; WANG, Y.; HUANG, X.; CUI, X.; ZHOU, X.; WANG, S.; NIU, H.; JIANG, G. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 146, p.57-69, 2007.

HEILMAN J. L.; BRITTIN, C. L.; NEALE, C. M. U. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 44, p. 261–273, 1989.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, v.17, n. 5, p. 32-34, 1999.

IBGE. **Produção agrícola 2007**: culturas perenes. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 18 abr. 2009.

IGBADUN, H. E.; MAHOO, H. F.; TARIMO, ANDREW K. P. R.; BAANDA A. S. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, p.141-150, 2006.

IICA. **Informe sobre a situação e perspectivas da agroenergia e dos biocombustíveis no Brasil**. 2007. Disponível em: <<http://www.iica.org.br/Docs/Publicacoes/Agronegocio/SituacaoPerspectivasBiocombustivelBrasil.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2009.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107–122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p.41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 83, p. 125–138, 2003.

INMAN-BAMBER, N. G.; MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, p. 71-84, 2002.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. **Efficient use of water resources in sugar production**: a physiological basis for crop response to water supply: final report. Aitkenvale, Queensland: CSIRO, 1999. 38 p.

IPCC. **Climate change 2007**: the physical science basis, summary for policymakers. Geneva, 2007. 18 p.

JARVIS, P. G., MCNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances Ecology Research**, New York, v. 15, p.1-49, 1986.

JONES, H.G. **Plants and microclimate**. Cambridge: University Press Cambridge, 1992. 428 p.

JONES, M.; SINGELS, A. **DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module**: user documentation. Mount Edgecombe, South Africa: International Consortium for Sugarcane Modelling, 2008. 57 p.

JUÁREZ, R. I. N. **Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste**: um estudo de observações sobre cerrado e cana de açúcar e modelagem numérica da atmosfera. 2004. 193 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KAHLOWN, M. A.; RAOOF, A.; ZUBAIR, M.; KEMPER, W. D. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 87, p. 292-298, 2007.

KAR, G.; KUMAR, A. Surface energy fluxes and crop water stress index in groundnut under irrigated ecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 146, p.94-106, 2007.

KARAM, F.; LAHOUD, R.; MASAAD, R.; KABALAN, R.; BREIDI, J.; CHALITA, C.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, p.213-223, 2007.

KARATAS, B. S.; AKKUZU, E.; UNAL, H. B.; ASIK, S.; AVCI, M. Using satellite remote sensing to assess irrigation performance in water user Associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p.982-990, 2009.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems. I. development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KINIRY, J. R.; SIMPSON, C. E.; SCHUBERT, A. M.; REED, J. D. Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 91, p. 297-306, 2005.

KJAERGAARD, J. H.; PLAUBORG, F.; MOLLERUP, M.; PETERSEN, C. T.; HANSEN, S. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 918-924, 2008.

KOSGEI, J. R.; JEWITT, G. P.W.; KONGO, V. M.; LORENTZ, S. A. The influence of tillage on field scale water fluxes and maize yields in semi-arid environments: A case study of Potshini catchment, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 32, p. 1117-1126, 2007.

KWON, H.; PENDALL, E.; EWERS, B. E.; CLEARY, M.; NAITHANI, K. Spring drought regulates summer net ecosystem CO₂ exchange in a sagebrush-steppe ecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 381-391, 2008.

LAGE, M.; BAMOUH, A.; KARROU, M.; EL MOURID, M. Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and pan evaporation methods under Moroccan conditions. **Agronomie**, Paris, v. 23, p. 625-631, 2006.

LANG, A. R. G.; MCNAUGHTON, K. G.; CHEN, F.; BRADLEY, E. F.; OHAKI, E. Inequality of eddy transfer coefficients for vertical transport of sensible and latent heats during advective inversions. **Boundary Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 25, p. 25-41, 1983.

- LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; BORGES, E.; SILVA, I. de F. da; LIRA, C. A. B de O. da. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 527-534, 2005.
- LINDERSON, M-L.; ZINAIDA IRITZ, Z.; LINDROTH, A. The effect of water availability on stand-level productivity, transpiration, water use efficiency and radiation use efficiency of field-grown willow clones. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 31, p.460–468, 2007.
- LINKOSALO, T.; PIPATWATTANAKUL, D.; HARI, P. Systematic errors in measuring irradiance related to levelling of the sensor. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 79, p. 149–155, 1996.
- LIU, D. L.; BULL, T. A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 144, p.181-211, 2001.
- LYRA, G. B., PEREIRA, A. R. Dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica pelo Perfil logarítmico do vento sobre vegetação esparsa em região semi-árida. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 187-197, 2007.
- MAGLIULO, V.; BINDI, M.; RANA, G. Water use of irrigated potato (*Solanum tuberosum* L.) grown under free air carbon dioxide enrichment in central Italy. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 97, p. 65–80, 2003.
- MAGNANI, F.; LEONARDI, S.; TOGNETTI, R.; GRACE, J.; BORGHETTI, M. Modelling the surface conductance of a broad-leaf canopy: effects of partial decoupling from the atmosphere. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 21, p. 867-879, 1998.
- MARIN, F. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 134 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MARQUES, T. A.; GODINHO, A. M. M.; TIRITAN, C. S.; CRESTE, J. E.; MARQUES, M. O. Parâmetros biométricos e tecnológicos de cultivares de cana-de-açúcar para o Oeste Paulista. . **Stab, açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v.26, n.2, p.6-10, 2007.
- MARTINS, C. de A. **Comparação dos fluxos em diferentes condições de estabilidade e topografia**. 2004. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR., G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.
- McGLINCHEY, M. G., INMAN-BAMBER, N. G. Predicting sugarcane water use with the Penman-Monteith equation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION SCHEDULING, 1996, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio: ASAE, 1996. p. 592-598
- McNAUGHTON, K. G., JARVIS, P. G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1983. v. 7, p. 1-47.

- McNAUGHTON, K. G.; LAUBACH, J. Unsteadiness as a cause of non-equality of eddy diffusivities for heat and vapour at the base of an advective inversion. **Boundary Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 88, p. 479-504, 1998.
- MEINZER, F. C., GRANTZ, D. A. Stomatal control of transpiration from a developing sugarcane canopy. **Plant Cell and Environmental**, Oxford, v. 12, p. 635-642, 1989.
- MIOCQUE, J. Avaliação de crescimento e de produtividade de matéria verde da cana-de-açúcar na região de Araraquara – SP. **Revista da STAB**. Piracicaba, v. 17, n. 4, p.45-47, 1999.
- MIRANDA, F. R.; GONDIM, R. S.; COSTA, C. A. G. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 82, p. 237-246, 2006.
- MOLDEN, D. J.; SAKTHIVADIVEL, R.; PERRY, C. J.; FRAITURE, C.; KLOEZEN, W. H. **Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems**. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1998. 34 p.
- MOLDER, M.; GRELLE, A.; LINDROTH, A.; HALLDIN, S. Flux-profile relationships over a boreal forest - roughness sublayer corrections. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 98-99, p. 645-658, 1999.
- MONTEITH, J. L. **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold, 1973. 241 p.
- MOTZER, T. Micrometeorological aspects of a tropical mountain forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 135, p. 230-240, 2005.
- MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; GURGEL, M. T.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia na cana-de-açúcar irrigada no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 27., 2007, Mossoró. **Anais...** Mossoró: ABID, 2007. 1 CD-ROM.
- MUCHOW, R. C., SPILLMAN, M. F., WOOD, A. W., THOMAS, M. R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigation tropical conditions. **Australian Journal Agricultural Research**, Victoria, v. 45, p.37-49, 1994.
- MUCHOW, R.C., WOOD, A.W., SPILLMAN, M.F., ROBERTSON, M.J.; THOMAS, M.R. Field techniques to quantify the yield determining processes in sugarcane. I. Methodology. In: CONFERENCE OF AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15., 1993, Cairns. **Proceedings...** Brisbane: CSIRO, 1993. p. 336-343.
- NICOLÁS, E.; BARRADAS, V. L.; ORTUÑO, M. F.; NAVARRO, A.; TORRECILLAS, A.; ALARCÓN, J. J. Environmental and stomatal control of transpiration, canopy conductance and decoupling coefficient in young lemon trees under shading net. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 63, p. 200-206, 2008.
- OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **Journal Applied Meteorology**, Boston, v. 21, p. 595-598, 1982.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. New York: John Wiley, 1978. 372 p.
- OLIVEIRA, G. M. de; LEITÃO, M. V. B. R. Estimativas de evapotranspiração e as consequências devido aos erros na determinação de saldo de radiação e efeitos advectivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 343-347, 2000.

- OLIVEIRA, R. A. de. **Análise de Crescimento da cana-de-açúcar, na região Noroeste do Paraná**. 2004. 80 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- OLIVEIRA, R. A. de; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O T.; BESPALHOK FILHO, J. C.; ZUFFELLATO RIBAS, K. C.; SILVA, D. K. T. da. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.
- OLIVEIRA, R. I. de; OLIVEIRA, E. C. A. de; FREIRE, J. F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de; COSTA, S. A. da; RODRIGUES, A. do N. Avaliação do crescimento de diferentes variedades de cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 9., 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008. p. 715-719
- OMARY, M.; IZUNO, F. T. Evaluation of sugarcane evapotranspiration from water table data in the everglades agricultural area. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 27, p. 309-319, 1995.
- ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 81, p. 131-143, 1996.
- PACHECO, P.; ALONSO, N.; GUITIÉRREZ, A. A study of the sugar cane evapotranspiration in Cuba. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTICS, 18, 1983, Ciudad de la Habana, Cuba. **Proceedings...** Ciudad de la Habana, Cuba: Society of Sugar Cane Technologists. 1983, p. 380-387.
- PARK, S. E.; ROBERTSON, M.; INMAN-BAMBER, N. G. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 305-320, 2005.
- PARSONS, A.; LEAFE, E. L.; COLLETT, B. The physiology of grass production under grazing. II - Photosynthesis. Crop growth an animal intake of continuous grazed sward. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 127-139. 1983.
- PATTON, E. G. **Large-eddy Simulation of turbulent flow above and within a plant canopy**. 1997. 145 f. Ph.D. Thesis (Doctor) – University of California, Davis.
- PAUWELS, V. R. N.; SAMSON, R. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 82, p. 1-24, 2006.
- PEREIRA, A. R. The Priestley–Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 125, p. 305-313, 2004.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PEREIRA, L. S.; OEWIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 57, p. 175-206, 2002.
- PERES, J. G.; PEREIRA, A. R.; FOLEGATTI, M. V. Determinação da resistência do dossel da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) para utilização no modelo de Penman-Monteith. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 1-4, 1999.

- PERES, J. G.; PEREIRA, A. R.; FRIZZONE, J. A.; VILLA NOVA, N. A. Calibração do modelo de Priestley-Taylor para estimar a evapotranspiração potencial da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 77-82, 1997.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, p. 141-150, 1999.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTINEZ-COB, A. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 25-23, 2008.
- PERRY, C.J. **Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems**. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1996.
- QIN, Z.; OUYANG, Y.; SU, G.; YU, Q.; LI, J.; ZHANG, J.; WU, Z. Characterization of CO₂ and water vapor fluxes in a summer maize field with wavelet analysis. **Ecological Informatics**, Amsterdam, v. 3, p.397-409, 2008.
- RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes os shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Jorunal Agronomy & Crop Science**. Berlim, v. 185, p. 249-258, 2000.
- RANA, G., KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 13, p. 125-153, 2000.
- RAUPACH MR & THOM AS. Turbulence in and above plant canopies. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 13, p. 97-129, 1981.
- RIGHI, E. Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004, 168 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- RIGHI, E. Z.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Energy balance of a young drip-irrigated coffe crop in shoutheast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 367-279, 2007.
- ROBERTS, J.; NAYAMUTH, R. A.; BATCHELOR, C. H.; SOOPRAMANIEN, G. C. Plant-water relations of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under a range of irrigated treatments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, p.95–115, 1990.
- ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; WOOD, A. W.; CAMPBELL, J. A. Accumulation of reducing sugars by sugarcane: effects of crop age, nitrogen supply and cultivar. **Field Crops Research**, Amsterdan. v. 49, p. 39-50, 1996b.
- ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W.; MUCHOW, R. C. Growth of sugarcane under high input tropical conditions. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, Amsterdan, v. 48, p. 11-25, 1996a.
- ROBERTSON, M. J.; DONALDSON, R. A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off before harvest. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 201–208, 1998.

- ROBERTSON, M. J.; INMAN-BAMBER, N. G.; MUCHOW, R. C.; WOOD, A. W. Physiological analysis of early season deficit and sugarcane productivity. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, p. 211–227, 1999.
- ROERINK, G. J.; BASTIAANSEN, W. G. M.; CHAMBOULEYRON, J.; MENENTI, M. Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing. **Water Resources Management**, v. 11, p. 445-465, 1997.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. New York: John Wiley, 1983. 495 p.
- ROUPHAEL, Y., COLLA, G. Radiation and water use efficiencies of greenhouse zucchini squash in relation to different climate parameters. **European. Journal Agronomy**, Amsterdam, v. 23, n. 2, p. 183-194, 2005.
- SAMMIS, T. W.; MEXAL, J. G.; MILLER, D. Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 69, p. 179–190, 2004.
- SANTOS, M. A. L. dos. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp.): um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas**. 2005. 101 f.. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- SANTOS, R. Z.; BOUHID ANDRÉ, R. G. Relações energéticas e aerodinâmicas em uma cultura de feijão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 11-18, 1999.
- SANTOS, S. N. M.; COSTA, M. H. A simple tropical ecosystem model of carbon, water and energy fluxes. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 176, n. 3/4, p. 291–312, 2004.
- SHEN, S.; LECLERC, M. Y. Modelling the turbulence structure in the canopy layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 87, p. 3-25, 1997.
- SILVA, A. B. da. **Resposta da cana-de-açúcar irrigada sob diferentes níveis de adubação**. 2002. 61 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- SILVA, D. K. T. da. **Crescimento de cultivares de cana-de-açúcar em primeira soca na Região Noroeste do Paraná na safra de 2002/2003**. 2005. 73 f. Tese (Mestrado) –, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.
- SILVA, T. J. A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método do balanço de radiação e lisimetria de pesagem hidráulica**. 2005. 113 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINED, J.M.; POWELL, G.; MONTES, G. Volume of individual internodes of sugarcane stalks. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 91, p. 207-215, 2005.
- SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R.E.; SHINE JR., J.M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 171-178, 2004.
- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Radiation use efficiency. **Advances Agronomy**, New York, v. 65, p. 215-265, 1999.

- SINGELS, A.; SMIT, M. A. The effect of row spacing on an irrigated plant crop of sugarcane cultivar NCo376. **Proceedings South African Sugar Technology Association**, Durban, v. 76, p. 94-105, 2002.
- SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module**. International Consortium for Sugarcane Modelling (ICSM), 2008. 34p. (User documentation).
- SINGELS, A.; SMIT, M. A.; REDSHAW, K. A.; DONALDSON, R. A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 249–260, 2005.
- SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, p. 95-100, 2007.
- SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.
- SOARES, J. M.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Bowen ratio-energy balance associated errors in Vineyards under dripping irrigation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 233-240, 2007.
- SOUZA, E. F; BERNARDO, S.; CARVALHO, J. A. Função de Produção da cana-de-açúcar em Relação à Água para Três Cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 28- 42, 1999.
- STANNARD, D. I. A theoretically based determination of bowen ratio fetch requirements. **Boundary Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 83, p. 375-406, 1997.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 169-184, 1998a.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. II. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 201-213, 1998b.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. III. Validity of Bowen ratio–energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 215-228, 1998c.
- STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer, 1988. 666 p.
- SU, C.-L.; LEE, Y.-M. Development status and life cycle inventory analysis of biofuels in Taiwan. **Energy Policy**, Surrey, v. 37, n. 2, p.754–758, 2009.
- SUGUITANI, C.; MATSUOSA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana-planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001., Londrina. **Anais...** Londrina: SBCS, 2001. p.119.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 417-427, 2008.

- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G.; ARKEBAUER, T. J.; WALTERS, D. T.; HUBBARD, K. G. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124, p.1–13, 2004.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 94, p. 31–42, 2007.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 362, p. 110–127, 2008.
- TEIXEIRA, A.H. de C.; BASTIAANSEN, W.G. M. ; MOURA, M. S. B. SOARES, J. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.148, p.1524–1537, 2008.
- TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 102, p. 64–72, 2007.
- TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JÚNIOR., L A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, p.39–44, 1997. Número especial.
- THOMPSON, G. D.; BOYCE, J. P. Daily measurements of potential evapotranspiration from fully canopied sugarcane. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 4, p. 267–279, 1967.
- TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 335–348, 2000.
- TOLEDO FILHO, M. da R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no estado de Alagoas**. 2001. 134f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- TOLEDO FILHO, M. R.; BERLATO, M. A.; LYRA, R. F. F. Parâmetros aerodinâmicos associados a cultivo de cana-de-açúcar no estado de alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de janeiro, v. 18, n. 2, p. 207–212, 2003.
- TRIGGS, J. M.; KIMBALL, B. A.; PINTER JÚNIOR, P. J.; WALL, G. W.; CONLEY, M. M.; BROOKS, T. J.; LAMORTE, R. L.; ADAM, N. R.; OTTMAN, M. J.; MATTHIAS, A. D.; LEAVITT, S. W.; CERVENY, R. S. Free-air CO₂ enrichment effects on the energy balance and evapotranspiration of sorghum. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124 p. 63–79, 2004.
- UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W.; YANG, Z. L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid sonoran desert site. **Agricultural Forest and Meteorology**. Amsterdam, v. 82, p. 119–153, 1996.
- VERHOEF, A.; ALLEN, S. J. A SVAT scheme describing energy and CO₂ fluxes for multi-component vegetation: calibration and test for a Sahelian savannah. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 127, p. 245–267, 2000.

- VERMA, S. B.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p.77–96, 2005.
- VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. **Journal Applied Meteorology**, Boston, v. 17, p. 330–338, 1978.
- VERMA, S. B.; ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; BARADAS, M. W. Resistance-energy balance model for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 776-782, 1976.
- VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, C. E.; OTTO, R.; ROSSETO, R. Acúmulo de fitomassa e de nitrogênio no ciclo agrícola de cana-planta. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 9, 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008, p.217-221.
- WANG, C. Y.; ISPPA, A.; LI, M.; WANG, D. L. Growth and eco-physiological performance of cotton under water stress conditions. **Agricultural Sciences in China**, Amsterdam, v. 6, n. 8, p. 949-955, 2007.
- WANG, H.; SAIGUSA, N.; YAMAMOTO, S.; KONDO, H.; HIRANO, T.; TORIYAMA, A.; FUJINUMA, Y. Net ecosystem CO₂ exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan. **Atmospheric Environment**, New York, v. 38, p.7021-7032, 2004.
- WATANABE, K.; YAMAMOTO, T.; TAKASHI YAMADA, L. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 67, p. 133-143, 2004.
- WEVER, L. A.; FLANAGAN, L. B.; CARLSON, P. J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 112, p.31-49, 2002.
- WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 64, p. 169-181, 2004.
- WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 43, p.173–182, 2000.
- WILSON, J. D. Turbulent transport within the plant canopy. In: BLACK, T. A.; SPITTLEHOUSE, D. L.; NOVAK, D.; PRICE, D. T. (Ed.). **Estimation of areal evapotranspiration**. Wallingford: IAHS, 1989. p. 43-80. (IAHS. Publication, 177).
- WILSON, J. D.; WARD, D. P.; THURTELL, G. W.; KIDD, G. E. statistics of atmospheric turbulence within and above a corn canopy. **Boundary Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 24, p. 495-519, 1982.
- WOLEDGE, J.; LEAFE, E. L. Single leaf and canopy photosynthesis in a ryegrass sward. **Annals of Botany**, London, v. 40, n. 68, p. 773-783. 1976.
- WOOD, A. W.; MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 223-233, 1996.
- WRAMNEBY, A.; SMITHA, B.; ZAEHLEB, S.; SYKESA, M. T. Parameter uncertainties in the modelling of vegetation dynamics- effects on tree community

structure and ecosystem functioning in European forest biomes. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 216, p. 277–290, 2008.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1629–1640, 2008.

ZHOU, M. M.; SINGELS, A.; SAVAGE, M. J. Physiological parameters for modelling differences in canopy development between sugarcane cultivars. **Proceedings of the South African Sugar Technology Association**, Durban, v. 77, p. 610–621, 2003.

ANEXOS

Tabela 1. Resumo dos valores das características aerodinâmicas da cana-de-açúcar irrigada (variedade 92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. DJ = dia Juliano, h_c = altura do dossel da cultura (m), Ri = número de Richardson (adimensional), d = deslocamento do plano zero (m), u^* = velocidade de fricção ($m\ s^{-1}$), z_{om} = parâmetro de rugosidade para o *momentum* (m), R^2 = coeficiente de determinação (decimal), d/h e z_{om}/h = relações do deslocamento do plano zero e do parâmetro de rugosidade para o *momentum* com a altura do dossel da cultura (adimensionais).

Data	DJ	Hora	DAC	h	Ri	d	u^*	z_{om}	R^2	d/h	z_{om}/h
13/10/07	286	6:00	138	2,3	0,0049	1,91	0,39	0,12	0,9995	0,84	0,05
14/10/07	287	15:00	139	2,3	0,0018	2,13	0,45	0,07	0,9998	0,93	0,03
15/10/07	288	15:30	140	2,3	0,0054	1,76	0,57	0,19	0,9983	0,76	0,08
22/10/07	295	6:30	147	2,5	-0,0025	1,80	0,53	0,38	0,9980	0,72	0,15
23/10/07	296	13:30	148	2,5	-0,0044	1,74	0,38	0,14	0,9996	0,69	0,05
23/10/07	296	6:00	148	2,5	-0,0037	1,94	0,41	0,08	0,9989	0,77	0,03
24/10/07	297	14:30	149	2,5	-0,0079	1,98	0,46	0,13	0,9999	0,78	0,05
24/10/07	297	3:00	149	2,5	0,0065	1,20	0,58	0,28	0,9996	0,47	0,11
28/10/07	301	11:30	153	2,6	-0,0071	1,85	0,31	0,22	1,0000	0,70	0,08
29/10/07	302	13:30	154	2,7	-0,0075	1,73	0,45	0,21	0,9996	0,65	0,08
30/10/07	303	14:30	155	2,7	-0,0099	1,48	0,52	0,31	0,9983	0,55	0,12
2/11/07	306	8:30	158	2,8	-0,0074	1,52	0,47	0,45	0,9984	0,55	0,16
7/11/07	311	14:30	163	2,9	0,0083	2,01	0,57	0,24	0,9988	0,70	0,08
7/11/07	311	14:00	163	2,9	-0,0047	1,67	0,60	0,42	0,9998	0,58	0,15
7/11/07	311	6:00	163	2,9	0,0000	2,01	0,38	0,36	0,9969	0,70	0,13
5/11/08	309	12:30	161	2,8	0,0027	2,46	0,35	0,11	0,9998	0,87	0,04
5/11/08	309	13:30	161	2,8	-0,0016	2,04	0,35	0,19	0,9947	0,72	0,07
6/11/07	310	15:00	162	2,9	0,0017	1,74	0,50	0,51	0,9919	0,61	0,18
20/11/07	324	6:30	176	3,2	0,0082	2,75	0,47	0,23	0,9979	0,87	0,07
25/11/07	329	19:30	181	3,3	0,0048	2,67	0,40	0,12	0,9936	0,82	0,04
22/11/08	326	16:00	178	3,2	-0,0065	1,73	0,42	0,41	0,9999	0,54	0,13
18/11/08	322	15:00	174	3,1	0,0000	2,59	0,44	0,26	0,9991	0,83	0,08
16/11/07	320	6:00	172	3,1	0,0077	2,61	0,44	0,21	1,0000	0,85	0,07
1/12/07	335	1:00	187	3,4	0,0077	2,66	0,53	0,17	0,9989	0,79	0,05
1/12/07	335	1:30	187	3,4	0,0062	2,15	0,50	0,29	0,9972	0,64	0,09
2/12/07	336	5:30	188	3,4	-0,0082	2,57	0,46	0,27	0,9987	0,76	0,08
5/12/08	339	6:00	191	3,4	0,0063	2,30	0,47	0,48	0,9993	0,67	0,14
13/12/07	347	6:00	199	3,6	0,0039	2,46	0,35	0,27	0,9999	0,69	0,08
13/12/07	347	6:30	199	3,6	0,0028	2,89	0,29	0,16	0,9973	0,81	0,04
12/12/07	345	14:00	197	3,5	-0,0095	2,30	0,58	0,29	0,9950	0,65	0,08
28/12/07	362	3:30	214	3,8	0,0070	3,17	0,49	0,16	0,9989	0,84	0,04
3/01/08	3	14:30	220	3,8	0,0075	2,76	0,41	0,31	0,9982	0,72	0,08
5/01/08	5	15:30	222	3,9	0,0042	3,55	0,32	0,12	0,9993	0,92	0,03
10/01/08	10	1:30	227	3,9	0,0099	2,66	0,71	0,38	0,9995	0,68	0,10

Continuação

10/01/08	10	6:00	227	3,9	0,0031	2,97	0,54	0,44	0,9997	0,76	0,11
10/01/08	10	6:30	227	3,9	0,0000	3,48	0,47	0,19	0,9996	0,89	0,05
24/01/08	24	22:00	241	4,0	0,0074	3,22	0,70	0,29	0,9997	0,80	0,07
2/04/08	93	13:00	310	4,3	-0,0037	3,14	0,64	0,60	0,9917	0,73	0,14
7/04/08	98	17:00	315	4,3	-0,0074	3,40	0,33	0,28	0,9998	0,79	0,07
15/04/08	106	18:30	323	4,3	-0,0024	3,15	0,46	0,30	0,9908	0,73	0,07
19/04/08	110	8:00	327	4,3	0,0010	2,90	0,49	0,77	0,9975	0,67	0,18
29/04/08	120	19:00	337	4,3	0,0043	3,38	0,42	0,29	0,9971	0,78	0,07
29/04/08	120	17:30	337	4,3	0,0011	2,51	0,52	0,63	0,9986	0,58	0,14
30/04/07	121	23:30	338	4,3	0,0082	2,69	0,49	0,48	0,9938	0,62	0,11
1/05/08	122	2:30	339	4,3	0,0053	2,65	0,46	0,66	0,9978	0,61	0,15
2/05/08	123	20:30	340	4,3	0,0071	3,60	0,48	0,23	0,9999	0,83	0,05
2/05/08	123	18:00	340	4,3	0,0052	2,26	0,53	0,82	0,9999	0,52	0,19
8/05/08	129	19:00	346	4,3	0,0096	2,30	0,61	0,69	0,9981	0,53	0,16
8/05/08	129	19:30	346	4,3	0,0085	3,65	0,45	0,13	0,9986	0,84	0,03
8/05/08	129	20:00	346	4,3	0,0076	2,82	0,47	0,35	0,9913	0,65	0,08
9/05/08	130	15:00	347	4,3	-0,0099	2,69	0,34	0,46	0,9981	0,62	0,11
9/05/08	130	15:30	347	4,3	-0,0046	3,00	0,50	0,63	0,9957	0,69	0,14
12/05/07	133	4:30	350	4,3	0,0066	2,91	0,45	0,22	1,0000	0,67	0,05
12/05/07	133	17:30	350	4,3	0,0052	2,74	0,52	0,33	1,0000	0,63	0,08
12/05/07	133	18:00	350	4,3	0,0096	2,78	0,49	0,44	0,9998	0,64	0,10
12/05/07	133	17:00	350	4,3	-0,0018	3,26	0,38	0,22	0,9979	0,75	0,05
12/05/07	133	16:30	350	4,3	-0,0025	2,26	0,65	0,67	0,9998	0,52	0,15
12/05/07	133	21:00	350	4,3	0,0021	2,74	0,58	0,47	0,9994	0,63	0,11
12/05/07	133	23:00	350	4,3	0,0070	2,82	0,51	0,33	0,9989	0,65	0,08
17/05/08	138	6:30	355	4,3	0,0043	3,65	0,33	0,18	0,9943	0,84	0,04
18/05/08	139	22:30	356	4,3	0,0041	3,18	0,49	0,19	0,9989	0,73	0,04
18/05/08	139	23:00	356	4,3	-0,0013	3,44	0,44	0,15	0,9987	0,79	0,03
18/05/08	139	23:30	356	4,3	0,0000	2,31	0,57	0,47	0,9949	0,53	0,11
19/05/08	140	2:30	357	4,4	0,0010	2,70	0,52	0,46	1,0000	0,62	0,11
19/05/08	140	0:30	357	4,4	0,0032	3,48	0,38	0,22	0,9916	0,80	0,05
20/05/08	141	8:30	358	4,4	-0,0079	2,92	0,49	0,20	1,0000	0,67	0,05
24/05/08	145	18:30	362	4,4	-0,0071	3,35	0,41	0,13	0,9962	0,77	0,03
Média	-	-	-	-	-	2,58	0,47	0,32	-	0,71	0,09