

BRUNO RIBAS BATALHA

**TEMPERATURA DO DOSSEL VEGETATIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS
E POTENCIAIS DE ÁGUA NO SOLO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B328t
2011

Batalha, Bruno Ribas, 1985-

Temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar sob diferentes condições meteorológicas e potenciais de água no solo / Bruno Ribas Batalha. – Viçosa, MG, 2011.

xxii, 142f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Sérgio Zolnier.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 122-142

1. Meteorologia agrícola. 2. Cana-de-açúcar - Fatores climáticos. 3. Cana-de-açúcar - Irrigação. 4. Evapotranspiração. 5. Termômetros e termometria. 6. *Saccharum officinarum*. 7. Plantas - Efeito da umidade do solo. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

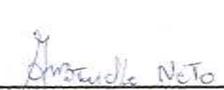
CDD 22. ed. 630.2515

BRUNO RIBAS BATALHA

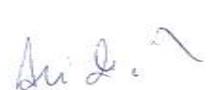
**TEMPERATURA DO DOSSEL VEGETATIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS
E POTENCIAIS DE ÁGUA NO SOLO**

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

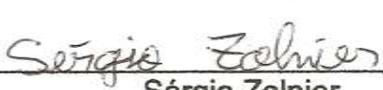
APROVADA: 25 de julho de 2011.



Antonio José Steidle Neto



Aristides Ribeiro
(Coorientador)



Sérgio Zolnier
(Orientador)

*Se você não mudar a direção, terminará
exatamente de onde partiu.*

*Uma jornada de duzentos quilômetros
começa com um simples passo.*

(Antigos provérbios chineses)

Aos meus pais,
Maria José Ribas Batalha e João Cunha Batalha,
pelo amor, dedicação e ensinamentos
com prioridade aos estudos ao longo da minha vida.

À minha irmã,
Larisse Aparecida Ribas Batalha,
pela amizade, pela paciência e pelos momentos fraternos.

À minha namorada,
Fernanda Aparecida Ferrari Soares,
pelo amor, compreensão e ajuda essencial em todos os momentos juntos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador, professor Sérgio Zolnier, pelos ensinamentos transmitidos, confiança, presteza e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus coorientadores, professores Aristides Ribeiro e Thieres George Freire da Silva, pela amizade e pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Everardo Chartuni Mantovani, Gilberto Chohaku Sediya, Mauro Aparecido Martinez e Rubens Alves de Oliveira, pelas estimadas sugestões, amizade e apoio.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Graça Freitas, pelo auxílio profissional, atenção e amizade.

A todos os meus professores, pela contribuição ao meu crescimento profissional.

Aos funcionários do DEA, por toda a colaboração ao longo desse período, em especial ao Geraldo e ao José Geraldo, pelo auxílio na montagem do experimento e ao Eduardo e Chicão, pela concessão dos equipamentos.

Aos meus colegas de trabalho, em especial ao Davi e ao Evandro, pela amizade e pelo agradável convívio e auxílio na condução do experimento.

Aos amigos do DEA, principalmente Eugênio, Enoque, Caio e Geraldo, pela amizade, pelas dicas valiosas, pelo companheirismo e pelo alegre convívio.

Aos amigos da Meteorologia Agrícola, Aline, Antônio (atualmente Prof Steidle), Dani, Henrique, Newton, Mila, Roberto, Robson, Thomé e Yhasmin, pela paciência, pelo auxílio durante as disciplinas e pelos bons momentos.

A Gustavo Haddad, pelas diversas concessões de equipamentos, pelas dicas valiosas e pelas horas de discussões a respeito da cana-de-açúcar irrigada.

A Gustavo Dantas, pela amizade, pelos momentos de agradável convívio e descontração e pela confiança.

Aos meus familiares, pelo carinho, pelo incentivo e pelas orações, principalmente aos primos que me trouxeram tanta alegria e descontração.

À família da minha namorada, pelo carinho, pelo incentivo e pelos momentos de descontração.

Aos amigos da Agronomia, pelos materiais, pelos ensinamentos, pela convivência, pelas longas horas de estudo e é claro pelos ótimos momentos vividos durante a nossa graduação.

Aos amigos Chapacos, principalmente ao Huber e ao Davi, que me acolheram de forma excepcional.

Aos amigos German, José Vicente e Germani, pela amizade verdadeira, pelos momentos agradáveis e por mostrarem que o sucesso é obtido com base no caráter, na humildade e na simplicidade.

Aos amigos de incontáveis alegrias e momentos memoráveis em minha vida: Adelmo, Alencar, Alisson, Anderson, Caetano, David, Eric, Fabinho, Felipão, Flávio, Fernandão, Gustavo, Paulinho, Luciano, Marcello, Rafael, Ricardo, Santiago e Vinícius entre outros que por um lapso não foram citados.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram, mesmo que indiretamente

BIOGRAFIA

BRUNO RIBAS BATALHA, filho de João Cunha Batalha e Maria José Ribas Batalha, nasceu em Viçosa, Minas Gerais, no dia 16 de setembro de 1985.

Em 2004, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, graduando-se em 24 de julho de 2009.

Durante o período de graduação, foi monitor do Departamento de Engenharia Agrícola.

Em agosto de 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da UFV, em nível de Mestrado, submetendo-se à defesa de tese em 25 de julho de 2011.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo geral	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	7
3.1. A cultura da cana-de-açúcar	7
3.2. Variáveis agrometeorológicas associadas ao desenvolvimento da cana-de-açúcar	11
3.2.1. Temperatura e umidade relativa do ar	12
3.2.2. Radiação solar e fotoperíodo	15
3.2.3. Velocidade do ar	17
3.3. Disponibilidade de nutrientes no solo	19

3.4. Disponibilidade hídrica no solo	20
3.5. Termometria a infravermelho como ferramenta de avaliação de estresse hídrico na planta	24
3.5.1. Termometria a infravermelho	24
3.5.2. Transpiração vegetal.....	26
3.5.3. Índice de estresse hídrico da cultura.....	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1. Localização da área experimental cultivada com a cana-de-açúcar	31
4.2. Clima local	32
4.3. Classificação e caracterização físico-química do solo.....	32
4.4. Variedade utilizada e período experimental.....	34
4.5. Avaliações biométricas	35
4.5.1. Avaliações biométricas em campo.....	35
4.5.2. Avaliações biométricas em laboratório.....	36
4.6. Graus-dia acumulados.....	37
4.7. Medição das variáveis meteorológicas e sistema de aquisição de dados	38
4.8. Medição da temperatura do dossel vegetativo e aquisição dos dados..	43
4.9. Monitoramento do potencial de água no solo	44
4.9.1. Sensor e medidor digital Watermark TM	44
4.10. Índice de estresse hídrico da cultura (IEHC)	46
4.11. Estimativa do diferencial “ t_c-t_{ar} ” a partir dos dados de R_g e DPV_{ar}	49
4.12. Estimativa da evapotranspiração da cultura em escala horária.....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Variáveis meteorológicas e evapotranspiração de referência	53
5.2. Curva característica de retenção de água, densidade aparente do solo e comportamento do potencial de água no solo	56
5.3. Análise de crescimento da cana-de-açúcar durante o período experimental.....	59

5.3.1. Perfilhamento	60
5.3.2. Altura média dos colmos	62
5.3.3. Número de folhas	65
5.3.4. Área e índice de área foliar	68
5.4. Avaliação diária da temperatura do dossel vegetativo e do ar em função da radiação solar global e déficit de pressão de vapor em escala de minutos	73
5.5. Variações sazonais da temperatura do dossel vegetativo em função das variáveis meteorológicas e da disponibilidade hídrica no solo	77
5.5.1. Condições de alta disponibilidade hídrica no solo	78
5.5.1.1. Início da fase de crescimento ($IAF < 3$)	78
5.5.1.2. Limite inferior empírico do diferencial $t_c - t_{ar}$	86
5.5.1.3. Fase de crescimento ($IAF > 3$)	91
5.5.1.4. Limite inferior empírico do diferencial $t_c - t_{ar}$	97
5.5.2. Condições de redução da disponibilidade hídrica no solo	102
5.5.2.1. Resposta da temperatura do dossel vegetativo às condições meteorológicas e à redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 120$ kPa)	102
5.5.2.2. Deslocamento do limite inferior empírico de $t_c - t_{ar}$ sob condições de redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 120$ kPa)	107
5.5.2.3. Resposta da temperatura do dossel vegetativo às condições meteorológicas e à redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 180$ kPa)	109
5.5.2.4. Deslocamento do limite inferior empírico de $t_c - t_{ar}$ sob condições de redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 180$ kPa)	116
6. CONCLUSÕES	120
REFERÊNCIAS	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Duração do ciclo da cana-de-açúcar em função do planejamento da época de plantio.....	10
Tabela 2 - Análise física do solo	32
Tabela 3 - Análise química do solo	33
Tabela 4 - Fator de forma com os respectivos coeficientes de determinação ajustados e número de folhas amostradas para as n folhas da variedade RB867515.....	68
Tabela 5 - Resultados das análises de regressão linear de t_c-t_{ar} versus R_g e DPV_{ar}	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	9
Figura 2 - Classificação dos fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas. Linhas negras correspondem a uma ação mais efetiva do que as linhas vermelhas.....	12
Figura 3 - Localização da área no campo experimental Vila Chaves.....	31
Figura 4 - Croqui da área experimental com a distribuição espacial da estação meteorológica automática, plantas selecionadas para as análises biométricas e sensores de potencial hídrico no solo (sem escala).....	39
Figura 5 - Mastro instrumental, posicionamento dos sensores eletrônicos e detalhes dos sensores eletrônicos: a) sensor de temperatura a infravermelho, b) termo-higrômetro, c) piranômetro e sensor quântico e d) anemômetro.	40
Figura 6 - Detalhe do interior do gabinete multifuncional de polipropileno: a) módulos seriais fixados; b) fixação interior do sensor de temperatura a infravermelho; e c) interior do gabinete após as conexões de cabos de transmissão de dados e alimentação dos sensores.....	42
Figura 7 - a) Mastro instrumental instalado em meio ao cultivo da cana-de-açúcar; b) tubo de saída dos cabos para conexão da transmissão de dados e alimentação elétrica; e c) vala perfurada para a passagem dos tubos de PVC.	43
Figura 8 - Sensor e medidor digital Watermark™ a e b, respectivamente.	45
Figura 9 - Domínio experimental do diferencial de temperatura “ t_c-t_{ar} ” em função do déficit de pressão de saturação do vapor d’água no ar (DPV_{ar}). A linha-base com ausência de estresse hídrico define o limite de estresse hídrico.	50

Figura 10 - a) Valores diários médios da temperatura e umidade relativa do ar e b) precipitação diária acumulada para o período compreendido entre o plantio da cana-de-açúcar e a instalação do sistema de aquisição de dados.	54
Figura 11 - Variação dos valores médios das variáveis meteorológicas: a) radiação solar global (R_g); b) temperatura do ar (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}); c) déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}); e d) velocidade do ar (u). Variação dos valores diários acumulados: e) evapotranspiração de referencia (ET_o) e f) precipitação.	55
Figura 12 - Curva representando o ajuste da equação do teor de umidade normalizado em função da tensão matricial aplicada.....	57
Figura 13 - Curva representando o ajuste da equação do teor de umidade normalizado corrigido em função da umidade no solo.	57
Figura 14 - Curva característica de retenção de água do solo ajustada pelo modelo de Van Genuchten (1980) e equação de determinação da umidade no solo versus a tensão matricial aplicada ao solo.	58
Figura 15 - Comportamento do potencial de água no solo (Ψ) em acordo ao regime de precipitação local no decorrer do período experimental.....	58
Figura 16 - Número de perfilhos industrializáveis (NPI) da cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP). Linhas verticais representam o desvio-padrão.	60
Figura 17 - Altura média dos colmos (AMC) da cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP). Linhas verticais representam o desvio-padrão. ...	63
Figura 18 - Número de folhas para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP), a) número de folhas emergentes (NFE), b) número de folhas verdes (NFV) e c) número de folhas mortas (NFM). Linhas verticais representam o desvio-padrão.	66
Figura 19 - Áreas individuais de todas as n folhas entre -2 a +10 (AF_n) observadas e medidas pelo integrador foliar, para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, a partir dos 140 dias após o plantio (DAP), em função do produto comprimento e largura das n folhas (C_n e L_n).	70
Figura 20 - a) Área foliar média da planta (AF_m) e b) índice de área foliar (IAF) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP). Linhas verticais representam o desvio-padrão.	71
Figura 21 - Variação em escala de minutos: a) radiação solar global (R_g), déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e temperatura do ar (t_{ar}), b) temperatura do	

dossel vegetativo (t_c), para 24/03 (167 DAP) sob condições de céu parcialmente nublado, entre 12h e 15h..... 75

Figura 22 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente. 79

Figura 23 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta e temperatura do ar (t_{ar}), para 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente. .. 81

Figura 24 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, em 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado e com potenciais hídricos no solo de -0,3; -0,3; e -5,0 kPa, respectivamente. 84

Figura 25 - Diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, ausência de estresse hídrico, sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente..... 88

Figura 26 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente. 92

Figura 27 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta e temperatura do ar (t_{ar}), para 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente. .. 94

Figura 28 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura (t_c-t_{ar}), para 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado e com potenciais hídricos no solo de -2,0; -2,3; e -8,3 kPa, respectivamente. 96

Figura 29 - Diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, sob ausência de estresse hídrico e sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente. 98

Figura 30 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente. 103

Figura 31 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta e temperatura do ar (t_{ar}), para 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente. 104

Figura 32 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura (t_c-t_{ar}), para 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro e com potenciais hídricos de -106,8; -124,3; e -135,3 kPa, respectivamente..... 106

Figura 33 - Diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, sob condições de redução da disponibilidade hídrica no solo e céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente. 108

Figura 34 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente. 110

Figura 35 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta e temperatura do ar (t_{ar}), para 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente. 111

Figura 36 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura (t_c-t_{ar}), para 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado e com potenciais hídricos de -180,0; -182,5; e -184,0 kPa, respectivamente..... 113

Figura 37 - Diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, sob condições de redução do potencial hídrico no solo e de céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente. 118

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AMC	Altura média do colmo (cm)
AF	Área foliar de uma planta (cm ²)
AF _n	Área foliar de cada n folha verde (cm ²)
AFE	Área foliar acumulada das folhas emergentes (cm ²)
AF _m	Área foliar média das cinco plantas amostradas (cm ²)
BOL	Balanço de ondas longas (W m ⁻²)
c _p	Calor específico do ar (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
L	Calor latente de evaporação (MJ kg ⁻¹)
CVS	Campo de visada do sensor
CAD	Capacidade de água disponível (m ³ m ⁻³)
K _c	Coefficiente da cultura (adimensional)
K _{c aj}	Coefficiente da cultura ajustado (adimensional)
A _{cm}	Coefficiente de ajuste (adimensional)
r	Coefficiente de correlação de <i>Pearson</i>
r ²	Coefficiente de determinação

r^2_{aj}	Coeficiente de determinação ajustado
CF_n	Comprimento da n folha verde (cm)
Σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($W m^{-2} K^{-4}$)
γ	Constante ou coeficiente psicrométrico ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
Δ	Declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água ($Pa \text{ } ^\circ C^{-1}$) à temperatura média horária ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
DPV_{ar}	Déficit de pressão de vapor do ar (Pa; hPa; kPa)
d_a	Densidade média aparente do solo ($g cm^{-3}$)
ρ_{ar}	Densidade do ar ($kg m^{-3}$)
DAP	Dias após o plantio
t_c-t_{ar}	Diferencial de temperaturas entre a do dossel vegetativo e a do ar ($^\circ C$)
$S_{t_c-t_{ar}}$	Erro padrão da estimativa de t_c-t_{ar} por R_g e DPV_{ar}
S_a	Erro padrão do parâmetro "a"
S_b	Erro padrão do parâmetro "b"
ε	Emissividade das folhas (adimensional)
TSD	Estresse diário de temperatura ($^\circ C$)
ET	Evapotranspiração (mm)
ET_c	Evapotranspiração da cultura ($mm h^{-1}$)
ET_o	Evapotranspiração da referencia ($mm h^{-1}$; $mm dia^{-1}$)
f	Fator de forma (adimensional)
LE	Fluxo de calor latente para o ar ($W m^{-2}$)
H	Fluxo de calor sensível do dossel para o ar ($W m^{-2}$)
G	Fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$; $MJ m^{-2} h^{-1}$)
GD	Graus-dia ($^\circ C dia^{-1}$)
GDA	Graus-dia acumulados ($^\circ C dia^{-1}$)
IAF	Índice de área foliar (adimensional)
IAF_{denso}	Índice de área foliar que se espera em um cultivo sob condições

	normais e práticas de manejo padrão (adimensional)
IEHC	Índice de estresse hídrico da cultura (adimensional)
IEHC _e	Índice de estresse hídrico da cultura empírico (adimensional)
IEHC _t	Índice de estresse hídrico da cultura teórico (adimensional)
SDD	Índice graus dia de estresse (adimensional)
R	Irradiância emitida ($W m^{-2}$)
LF _n	Largura da n folha verde (cm)
(t _c -t _{ar}) _{LBI}	Linha-base inferior na ausência de estresse hídrico
NFE	Número de folhas emergentes (folhas planta ⁻¹)
NFM	Número de folhas mortas (folhas planta ⁻¹)
NFV	Número de folhas verdes completamente abertas (folhas planta ⁻¹)
NPI	Número de perfilhos industrializáveis (perfilhos m ⁻²)
N	Número de observações de t _c -t _{ar}
n	Número da folha verde segundo o sistema de Kuijper
α, n e m	Parâmetros de ajuste da equação de VAN GENUCHTEN (1980) (adimensionais)
a	Parâmetro associado ao fator independente R _g da linha-base inferior
b	Parâmetro associado ao DPV _{ar} ; inclinação da reta da linha-base inferior
Ψ _m	Potencial matricial aplicado (kPa)
Ψ	Potencial de água no solo (kPa)
e _a	Pressão parcial de vapor d'água (Pa; hPa; kPa)
e _s	Pressão de saturação de vapor d'água (Pa; hPa; kPa)
R _g	Radiação/irradiância ou densidade de fluxo de radiação solar global ($W m^{-2}$)

r_h	Resistência à transferência de calor sensível por convecção ($s\ m^{-1}$)
r_c	Resistência de superfície à transferência de calor latente ($s\ m^{-1}$)
R_n	Saldo de radiação ($MJ\ m^{-2}$; $MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$)
TEMC	Taxa de alongação média do colmo ($cm\ dia^{-1}$)
T	Temperatura absoluta das folhas (K)
T_b	Temperatura base ($^{\circ}C$)
T_a	Temperatura média horária do ar ($^{\circ}C$)
t_{ar}	Temperatura do ar ($^{\circ}C$)
t_c	Temperatura do dossel vegetativo ($^{\circ}C$)
TM	Temperatura mínima diária ($^{\circ}C$)
Tm	Temperatura máxima diária ($^{\circ}C$)
TIV	Termômetro a infravermelho
Θ	Teor de umidade normalizada (adimensional)
$\theta(\Psi_m)$	Umidade no solo em função do potencial matricial (% em massa)
θ_s	Umidade de saturação (% em massa)
θ_r	Umidade residual (% em massa)
UR_{ar}	Umidade relativa do ar (%)
CTV	Variabilidade da temperatura do dossel ($^{\circ}C$)
u	Velocidade do ar ($m\ s^{-1}$)
u_2	Velocidade do ar a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$)

RESUMO

BATALHA, Bruno Ribas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011.
Temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar sob diferentes condições meteorológicas e potenciais de água no solo. Orientador: Sérgio Zolnier. Coorientadores: Aristides Ribeiro e Thieres George Freire da Silva.

Medições da temperatura do dossel vegetativo, a partir da utilização da termometria a infravermelho, podem ser utilizadas em estudos de relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera, sendo uma ferramenta de fácil utilização e resposta rápida. O objetivo principal deste trabalho foi analisar a variação da diferença entre a temperatura do dossel vegetativo (t_c) e a temperatura do ar (t_{ar}), sob diferentes condições meteorológicas e potenciais de água no solo, durante o estágio fenológico de crescimento da cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido em condições de campo, em solo argiloso de fertilidade média, na área experimental pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. O plantio da cana-de-açúcar (var. RB867515) foi realizado a partir de partes vegetativas do colmo no dia 08/10/2010, utilizando-se a densidade de 18 gemas por metro de linha de cultivo, com espaçamento de 1,4 m. Os sensores eletrônicos utilizados para medição da radiação solar, velocidade do ar, umidade relativa, temperatura do ar e temperatura do dossel vegetativo foram conectados a um

sistema serial de aquisição de dados. O potencial de água no solo (Ψ) foi obtido a partir de leituras diárias fornecidas por um medidor digital, utilizando-se a média de três sensores de resistência elétrica, que foram instalados a 30 cm de profundidade. Em intervalos semanais e quinzenais, foram realizadas medidas biométricas não destrutivas em campo e destrutivas em laboratório, respectivamente. A relação entre o diferencial de temperatura " t_c-t_{ar} " e as variáveis, radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), foram determinadas para condições de céu claro, nublado e parcialmente nublado, sob distintos valores de potencial de água no solo. Sob ausência de estresse hídrico ($\Psi > -10\text{kPa}$), foi possível observar que os parâmetros da relação " $t_c-t_{ar}=aR_g-bDPV_{ar}$ " são afetados pelas condições de nebulosidade. A presença de nuvens resultou, respectivamente, no aumento e redução dos parâmetros "a" e "b", tanto para o índice de área foliar médio de 2,40 como 3,35. Com a redução do conteúdo de água disponível no solo, constatado aos 220 ($\Psi \approx -120\text{kPa}$) e 240 ($\Psi \approx -180\text{kPa}$) dias após o plantio, observou-se também um ligeiro aumento do parâmetro "a", mas um efeito contrário no parâmetro "b". Este fato pode ser explicado pela diminuição da disponibilidade hídrica no solo, que faz com que a abertura estomática seja controlada nas horas de maior demanda de água, diminuindo, assim, o resfriamento evaporativo por transpiração. Estes resultados sugerem que a termometria a infravermelho tem potencial para estimativa da disponibilidade hídrica no solo, na fase fenológica de crescimento da cana-de-açúcar, mesmo sob a presença de nebulosidade.

ABSTRACT

BATALHA, Bruno Ribas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011.
Canopy temperature of sugarcane under different meteorological conditions and soil water potential. Adviser: Sérgio Zolnier. Co-advisers: Aristides Ribeiro and Thieres George Freire da Silva.

Canopy temperature measurements with infrared thermometers can be used in studies of water relations in the soil-plant-atmosphere, being a tool of easy use and quick response. The main objective of this study was to analyze the variation of the difference between canopy temperature (t_c) and the air temperature (t_{air}) under different meteorological conditions and soil water potential during the phenological growth stage of sugarcane. The experiment was conducted under field conditions in clay soil of medium fertility at the Agricultural Engineering Department from the Federal University of Viçosa, Viçosa, MG. The sugarcane planting (var. RB867515) was conducted from vegetative parts of the stem on 08/10/2010, using the density of 18 buds per meter of crop row, with 1.4 m spacing. The electronic sensors used to measure solar radiation, air velocity, relative humidity, air temperature and canopy temperature were connected to a serial system data acquisition. The soil water potential (Ψ) was obtained from daily readings provided by a digital gauge, using the average of three sensors of electrical resistance, which were installed

at 30 cm depth. At weekly and biweekly, biometric measurements were performed in field (non-destructive) and laboratory (destructive). The relationship between the temperature differential " $t_c - t_{air}$ " and variables, incident radiation (R_i) and vapor pressure deficit in the air (VPD_{air}), were determined for clear sky, cloudy and partially cloudy conditions, under different values of soil water potential. In the absence of water stress ($\Psi > -10$ kPa), it was observed that the parameters of the relationship " $t_c - t_{air} = a R_g - b VPD_{air}$ " are affected by cloudy conditions. The presence of clouds resulted, respectively, increase and decrease of the parameters "a" and "b" for both the average leaf area index of 2.40 as 3.35. With the decline of the available soil water, found at 220 ($\Psi \approx -120$ kPa) and 240 ($\Psi \approx -180$ kPa) days after planting, it was observed also a slight increase in the parameter "a", but an opposite effect parameter "b". This fact can be explained by decreased availability of soil water, which causes stomatal opening which is controlled at times of peak water demand, thus reducing evaporative cooling through transpiration. These results suggest that infrared thermometry has the potential to estimate soil water availability, phenological growth stage of sugarcane, even in the presence of cloud.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes para a agricultura brasileira, sendo componente histórico, econômico e cultural da formação sociopolítica nacional. Essa cultura compõe um setor que movimenta grande montante de capital, tecnologia, pessoas e informação (CARVALHO, 2009). Destaca-se também pela sua múltipla utilidade, podendo ser empregada sob a forma de forragem para a alimentação animal ou como matéria-prima para a fabricação de rapadura, melado, aguardente, açúcar e álcool (etanol). Além disso, seus resíduos têm grande importância econômica, pois o vinhoto e a torta de filtro são transformados em adubos, e o bagaço e a palhada, resultantes respectivamente da moagem e da colheita, são utilizados pelas próprias usinas no aquecimento de caldeiras e na geração de energia elétrica (PAULA, 2008).

Na atualidade, os maiores índices de aumento de áreas cultivadas são encontrados em São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais. A área de cana-de-açúcar colhida em todos os estados produtores, destinada à atividade sucroalcooleira na presente safra (2010/2011), está estimada em 8.033,6 mil hectares. Dentre os estados produtores, podem-se citar São Paulo com 54,2% (4.357,01 mil hectares) e Minas Gerais que possui 8,0% (649,94 mil hectares). A previsão do total de cana-de-açúcar moída é de 624.991 mil toneladas, com incremento de 3,4% em relação à safra 2009/2010. Do total processado, 46,2% referem-se à produção de açúcar e os 53,8% restantes

correspondem à produção de álcool (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2011).

Atualmente, aceitam-se que os recursos de energéticos, em grande parte baseados em combustíveis fósseis, não são sustentáveis a longo prazo (CHU et al., 2007; FOOD AGRICULTURAL ORGANIZATION – FAO, 2008). Por este motivo, há urgência na realização de um esforço global para desenvolver fontes de energia sustentáveis, a fim de preservar tanto os recursos naturais como mitigar os efeitos das emissões de CO₂ (FISCHER et al., 2008). O uso de biomassa como fonte de energia é uma prática antiga que ainda tem uma contribuição significativa em países menos desenvolvidos (FAO, 2008). Entretanto, o exemplo brasileiro da produção de etanol de cana-de-açúcar, como um combustível líquido, tem mostrado que contribui significativamente para a necessidade energética do mundo e, ao mesmo tempo, contribui para reduzir a emissão de CO₂ e outros gases do efeito estufa (NEMIR, 1983; ROSILLO-CALLE, 1984; BODDEY, 1993; FAO, 2008).

As plantas estão sujeitas a grande variedade de estresses ambientais, incluindo temperaturas inadequadas, condições físico-químicas de solo desfavoráveis e várias doenças e pragas. Contudo, pode-se dizer que o déficit hídrico reduz o crescimento e a produtividade vegetal, mais que outros estresses combinados, pois ocorre em qualquer local, mesmo nas regiões consideradas úmidas (KRAMER, 1983)

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia com o estágio vegetativo em que a cultura se encontra e a cultivar utilizada (AUDE, 1993), sendo, portanto, função da área foliar, estágio fisiológico e densidade radicular. O número de colmos de cana-de-açúcar aptos à indústria é reduzido sob condições de restrição de água. Similarmente, o diâmetro e a alongação da planta são afetados pelo estresse hídrico (SILVA; COSTA, 2004; SOARES et al., 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

A umidade no solo é de grande importância no estudo de processos no sistema solo-planta-atmosfera e no manejo da água, objetivando a produção vegetal (TRINTINALHA et al., 2004). Nesse âmbito, vários autores sugerem que a temperatura do dossel pode ser utilizada para determinar o nível de estresse da cultura (CLAWSON; BLAD, 1982; ERLHER, 1973; JACKSON et al., 1981; TANER, 1963). Desde o início do século XX, vários fisiologistas

vegetais já buscavam relacionar o resfriamento foliar pelo processo de transpiração, comparando a temperatura foliar com a do ar circunvizinho, diante de alterações dos elementos meteorológicos, principalmente radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do ar. Curtis (1936) cita que alguns autores até então afirmavam que o resfriamento evaporativo pela transpiração teria pouca importância na prevenção do aquecimento foliar. Já outros asseguravam que a transpiração era realmente importante. Moreland (1937), realizando medições de temperatura foliar com termopares inseridos no limbo foliar ou na nervura principal da cultura da cana-de-açúcar, observou que a temperatura foliar sofria um decréscimo de aproximadamente 1°C em relação ao ar, sob condições de céu nublado, concluindo que o deslocamento de ar era mais importante que a umidade relativa no resfriamento foliar. Para esses autores, não estavam elucidadas a importância da disponibilidade hídrica no solo e a diferença entre as variedades comerciais plantadas, além da ausência de instrumentos de termometria a infravermelho.

A temperatura do dossel vegetativo está diretamente relacionada com o potencial hídrico da planta, sua transpiração e, conseqüentemente, com o conteúdo de água no solo (IDSO et al., 1986). Assim, a severidade do estresse é indicada pela magnitude da elevação na temperatura da cultura (NÓBREGA et al., 1999).

Lebourgeois et al. (2010) relatam que muitos índices de estresse hídrico foram desenvolvidos após o surgimento dos sensores a infravermelho. Entretanto, o índice de maior sucesso é o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC), que considera a influência das condições meteorológicas do ambiente na temperatura do dossel. Este índice foi desenvolvido empiricamente por Idso et al. (1981) (IEHC_e) e teoricamente por Jackson et al. (1981) (IEHC_t).

O IEHC_e foi utilizado no monitoramento do estresse hídrico em várias culturas, como algodão (PINTER; REGINATO, 1982; WANJURA et al., 1984), amendoim (KAR; KUMAR, 2007), fava (AHMED et al., 2000), feijão (GARCIA; ANDRÉ, 2001), girassol (ERDEM et al., 2006), melancia (ORTA et al., 2002), melão (SILVA et al., 2007), milho (CÁRCOVA et al., 1998; IRMAK et al., 2000), pastagem (CARROW, 1989), pistache (TESTI et al., 2008), soja (NIELSEN et al., 1990), sorgo (OLUFAYO et al., 1996) e trigo (YUAN et al., 2004; ALDERFASI; NIELSEN, 2001).

Segundo Lebourgeois et al. (2010), poucos estudos reportaram a aplicação do IEHC para a cana-de-açúcar e o fato do dossel vegetativo cobrir o solo durante aproximadamente dois terços do seu ciclo de crescimento, o que facilita o uso dessa tecnologia. Em condições de campo, Boroommand-Nasab et al. (2005) e Khera e Sandhu (1986) implementaram o IEHC_e para a cultura da cana-de-açúcar em regiões áridas. Em condições de ambiente protegido, Trentin (2010) realizou seu trabalho em região de clima úmido, porém com o cultivo de plantas em vasos. Outro trabalho com a cana-de-açúcar foi desenvolvido por Inman-Bamber e Jager (1986) no cinturão costeiro de cana-de-açúcar na África do Sul. Os resultados obtidos por estes autores necessitam ser consolidados e testados em condições de clima úmido.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Investigar a viabilidade da termometria a infravermelho para detecção de estresse hídrico da cana-de-açúcar, a partir da análise da diferença entre a temperatura do dossel vegetativo da cultura (t_c) e a temperatura do ar (t_{ar}), sob diferentes condições meteorológicas e potenciais de água no solo, durante o estágio fenológico de crescimento da cana-planta cultivada em sequeiro.

2.2. Objetivos específicos

- a) Analisar o crescimento da cana-de-açúcar a partir de avaliações biométricas em função dos graus-dia acumulados (GDA), principalmente expressada pelo índice de área foliar (IAF) visando estabelecer correlações com a temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar;
- b) Determinar os parâmetros da linha-base inferior do índice de estresse hídrico (IEHCe) para a cultura da cana-de-açúcar em condições de campo, por meio de medições das variáveis meteorológicas, da temperatura do dossel vegetativo e do potencial de água no solo;
- c) Avaliar o comportamento da linha-base inferior sob redução do potencial de água no solo, para diferentes condições meteorológicas e IAF;

d) Estabelecer uma relação para a linha-base inferior, a fim de potencializar o uso da termometria a infravermelho sob a presença de nebulosidade.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar tem origem no sudeste asiático, na região da Nova Guiné e Indonésia (DOORENBOS; KASSAM, 1994; PARANHOS, 1987). Atualmente, é cultivada com predominância em áreas subtropicais, entre 15° e 30° de latitude, podendo se estender até 35°, tanto ao norte quanto ao sul e em altitudes que variam desde o nível do mar até cerca de mil metros. É produzida comercialmente em mais de 79 países e territórios, em uma área de cerca de 12 milhões de hectares, sendo os maiores produtores em ordem decrescente: Brasil, Cuba, Índia, México, China, Filipinas, Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América (principalmente Havaí), República Dominicana e Formosa (TAVARES, 2009).

De acordo com Figueiredo et al. (1995), essa grande amplitude de áreas de cultivo da cana-de-açúcar pelo mundo se deve aos programas de melhoramento genético, que desenvolvem variedades mais resistentes a patógenos e melhor adaptadas às diversas condições ambientais. No Brasil, devido à grande extensão territorial, existem áreas com clima ideal, sem restrições térmicas e, ou, hídricas, que permitem a produção econômica sem exigir recursos e técnicas especiais. Entretanto, há áreas em que as restrições são limitantes, onde se adaptam somente variedades selecionadas e é necessária a utilização de recursos extras como: drenagem, irrigação,

fertilização e calagem e preparo periódico do solo (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977).

Atualmente, as espécies de cana-de-açúcar são classificadas como *Saccharum officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis*, *S. barberi* e *S. robustum*, pertencentes à família *Poacea*. As variedades derivadas da espécie *S. officinarum* foram denominadas como *Canas Nobres* por pesquisadores alemães na Ilha de Java nos anos 20, porque continham maior teor de açúcar e menos fibras em relação às demais espécies (CARVALHO, 2009).

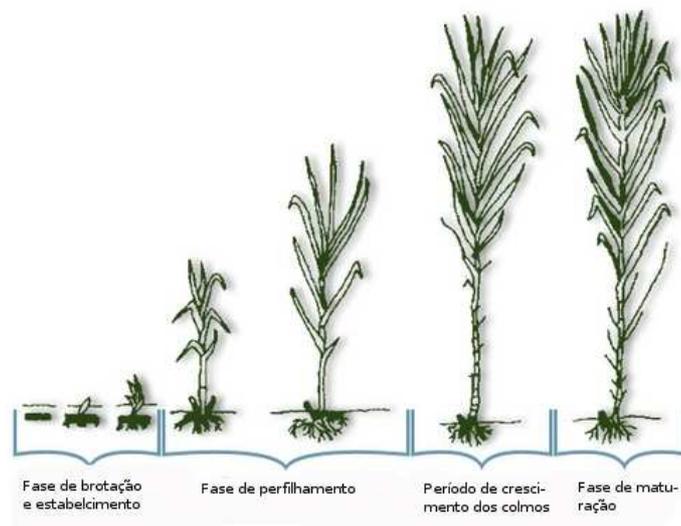
A propagação da cana-de-açúcar é geralmente feita por intermédio de pedaços do colmo (toletes), contendo uma ou mais gemas. A brotação constitui uma fase importante, pois resultará em plantas vigorosas (SILVA et al., 2004). O processo de transição da gema do estado de dormência para o de crescimento ativo é um fenômeno complexo, desencadeado por enzimas e regulado por hormônios de crescimento (MALAVOLTA; HAAG, 1964).

A cana-de-açúcar é uma cultura perene que perfilha abundantemente na fase inicial de desenvolvimento, e, quando ela se estabelece, a competição intraespecífica por radiação fotossinteticamente ativa (autosombreamento) induz uma inibição no perfilho e acelera o crescimento do colmo principal (MAGALHÃES, 1987). Segundo Barros (2008), a parte aérea é formada por colmos (caule típico das gramíneas), folhas e inflorescência (conjunto de flores arranjadas em uma haste), e a parte subterrânea é composta por raízes e rizomas (fonte de reservas para a planta). Suas raízes são do tipo fasciculada, sendo que 85% delas encontram-se nos primeiros 50 cm e, aproximadamente, 60% estão entre 20 e 30 cm de profundidade (Mozambani et al., 2006).

As primeiras raízes que se desenvolvem após o plantio da cana-de-açúcar são as de fixação, originadas dos primórdios situados na zona radicular dos toletes plantados (BACCHI, 1983; CASTRO; KLUGE, 2001). Cada perfilho apresenta um sistema radicular próprio, sendo que, enquanto houver emissão desses, ocorrerá aumento no volume das raízes. Nos primeiros 30 dias, durante a brotação das gemas, a planta vive das reservas de nutrientes contidas no tolete e, parcialmente, do suprimento de água e nutrientes pelas raízes de fixação (BACCHI, 1983). Com o desenvolvimento das raízes dos perfilhos, a cana-planta passa a depender exclusivamente destas e, assim, as raízes de fixação vão perdendo a função (ROCHECOUSTE, 1967).

A cultura procedente da cana-planta vem seguida de dois a quatro ciclos de rebrota (cana-soca), podendo em certos casos ultrapassar oito ciclos. No início, o crescimento é lento, aumentando gradativamente até atingir uma taxa máxima, e, em seguida, diminui à medida que a cana começa a amadurecer, em decorrência do frio e, ou, seca ou mesmo devido à floração (DOOREMBOS; KASSAM, 1979).

Na Figura 1, está representada uma escala fenológica, que consiste em um conjunto de fases sequenciais, a fim de descrever o crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar, desde a sua emergência até a maturação.



Fonte: Gascho e Shih (1983).

Figura 1 – Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar apresenta quatro estágios fenológicos, que são comumente denominados de “estádios”. São eles: i) brotação e emergência, com duração de 30 a 60 dias (colmos primários); ii) perfilhamento e estabelecimento da cultura, com duração de 60 a 90 dias (da emergência dos brotos ao final do perfilhamento); iii) crescimento dos colmos, com duração de 180 a 210 dias (do final do perfilhamento ao início da acumulação de sacarose); e iv) maturação dos colmos, com duração de 60 a 90 dias (intenso acúmulo de sacarose nos colmos) (GASCHO; SHIH, 1983; CÂMARA; OLIVEIRA, 1993).

O rendimento econômico da cana-de-açúcar é dado pela produção de sacarose, além de açúcares não redutores utilizados para formar o melaço e também a fibra, que pode ser utilizada como fonte de energia para a própria usina. O processamento industrial da cana pode também ser direcionado para a produção de álcool (etanol), utilizado como combustível (RODRIGUES, 1995).

Para atingir elevada produção de sacarose, a cana-de-açúcar precisa encontrar condições de temperaturas mais baixas e umidade adequada, para permitir um desenvolvimento suficiente durante a fase vegetativa. Na sequência, é necessário um período com restrição térmica e, ou, hídrica moderadas para forçar o repouso vegetativo e, conseqüentemente, o enriquecimento de sacarose na época do corte (HUMBERT, 1968; ALFONSI et al., 1987; VAREJÃO-SILVA; BARROS, 2001).

O Brasil apresenta duas estações distintas durante o ano e, por isso, é o único país no mundo com duas colheitas anuais: uma referente ao Norte-Nordeste, que vai de setembro a abril, e a outra na região Centro-Sul, de maio a dezembro (SCARPARI, 2002). O momento de colheita é definido em função da variedade, época de plantio (e conseqüentemente a duração do ciclo), manejo da maturação e condições climáticas no ambiente (GASCHO; SHIH, 1983). A duração do ciclo está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Duração do ciclo da cana-de-açúcar em função do planejamento da época de plantio

Tipo de cana	Duração dos ciclos
Cana de ano e meio	14 a 22 meses
Cana de ano	12 meses
Cana soca	12 meses
Cana de inverno	12 a 16 meses

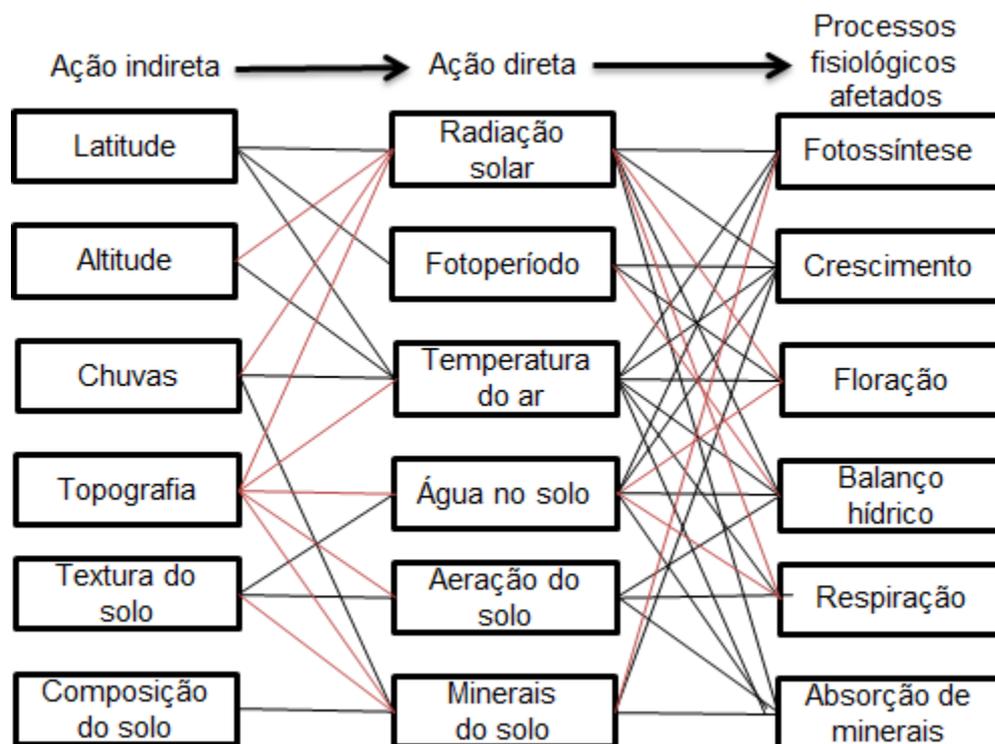
Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2010).

3.2. Variáveis agrometeorológicas associadas ao desenvolvimento da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma gramínea (*Poacea*) do tipo C4, denominada assim por produzir compostos orgânicos com quatro carbonos durante a fixação destes no ciclo de Calvin. A cana-de-açúcar apresenta maior taxa fotossintética e eficiência na utilização e resgate de CO₂ da atmosfera. É uma cultura adaptada às condições de alta intensidade luminosa, altas temperaturas e estresse hídrico moderado, sendo que requer quantidades consideráveis de água para suprir sua demanda hídrica, pois, dependendo da fase no estágio fenológico, 70% do seu peso é água (SEGATO et al., 2006).

Castro (1999) classifica os fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas, de acordo com o esquema demonstrado na Figura 2.

Gemente et al. (1986) definem o clima como principal determinante das restrições impostas pelo ambiente físico, este constituído pela interação dos componentes do clima, solo e planta, que influenciam, respectivamente, a época de colheita, o número programado de cortes e a escolha de variedades. Temperatura, radiação fotossinteticamente ativa e umidade relativa do ar são os principais elementos meteorológicos que controlam o crescimento da cana-de-açúcar. Por ser uma planta tropical, desenvolve-se melhor em áreas quentes e ensolaradas (HUMBERT, 1968).



Fonte: Modificado de Castro (1999).

Figura 2 - Classificação dos fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas. Linhas negras correspondem a uma ação mais efetiva do que as linhas vermelhas.

3.2.1. Temperatura e umidade relativa do ar

O aquecimento e o resfriamento do ar são determinados pelo balanço de radiação da superfície do solo e da vegetação. As trocas de calor do ar com as superfícies se dão por condução e convecção, gerando movimentos turbulentos do ar. Junto com o calor, o movimento do ar transfere vapor d'água, energia cinética, gás carbônico e poluentes. A variação da temperatura do ar segue a variação do balanço de radiação. A temperatura máxima do ar próximo ao solo ocorre simultaneamente com a temperatura máxima da superfície do solo; mas à medida que se afasta do solo há um retardamento do momento de máxima temperatura do ar (a dois metros de altura ocorre cerca de duas horas após). Em noites com céu descoberto, devido ao resfriamento das superfícies e

consequente resfriamento do ar das camadas inferiores, ocorre uma inversão de acordo com um gradiente térmico (PILLAR, 1995).

A temperatura que alguns autores (HUMBERT, 1968; ALEXANDER, 1973; OMETO, 1978 e 1981; IDE; BANCHI, 1984; IDE; OLIVEIRA, 1986; MAGALHÃES, 1987; BARBIERI, 1993) definem como de maior relevância para a maturação fisiológica da cana-de-açúcar, além de afetar a absorção de água e nutrientes através do fluxo transpiratório, é um condicionante não controlável, com exceção a ambientes de cultivo protegido. A planta, geralmente, é bem tolerante a altas temperaturas, desde que haja irrigação ou umidade disponível no solo (MAGALHÃES, 1987; PAULA, 2008).

A temperatura do ar tem relação direta com a brotação das gemas da cana-planta. Dessa maneira, a faixa ideal de temperatura para a brotação está entre 34°C e 37°C, sendo limitantes os extremos 21°C e 44°C (NICKELL, 1975). De acordo com Humbert (1968), sempre que a temperatura atinge valores abaixo de 20°C, a taxa de brotação é reduzida, e temperaturas superiores a 40°C também inibem a brotação dos toletes.

Similarmente à brotação das gemas, o perfilhamento é fortemente influenciado pela temperatura. No entanto, além da temperatura, a radiação solar tem papel decisivo na formação e no crescimento dos perfilhos, mesmo sendo o potencial de perfilhamento inerente às variedades (CARVALHO, 2009). Segundo Van Dillewijn (1952), o perfilhamento aumenta à medida que a temperatura do ar se eleva, até o máximo aproximado de 30°C.

A cultura da cana-de-açúcar suporta razoavelmente temperaturas elevadas de 34-35°C. Porém, valores constantes e acima de 38-40°C podem afetar o seu desenvolvimento pelo efeito inibitório de atividades fisiológicas (BRUNINI, 2008).

Ebrahim et al. (1998) relataram que, quando mantidas à temperatura igual a 15°C, as plantas de cana-de-açúcar têm crescimento lento, poucas folhas e reduzido número de internódios, os quais também são curtos. Em contraste, quando submetidas a 45°C, as plantas tiveram quase o mesmo número de folhas e internódios que as mantidas a 27°C, que foi considerado o valor ótimo por esses autores. No entanto, os internódios eram mais curtos e com menor diâmetro e as folhas secaram mais precocemente, apesar do maior perfilhamento. O incremento em área foliar foi maior à temperatura ótima. A

produção de biomassa foi de meio a um terço menor a 45°C e um décimo a 15°C. A concentração de sacarose nos colmos foi igual para as três temperaturas, porém a translocação de sacarose no floema foi fortemente inibida a 15°C. Já a 45°C, devido ao elevado nível de respiração, ocorreu redução da quantidade de sacarose disponível para a translocação.

Segundo Fauconier e Bassereau (1975), o crescimento máximo da cana-de-açúcar dá-se entre 30° e 34°C, enquanto que abaixo de 25°C e acima de 38°C é muito lento. Conforme Bacchi e Souza (1977), as temperaturas basais da cana-de-açúcar para lavouras irrigadas e não irrigadas são 19°C e 18°C, respectivamente.

De acordo com Humbert (1968), a temperatura é o fator mais efetivo no processo de acúmulo de sacarose. Este processo é maior desde que haja uma combinação de oscilações de temperatura associadas a um período de seca moderada, e a temperatura noturna influencia mais que a diurna (MARCHIORI, 2004). Assim, os decréscimos de temperatura são favoráveis à maturação e desfavoráveis ao crescimento vegetativo dos colmos. Em regiões onde não há estação seca para a maturação da cana, é necessário que a temperatura média diária seja inferior a 20°C. A faixa ideal de temperatura para a maturação é de 10°C a 20°C (MARIN, 2011). Scarpari (2002) diz que neste cenário é necessário um período de três meses para que ocorra o repouso vegetativo e se inicie a maturação.

O florescimento faz cessar o crescimento da cana-de-açúcar, não sendo interessante para produção comercial (MAGALHÃES, 1987; TAVARES, 2009), mas sim para estudos relacionados ao melhoramento genético. Esta é uma característica genética da cana-de-açúcar, existindo variedades floríferas e não floríferas. Além de cessar o crescimento, a planta irá transformar açúcares do colmo em inflorescência, prejudicando a produção a ponto de promover a desidratação da extremidade apical dos colmos (GOMES et al., 2003; COLLICCHIO, 2008). Scarpari (2002) relaciona o florescimento à duração do período diurno, umidade no solo, variedade e temperatura. Valores noturnos acima de 18°C, baixa umidade e duração do período diurno próximo a 12 h, na maioria dos casos e dependendo da variedade exposta, estimulam o florescimento.

A cana-de-açúcar é cultivada sob condições temperadas, subtropicais e tropicais, contudo, ela é basicamente uma cultura tropical, com crescimento governado por um complexo de fatores internos e externos, sendo estes últimos especialmente os elementos climáticos como precipitação, umidade do ar e temperatura. A umidade relativa média do ar que a cana-de-açúcar se desenvolve melhor está entre 55 e 85% (Van Dillewijn, 1952; Netafim, 2008). Entretanto, altas umidades favorecem a infestação e o crescimento de fungos patogênicos de maneira geral (CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS – CIIAGRO, 2010).

De acordo com NETAFIM (2010), a alta umidade (80 - 85%) favorece um alongamento rápido do colmo durante o período de crescimento. Porém, valores moderados de 45 a 65 %, junto a um suprimento de água limitado, são favoráveis durante a fase de amadurecimento; já o florescimento é induzido por um período seco (RODRIGUES, 1995). Segundo Doorenbos e Kassam (1994), a cultura da cana-de-açúcar desenvolve-se bem sob estação quente e longa, com alta incidência de radiação e umidade relativa adequada, seguida de período seco, ensolarado e moderadamente frio, porém sem geadas, durante a maturação e a colheita.

A geada “branca” e a “negra” são graves problemas da cultura canavieira na região Centro-sul do Brasil. A branca ocorre quando a temperatura do ponto de orvalho está abaixo de 0°C, normalmente em condições de alta umidade relativa do ar. Quando esta baixar e a temperatura cair abaixo de 0°C (acima do ponto de orvalho), ocorre a geada negra, nome dado devido ao surgimento de tecido vegetal escuro, sem a presença de gelo, após o período da geada. Dependendo das condições do clima e do tempo de exposição, a geada negra pode ser mais prejudicial, possivelmente devido à liberação de energia, que ocorre quando a água passa do estado líquido para o sólido, retardando a diminuição da temperatura (RODRIGUES, 1995).

3.2.2. Radiação solar e fotoperíodo

A radiação solar é a principal fonte de energia para o ambiente, sendo uma das variáveis que tem maior influência nos processos fisiológicos que regem o desenvolvimento e o crescimento das plantas e, conseqüentemente,

influencia a produtividade (BLANCO; SENTELHAS, 2001; D'ANGIOELLA et al., 2001). Somente a faixa de 0,4 a 0,7 μm do espectro da radiação solar que atinge a superfície de um dossel é utilizada diretamente pelas plantas, sendo conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (LANA; VIEIRA, 2001). Allen et al. (1998) consideram ainda que a radiação solar seja a fonte de energia utilizada para permutar grandes quantidades de água líquida em vapor de água. A radiação solar que alcança a superfície evaporante depende da turbidez atmosférica e da presença de nuvens que refletem e absorvem quantidades importantes de radiação.

A radiação solar global é o total de energia proveniente do Sol, que de maneira direta ou difusa (perceptível a um observador durante um dia nublado) atinge uma determinada superfície. O Balanço de Ondas Longas (BOL) compreende dois componentes, a contrarradiação atmosférica e a radiação emitida pela superfície. A primeira é função, basicamente, da temperatura do ar, da quantidade de vapor d'água na atmosfera e cobertura de nuvens. Já a emitância do complexo de superfície formado pelo solo e cultura depende da temperatura e emissividade destes (VIANELLO; ALVES, 1991).

A cana-de-açúcar é considerada, por excelência, uma "planta de sol". A radiação solar afeta todos os estágios de desenvolvimento dessa cultura (ORTOLANI; CAMARGO, 1987). Segundo Rodrigues (1995), com elevadas taxas de radiação, os colmos são mais curtos e possuem diâmetro maior, as folhas são mais longas e mais verdes, resultando, assim, em altas taxas fotossintéticas. Em condições de baixas taxas de radiação, os colmos são mais finos e longos, as folhas estreitas e amareladas. Para Fauconier e Basserau (1975), a radiação solar intensa também propicia aos canaviais maior área foliar, raízes mais desenvolvidas, tendência ao maior acúmulo de matéria seca (açúcar e fibras) em detrimento da quantidade de água.

Durante a fase de germinação, não há evidências de que esta tenha efeito sobre o desenvolvimento das gemas e a cana pode germinar mesmo na sua ausência (FAUCONIER; BASSERAU, 1975), enquanto que na fase de desenvolvimento vegetativo há diversos eventos dependentes da radiação. O perfilhamento é favorecido pela radiação solar intensa. Com o desenvolvimento foliar, a extinção de radiação fotossinteticamente ativa no interior do dossel vegetativo torna-se mais intensa e a competição das plantas se acentua,

exigindo um reequilíbrio entre a quantidade de energia radiante recebida e o número de perfilhos que poderão sobreviver. Assim, na fase em que o dossel da cana-de-açúcar começa a cobrir totalmente o solo, perde-se grande parte dos perfilhos jovens por limitação de radiação solar (CARVALHO, 2009).

A cana-de-açúcar, por apresentar folhas mais eretas, permite o adensamento das plantas, o que explica os elevados níveis de produtividade observados em condições de campo utilizando menores espaçamentos (CARVALHO, 2009). Galvani et al. (1997) concluem que em menores espaçamentos há elevação no índice de área foliar (IAF) e, conseqüentemente, acréscimo na taxa de fotossíntese do dossel vegetativo, gerando maior produção para uma mesma área.

Segundo Marin et al. (2009), em regiões tropicais e subtropicais, a cana-de-açúcar mostra crescimento muito vigoroso no início do verão e, especialmente, após as chuvas que ocorrem no meio da tarde, quando o céu está claro e a radiação solar intensa. Nesta situação, associam-se todas as condições requeridas para altas taxas de crescimento.

O fotoperíodo é um fator importante para o desenvolvimento dessa cultura e afeta principalmente o comprimento dos colmos da cana-de-açúcar. Quando compreendido entre valores variando de 10 a 14 h, há um aumento no tamanho destes. Entretanto, o oposto é observado sob fotoperíodos longos, compreendidos entre 16 e 18 h. Além disso, esse fator atua também como condicionador do florescimento, juntamente com a temperatura do ar (BARBIERI, 1981). Para que ocorra florescimento, o fotoperíodo deve estar entre 12 e 12,5 h (PEREIRA et al., 1983). Contudo, a indução desse processo somente é constatada, nesse período, se a temperatura máxima do ar estiver abaixo de 31°C e a mínima acima de 18°C em um número mínimo de dias. Segundo Pereira et al. (2002), isso explica porque a cana-de-açúcar floresce em alguns anos e não em outros.

3.2.3. Velocidade do ar

O escoamento do ar é um dos fenômenos de maior importância para os processos de interação biosfera-atmosfera, agindo de forma ativa sobre a

mistura e a troca de *momentum*, calor e massa na camada limite planetária, a qual é extremamente influenciada pela superfície terrestre (STULL, 1988).

O entendimento do escoamento na superfície das plantas não é trivial, pois apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal. Essa complexidade se deve, especialmente, à existência das diversas subcamadas fisicamente distintas acima e dentro de superfícies vegetadas, que influenciam consideravelmente na força de arraste do vento sobre a própria superfície (PATTON, 1997; SHEN; LECLERC, 1997). Para caracterizar a estrutura média do escoamento em superfície, são utilizados os valores médios da velocidade do ar. Entretanto, para representar a natureza turbulenta do escoamento, são aplicadas estatísticas de turbulência, bem como são analisados os termos do balanço de energia cinética e o espectro de turbulência acima e abaixo do dossel das plantas (SHEN; LECLERC, 1997; WILSON, 1989).

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 desenvolvido por JARVIS; McNAUGHTON (1986), que quantificaram o grau de acoplamento para a troca de vapor d'água por meio do cálculo de um parâmetro denominado fator de desacoplamento. Quando uma cultura encontra-se totalmente desenvolvida e com disponibilidade de água no solo, o aumento da interação biosfera-atmosfera pode ser induzido pelo aumento da velocidade do ar, resultando em valores de fator de desacoplamento tendendo a zero. Porém, condições de vento muito calmo ou muito forte promovem um maior acoplamento entre a biosfera e a atmosfera. Sob condições de cultura esparsa e velocidade do ar moderada também é observado altodesacoplamento entre a vegetação e a atmosfera (STEDUTO; HSIAO, 1998).

Silva (2009), em seu trabalho com a cultura da cana-de-açúcar no semiárido brasileiro, concluiu que, sob estas condições meteorológicas, a cana apresentou um maior controle do processo de troca de vapor d'água com a atmosfera. Este processo foi realizado por meio de ajustes dos estômatos durante os meses mais quentes, quando ocorreram altos valores de suprimento de radiação e de demanda atmosférica, associados a baixos valores de velocidade do ar. Ainda segundo este autor, no início do ciclo, a interação cana-atmosfera é menor em decorrência do baixo índice de área foliar e dos

altos valores de velocidade do ar, que inibem o contato entre a cultura e a atmosfera.

Allen et al. (1998) relatam que o processo de remoção de vapor depende do vento e da turbulência, os quais transferem grandes quantidades de ar para a superfície evaporante. Com a evaporação da água, o ar sobre a superfície se satura gradualmente. Se este volume de ar não é substituído por outro mais seco, há a redução da intensidade de remoção de vapor d'água e da taxa de evapotranspiração (ET).

Outra importância do vento refere-se ao tombamento das plantas, principalmente sob ventos fortes, que influencia a produtividade final da cultura, estando também associado às características das variedades cultivadas. Caputo (2003) completa ainda que o tombamento pode ser influenciado por fatores como nutrição, tipo e umidade no solo.

3.3. Disponibilidade de nutrientes no solo

O maior desenvolvimento do sistema radicular de uma planta irá proporcionar, inicialmente, maior resistência à seca, absorção de nutrientes e, conseqüentemente, maior produtividade. Assim, fatores que influenciam o desenvolvimento do sistema radicular são de fundamental importância para o sucesso de um sistema agrícola, principalmente em países tropicais (SERRANA, 2001).

Apesar dos produtos finais (sacarose e álcool etílico) conterem apenas carbono, hidrogênio e oxigênio (provenientes do ar e da água), uma série de outros elementos químicos, considerados nutrientes para a cana-de-açúcar, são essenciais não só para o crescimento e desenvolvimento, mas também para a participação em inúmeras reações intermediárias, dentro das diferentes rotas metabólicas da planta, até produto final (açúcar) de interesse econômico (ORLANDO FILHO et al., 1994).

A falta de qualquer macro ou micronutriente no solo faz com que haja uma redução na produtividade da cana e, conseqüentemente, na de açúcar. Quando a deficiência nutricional é pronunciada, a planta revela sintomas típicos (ANDERSON; BOWEN, 1992). A cana-de-açúcar, como muitas gramíneas, é uma planta acumuladora de silício (Si). Em condições de campo, quando as

lâminas foliares contêm menos que 1,4% de Si, a planta pode apresentar uma redução drástica no crescimento e sintomas típicos de deficiência (*leaf freckling*- folha sardenta) nas lâminas foliares diretamente expostas aos raios solares (ELAWAD et al., 1982). Quando os sintomas aparecem, normalmente a produtividade já foi afetada economicamente. Para alguns nutrientes (por exemplo, cobre e zinco) a cana-de-açúcar apresenta o processo de "fome escondida", ou seja, a deficiência não é suficientemente grave para apresentar os sintomas, mas sim para reduzir economicamente a produção (ORLANDO FILHO et al., 1995).

Segundo Orlando Filho (1983), a extração de nutrientes no solo pela cana-de-açúcar é influenciada por fatores como: idade da planta, tipo de solo e variedade. Ainda, conforme relata este autor, a cana-de-açúcar necessita, consideravelmente, de doses adequadas de nitrogênio no seu período de formação, ou seja, da germinação até o fechamento do dossel vegetativo; o fósforo tem importante participação na formação de sacarose; plantas deficientes em potássio respiram mais, ocorrendo diminuição da fotossíntese; o cálcio é fundamental na composição salina do citoplasma, dando estrutura às células, sendo componente da parede celular e facilitando a absorção de água por sua elevada função plasmolítica. O magnésio é componente da molécula de clorofila, sendo encontrado em maior concentração em pontos de crescimento. O enxofre é encontrado em numerosos compostos das plantas, sendo as proteínas os mais importantes (BEUCLAIR, 1994).

3.4. Disponibilidade hídrica no solo

O manejo de água deve ser conduzido de forma adequada, buscando o rendimento ótimo da cultura do ponto de vista econômico (TRINTINALHA et al., 2004). O déficit hídrico não é limitado apenas às regiões áridas e semiáridas do mundo, uma vez que, mesmo em regiões consideradas úmidas, a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o crescimento (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A água em excesso no solo altera os processos químicos e biológicos, limitando a quantidade de oxigênio e acelerando a formação de compostos tóxicos à raiz. Por outro lado, a percolação intensa provoca remoção de

nutrientes e inibição do crescimento normal da planta. Embora importantes, os excedentes hídricos não apresentam os mesmos problemas, quando comparados à seca, que se caracteriza por diferentes formas e intensidades, e corresponde à causa principal de decréscimo de produtividade (ORTOLANI; PAES DE CAMARGO, 1987).

O aumento na produção de alimentos e nos demais setores produtivos pode levar à escassez de água. Tal fato reforça a importância da programação da irrigação, cuja eficiência depende de conhecimentos: da cultura, como por exemplo, as necessidades hídricas da mesma nos diferentes estágios de crescimento; do clima, no que se refere aos fatores meteorológicos governantes do deslocamento da água para a atmosfera, pelos fenômenos da evaporação e da evapotranspiração; e no solo, principalmente nas suas características físicas, determinantes da capacidade de armazenamento da água, bem como da retenção da mesma na profundidade das raízes. Estes conhecimentos possibilitam a estimativa de quando e quanto irrigar, mantendo a eficiência de irrigação em níveis aceitáveis, pois com o monitoramento da umidade no solo pode-se ter maior controle da irrigação, minimizando-se o estresse hídrico às culturas, por excesso ou por escassez de água (LEÃO et al., 2007).

Segundo Israelsen e Hansen (1985), a programação de irrigação é uma técnica que permite determinar o nível ótimo de rega, considerando as variáveis anteriormente expostas, de forma a estabelecer a frequência de aplicação e a quantidade de água a ser utilizada, de acordo com as condições edafoclimáticas em que se encontra o cultivo. Portanto, para programar a irrigação, é essencial estimar a quantidade de água que o solo explorado pelas raízes pode armazenar e a evapotranspiração no sistema.

A determinação da umidade no solo é de grande importância para a pesquisa e o manejo da irrigação. Em decorrência das dificuldades envolvidas na determinação direta da umidade no solo pelo método gravimétrico, geralmente, utilizam-se métodos indiretos, em que a umidade é estimada a partir da medição de alguma propriedade do solo a ela relacionada (MIRANDA et al., 2007).

O potencial matricial de água ou a tensão de água no solo proporciona um meio de indicar quando irrigar e quanto aplicar ao solo (CARY; FISHER,

1983), permitindo determinar o fluxo de água no solo e a sua disponibilidade para as plantas (REECE, 1996). Blocos que medem a resistência à passagem da corrente elétrica entre dois eletrodos imersos em gesso estão entre os tipos de sensores utilizados para essa medida indireta de umidade. Para a determinação da umidade no solo utilizando estes blocos, faz-se necessária a obtenção da curva de retenção de água, elaborada a partir de dados obtidos pela metodologia proposta por Richards (1965). A curva de retenção é obtida através de um conjunto de pares de umidade no solo, correspondentes a um dado potencial matricial aplicado.

A capacidade do solo em armazenar água e suprir a necessidade das plantas é uma das propriedades funcionais fundamentais relacionadas à produtividade da cana-de-açúcar. A determinação da disponibilidade de água é utilizada em muitas práticas de manejo do solo, bem como na modelagem da produtividade dessa cultura. Porém, a obtenção quantitativa da capacidade de água disponível (CAD) é complexa, pois envolve a cotação de dois limites, denominados capacidade de campo e ponto de murcha permanente (JIANG et al., 2007; RITCHIE, 1981).

Bernardo et al. (2006) descreveram que a capacidade de campo (θ_{cc}) ocorre quando o teor de umidade no solo for aquele em que a condutividade hidráulica se torna tão pequena, de forma que o movimento vertical de água para o interior do solo será insignificante, considerando um solo saturado em condição de lençol freático profundo. Ainda segundo estes autores, o ponto de murcha permanente (θ_{pm}) representa o teor de umidade no solo abaixo do qual a planta não conseguirá retirar água na mesma intensidade com que transpira. Isso aumenta, a cada instante, a deficiência de água na planta, o que a levará à morte, caso não seja irrigada. Portanto, o θ_{pm} representa o limite mínimo de água armazenada no solo que será usada pelos vegetais. Este conceito é muito útil, mas convém ressaltar que seu valor depende do tipo de solo e que diferentes plantas têm a capacidade de extrair água até diferentes limites.

Para a cana-de-açúcar, uma precipitação pluvial anual a partir de 1.000 mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produtividades (ALMEIDA et al., 2008). Isso implica que o manejo hídrico deve ser realizado com eficiência, com suprimentos hídricos adequados durante o desenvolvimento vegetativo (principalmente nas fases de germinação,

perfilamento e alongamento dos colmos) e alguma restrição no período de maturação, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento em sacarose (IINMAN-BAMBER; SMITH, 2005). O déficit hídrico no solo gera um estresse hídrico na planta que afeta negativamente o crescimento e, por fim, o rendimento final da cultura, já que causa o fechamento dos estômatos e a diminuição da fotossíntese em adaptação à escassez de água (PEREIRA et al., 2002).

Os efeitos do déficit hídrico dependem da intensidade, duração e época de ocorrência, assim como a interação com outros fatores determinantes da produtividade final (FONTANA et al., 2001). Segundo DOORENBOS e KASSAN (1994) e DELGADO ROJAS (1998), o déficit hídrico provoca uma redução na taxa de alongamento do caule, com a formação de internódios mais curtos. A irrigação frequente no final do ciclo da cultura induz à floração, o que diminui a produção de açúcar. Por isso, na fase de maturação, os intervalos de irrigação são ampliados, ou então ela é suspensa, para que ocorra redução na taxa de crescimento vegetativo. Com o arrefecimento da disponibilidade hídrica há uma desidratação da cana, forçando a transformação dos açúcares em sacarose recuperável.

O efeito da deficiência hídrica nas folhas é relatado por Ometto (1980, citando os resultados de HARTT, 1939). Os autores verificaram que folhas supridas com água sintetizam 10 vezes mais sacarose que as desprovidas de água e que a atividade fotossintética não cessa no ponto de murchar, mas permanece em razão extremamente baixa.

A deficiência hídrica provoca ainda um menor conteúdo de sacarose e maior *brix*, e, conseqüentemente, menor pureza, além da dificuldade de extração e processamento. Esse efeito é devido, provavelmente, ao alto conteúdo de fibra, advindo de entrenós curtos, da maior transpiração, e do crescimento atrofiado dos colmos (NAQVI; QAYYUM, 1973).

3.5. Termometria a infravermelho como ferramenta de avaliação de estresse hídrico na planta

3.5.1. Termometria a infravermelho

Medições de temperaturas de superfícies têm muitas aplicações nas ciências físicas e ambientais (BAKER et al., 2000). Por isso, a temperatura das superfícies tem sido utilizada como um critério de avaliação na saída de modelos do sistema solo-planta-atmosfera (BAKER et al., 1996), como entrada de modelos de fluxo de superfície (KUSTAS; NORMAN, 1997), e como indicadora de estresse hídrico em plantas (IDSO et al., 1981).

Campbell e Norman (1998) relatam que os radiômetros que medem a energia na faixa do infravermelho, são utilizados para estimar a temperatura nesta faixa de radiação e, por isso, são chamados de termômetros a infravermelho, já que são projetados para estimar a temperatura da superfície e serem minimamente influenciados pela intervenção atmosférica. Geralmente, eles são sensíveis somente a comprimentos de onda onde a atmosfera é relativamente transparente, como, por exemplo, na faixa situada entre 8 e 13 μm . A radiação emitida pela folha se caracteriza por estar composta principalmente pela parte infravermelha do espectro, e sua magnitude depende da temperatura (SANMARTIN; ACEVEDO, 2001).

Segundo Tanner (1963), o termômetro a infravermelho mede a radiação emitida pelas plantas e relaciona esta radiação com a temperatura das folhas, por intermédio da lei de Stefan-Boltzmann, descrita pela seguinte expressão:

$$R = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

em que R é a irradiância emitida (Wm^{-2}); ϵ , emissividade das folhas (adimensional); σ , constante de Stefan-Boltzmann ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$); T, temperatura das folhas (K).

Para Sanmartin e Acevedo (2001), esta expressão mostra que quando a temperatura de uma folha exposta à radiação solar se eleva, a energia infravermelha que esta emite também aumenta. A emissividade da radiação infravermelha das plantas verdes é alta (0,95 a 0,98), assim, a medida da

temperatura radiativa pode ser convertida na temperatura da planta com um pequeno erro (TANNER, 1963).

Para Garcia et al. (2000), o desenvolvimento de termômetros a infravermelho (TIV) portáteis e de baixo custo, no início dos anos 70, incrementou pesquisas sobre o uso de sensores remotos para medição da temperatura do dossel vegetativo e sobre a detecção da ocorrência de estresse hídrico.

Infelizmente, a temperatura de uma determinada superfície é difícil de ser medida com exatidão, resolução e estabilidade requerida por aplicações potenciais (BAKER et al., 2000). Antes dos termômetros a infravermelho estarem disponíveis, medições de temperatura foliar foram realizadas com sensores de contato, ou incrustadas nas folhas (JACKSON et al., 1981). Apesar de vários autores terem sugerido a utilização de termopares para a determinação da temperatura foliar (EHLER, 1973; YANG et al., 1989; PEÑUELAS et al., 1992; KATSOUULAS et al., 2001), estes requerem um equilíbrio térmico com a superfície e íntimo contato com a mesma, afetando assim o balanço energético local e pequena área amostrada não representativa da variabilidade espacial (FUCHS, 1990; BAKER et al., 2000).

A termometria a infravermelho é uma alternativa atrativa, que evita estes problemas, por não entrar em contato com a superfície. Monteith e Szeicz (1962) e Tanner (1963) estão entre os primeiros a utilizarem a termometria a infravermelho para a medição da temperatura das plantas. Segundo Kirkhan (2004), as três principais vantagens dessa técnica são: a relativa facilidade de uso, a rapidez nas medições e o fato de não ser um método destrutivo. Finalmente, o método possibilita a integração da temperatura em uma área representativa da cultura, de acordo com o campo de visada do sensor (CVS).

Gardner et al. (1992) propõem alguns procedimentos a serem tomados para que os fatores que afetam a determinação da temperatura do dossel, utilizando o termômetro a infravermelho, sejam amenizados: i) a lente de um sensor a infravermelho é altamente sensível, devendo ser limpa periodicamente para se evitar que partículas de sujeira alterem a radiação captada; ii) a calibração regular e a escolha correta da emissividade do objeto; iii) o posicionamento do sensor em relação à superfície a ser medida é de

extrema importância, sendo que a distância e o ângulo de visada devem obedecer aos padrões do fabricante. Outro fator importante na acurácia das medições da radiação infravermelha emitida por um corpo é o vapor d'água. Segundo Pillar (1995), a radiação na faixa do infravermelho é largamente absorvida pelo vapor d'água, apesar da sua pequena concentração no ar atmosférico.

3.5.2. Transpiração vegetal

A água proveniente da chuva ou irrigação penetra no solo, sendo absorvida pelas plantas, por meio das raízes. Em seguida, é transportada pelo caule até atingir as folhas, onde ocorre a transferência para a atmosfera na forma de vapor. Esse processo ocorre em decorrência da existência de um potencial hídrico e de uma continuidade hidráulica entre o solo e as folhas. A água é transportada através dos vegetais por uma rede de vasos, constituindo o floema e o xilema. O floema distribui, a partir das folhas, uma solução concentrada e rica em substâncias nutritivas. O xilema assegura o transporte de uma solução diluída para as folhas, proveniente do sistema radicular. A transpiração vegetal permite que as células foliares recebam os elementos e substâncias dissolvidas na água procedente do solo (VERTUAN, 2003).

A eliminação de água pelos vegetais ocorre de duas formas: a gasosa (vapor de água) ou líquida. A predominante é a gasosa, por transpiração e do tipo estomática, ou seja, por intermédio dos estômatos (80 a 90% da perda de água por um vegetal). Caules, flores, frutos transpiram, mas a perda maior de água por transpiração se dá por meio das folhas (VERTUAN, 2003). Segundo Ritchie (1972), à medida que os cultivos vão se desenvolvendo, aumentando a área foliar e a cobertura, a transpiração começa a ser importante, até representar o principal componente da evapotranspiração, chegando a compreender de 90 a 95% desta, sendo mínimas as perdas por evaporação do solo.

De toda a água absorvida pelas raízes, somente uma pequena parte é retida pela planta nos processos fisiológicos e como parte das células, sendo transpirada a maior parte (TAIZ; ZEIGER, 2004). Sob estresse hídrico, uma das

primeiras respostas das variedades de cana-de-açúcar pode ser o fechamento estomático, a fim de minimizar a perda de água, reduzindo também a taxa de fotossíntese líquida (LARCHER, 2000; TAIZ; ZEIGER, 2004).

As plantas controlam a abertura estomática temporalmente, à noite quando não há fotossíntese, e, portanto não há demanda por CO₂ dentro da folha, a abertura estomática fica pequena. Nas manhãs ensolaradas, com suprimento de água adequado, a radiação solar incidente favorece a fotossíntese; a demanda de CO₂ dentro da folha é alta e, por isso, o poro estomático permanece aberto (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A taxa de transpiração é afetada não somente pelos estômatos, mas também pela profundidade efetiva do sistema radicular, tipo de vegetação, vento, temperatura e umidade do ar (ALVES, 1999). Pinto et al. (1976) comentam que a luz, o calor e a maior umidade propiciam a abertura dos estômatos das folhas e influenciam diretamente a transpiração, além das condições de umidade no solo. Em geral, a transpiração decresce com o aumento da tensão da umidade no solo (MOTA, 1987).

A transpiração tem, além disso, um papel muito importante no balanço energético da planta, já que a evaporação é um processo refrigerante muito eficaz. Para evaporar 1 kg de água a 30°C, é necessário 580 kcal, e essa energia requerida se chama calor latente de vaporização (SALISBURGY; ROSS, 1994).

3.5.3. Índice de estresse hídrico da cultura

Para se compreender melhor os efeitos do estresse hídrico, faz-se necessária uma investigação no mecanismo fisiológico da planta que é a base da resposta a essa condição (CARVALHO, 2009). A temperatura do dossel de plantas atua como um bom indicador do *status* hídrico da planta (WANG et al., 2010). O *status* hídrico da planta é um fator chave de grande impacto no crescimento e no manejo de água. O estresse hídrico pode alterar a temperatura do dossel, o balanço de energia, a transpiração, a fotossíntese, o uso eficiente de água e o rendimento da cultura (LI et al., 2010).

A temperatura do dossel é uma função da temperatura do ar, intensidade de radiação, do conteúdo de água da folha, velocidade do ar,

assim como dimensões e ângulo de orientação da folha em relação à radiação incidente (ANSARI; LOOMIS, 1959). Esse fator depende, ainda, da troca de calor sensível e do gradiente de pressão do vapor (EHLER, 1973), além da posição da folha sobre a planta (WAGGONER; SHAW, 1952), pelo nível de umidade no solo que, associada à luminosidade, permite maior ou menor abertura dos estômatos. Também regula o fluxo transpiratório e a absorção de CO₂, tendo como consequência o resfriamento ou o aquecimento das plantas (NÓBREGA et al., 1999).

Clark e Hiler (1973) observaram que a resistência estomatal aumenta com o desenvolvimento do estresse de água, tendo como consequência o aumento da temperatura foliar. Eles concluíram que o estado da água na planta representa uma integração da demanda atmosférica, potencial de água no solo, densidade e distribuição da raiz e outras características. Portanto, para se ter uma verdadeira medida do déficit de água na planta, essas medidas poderiam ser feitas na folha em vez de serem realizadas no solo ou na atmosfera.

Segundo González-Dugo et al. (2006), um manejo de irrigação baseado na medição do conteúdo de água no solo ou a estimativa de ET por parâmetros meteorológicos pode consumir muito tempo ou depender de equipamentos caros. Assim, o manejo baseado no *status* hídrico da cultura pode ser mais vantajoso desde que ela responda a ambos, ao solo e à atmosfera.

Um cultivo com boa dotação de água transpira a sua taxa potencial e gera um resfriamento efetivo das plantas, permitindo assim que o dossel se mantenha mais frio que o ambiente (TANNER, 1963). Quando a água se torna limitante, a energia na folha é acumulada e somente a emissão de radiação térmica e convectiva pode dissipá-la. Então, a temperatura da folha se aproximará da temperatura do ar e, muitas vezes, superará esta, sob severas condições de estresse hídrico (KEENER; KIRCHER, 1983) por causa da radiação absorvida (JACKSON, 1982).

A manifestação dos fatores ambientais como a pressão do vapor d'água, o saldo de radiação e a velocidade do ar, na temperatura do dossel vegetativo, e o advento do TIV culminam na criação de vários índices de estresse. Os mais conhecidos são: i) Jackson et al. (1977) e Idso et al., (1977)

criaram o índice graus dia de estresse (SDD) como a diferença entre as temperaturas do dossel e do ar; ii) Gardner et al. (1981) denominaram estresse diário de temperatura (TSD) a diferença entre as temperaturas do dossel de parcelas estressada e não estressada; iii) Clawson e Blad (1982) definiram a variabilidade da temperatura do dossel (CTV) como a diferença entre as temperaturas máxima e mínima, observadas numa mesma parcela.

Uma vez que o SDD pode ser influenciado por fatores como pressão de vapor do ar, radiação líquida e velocidade do ar, Idso et al. (1982) desenvolveram o índice de estresse hídrico da cultura (IEHC_e) em uma abordagem empírica, que essencialmente normaliza os valores de SDD. Baseia-se na constatação de que a temperatura do dossel menos a temperatura do ar ($t_c - t_{ar}$) é uma função linear do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), enquanto as plantas estão bem supridas com água (EHLER, 1973). A abordagem empírica (IEHC_e), proposta por IDSO et al. (1981), é mais utilizada porque requer somente três variáveis para ser aplicada (DPV_{ar}, t_{ar} e t_c). Já a abordagem teórica (IEHC_t), proposta por Jackson et al. (1981), baseada no balanço de energia, requer o saldo de radiação, a velocidade do ar e as resistências do dossel e aerodinâmica, que nem sempre estão disponíveis (LEBOURGEOIS et al., 2010).

O IEHC_e baseia-se na correlação entre a diferença " $t_c - t_{ar}$ " e o DPV_{ar} que produz relações lineares específicas, independentemente de outros elementos ambientais, exceto a cobertura de nuvens, que modifica o balanço de energia (Idso et al., 1981). Também, segundo Idson et al. (1981), avaliando várias culturas, comprovou-se que a relação " $t_c - t_{ar}$ " e DPV_{ar}, para culturas bem molhadas e sob condições de céu claro, foi linear, como sugerido anteriormente por Erhler (1973). Normalmente, essas medições eram conduzidas entre 12h e 13h, quando a radiação solar incidente alcançava o seu valor máximo. Nestes casos, assumia-se que as plantas estavam transpirando em condições plenas, ou seja, sem estresse hídrico, quando a diferença " $t_c - t_{ar}$ " era negativa. Em contraste, presumia-se que havia a necessidade de irrigação quando esta diferença fosse positiva, pois o resfriamento foliar evaporativo estava sendo suprimido (IDSO, 1982). De acordo com o autor, esta diferença foi insuficiente para assegurar um controle adequado da irrigação, pois não

somente a disponibilidade hídrica, mas também as variáveis meteorológicas afetavam o diferencial de temperatura " $t_c - t_{ar}$ ".

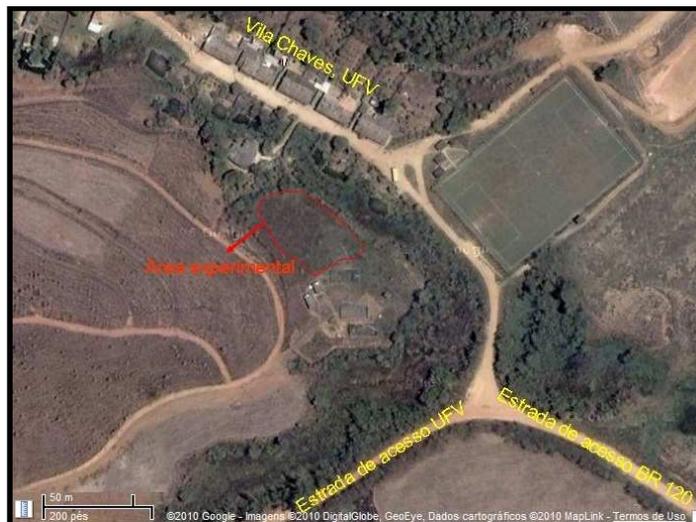
Assim, Idso et al. (1981) utilizaram uma linha obtida pela regressão linear, nestes dados, como um limite inferior e um limite superior (linhas base) que assume com segurança a não transpiração da cultura, para definir um $IEHC_e$. Em decorrência de diferenças de transpiração entre as plantas, foram determinados os valores dos parâmetros específicos para cada espécie. Embora a presença de nuvens tenha modificado o intercepto e a inclinação da linha-base inferior de temperatura, a relação linear foi preservada. Esta relação, entretanto, muda com o conteúdo de água no solo (EHLER, 1973; JACKSON, 1977; IDSO, 1981; GONTIA; TIWARI, 2008) e com as variáveis meteorológicas (ZOLNIER et al., 2001; PAYERO et al., 2005).

Gardner et al. (1992), além de associarem problemas relacionados ao cálculo de $IEHC$ aos instrumentos de medição, cooptaram também fatores ambientais e da planta. O vento e a radiação solar podem afetar o cálculo do $IEHC_e$, apesar de não serem considerados no cálculo. Se estes se mantêm estáveis durante o período de medição de $IEHC_e$, a determinação das linhas-base é confiável. A diferença de aquecimento entre folhas sombreadas e expostas à radiação solar também gera uma variação dentro do mesmo ou entre cultivos (NIELSEN et al., 1984). As linhas-base podem ainda ser alteradas consideravelmente durante os estágios de crescimento da planta, devido a mudanças na arquitetura e no aparecimento de estruturas que modificam a temperatura do dossel, principalmente do crescimento vegetativo para o reprodutivo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização da área experimental cultivada com a cana-de-açúcar

O estudo foi realizado no campo experimental Vila Chaves, setor de Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizado no município de Viçosa-MG. As coordenadas geográficas do local são: latitude 20°45'45" S, longitude 42°52'04" W e altitude de 690 m.



Fonte: <http://maps.google.com.br>.

Figura 3 - Localização da área no campo experimental Vila Chaves.

4.2. Clima local

O clima local é do tipo Cwa, caracterizado como temperado quente mesotérmico, de acordo com a classificação de Köppen. O índice pluviométrico médio anual é de 1221,4 mm, a temperatura média anual é 19,4°C e as temperaturas médias anuais, máxima e mínima são 26,4° e 14,8°C, respectivamente (ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS - ALMG, 2010). Apresenta duas estações bem definidas, sendo uma seca (junho, julho, agosto) e outra chuvosa (dezembro, janeiro, fevereiro). Nos meses de inverno ocorrem poucas chuvas, com valores próximos a 10 mm e ainda poucas com intensidades maiores que 1 mm (SANTOS et al., 2000).

4.3. Classificação e caracterização físico-química do solo

O solo da área experimental apresenta classificação do tipo Podzólico (Argissolo) Amarelo-vermelho Câmbico, fase terraço, com topografia plana (COSTA, 1973). A análise físico-química indicou textura argilosa e fertilidade média. Nas Tabelas 2 e 3 são demonstradas algumas características físicas e químicas do solo em questão.

Tabela 2 - Análise física do solo

Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Textura do solo*
14,00	5,50	25,75	54,75	Argilosa

* Análise realizada no Laboratório do Departamento de Solos da UFV.

Tabela 3 - Análise química do solo

Características químicas	Unidades	Resultados*	Interpretação**
pH em água (1:2,5)	-	5,40	Acidez média
Fósforo disponível (P)	mgdm ⁻³	1,80	Muito baixo
Potássio disponível (K)	mgdm ⁻³	170,00	Muito bom
Cálcio trocável (Ca ²⁺)	cmol _c dm ⁻³	2,00	Médio
Magnésio trocável (Mg ²⁺)	cmol _c dm ⁻³	0,80	Médio
Acidez trocável (Al ³⁺)	cmol _c dm ⁻³	0,20	Muito Baixo
Acidez potencial (H+Al)	cmol _c dm ⁻³	3,63	Médio
Soma de bases (SB)	cmol _c dm ⁻³	3,23	Bom
CTC efetiva (t)	cmol _c dm ⁻³	3,43	Baixo
CTC a pH 7 (T)	cmol _c dm ⁻³	6,86	Médio
Saturação por alumínio (m)	%	47,00	Médio
Saturação por bases (V)	%	6,00	Muito Baixo
Materia orgânica (M.O.)	dagkg ⁻¹	2,00	Baixo

* Análise realizada pelo Laboratório de Análise de Solo de Viçosa Ltda, para amostragem da camada de 0-20 cm.

** Interpretação segundo as recomendações para estado de Minas Gerais, 5ª aproximação (RIBEIRO et al., 1999).

Para determinação da curva característica de retenção de água e da densidade aparente do solo em questão, foram enviadas amostras deformadas e indeformadas, respectivamente, para o Laboratório de Física do Solo, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. A obtenção de pontos para a determinação da curva foi realizada em câmaras de pressão de Richards com as seguintes tensões matriciais aplicadas: 5, 10, 30, 50, 80, 150, 300, 500, 800 e 1500 kPa.

Foram coletadas aleatoriamente amostras de solo em três pontos dentro da área, na camada de 0-30 cm de profundidade, constituindo uma amostra composta deformada. As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um trado tipo Uhland, também em três pontos aleatórios. Com os valores obtidos de umidades e suas respectivas tensões aplicadas, procedeu-se aos devidos ajustes, conforme o modelo proposto por Van Genuchten (1980), equação 4. Sendo assim, utilizando-se um programa computacional, foi possível obter o modelo ajustado e o coeficiente de determinação (r^2_{aj}). A equação 3 foi obtida pela combinação das equações 2 e 4:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot |\Psi_m|^n)} \right] \quad (3)$$

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \cdot |\Psi_m|^n) \right]^m} \quad (4)$$

em que Θ é teor de umidade normalizada, adimensional; $\theta(\Psi_m)$, umidade no solo em função do potencial matricial, % em massa; θ_s , umidade de saturação, % em massa; θ_r , umidade residual, % em massa; Ψ_m , tensão ou potencial matricial aplicado, kPa; α , n e m , parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten. A equação 4 com $m=1$ tem sido utilizada em muitos estudos para descrever a relação da retenção de água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980).

4.4. Variedade utilizada e período experimental

A variedade utilizada neste trabalho foi a RB867515, *Saccharum spp.*, que se destaca pela sua relativa tolerância à seca, ao alto teor de sacarose, e ao crescimento rápido com alta produtividade (BARBOSA et al., 2001). Esta variedade possui um ciclo médio de 12 meses, sendo dois meses de maturação e um mês de emergência dos perfilhos (TEIXEIRA, 2009). A RB867515 é a mais difundida no Brasil tanto para a produção de açúcar e álcool quanto de forragem (BARBOSA; SILVEIRA, 2010). As mudas provieram de um cultivo de cana-planta com cerca de um ano de idade.

A área experimental com aproximadamente 1.000 m² teve o solo preparado de forma convencional por aração pesada, gradagem e sulcamento a 25 cm e espaçamento de 1,4 m, recebendo posteriormente 1,64 t ha⁻¹ de calcário a lanço de forma manual.

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em 08 de outubro de 2010. Adotou-se o sistema de plantio manual em que os colmos inteiros (mudas) foram lançados no sulco permitindo a interseção de pé e ponta; a secção das

mudas gerou seis toletes com três gemas cada totalizando 18 gemas por metro de linha.

A adubação e a calagem foram feitas com base na análise de solo, seguindo as recomendações de Korndörfer et al. (1999) e Alvarez V. et al. (1999), respectivamente. Foram aplicados 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 no sulco de plantio como adubação de base e 60 kg ha^{-1} de N como adubação de cobertura 70 dias após o plantio (DAP). Os tratos culturais concedidos à cana-planta foram duas capinas manuais realizadas 47 e 103 dias após o plantio, não sendo aplicado nenhum tipo de defensivo agrícola.

O período experimental foi compreendido entre os meses de fevereiro de 2011 a junho de 2011, totalizando 115 dias, no estágio de crescimento. A brotação ocorreu 30 DAP. A cana-de-açúcar não recebeu nenhum tipo de irrigação, nem mesmo de forma suplementar.

4.5. Avaliações biométricas

O período de amostragem das variáveis biométricas e de biomassa teve início a partir dos 139 dias após o plantio (DAP), semana posterior a instalação do sistema de aquisição de dados do ambiente e da temperatura do dossel vegetativo. Assim, estas amostragens se restringem ao período experimental em que houve a necessidade de ter-se um dossel parcialmente fechado para desenvolvimento da metodologia aplicada ao índice de estresse hídrico da cultura (IEHC_e). Como proposto por Doorembos e Kassam (1979), a cana-de-açúcar terá uma área sombreada de 100% cerca de 140 DAP. Lebourgeois et al. (2010) iniciaram seu experimento com a cana-soca a partir de 220 dias após o corte utilizando a mesma metodologia para o IEHC_e, para um solo argiloso sob clima tropical na Ilha de Reunião.

4.5.1. Avaliações biométricas em campo

As avaliações biométricas em campo foram realizadas, em média, em intervalos de 7 dias, a partir dos 139 até os 245 dias após o plantio. Estas avaliações foram compostas das seguintes contagens e medições: número de perfilhos industrializáveis (NPI), número de folhas verdes completamente

abertas (NFV), número de folhas emergentes (NFE), número de folhas mortas (NFM) e altura média do colmo (AMC). Para a contagem do NPI, foram demarcados cinco metros na linha de plantio em três repetições (R1, R2 e R3) próximas aos sensores de potencial de água no solo. As contagens de NFV, NFE e NFM, além das medições do DMC e AMC, foram realizadas nas mesmas 15 plantas (cinco plantas dentro de cada repetição da demarcação dos cinco metros lineares, denominadas: P1, P2, P3, P4 e P5) que representavam a área de cultivo (conforme a Figura 4).

O NPI foi determinado através da contagem dos perfilhos potencialmente industrializáveis ao longo dos cinco metros na linha de plantio. O NFV e NFM foram obtidos partindo-se do princípio que folhas verdes eram aquelas com pelo menos 50% de área foliar verde. O NFE foi contabilizado considerando-se as folhas anteriores às folhas +1 (primeira folha totalmente desenvolvida inserida no “dewlap” ou barbela visível) que não se apresentavam completamente abertas.

A AMC foi obtida medindo-se do nível do solo até o primeiro *dewlap* visível com o auxílio de uma fita métrica. O DMC foi mensurado com o auxílio de um paquímetro, no terceiro internódio da base e em sua porção mediana.

4.5.2. Avaliações biométricas em laboratório

As avaliações biométricas em laboratório foram realizadas, em média, em intervalos de 15 dias, a partir dos 140 até os 245 dias após o plantio. Foram amostradas cinco plantas representativas de forma aleatória dentro da área de cultivo. Estas avaliações foram compostas das seguintes medições: largura (LF_n) e comprimento (CF_n) das n folhas verdes totalmente abertas, área foliar (AF_n) de cada n folha verde, área foliar acumulada das folhas emergentes (AFE).

Para as medições da LF_n e do CF_n , realizou-se a identificação foliar de cada planta por meio da numeração crescente da folha -3 até a folha +10, conforme o “sistema de Kuijper” descrito por Bacchi (1983). LF_n e CF_n foram mensurados com auxílio de uma fita métrica, e a medição LF_n foi realizada na maior dimensão. A AF_n e a AFE foram, adicionalmente, medidas com o

integrador de área foliar LI-3100 (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). Para a estimativa da AF_n , utilizou-se a equação proposta por Francis et al.(1969):

$$AF = \sum_{i=3}^n CF_n \times LF_n \times f \quad (5)$$

em que AF , cm^2 ; LF_n , cm ; CF_n , cm e f é o fator de forma, adimensional.

O fator de forma, citado na equação 5, foi obtido como o valor do parâmetro de inclinação da reta, encontrado a partir da regressão linear entre a área foliar medida, com auxílio da fita métrica, e a área medida pelo integrador de área foliar LI-3100. A área foliar de cada avaliação foi obtida através da média de cinco plantas amostradas.

A partir dos resultados de AF , foi determinado o índice de área foliar (IAF , $m^2 m^{-2}$):

$$IAF = \frac{AF_m}{NPI/E} \quad (6)$$

em que AF_m , área foliar média das cinco plantas amostradas, cm^2 ; NPI ; E , espaçamento entre linhas de cultivo, m .

Para descrever o comportamento das avaliações biométricas ao longo do período foi utilizado um programa computacional que permitiu ajustar, a partir do teste “F”, os parâmetros avaliados das equações utilizadas.

4.6. Graus-dia acumulados

Utilizando-se os dados médios diários de temperatura máxima e mínima, calcularam-se os valores de graus-dia, pelas seguintes equações (INMAN-BAMBER, 1994):

$$GD = \left(\frac{TM - Tm}{2} \right) - Tb \quad Tm > Tb \quad (7)$$

$$GD = \frac{(TM - Tb)^2}{2(TM - Tm)} \quad Tm \leq Tb \quad (8)$$

em que GD, graus-dia, °C dia⁻¹; TM, temperatura máxima diária do ar, °C; Tm, temperatura mínima diária do ar, °C; Tb, temperatura base, °C.

Para a estimativa de graus-dia acumulados (somatório dos GD) (GDA, °C dia), foi considerada como temperatura base da cultura 10°C para a parte área total da planta e 16°C para os colmos, como sugerido por Smith e Singels (2005) e Sinclair et al. (2004). Os valores de TM e Tm foram obtidos por meio da Estação Meteorológica Automática, código A510, pertencente ao INMET, localizada na Universidade Federal de Viçosa com coordenadas geográficas de latitude 20°25'S, longitude 42°52'W e altitude de 712 m, distando 2,4 km da área experimental. Os dados pluviométricos utilizados neste trabalho provieram dessa mesma estação.

4.7. Medição das variáveis meteorológicas e sistema de aquisição de dados

A medição das variáveis meteorológicas foi realizada dentro da área experimental, onde foi instalado um mastro galvanizado com 7,5 cm de diâmetro e 5 m de altura a partir do nível do solo e posicionamento espacial (Figura 4). No referido mastro, instalou-se três perfis de aço em formato “U” com 1,5 m de comprimento e 7,5 cm de largura, soldados a uma braçadeira em aço, à altura de 4,5 m. Os perfis foram posicionados com a face “U” voltada para o solo, facilitando a fixação e a passagem protegida dos cabos de conexão dos sensores eletrônicos e dos mesmos na face superior.

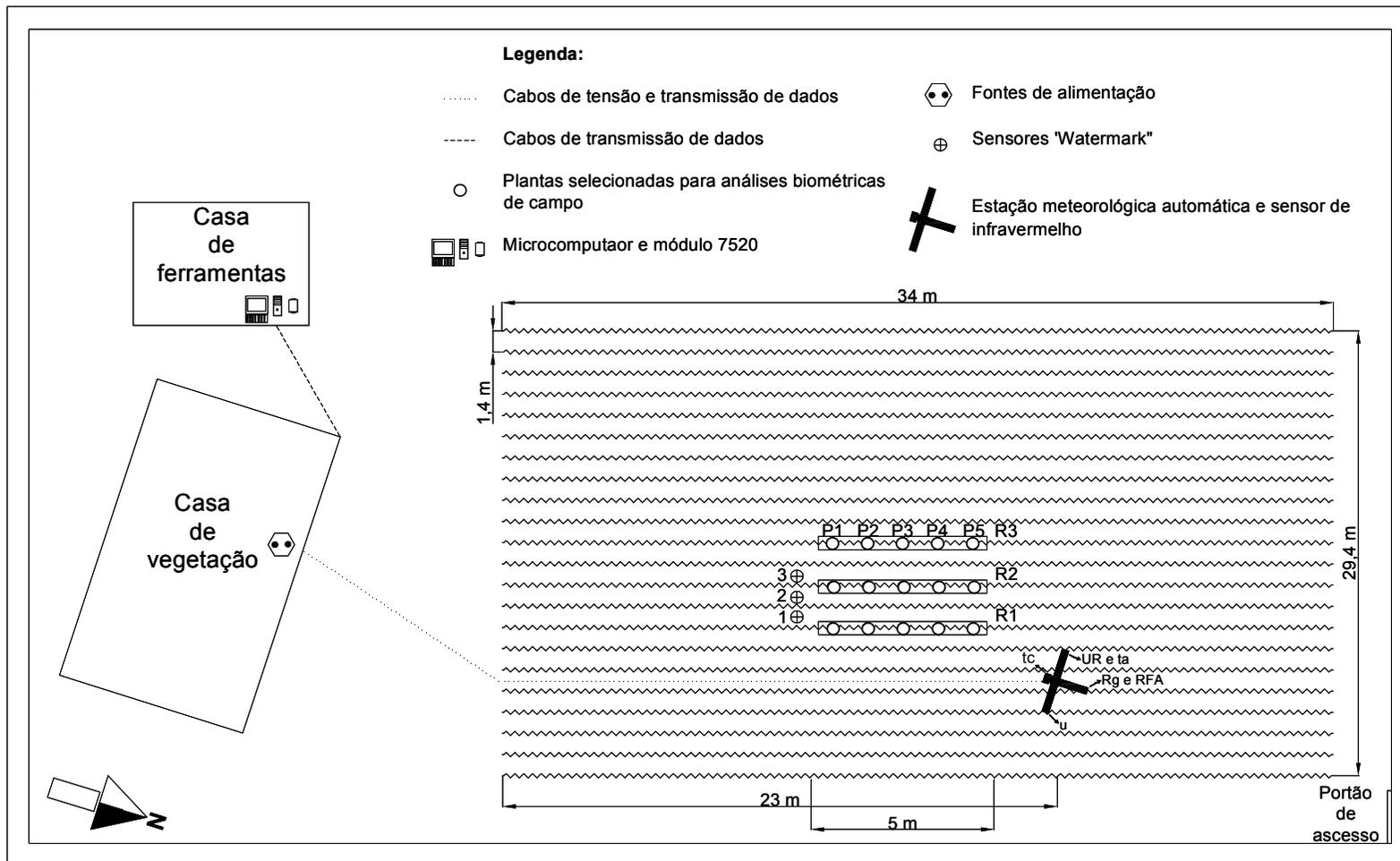


Figura 4 - Croqui da área experimental com a distribuição espacial da estação meteorológica automática, plantas selecionadas para as análises biométricas e sensores de potencial hídrico no solo (sem escala).

Os sensores eletrônicos utilizados na medição das variáveis meteorológicas foram: sensor de radiação solar global (R_g , piranômetro, modelo LI-200SA, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA), com exatidão típica de $\pm 3\%$ e resolução de $0,2 \text{ kW m}^{-2} \text{ m V}^{-1}$, sensor de radiação fotossinteticamente ativa (RFA, sensor quântico, modelo LI-190SA, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA), com exatidão típica de $\pm 2\%$ e resolução de $5 \text{ } \mu\text{A por } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar (t_{ar} e UR_{ar} , termo-higrômetro, modelo HMP60, Vaisala, Woburn, MA, USA), com exatidão de $\pm 3\%$ UR_{ar} de (0 a 40°C e 0 a 90%) e de $\pm 0,6^\circ\text{C}$ t_{ar} (40 a 60°C) e resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e 1%, e sensor de velocidade do ar (u , anemômetro, modelo 1453 S2 N, Lambrecht, Logan, Göttingen, DEU), com exatidão de 2% de e resolução de $0,1 \text{ m s}^{-1}$, conforme a Figura 5.

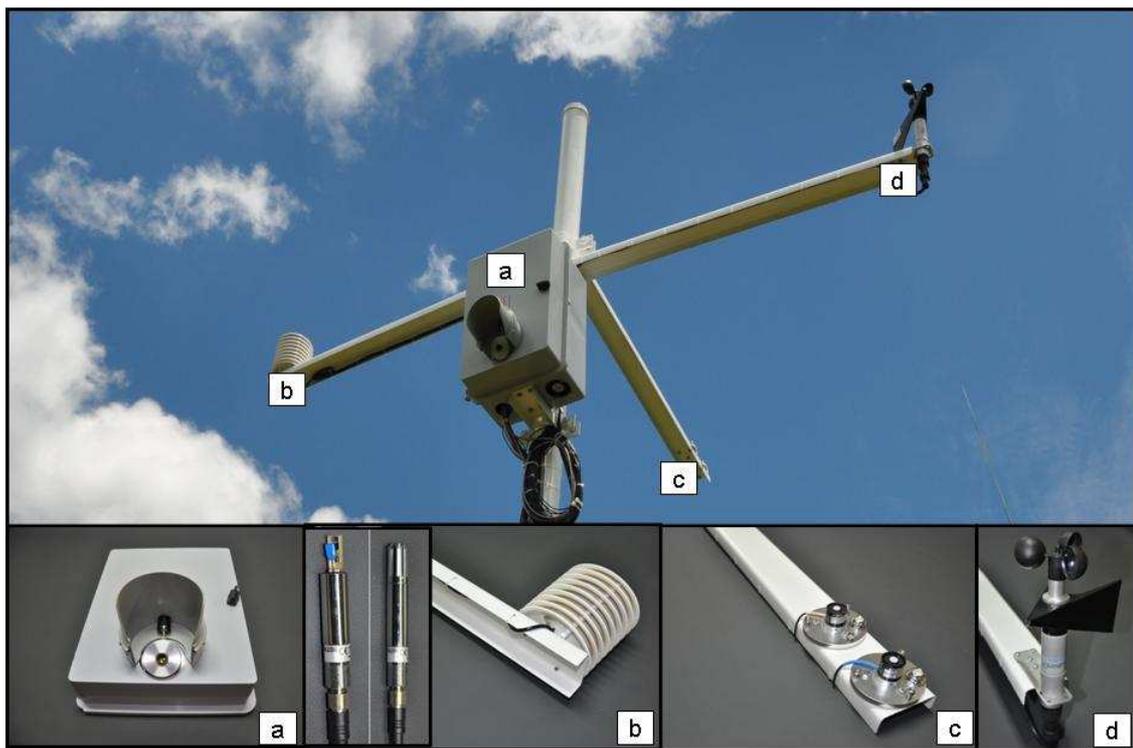


Figura 5 - Mastro instrumental, posicionamento dos sensores eletrônicos e detalhes dos sensores eletrônicos: a) sensor de temperatura a infravermelho, b) termo-higrômetro, c) piranômetro e sensor quântico e d) anemômetro.

O sensor de radiação solar global e o de radiação fotossinteticamente ativa foram instalados em um mesmo perfil na direção norte. O sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar foi instalado em um único perfil na direção leste e no interior de um micro abrigo de multiplacas, a fim de impedir a incidência direta da radiação solar e da precipitação sobre os elementos sensíveis do sensor e, ao mesmo tempo, garantindo um fluxo de ar adequado. O sensor de velocidade do ar foi instalado longitudinalmente ao sensor de conjugado de temperatura e umidade relativa do ar em um perfil único na direção leste-oeste.

O sistema de aquisição de dados foi composto de dois módulos analógicos (modelo LR-7018, LR COM) de interface RS-485 e um módulo conversor bidirecional optoisolado (modelo LR-7520, LR COM), que permite a conversão da interface RS485 a dois fios para RS-232, e através de um conector DB-9 pôde ser conectado a porta serial do microcomputador, utilizando a porta serial COM1.

Devido à magnitude de sinais, os sensores de R_g e RFA foram conectados a um mesmo módulo analógico configurado no tipo de entrada como: código 01, sinais entre +/- 50 mV. Já os sensores de t_{ar} , UR_{ar} e u foram conectados em outro módulo configurado no tipo de entrada como: código 05, sinais entre +/- 2,5 V.

Para o processo de aquisição e armazenagem de dados no microcomputador, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C++. O programa foi denominado "Sistema de Aquisição de Dados", com as funções principais de gerenciar os módulos analógicos e realizar a conversão dos sinais dos sensores em sinais digitais no formato binário. Os dados meteorológicos foram armazenados no disco rígido do microcomputador através do Sistema de Aquisição de Dados em intervalos de um minuto. O déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) foi calculado utilizando dados do sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar, dentro da rotina do programa computacional, armazenado no mesmo intervalo.

Os módulos analógicos foram fixados em uma placa de montagem, contida em um gabinete multifuncional de polipropileno (série G código 2918,

Tableplast S.R.L., Lomas del Mirador, BA, ARG), que por sua vez foram fixados ao mastro à uma altura de 4 m, conforme Figura 6.

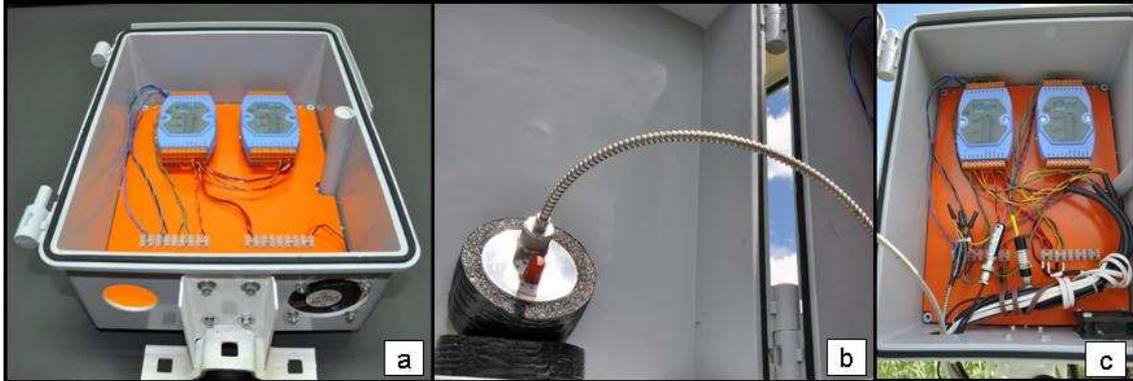


Figura 6 - Detalhe do interior do gabinete multifuncional de polipropileno: a) módulos seriais fixados; b) fixação interior do sensor de temperatura a infravermelho; e c) interior do gabinete após as conexões de cabos de transmissão de dados e alimentação dos sensores.

Para a transmissão de dados das variáveis meteorológicas dos módulos analógicos para o microcomputador, além da alimentação do sistema, foi necessária a passagem de três pares de condutores do tipo cordão paralelo em tubos e conexões em PVC colocados a uma profundidade de 50 cm, conforme a Figura 7.

Apesar do monitoramento da RFA ao longo de todo período experimental, esta variável meteorológica não foi utilizada neste trabalho.

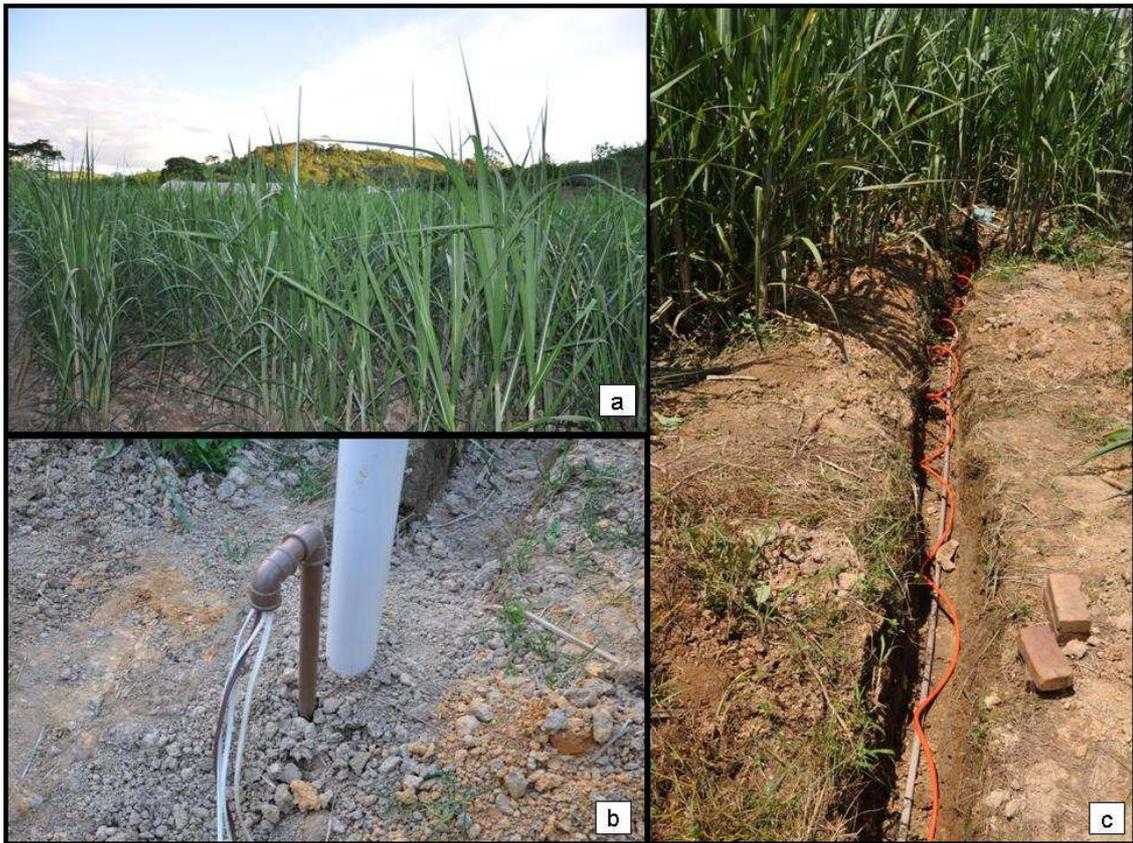


Figura 7 - a) Mastro instrumental instalado em meio ao cultivo da cana-de-açúcar; b) tubo de saída dos cabos para conexão da transmissão de dados e alimentação elétrica; e c) vala perfurada para a passagem dos tubos de PVC.

4.8. Medição da temperatura do dossel vegetativo e aquisição dos dados

Para obtenção dos dados de temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar, utilizou-se um sensor de temperatura a infravermelho (t_c , modelo 4000.4GL, Everest Interscience, Tucson, AZ, USA). Este foi instalado em um orifício perfurado na tampa do gabinete multifuncional e envolto por uma espuma elastomérica que permitiu uma fixação adequada e evitou, ainda, a entrada de água no gabinete. A fim de impedir a incidência direta da radiação solar e a precipitação sobre o sensor, instalou-se externamente à tampa do gabinete uma proteção em PVC, conforme Figuras 5 e 6.

O sensor de temperatura a infravermelho apresentava um campo de visada de 15° e estava equipado com um filtro espectral na faixa de 8 a 14 μm , apresentando exatidão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ e resolução de $0,1^\circ\text{C}$. O centro de visada do sensor de temperatura a infravermelho foi posicionado a uma altura de 4 m e inclinação de 45° em relação ao plano horizontal com orientação na direção sul. Essa obliquidade do sensor em relação ao solo é importante para que o campo de visada se concentre no dossel vegetativo da cana-de-açúcar (LEBOURGEOIS et al., 2010). A emissividade selecionada para o dossel vegetativo da cultura foi igual a 0,98.

A aquisição dos dados de temperatura do dossel vegetativo foi realizada utilizando o programa “Sistema de Aquisição de Dados” dentro do mesmo processo de aquisição e armazenagem de dados meteorológicos do ambiente.

4.9. Monitoramento do potencial de água no solo

4.9.1. Sensor e medidor digital Watermark™

Para monitoramento do comportamento do potencial de água no solo na área experimental, foram instalados três sensores Watermark™ (Ψ , modelo 200-SS, Irrrometer Company, Riverside, CA) a uma profundidade de 30 cm, e realizada diariamente a leitura utilizando-se um medidor digital Watermark™ (Irrrometer Company, Riverside, CA), conforme Figura 8.



Figura 8 - Sensor e medidor digital Watermark™ a e b, respectivamente.

Este sensor baseia-se no método indireto para determinação instantânea da umidade no solo, através da medida de resistência à passagem de corrente elétrica do solo. Segundo Chard (2005), o sensor Watermark™ consiste em dois eletrodos concêntricos, inseridos em uma matriz de material especial, envolta por uma chapa de aço inoxidável. O material da matriz foi selecionado para refletir ao máximo a mudança da resistência elétrica dentro da faixa correspondente à decrescimento das culturas agrícolas. Quando em operação, esta matriz está, constantemente, absorvendo ou perdendo água para o solo. À medida que o solo seca, a tensão do sensor é reduzida e a resistência elétrica entre os dois eletrodos aumenta. A saída dos sensores varia de 0,5 a 30 k Ω , equivalendo à variação de 0 a 200 kPa de tensão no solo, sendo essa relação não linear. A conversão de resistência elétrica entre os dois eletrodos em tensão no solo foi realizada utilizando o medidor digital Watermark™.

4.10. Índice de estresse hídrico da cultura (IEHC)

A energia disponível para a ocorrência do processo de transpiração é proveniente da teoria do balanço de energia à superfície da vegetação (JACKSON et al., 1981), dada pela relação:

$$R_n = G + H + LE \quad (9)$$

em que R_n é saldo de radiação, $W m^{-2}$; G , fluxo de calor no solo, $W m^{-2}$; H fluxo de calor sensível do dossel para o ar, $W m^{-2}$; LE , fluxo de calor latente para o ar, $W m^{-2}$, sendo L o calor latente de evaporação, que para a água a $20^\circ C$ é igual a $2,453 MJ kg^{-1}$.

Em uma área com plantas em estágio de crescimento e desenvolvimento avançado, o fluxo de calor no solo (G) pode ser considerado desprezível, em função da pouca radiação incidente na superfície do solo, esta que é provocada pelo sombreamento ocasionado pela cobertura foliar. Assim, a equação 9 resume-se em:

$$R_n = H + LE \quad (10)$$

Dessa forma, H e LE (equação de Penman-Monteith descrita por Monteith (1965)) podem ser expressos como:

$$H = \frac{\rho_{ar} c_p (t_{ar} - t_c)}{r_h} \quad (11)$$

$$LE = \frac{\Delta (R_n) + \rho_{ar} c_p DPV_{ar} / r_h}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_h)} \quad (12)$$

em que ρ_{ar} é densidade do ar, $kg m^{-3}$; c_p , calor específico do ar, $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$; t_{ar} , temperatura do ar, $^\circ C$; t_c , temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar, $^\circ C$; r_h , resistência à transferência de calor sensível por convecção, $s m^{-1}$; Δ , declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água do ar, $Pa ^\circ C^{-1}$; DPV_{ar} é o déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar, Pa ; γ é a

constante psicrométrica, Pa °C⁻¹; r_c é a resistência de superfície à transferência de calor latente, s m⁻¹.

A quantidade de moléculas de vapor d'água que o ar pode manter em suspensão depende da temperatura; quanto mais alta, maior é a capacidade de se armazenar vapor de água e mais alta é a pressão de saturação de vapor (e_s). O déficit de pressão de vapor (DPV_{ar}), basicamente, é a diferença entre a quantidade de umidade no ar e o quanto de umidade este ar pode armazenar quando está saturado. Se o conteúdo de umidade no ar é mantido constante, altas temperaturas diminuem a umidade relativa e aumentam o DPV_{ar} (ZOLNIER, 1999). O DPV_{ar} foi calculado com base na equação proposta por Allen et al. (1998).

Substituindo as equações 11 e 12 em 10 e isolando a diferença " $t_c - t_a$ ", encontra-se:

$$t_c - t_{ar} = \frac{Rn (r_h + r_c)}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} - \frac{DPV_{ar}}{\gamma (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (13)$$

A equação 13 relaciona a diferença entre as temperaturas do dossel e do ar com o saldo de radiação, as resistências aerodinâmicas da cultura e o déficit de pressão de vapor d'água do ar (JACKSON et al., 1981).

Assim, o IEHC pode ser obtido para a cana-de-açúcar, assumindo a normalização do domínio do diferencial de temperatura " $t_c - t_{ar}$ ", a partir das linhas bases de temperatura inferior e superior, que admitem resistências de superfície à transferência de calor latente aproximadamente nula ($r_c \cong 0$) e infinita ($r_c \cong \infty$), respectivamente. Estes limites representados, nesta ordem, por $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ e $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ são determinados pela relação linear entre " $t_c - t_{ar}$ " e o DPV_{ar} , sendo o primeiro, denominado linha-base de temperatura na ausência de estresse hídrico, estabelecido em condições de solo em capacidade de campo, e o segundo em condições de estresse hídrico severo (JACKSON et al., 1981).

A partir destas condições de cultivo, o limite $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ pode ser representado pela equação (PEÑUELAS et al., 1992):

$$(t_c - t_{ar})_{LBI} = \frac{Rn r_h}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma)} - \frac{DPV_{ar}}{\gamma (1 + \Delta/\gamma)} \quad (14)$$

Para o limite $(t_c - t_{ar})_{LBS}$, é utilizada a expressão (JACKSON et al., 1981):

$$(t_c - t_{ar})_{LBS} = \frac{Rn r_h}{\rho_{ar} c_p} \quad (15)$$

A partir das considerações propostas por Jackson et al. (1981), o IEHC será determinado pela expressão:

$$IEHC = \frac{(t_c - t_{ar}) - (t_c - t_{ar})_{LBI}}{(t_c - t_{ar})_{LBS} - (t_c - t_{ar})_{LBI}} \quad (16)$$

De acordo com Jackson et al. (1981), substituindo as equações do fluxo de calor sensível e latente na equação do balanço de energia, o diferencial de temperatura entre a cultura (t_c) e o ar do ambiente de cultivo (t_{ar}) será obtido como:

$$t_c - t_{ar} = \frac{Rn (r_h + r_c)}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} - \frac{DPV_{ar}}{\gamma (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (17)$$

Assim, assumindo que Rn , r_c e r_h são praticamente constantes em condições meteorológicas específicas, geralmente observadas próximas ao meio-dia, Idso et al. (1981) argumentaram que, com uma pequena variação da u e da Rg , o diferencial de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” para plantas mantidas sem estresse hídrico é dependente da espécie vegetal e será estimado a partir de dados do DPV_{ar} . Dadas essas pressuposições, a equação 17 será assim simplificada:

$$(t_c - t_{ar}) = a - b DPV_{ar} \quad (18)$$

em que

$$a = \frac{Rn (r_h + r_c)}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (19)$$

$$b = \frac{1}{\gamma (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (20)$$

A linha-base em condições de ausência de estresse hídrico fornece um limite inferior definido para uma cultura específica em vez de um limite inferior teórico. Baseado no limite inferior definido pela cultura, a faixa de estresse hídrico pode ser vista na Figura 9.

Neste caso, o domínio do diferencial de temperatura “ t_c-t_{ar} ” é menos abrangente, mas compreende os valores realmente observados experimentalmente. O limite superior experimental representa o estresse hídrico máximo tolerado pela cultura, sendo definido quando os estômatos estariam completamente fechados (TRENTIN, 2010). A posição da linha de estresse hídrico máximo pode ser determinada experimentalmente quando a umidade no solo está próxima do ponto de murcha permanente. Assim, segundo os limites experimentais da Figura 9, o IEHC_e estará compreendido entre 0 (estresse nulo) e 1 (estresse máximo).

4.11. Estimativa do diferencial “ t_c-t_{ar} ” a partir dos dados de R_g e DPV_{ar}

Para a linha-base inferior na ausência de estresse com base no princípio proposto por Idso et al. (1981), necessita-se obter empiricamente os parâmetros da equação 18. A introdução da variável independente R_g na equação clássica segundo Idso et al. (1981) foi proposta por Zolnier et al. (2001), para obter a linha-base inferior na ausência de estresse hídrico para a cultura da poinsetia (*Euphorbia pulcherrima*) em ambiente protegido, sob diferentes condições de luminosidade e durante a noite.

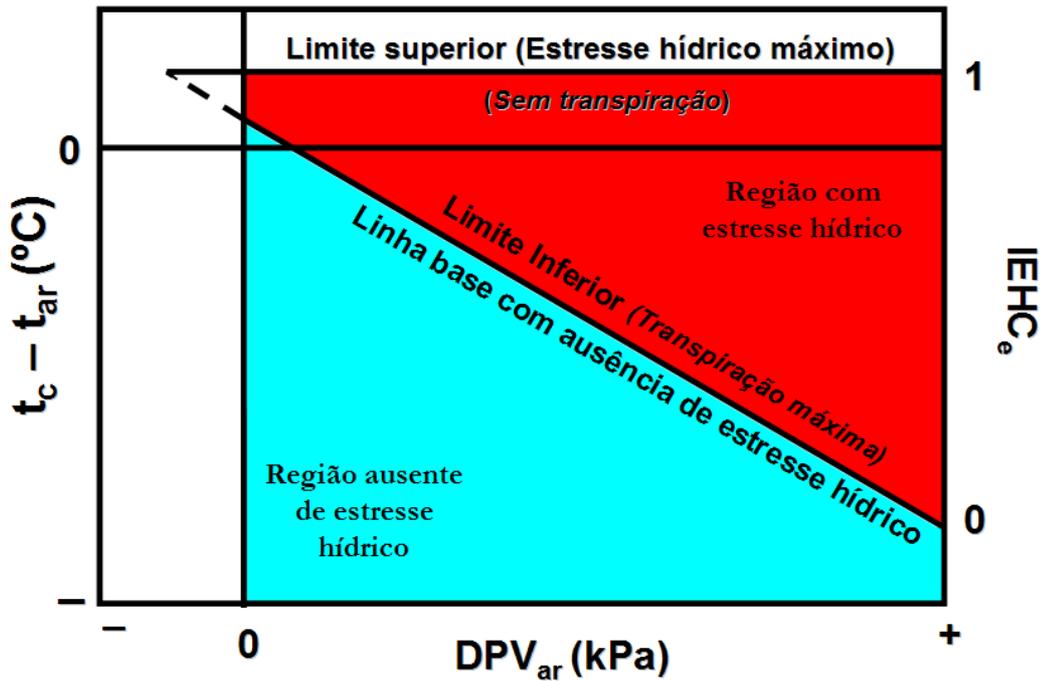


Figura 9 - Domínio experimental do diferencial de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” em função do déficit de pressão de saturação do vapor d’água no ar (DPV_{ar}). A linha-base com ausência de estresse hídrico define o limite de estresse hídrico.

Desse modo, introduzindo a radiação solar incidente (R_g), a equação 17 foi reescrita da seguinte forma:

$$(t_c - t_{ar}) = a R_g - b DPV_{ar} \quad (21)$$

4.12. Estimativa da evapotranspiração da cultura em escala horária

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi determinada através do produto da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo coeficiente da cultura (K_c) na fase fenológica de crescimento máximo. Segundo Dorembos e Kassam (1994), nesta fase de crescimento, a cultura da cana-de-açúcar possui um K_c fixo de 1,25, área sombreada de 100% e uma profundidade efetiva do sistema radicular de 50 cm. Devido as diferenças observadas no IAF no

decorrer do período experimental optou-se por corrigir o K_c em função do IAF, segundo as equações propostas por Allen et al. (1998):

$$K_{c\text{aj}} = K_c - A_{cm} \quad (22)$$

$$A_{cm} = 1 - \left[\frac{\text{IAF}}{\text{IAF}_{\text{denso}}} \right]^{0,5} \quad (23)$$

em que K_c , coeficiente da cultura, adimensional; $K_{c\text{aj}}$, coeficiente da cultura ajustado, adimensional; A_{cm} , coeficiente de ajuste, adimensional; IAF, índice de área foliar, adimensional; $\text{IAF}_{\text{denso}}$, índice de área foliar que se espera em um cultivo sob condições normais e práticas de manejo padrão, adimensional. O $\text{IAF}_{\text{denso}}$ utilizado foi igual a 4, considerado um dossel totalmente desenvolvido (ALVAREZ et al., 1999).

O ET_c (mm h^{-1}) foi calculado pela seguinte equação:

$$\text{ET}_c = \text{ET}_o \cdot K_c \quad (24)$$

A ET_o foi calculada com base na equação proposta por Allen et al. (1998):

$$\text{ET}_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)]} \quad (25)$$

em que ET_o , evapotranspiração de referência, mm h^{-1} ; Δ , declividade da curva de pressão de vapor de saturação à temperatura média horária do ar (T_a), $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; R_n , saldo de radiação solar, $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$; G , densidade de fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$; γ , coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; T_a , temperatura média do ar em escala horária, $^\circ\text{C}$; u_2 , velocidade do ar a 2 m de altura, m s^{-1} ; e_s , pressão de vapor de saturação à temperatura média do ar em escala horária, kPa ; e_a , pressão parcial de vapor à temperatura média do ar de hora em hora, kPa . Foi considerado G igual a $0,1R_n$, para o período diurno.

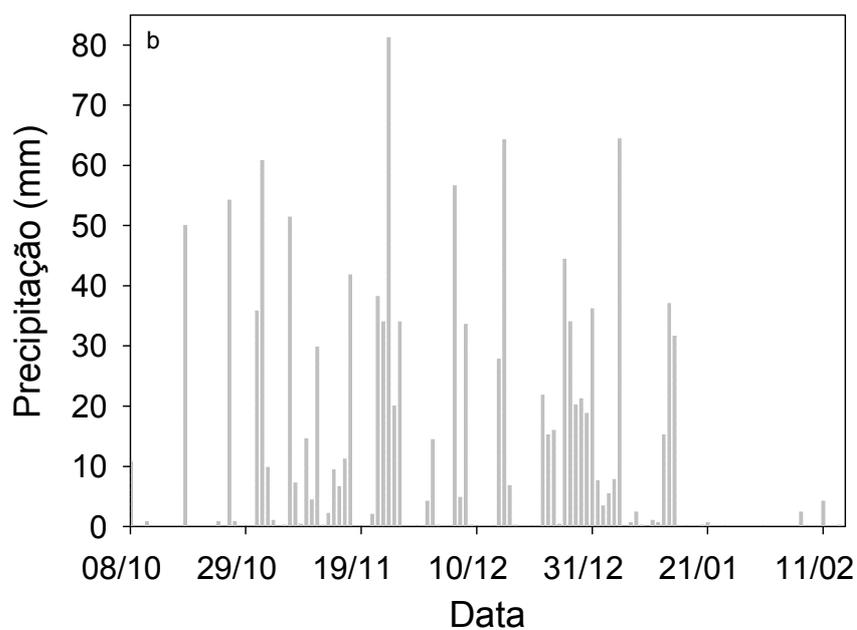
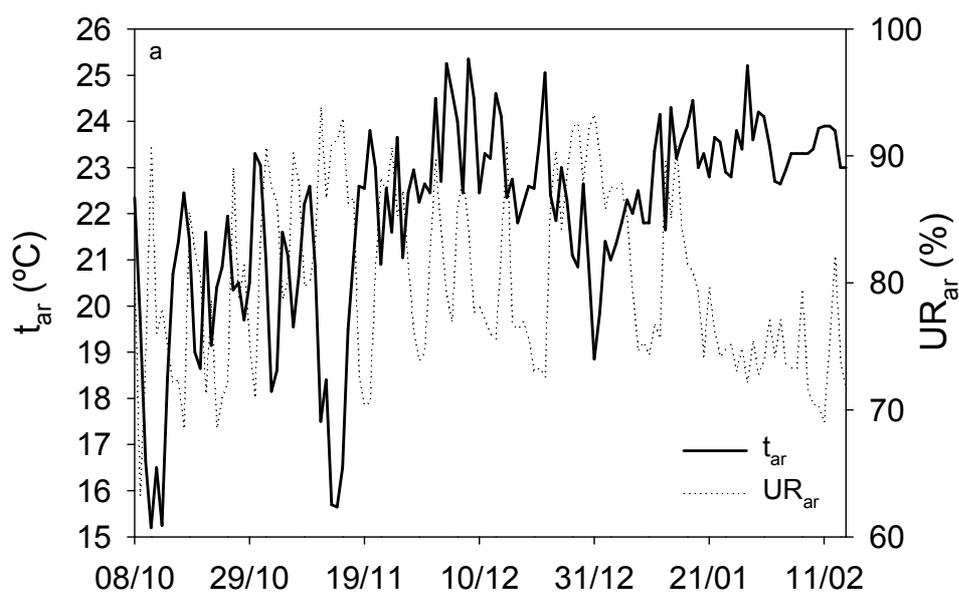
Como o anemômetro foi instalado a uma altura de 4 m, conforme descrito no subitem 4.7, fez-se necessária a correção da velocidade do ar, já que para o cálculo de ET_o , segundo Allen et al. (1998), a altura padronizada é 2 m. O ajuste dos dados de u foi realizado utilizando a relação logarítmica proposta por Allen et al. (1998).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Variáveis meteorológicas e evapotranspiração de referência

Na Figura 10, observam-se os valores diários médios: a) temperatura e umidade relativa do ar; b) precipitação diária acumulada para o período compreendido entre o plantio da cana-de-açúcar e a instalação do sistema de aquisição de dados.

O valor máximo de t_{ar} foi igual a 25,4°C em 08/12 e o menor igual a 15,2°C em 11/10, a UR_{ar} máxima foi 94% em 11/11 e a mínima 63% em 09/10. A maior precipitação diária acumulada foi registrada em 24/11 com valor igual a 81,2 mm. O valor da precipitação acumulada para o período foi igual a 1239 mm. As normais climatológicas para a região em relação à t_{ar} são 20,2, 20,2, 21,3, 22,1 e 22,3°C para os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, respectivamente. Para UR_{ar} os valores são 77, 81, 83, 82 e 81% para os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, respectivamente. A precipitação acumulada para o período, segundo as normais climatológicas, é igual a 905,8 mm, considerando todo o mês de fevereiro (com valor igual a 148,8 mm). O maior período de veranico foi entre os dias 16/01 e 21/02, para eventos de precipitação maiores que 5 mm.



Fonte: INMET.

Figura 10 - a) Valores diários médios da temperatura e umidade relativa do ar e b) precipitação diária acumulada para o período compreendido entre o plantio da cana-de-açúcar e a instalação do sistema de aquisição de dados.

Na Figura 11, observa-se a variação dos valores médios diários das seguintes variáveis meteorológicas: a) radiação solar global (R_g); b) temperatura do ar (t_{ar}); c) déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}); e d) velocidade do ar (u). A variação dos valores diários acumulados: e) evapotranspiração de referência (ET_o) e f) precipitação. O período experimental ficou entre 130 e 245 DAP, o que fornece 115 dias de dados meteorológicos e de ET_o .

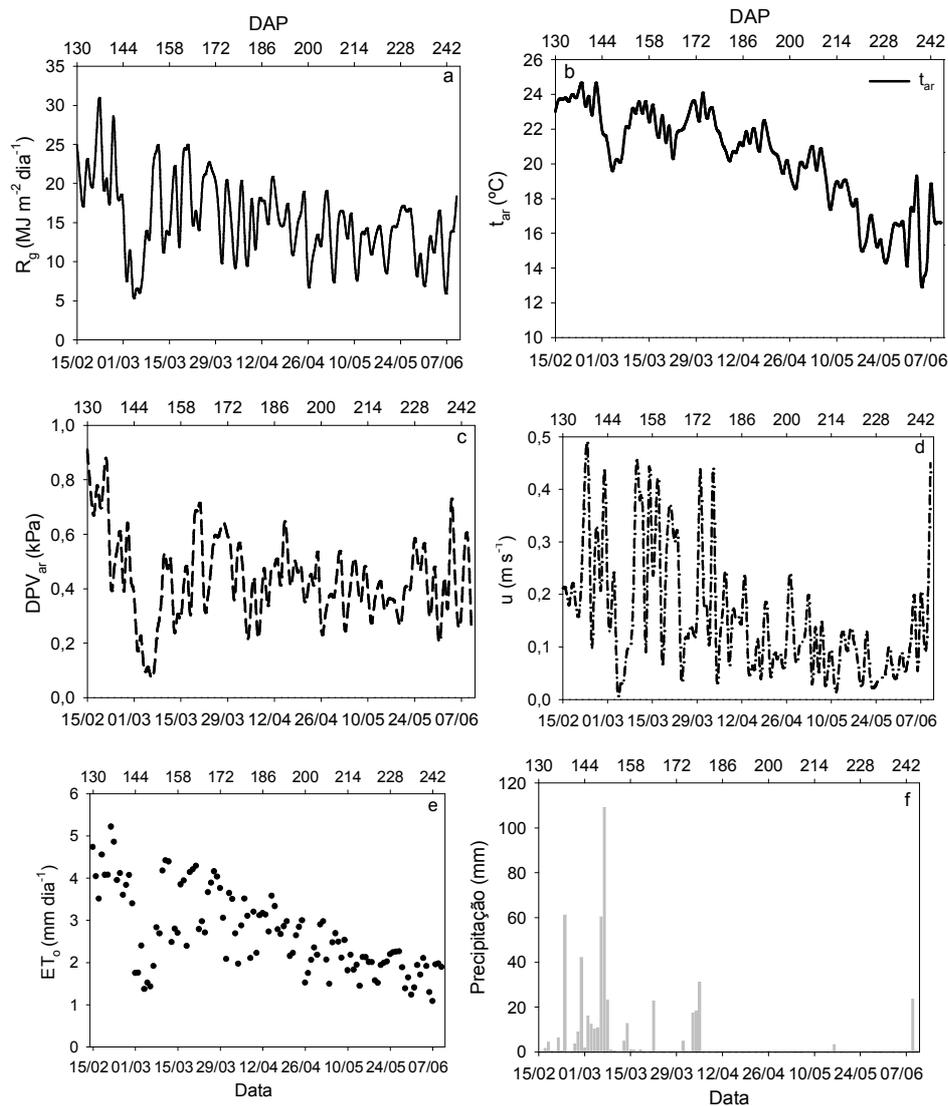


Figura 11 - Variação dos valores médios das variáveis meteorológicas: a) radiação solar global (R_g); b) temperatura do ar (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}); c) déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}); e d) velocidade do ar (u). Variação dos valores diários acumulados: e) evapotranspiração de referência (ET_o) e f) precipitação.

O valor máximo de R_g foi de $26,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em 21/02 e mínimo de $5,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em 04/03. A média máxima da t_{ar} foi de $24,6^\circ\text{C}$ em 27/02 e mínima de $13,1^\circ\text{C}$ em 06 e 07/06. A temperatura diária máxima foi de $32,5^\circ\text{C}$ registrada em 20/02 e a mais baixa de $5,6^\circ\text{C}$ em 06/06. A u esteve entre 0,02 e 0,45 m/s nos dias 23/05, 10/03 e 10/06, respectivamente. O DPV_{ar} oscilou entre 0,077 e 0,91 kPa valores registrados em 06/mar e 15/fev, respectivamente.

Os valores resultantes da interação de todas as variáveis meteorológicas é a ET_o , com valor máximo de $5,2 \text{ mm dia}^{-1}$ em 21/02 e valor mínimo de $1,1 \text{ mm dia}^{-1}$ em 07/06.

O total de precipitação durante o período experimental foi de 523,4 mm; já para o período compreendido entre o plantio e o último dia do período experimental foi de 1.762,4 mm. O veranico maior durante o período do plantio ao fim do verão (20/03) foi de 16/01 a 21/02, considerando eventos de precipitação maiores que 5 mm. Para o outono/inverno caracterizado na região como estação seca (SANTOS et al., 2000), o maior período de veranico compreendeu-se entre os dias 06/04 e 09/07, sendo que em 16/05 houve um pequeno evento de precipitação de 3,2 mm.

As normais climatológicas para a região em relação à t_{ar} são 21,8, 20,0, 17,7, $16,0^\circ\text{C}$ para os meses de março, abril, maio e junho, respectivamente. Para a UR_{ar} , os valores são 82, 83, 83 e 84% nos meses de março, abril, maio e junho, respectivamente. O total de precipitação para o período é igual a 368,6 mm, considerando todo o mês de fevereiro, com total de 1.125,6 mm entre os meses de outubro e junho.

5.2. Curva característica de retenção de água, densidade aparente do solo e comportamento do potencial de água no solo

Nas Figuras 12 e 13, são apresentados os valores dos teores umidade normalizados e corrigidos, em função da tensão matricial aplicada (Ψ_m) e umidade no solo (θ), respectivamente. Na Figura 14 são demonstrados os valores de umidade no solo (θ) em função da tensão matricial aplicada (Ψ_m). Na Figura 15 é apresentado o comportamento do potencial de água no solo em função do regime pluviométrico do local no decorrer do período experimental.

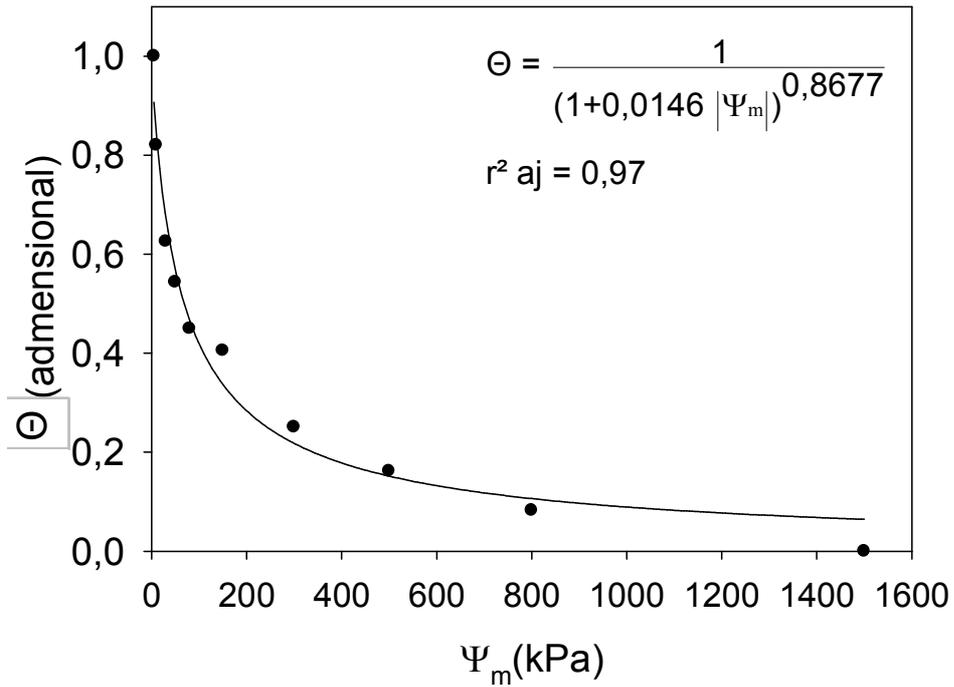


Figura 12 - Curva representando o ajuste da equação do teor de umidade normalizado em função da tensão matricial aplicada.

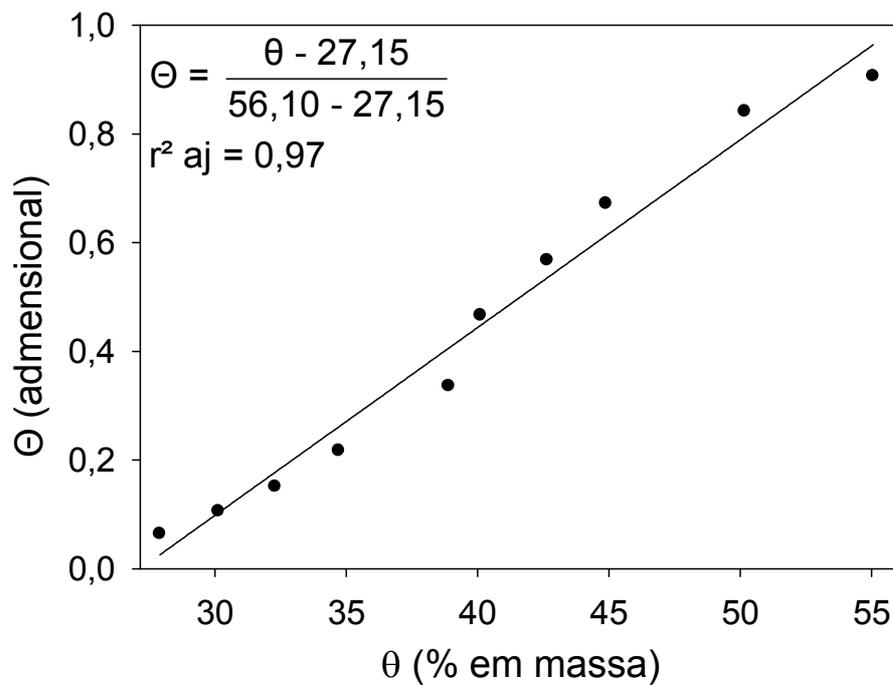


Figura 13 - Curva representando o ajuste da equação do teor de umidade normalizado corrigido em função da umidade no solo.

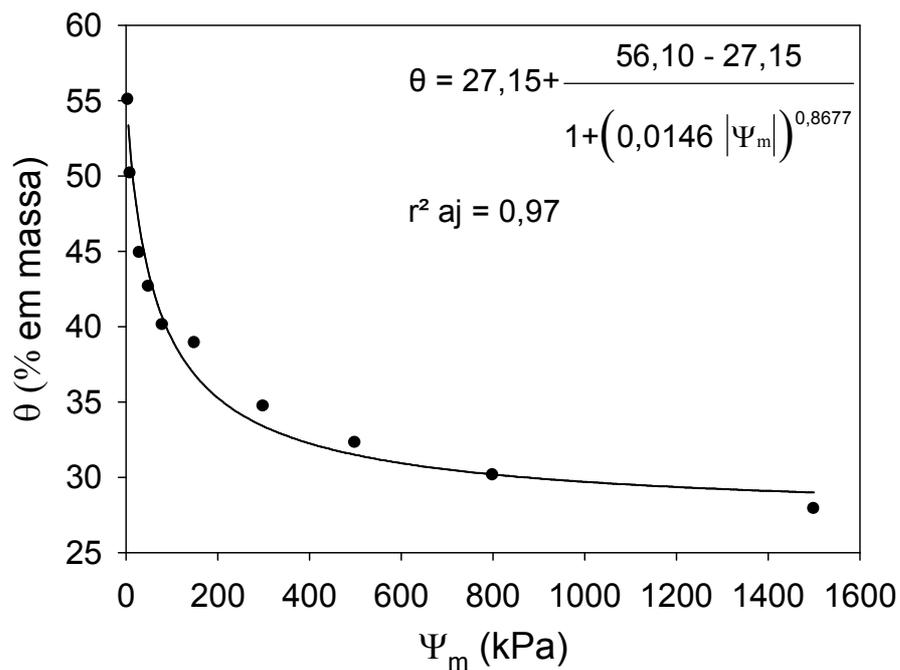


Figura 14 - Curva característica de retenção de água do solo ajustada pelo modelo de Van Genuchten (1980) e equação de determinação da umidade no solo versus a tensão matricial aplicada ao solo.

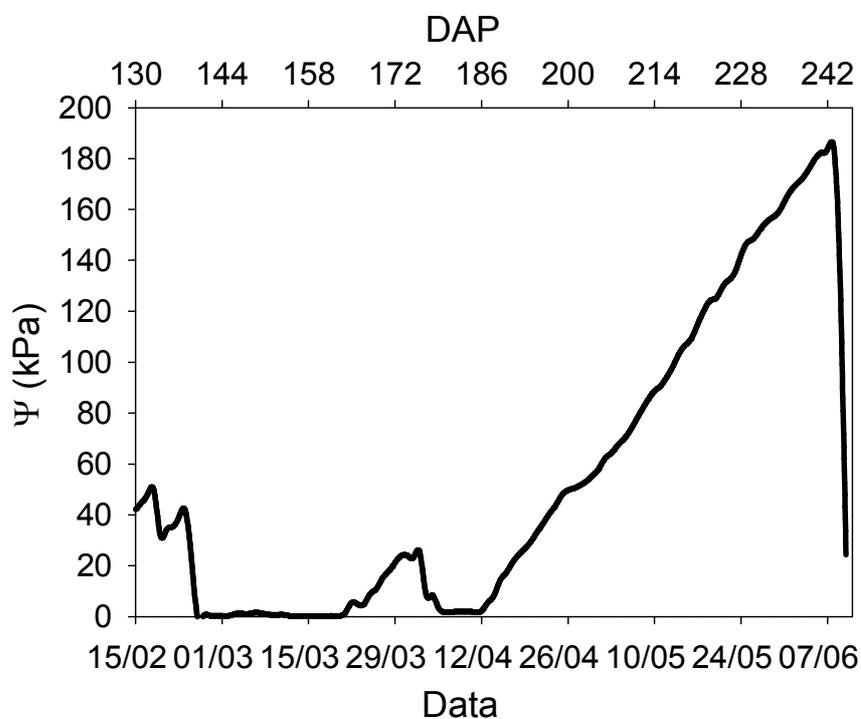


Figura 15 - Comportamento do potencial de água no solo (Ψ) em acordo ao regime de precipitação local no decorrer do período experimental.

Observou-se que os valores de umidade no solo em função da tensão matricial aplicada tiveram um comportamento exponencial decrescente. O valor da capacidade de campo estimado foi de 44,9% e o ponto de murcha permanente 27,9%, ambos em % massa, correspondentes as tensões de 30 e 1500 kPa respectivamente (REICHARDT, 1996; VAN LIER, 2000; BERNARDO et al., 2006).

A densidade aparente média do solo (d_a), determinada a partir de três amostras, foi igual a $1,13 \text{ g cm}^{-3}$, valores muito próximos foram encontrados por Saunders (1978), para um solo com granulometria e classe textural semelhantes.

Combinando as equações ajustadas apresentadas nos itens 5.3 e 5.4, obteve-se o modelo ajustado da equação proposta por Van Genuchten (1980), conforme Figura 14.

As maiores tensões verificadas no decorrer do período experimental coincidiram com os períodos de veranicos apresentados no subitem 5.1, já que a cultura da cana-de-açúcar não recebeu irrigação nem mesmo de forma suplementar. Dessa forma, foi possível eleger dias característicos de ausência de estresse hídrico e de estresse hídrico presente.

5.3. Análise de crescimento da cana-de-açúcar durante o período experimental

Os valores reportados no presente trabalho remetem a última semana do estágio II (perfilhamento) e do início a meados do estágio III (desenvolvimento). Segundo Casagrande (1991), a cana-de-ano tem seu máximo desenvolvimento de novembro a abril, diminuindo após este mês devido às condições meteorológicas adversas, com possibilidade de colheita, dependendo da variedade, a partir de julho. Santos et al. (2006) relatam que a partir do quarto mês (120 DAP) já que a população está estabelecida, tem-se início a fase de alongamento do colmo com um rápido crescimento deste e que a disponibilidade hídrica no solo é muito importante nesta fase.

5.3.1. Perfilhamento

Na Figura 16 é demonstrado o número de perfilhos industrializáveis (NPI) da cana-de-açúcar a partir dos 139 dias após o plantio (DAP). Nesta figura também está a equação do NPI ajustada em função dos graus dias acumulados (GDA) após o plantio.

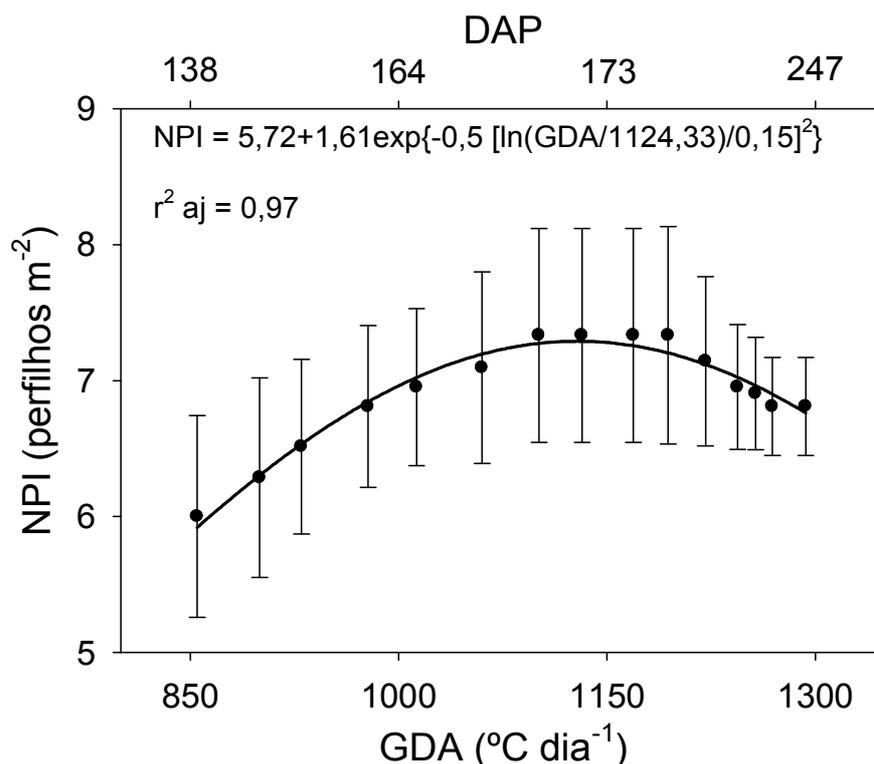


Figura 16 - Número de perfilhos industrializáveis (NPI) da cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP). Linhas verticais representam o desvio-padrão.

Considerando a variedade utilizada e as condições meteorológicas favoráveis (Figuras 10 e 11), provavelmente o máximo perfilhamento foi atingido entre 105 e 120 DAP, conforme relatado por Almeida et al. (2008), Oliveira et al. (2005) e Santos et al. (2009). Ramesh e Mahadevaswamy (2000), analisando quatro variedades comerciais da Índia, verificaram que, para a cana-planta de ano, o número máximo de perfilhos foi alcançado aos 120

DAP, para condições de déficit hídrico moderado e severo, enquanto que em condições livres de estresse esse número foi verificado aos 90 DAP.

Inman-Bamber (1994), sob condições climáticas dos Estados Unidos da América, utilizando as variedades NCo376 e N12 durante dois cortes para a cana-soca de ano cultivada em solo de textura média, obtiveram um máximo perfilhamento com cerca de 500 GDA ($T_b = 16\text{ }^\circ\text{C}$) e estabilização após 1200 GDA. Enquanto que Smit e Singels (2006), sob condições climáticas da África do Sul, utilizando as variedades NCo376 e N22, com a cana-planta de ano irrigada por gotejamento e cultivada em solo artificial e homogêneo colocados em um plástico impermeável, obtiveram um máximo perfilhamento com cerca de 600 GDA ($T_b = 16\text{ }^\circ\text{C}$) com diminuição contínua até 1100 GDA, quando, segundo estes autores, a morte dos perfilhos termina.

O número máximo de perfilhos constatados foi de $7,3\text{ m}^{-2}$ aos 181 DAP ou 1100 GDA, valor que se manteve constante durante quatro semanas de amostragem. Houve uma tendência de queda no NPI a partir dos 209 DAP ou 1221 GDA, para o último número obtido de $6,8$ perfilhos m^{-2} aos 244 DAP ou 1293 GDA. Este valor era esperado até o fim do ciclo, já que os perfilhos estavam vigorosos e o NFV (subitem 5.3.4) tendendo a diminuir. Ainda, os 1269 GDA estão acima dos 1100 e 1200 GDA propostos por Smit e Singels (2006) e Inman-Bamber (1994), respectivamente.

Oliveira et al. (2007) obtiveram para as variedades RB72454 (progenitora da RB867515), RB855113 e RB855536 um número de perfilhos igual a 10,0; 11,7 e 10,9 perfilhos m^{-2} aos 231 DAP, respectivamente. A cana-planta de ano-e-meio foi cultivada no Estado do Paraná em um Latossolo Vermelho Distrófico com o mesmo espaçamento utilizado (1,4 m) e plantio em março. Aos 497 DAP (final do ciclo) estes autores obtiveram os valores de 7,3; 6,71 e 7,0 para RB72454, RB855113 e RB855536, respectivamente.

Para a variedade RB75126, cultivada em um Argissolo Vermelho Distrófico no Estado de Alagoas e plantada em dezembro, Santos (2006) obteve, seis meses após o plantio (240 DAP), para diferentes tratamentos com diferentes fontes de fósforo, o valor máximo de 14,0 e o mínimo de 13,1 perfilhos m^{-2} . O espaçamento utilizado por este autor foi de 1m entre linhas, o que remete a uma maior densidade de plantas. Ao final do ciclo (12 meses

após o plantio), os valores encontrados foram de 8,7 e 8,2 perfilhos m^{-2} , valor máximo e mínimo, respectivamente.

Almeida et al. (2008) observaram valores máximos aos 120 DAP ou 800 GDA para a cana-planta cultivada em um Latossolo Amarelo de textura média/argilosa no Estado de Alagoas, plantio em outubro. Aos 150 DAP, os valores obtidos foram 18,5; 10,3; 13,6 e 11,7 perfilhos m^{-2} , já aos 360 DAP, os valores encontrados foram 10,9; 8,3; 8,2; e 7,4 perfilhos m^{-2} para as variedades RB92579, RB93509, SP79-1011 e RB931530, respectivamente.

Suguitani (2006) obteve uma população praticamente estabilizada próximo dos 87 DAP, e não alcançou um pico de perfilhamento evidente. As variedades utilizadas foram R570, RB72454, NCo376 e SP83-2847 em duas áreas de cultivo (irrigada e não irrigada), sob condições irrigadas, os valores máximos foram cerca de 11 perfilhos m^{-2} (165 DAP, 1ª variedade), 12 perfilhos m^{-2} (110 DAP, 2ª variedade), 18 perfilhos m^{-2} (165 DAP, 3ª variedade) e 15 perfilhos m^{-2} (333 DAP, 4ª variedade). Para a área não irrigada, os valores máximos foram cerca de 10 perfilhos m^{-2} (130 DAP, 1ª variedade), 10 perfilhos m^{-2} (130 DAP para 2ª variedade), 15 perfilhos m^{-2} (215 DAP para a 3ª variedade) e 11 perfilhos m^{-2} (333 DAP para a 4ª variedade). Sob condições climáticas do Estado de São Paulo para um Latossolo vermelho amarelo distrófico, foi utilizado o espaçamento de 1,4 m e plantio foi realizado em outubro.

5.3.2. Altura média dos colmos

A altura média dos colmos (AMC) da cana-de-açúcar a partir dos 139 dias após o plantio (DAP), bem como a equação ajustada em função dos graus dias acumulados (GDA), são observadas na Figura 17.

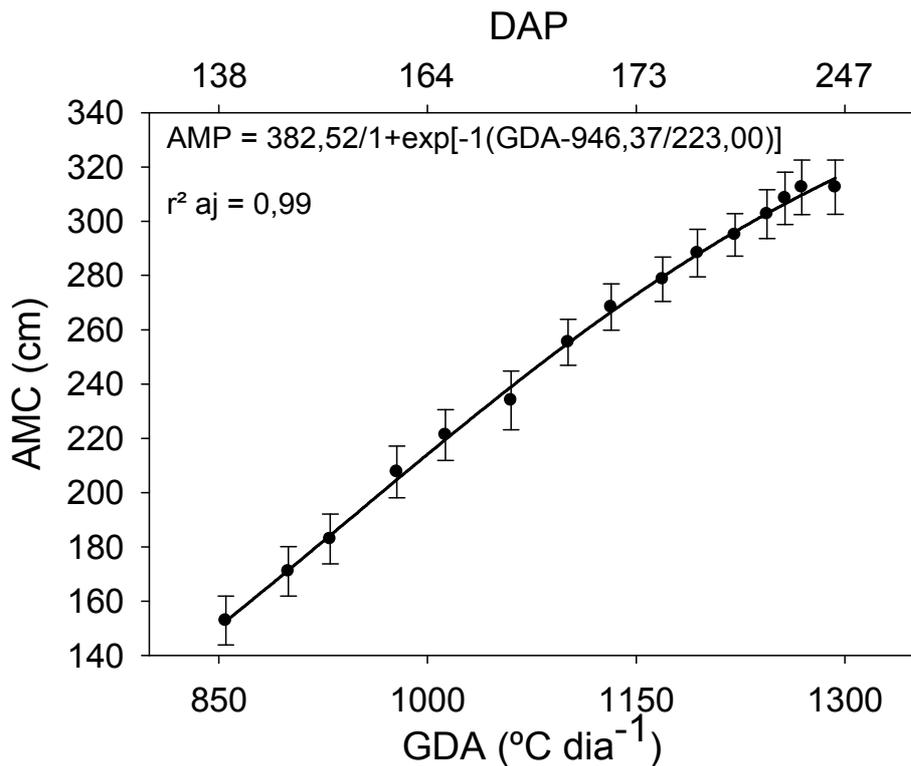


Figura 17 - Altura média dos colmos (AMC) da cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP). Linhas verticais representam o desvio-padrão.

A AMC teve uma tendência linear de crescimento, que também foi observada por Suguitani (2006) para as variedades R570, RB72454, NCo376 e SP83-2847 a partir dos 150 DAP, sendo elas irrigadas ou não. Trentin (2010) e Tavares (2009), ambos trabalhando com a variedade RB867515 (mesma variedade utilizada neste trabalho) em condições de casa de vegetação, obtiveram valores consideravelmente abaixo dos obtidos neste trabalho. Aos 150 DAP, ambos autores encontraram valores menores que 150 cm; em condições de campo foi observada uma AMC de 183 cm aos 153 DAP (930 GDA). Aos 200 DAP e aos 215 DAP para o primeiro e segundo autor foram encontradas alturas de cerca de 170 cm e 190 cm, respectivamente, enquanto que neste trabalho entre 202 e 216 DAP verificou-se valores superiores a 288 cm. O primeiro autor realizou seu cultivo no Estado de Minas Gerais, plantio em

vaso utilizando substrato agrícola realizado em junho; já o segundo no Estado de São Paulo, plantio em tubulão com um solo de textura franco arenosa realizado em outubro.

A taxa de alongação média do colmo (TEMC) foi máxima de 3,5 cm dia⁻¹ entre 153 e 160 DAP (930 e 978 GDA), possivelmente devido a eventos de precipitação intenso associados a altas temperaturas médias, assim como notado por Suguitani (2001). Marchiori (2004) afirma que a temperatura noturna influi mais no crescimento que a diurna. Quando as noites são frias, o desenvolvimento é lento e há maior concentração de sacarose.

Sob condições de clima semiárido brasileiro para a cana-soca de ano (variedade RB92579) irrigada, Silva (2009) obteve um valor máximo de 2,47 cm dia⁻¹, após o fenômeno de tombamento evidenciado pelo autor. Oliveira et al. (2004) observaram 2,25 cm dia⁻¹ (279 a 323 DAP); 1,83 cm dia⁻¹ (323 a 377 DAP) para as variedades RB855536 e RB 72454, respectivamente. Santos et al. (2009) reportam valores máximos de 1,20 cm dia⁻¹ entre 120 e 180 DAP para um dos tratamentos com diferentes fontes de fósforo.

O segundo maior valor de TEMC encontrado foi de 3,0 cm dia⁻¹ entre 174 e 181 DAP (1060 e 1101 GDA), além da disponibilidade hídrica e altas temperaturas médias. Este período está associado a maiores valores de Índice de área foliar (IAF), conforme subitem 5.3.4. Esta mesma tendência foi observada por Santos (2006), Oliveira et al. (2004) e Tavares (2009).

É esperado que a AMC se mantenha estável, já que as noites têm sido mais frias (menores que 10°C), em acordo ao afirmado por Marchiori (2004), mas também devido ao período de veranico pelo qual a cultura vem passando, e a TEMC já sendo praticamente igual a 0 cm dia⁻¹. Nable et al. (2009) verificaram que para uma diminuição de 66% e 18% da CAD para o sorgo e a cana-de-açúcar (Q115), respectivamente, a taxa normalizada de alongação do colmo teve declínio linear, para condições de casa-de-vegetação e cultivo em vaso na Austrália, o que evidencia uma grande sensibilidade da cultura da cana-de-açúcar e sua deficiência hídrica para o incremento em altura.

A última AMC foi igual a 312 cm (valor mantido à última medição). Silva (2009) encontrou valores superiores a 300 cm após os 250 DAP (2500 GDA).

Por outro lado, Oliveira et al. (2004) encontraram valores superiores a 300 cm somente 428 DAP.

Apesar de o número máximo de perfilhos encontrados por Santos (2006) e Almeida et al. (2008) ser consideravelmente superior aos valores encontrados no presente trabalho, estes autores obtiveram valores de AMC inferiores a 250 cm, enquanto o observado foi 312 cm aos 230 DAP. Um menor NPI gera uma menor competição intraespecífica por água, nutrientes e luminosidade, conferindo à planta grande capacidade de incremento em altura.

5.3.3. Número de folhas

O número de folhas emergentes (NFE, a), número de folhas verdes (NFV, b) e o número de folhas mortas (NFM, c) da cana-de-açúcar a partir dos 139 dias após o plantio (DAP), bem como a equação ajustada em função dos graus dias acumulados (GDA) para b e c são observadas na Figura 18.

A emissão máxima de folhas durante o período foi constatada aos 167 DAP (2014 GDA), o NFE foi aproximadamente quatro folhas planta⁻¹. Este valor está associado a temperaturas mínimas diárias maiores que 16°C (médias diárias próximas a 24°C, para dias de céu claro), precipitações de altas intensidades correlacionadas à fase de grande crescimento foliar dos perfilhos industrializáveis favorecendo a interceptação da radiação solar, assim o processo de fotossíntese e altas taxas de transpiração. A posterior queda está associada ao aumento do NFV (Figura 18b), e a manutenção de um valor quase constante após 215 DAP é devido à diminuição das condições ideais ao surgimento de novas folhas e a não abertura destas pela diminuição da extensão foliar.

Silva (2009) encontrou valores máximos entre 200 e 250 DAP, variando durante o ciclo da cultura em função da dinâmica foliar observada. Inman-Bamber (1994) afirma que a emissão de novas folhas está estreitamente ligada à temperatura do ar e à disponibilidade hídrica no solo. A temperatura média diária maior ou igual a 10°C é a temperatura base para extensão e surgimento foliar; a cana-de-açúcar submetida ao estresse hídrico diminui com o surgimento de novas folhas, mas este processo é reversível desde que o meristema apical não tenha sido danificado.

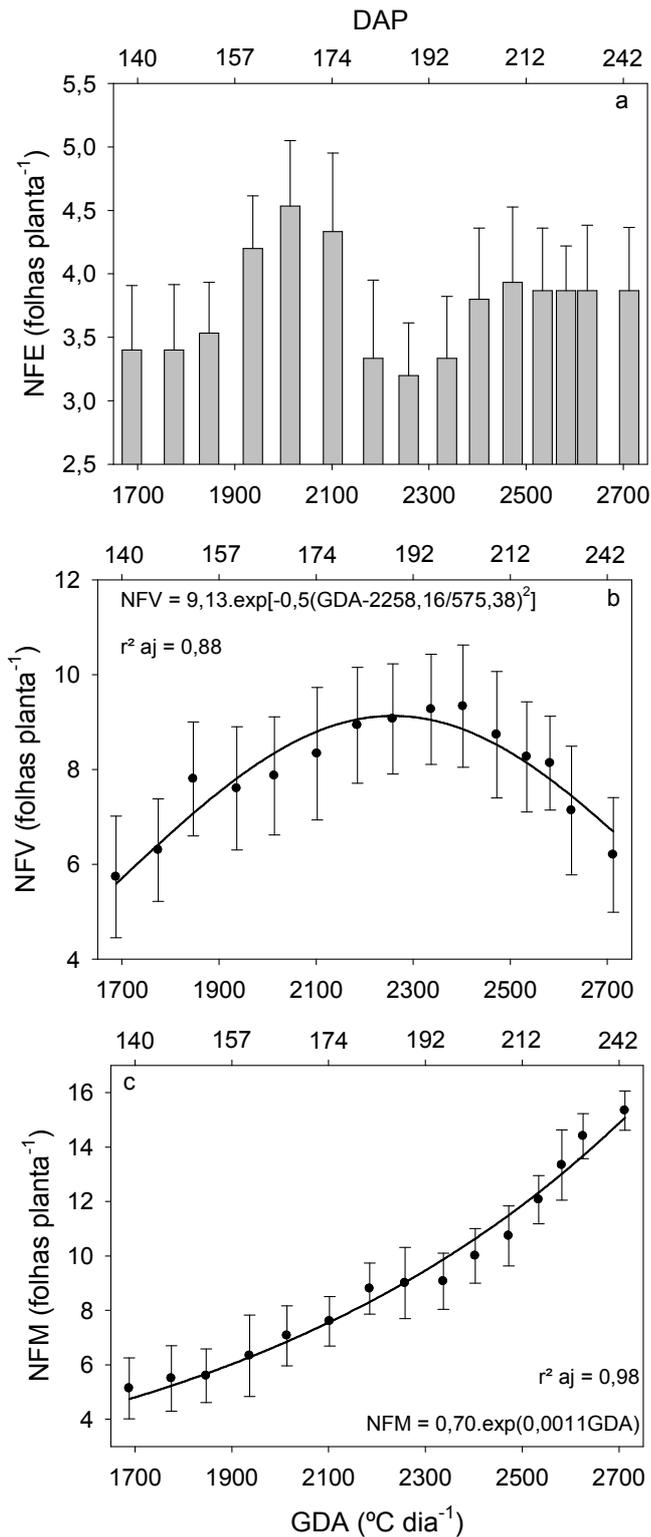


Figura 18 - Número de folhas para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP), a) número de folhas emergentes (NFE), b) número de folhas verdes (NFV) e c) número de folhas mortas (NFM). Linhas verticais representam o desvio-padrão.

O NFV aumentou até os 202 DAP (2403 GDA), chegando a um valor máximo aproximado de nove folhas planta⁻¹, e, após este período, este número tendeu a diminuir. Tavares (2009) utilizou a mesma variedade e o número de folhas aumentou até os 215 DAP, período até o qual, segundo este autor, a planta expressou todo seu potencial vegetativo.

Oliveira et al. (2004) observaram os maiores valores do NFV entre 182 DAP e 231 DAP, sendo eles aproximadamente de 10, 14 e 16 folhas planta⁻¹ para as variedades RB72454, RB855113 e RB855536, respectivamente. Suguitani (2006) verificaram um pico relativo ao NFV próximo aos 164 DAP, para as quatro variedades avaliadas sendo elas irrigadas ou não.

Machado et al. (2009), em seu trabalho utilizando as variedades IACSP 94-2094 e IACSP 96-2042 no Estado de São Paulo, em casa de vegetação e com imposição de déficit hídrico em três fases distintas da cultura, afirmam que para os genótipos avaliados houve uma redução significativa na quantidade de folhas verdes decorrentes do déficit hídrico imposto.

Inman-Bamber (1994) observou que existe uma relação linear positiva entre o NFV e a água prontamente disponível para a planta (APD). Assim, este autor observou que a senescência foliar é acelerada durante períodos de estresse hídrico. O mesmo foi observado por Smit e Singels (2006), o resultado de 38 dias de estresse (após 1100 GDA, $T_b=16^{\circ}\text{C}$) foi a queda no NFV de 10,8 para 5,2 e 12,2 para 4,0 folhas planta⁻¹ nas variedades N22 e NCo376, respectivamente.

Ramesh (2000) verificou que em quatro variedades comerciais da Índia, no ciclo de cana-planta de ano, após a fase intenso crescimento (279 a 377 DAP), a cana-de-açúcar diminui o gasto energético para a produção de folhas verdes. Em complemento, a cultura busca diminuir sua superfície transpirante e o gasto energético para a manutenção dos tecidos (INMAN-BAMBER; SMIT, 2005; INMAN-BAMBER et al., 2008) e o acúmulo de sacarose.

Devido ao processo de senescência, o NFM tendeu a aumentar com maior rapidez após 2270 GDA ou 189 DAP. Os valores encontrados aqui foram superiores aos observados por Silva (2009), o que confirma a maior

senescência para as condições de sequeiro comparadas a áreas irrigadas, entretanto, depende também da variedade cultivada. Smit e Singels (2006) verificaram que o estresse hídrico induzido aumentou consideravelmente o NFM após 2300 GDA, para as duas variedades avaliadas, reportando valores superiores a 16 folhas planta⁻¹.

5.3.4. Área e índice de área foliar

Devido à variação encontrada no fator de forma (f) para cada folha (-2 a +10) da variedade estudada, a determinação deste fator foi obtida através das relações da área de cada folha com pelo menos 10 repetições nas 35 plantas amostradas durante o período experimental, medidas em um integrador foliar e as obtidas pelo produto da largura *versus* o comprimento. Os valores dos coeficientes angulares de regressão obtidos são os fatores de forma, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Fator de forma com os respectivos coeficientes de determinação ajustados e número de folhas amostradas para as n folhas da variedade RB867515

Folha (n)	Fator de forma (f)	r ² aj	N.º de folhas amostradas
-2	0,58	0,52	10
-1	0,60	0,68	35
0	0,65	0,61	35
+1	0,64	0,78	35
+2	0,63	0,80	35
+3	0,62	0,85	35
+4	0,62	0,74	35
+5	0,62	0,79	34
+6	0,61	0,73	33
+7	0,62	0,88	26
+8	0,63	0,87	21
+9	0,59	0,63	14
+10	0,60	0,86	10

Tavares (2009), utilizando a mesma variedade, determinou dois fatores de forma, um para 67 DAP e outro para 215 DAP, e os valores respectivos foram 0,66 e 0,56; estes representam a folha +3. Silva (2009) obteve também para a folha +3 o fator de forma igual a 0,69 para a variedade RB92579. Paula (2008) utilizando a variedade SP80-3280 para as condições de casa de vegetação com plantas cultivadas em lisímetros em um solo franco arenoso obteve um fator de forma aproximadamente igual a 0,70; porém, este autor não especificou de qual folha se tratava as medições.

Francis et al. (1969) propõem um fator de forma geral de 0,75, independente da posição da folha na cana-de-açúcar. Este mesmo valor é utilizado na equação proposta por Hermann e Câmara (1999), que determina empiricamente a área foliar da cana-de-açúcar utilizando somente as dimensões da folha +3 e o número de folhas com pelo menos 20% de área verde (folha 0 a +7). Para o presente trabalho, valores superiores a 0,65 tenderiam a superestimar a AF_m .

As áreas individuais das n folhas entre -2 a +10 (AF_n) medidas pelo integrador foliar, para cana-de-açúcar a partir dos 140 dias após o plantio (DAP), em função do produto comprimento e largura das n folhas (C_n e L_n), são apresentados na Figura 19.

A área foliar média da planta (AF_m , Figura 20a), obtida pelo integrador foliar e o índice de área foliar (IAF, Figura 20b) baseado em AF_m , para a cana-de-açúcar a partir dos 140 dias após o plantio (DAP), bem como a equação ajustada em função dos graus dias acumulados (GDA) é observada na Figura 20.

A área foliar de folhas emergentes, normalmente menores que a -1, de difícil medição ou acesso contribuiu com aproximadamente entre 2,5 e 8%, dois valores próximos a 8%, o primeiro associado a um alto NFE (maior que 4), e o segundo a manutenção do NFE (entre 3 e 4 folhas) e diminuição do NFV para valores menores que 8 folhas planta⁻¹.

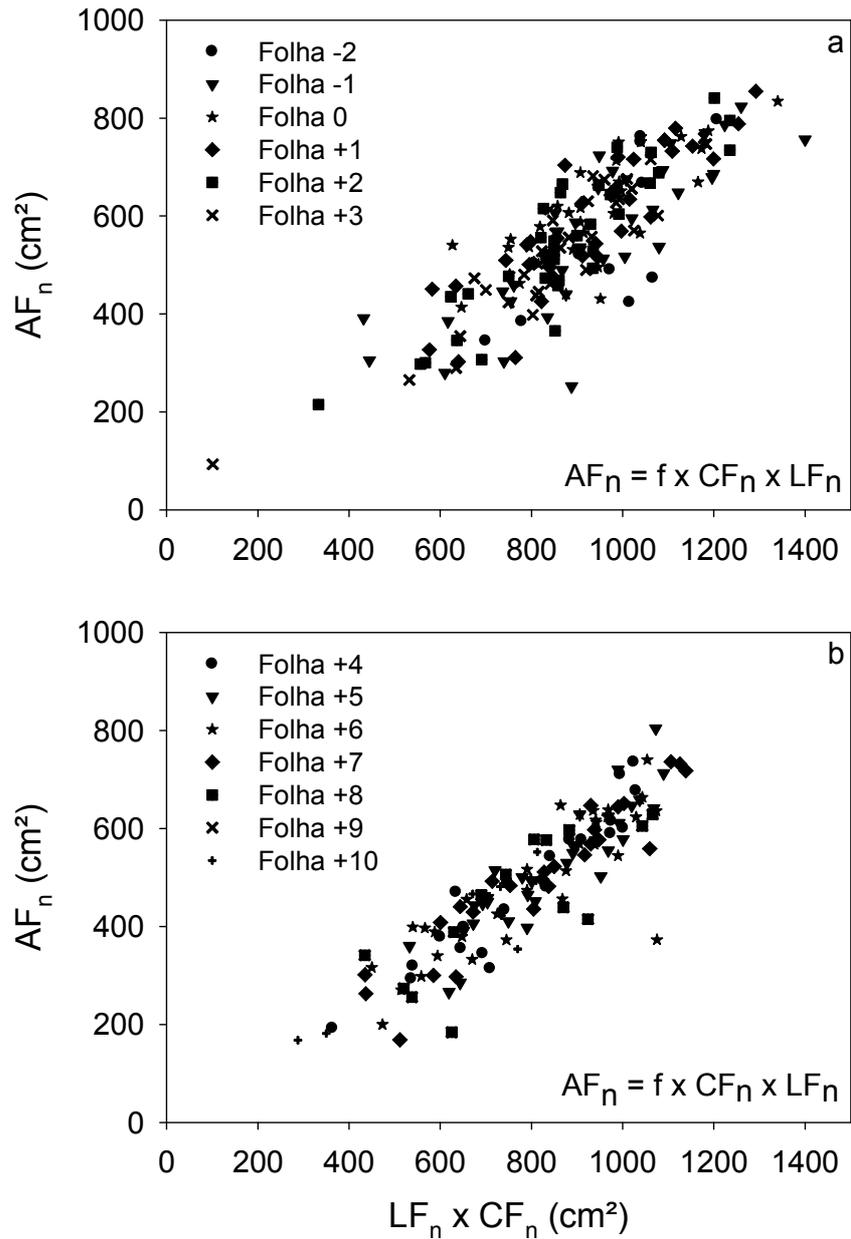


Figura 19 - Áreas individuais de todas as n folhas entre -2 a +10 (AF_n) observadas e medidas pelo integrador foliar, para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, a partir dos 140 dias após o plantio (DAP), em função do produto comprimento e largura das n folhas (C_n e L_n).

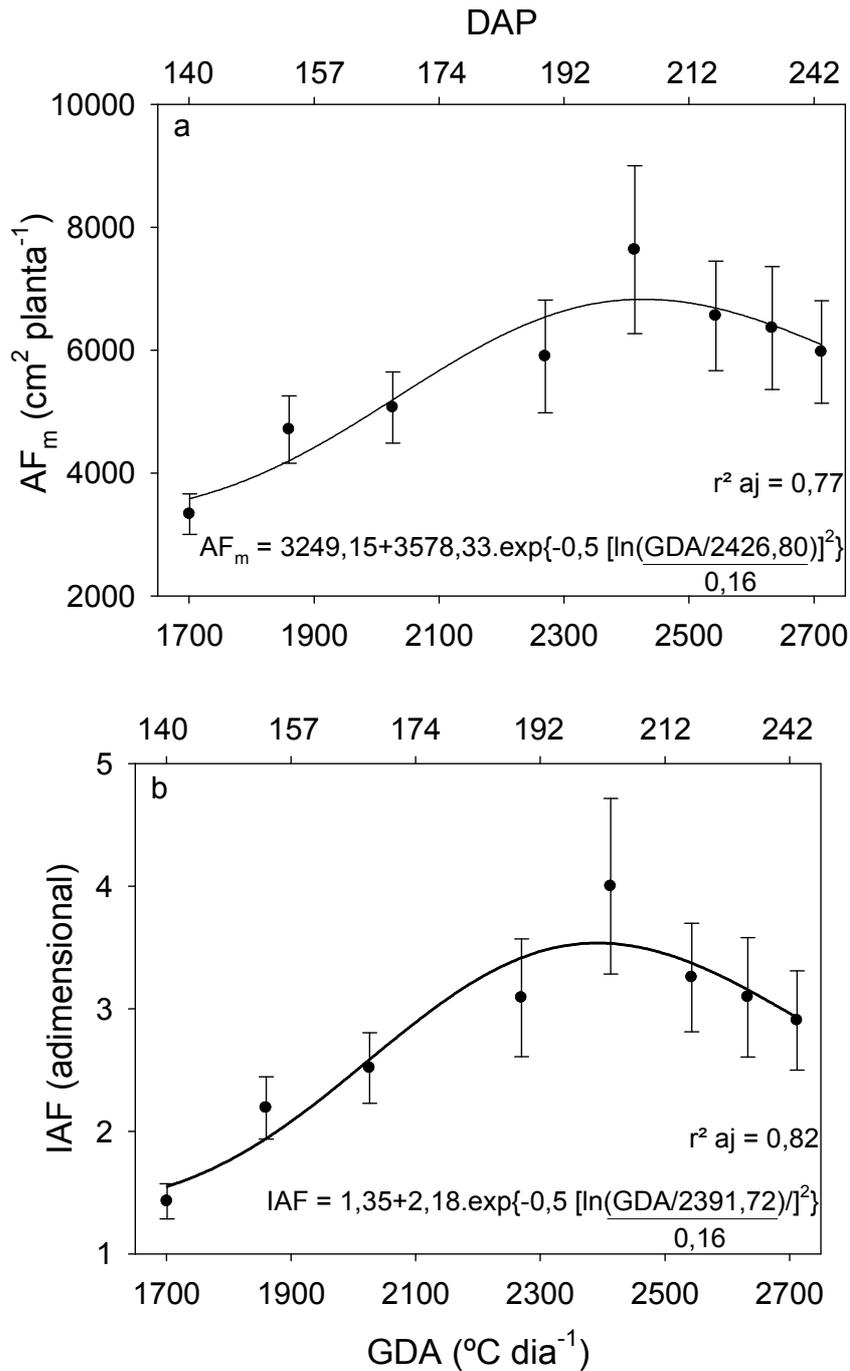


Figura 20 - a) Área foliar média da planta (AF_m) e b) índice de área foliar (IAF) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB867515) no ciclo da cana-planta, em função dos graus dias acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP). Linhas verticais representam o desvio-padrão.

Verificou-se um incremento na área foliar média da planta (AF_m) até os 203 DAP ou 2413 GDA ($T_b=10\text{ }^\circ\text{C}$), o valor máximo atingido foi igual a 7634 cm^2 , logo após houve uma tendência a queda que estava relacionada ao período fenológico em que a cana-de-açúcar se encontrava e o comportamento do processo de reposição e senescência foliar discutidos no subitem anterior (subitem 5.3.3).

Trentin (2010) verificou um incremento na AF_m principalmente até 1530 GDA, e os valores máximos foram atingidos entre 1500 e 1800 GDA. Os valores observados neste intervalo foram superiores a 4000 cm^2 , utilizando a um fator de forma igual a 0,69 para todas as folhas. Por outro lado, Tavares (2009) observou uma área foliar variando entre 5600 e 7400 cm^2 , de acordo aos tratamentos de diferentes níveis de lençol freático impostos por este autor. Estes valores foram observados entre 120 e 215 DAP, com tendência a redução após este período.

Acompanhando a tendência da AF_m correlacionada ao NPI (subitem 5.3.1) o valor mínimo e o máximo de IAF foi aproximadamente de 1,43 (140 DAP ou 1701 GDA) e 4,00 (203 DAP ou 2413 GDA), respectivamente. Para um solo arenoso, sob condições climáticas do norte mineiro, para a mesma variedade (RB857515) cana-planta de ano irrigada e plantio em janeiro, Teixeira (2009) obteve aos 84, 200 e 310 DAP os seguintes valores de IAF 1,67; 2,69; e 3,50; respectivamente. Ferreira Junior (2010), sob condições climáticas de Alagoas, solo de textura média/argilosa, também utilizando a mesma variedade para um espaçamento combinado de 1,4 e 0,4 m, no ciclo da cana-planta de ano irrigada e plantio em fevereiro, obteve valores de IAF superiores a 3 porém menores que 4 aos 203, 245 e 299 DAP.

Oliveira et al. (2004) obtiveram valores de IAF máximo aos 377 DAP analisando as variedades RB72454 e RB855113. Para a variedade RB855536 o valor máximo ocorreu aos 323 DAP, e foram superiores a 4 para a primeira variedade, superiores a 5 para a segunda variedade e bem próximo a 4 para a terceira variedade. Após o relatado acima, houve uma tendência maior de queda em relação às duas primeiras variedades.

Sugutani (2006) observou os valores máximos de IAF aos 200 DAP, próximos a 5 para todas as variedades, e uma tendência maior ao decréscimo

após 250 DAP para o tratamento sem irrigação. Almeida et al. (2008) verificaram que para as três variedades estudadas por estes autores o crescimento máximo da cana-de-açúcar coincidiu com um aumento continuado do IAF até aproximadamente 3,5 para a cana-planta. E que as variedades alcançaram IAF acima de 3 no intervalo de 4 a 7 meses (120 a 210 DAP), o que foi muito próximo ao encontrado neste trabalho. Santos et al. (2009) constataram também que no período de maior crescimento (120 a 240 DAP) o IAF apresentou valores superiores a 3.

Após atingir o valor máximo o IAF tende a reduzir devido à manutenção do NFE, à diminuição do NFV associado principalmente a senescência (aumento do NFM) e à densidade de plantas (NPI). Os fatores determinantes foram a temperatura e o déficit hídrico, como poder ser visto no item 5.1, em acordo Inman-Bamber (2004).

Segundo Inman-Bamber e Smith (2005), a cana-de-açúcar tende a diminuir ou atrasar o efeito do estresse hídrico limitando a transpiração e, ou, reduzindo a área foliar exposta para, assim a diminuição da taxa de aparecimento foliar, a não abertura de folhas emergentes ou o enrolamento destas, esta associada a uma melhor tolerância a seca. Juntamente com a senescência, o número de folhas verdes diminui, podendo ser utilizado como um indicador de estresse hídrico (INMAN-BAMBER, 2004).

Smit e Singels (2006) verificaram que o IAF para as variedades NCo376 e N22 irrigadas alcançaram valores de aproximadamente 6 após 1100 GDA ($T_b=10^{\circ}\text{C}$), já para a área onde se induziu o estresse hídrico cerca de 12 dias após o estresse as plantas alcançaram valores de IAF entre 4 e 5, valores que decresceram rapidamente até aproximadamente 2 após 40 dias de estresse hídrico mantidos.

5.4. Avaliação diária da temperatura do dossel vegetativo e do ar em função da radiação solar global e déficit de pressão de vapor em escala de minutos

Para a avaliação do comportamento do diferencial t_c-t_{ar} em diferentes níveis de potencial de água no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e em função da radiação solar global (R_g) e do déficit de pressão de vapor (DPV_{ar}),

optou-se por realizar tais avaliações sob diferentes coberturas de nuvens (céu claro, nublado e parcialmente nublado). A região apresenta grandes contrastes climáticos em razão de uma diversidade de fatores, com elevadas precipitações ao longo do ano. Os sistemas frontais predominam e o relevo é também um fator importante na distribuição das temperaturas e das precipitações (SANTOS et al., 2000). A cobertura parcial por nuvens ocorre durante grande parte de todo o ano.

Foi possível observar que, para tais condições meteorológicas, a t_c oscilou muito em relação à DPV_{ar} , função de UR_{ar} e t_{ar} que não variaram tanto quanto t_c em escala de minutos. Assim, verificou-se que o t_c responde rapidamente à variação de R_g , mesmo que com pouca defasagem em relação ao tempo. A determinação de uma média móvel, que foi calculada em relação aos 5 últimos valores anteriores ao minuto de registro (incluindo o próprio valor), tornou possível amenizar tais flutuações.

A Figura 21 mostra a variação em minutos: a) radiação solar global (R_g), déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e temperatura do ar (t_{ar}), e b) temperatura do dossel vegetativo (t_c), para o dia 24/03 (167 DAP) sob condições de céu parcialmente nublado, de 12h às 15h, horário mais quente do dia e com maior variação em R_g .

A temperatura do dossel vegetativo depende de vários fatores ambientais, tais como: temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do ar (SPREER et al., 2009). A velocidade do ar está implícita ao $IEHC_e$ e, como salientado por Trentin (2010), normalmente ela não é especificada em trabalhos que envolvem a determinação do $IEHC_e$.

Inman-Bamber e Jager (1986), para obterem empiricamente o limite inferior do diferencial $t_c - t_{ar}$, utilizando três variedades de cana-de-açúcar (NCo 376, N12, e N14) em um solo arenoso sob condições climáticas da África do Sul, estabeleceram que para uma mínima resistência do dossel ($r_c = 0,05 \text{ s m}^{-1}$) a velocidade do ar deve ser $\leq 1,75 \text{ m s}^{-1}$.

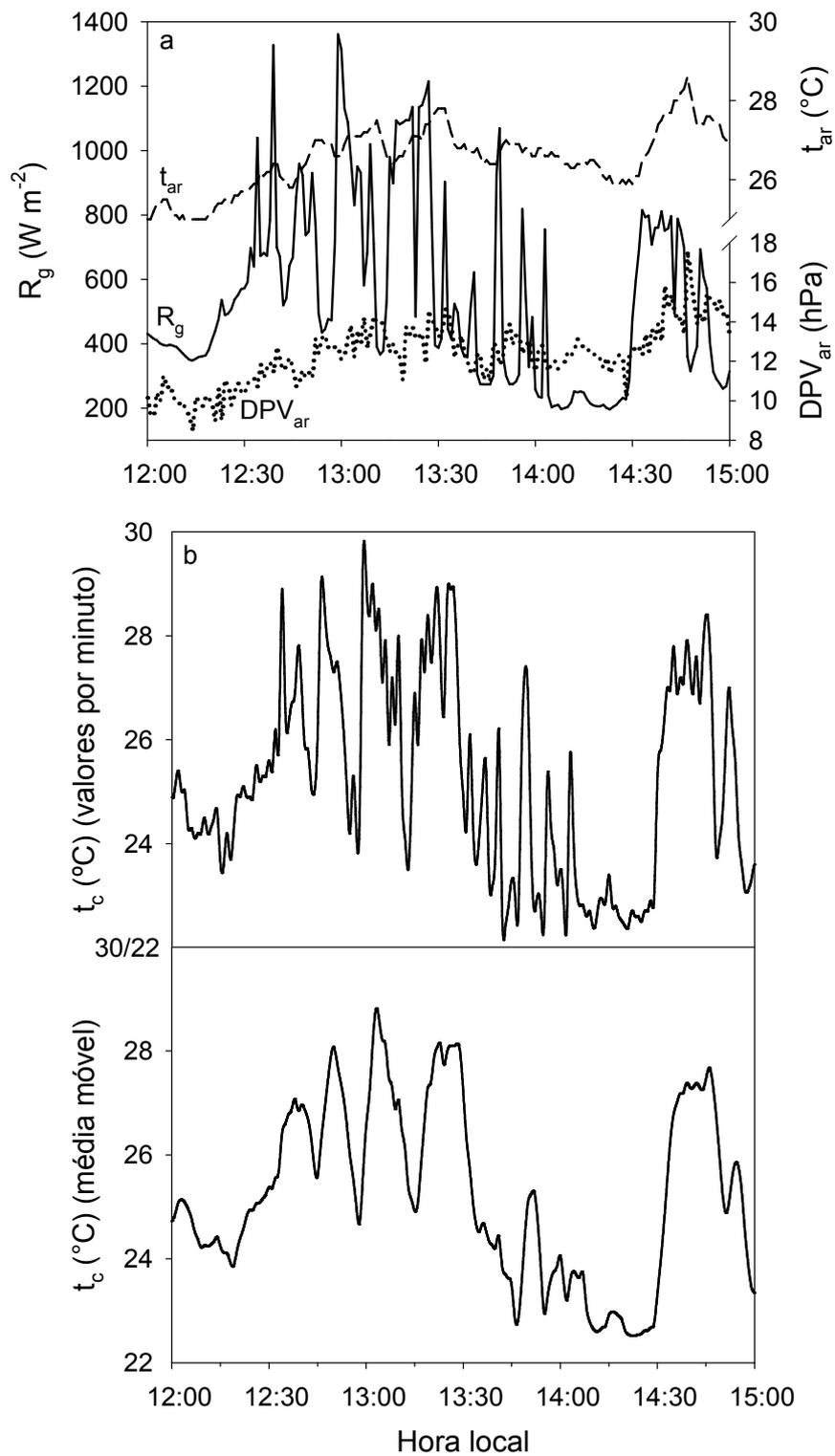


Figura 21 - Variação em escala de minutos: a) radiação solar global (R_g), déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e temperatura do ar (t_{ar}), b) temperatura do dossel vegetativo (t_c), para 24/03 (167 DAP) sob condições de céu parcialmente nublado, entre 12h e 15h.

Zia et al. (2010), para obterem empiricamente o limite superior do diferencial $t_c - t_{ar}$, na cultura do milho cultivado em vasos, sob condições climáticas da Alemanha, concluíram que para imagens termais tomadas a cada 15 e 20 s e velocidade do ar constante imposta de $1,12 \text{ m s}^{-1}$, após 1 min. é difícil diferenciar plantas sob estresse e sem estresse hídrico. Após 5 min. de vento constante, o resfriamento foliar continua evidente. Entretanto, 2 min. após cessar a circulação de ar imposta, as plantas recuperam seu nível prévio de estresse.

Gardner et al. (1992) relatam que a alteração no IEHC_e é mínima quando a velocidade do ar é menor que $2,5 \text{ m s}^{-1}$, já que para valores superiores a este, a transferência de calor sensível é maior, por conseguinte afetando o balanço de energia.

Os dias 161, 162, 167, 184, 186 e 188 DAP foram eleitos com o critério de diferenciação em cobertura de nuvens e diferentes IAF, sob condições de ausência de estresse hídrico. A velocidade do ar durante o período diurno em escala de minutos para os dias 161, 167, 186 e 188 esteve abaixo de $1,63 \text{ m.s}^{-1}$. Já para 162 e 184 DAP, os valores máximos foram $2,40$ e $2,07 \text{ ms}^{-1}$, com apenas 3 e 9 valores superiores a $1,75 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente. Assim, não foi possível notar diferenças na t_c em função da velocidade do ar mantendo outros fatores constantes.

Os dias 219, 223, 227, 240, 241 e 242 DAP foram eleitos com o critério de diferenciação em cobertura de nuvens e diferentes IAF, sob condições de redução do potencial de água no solo. A velocidade do ar durante o período diurno em escala de minutos para os dias 223, 227, e 241 esteve abaixo de $1,00 \text{ ms}^{-1}$. Já para 219 e 242 DAP, os valores máximos foram $1,37$, $1,35 \text{ ms}^{-1}$, com apenas 4 e 3 valores superiores a $1,12 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente. Somente aos 140 DAP foram 30 valores superiores a $1,12 \text{ ms}^{-1}$, e máximo de $2,08 \text{ ms}^{-1}$, não sendo possível notar diferenças na t_c em função da velocidade do ar mantendo outros fatores constantes.

5.5. Variações sazonais da temperatura do dossel vegetativo em função das variáveis meteorológicas e da disponibilidade hídrica no solo

O conhecimento das relações hídricas na cana-de-açúcar é de extrema importância para poder-se realizar um manejo da irrigação mais eficiente, visando maior produtividade em bases sustentáveis, principalmente quando o dossel vegetativo apresenta um IAF superior a 2, como reportado neste trabalho. Inman-Bamber e Smith (2005) afirmam que esta cultura pode suportar certo estresse hídrico sem afetar o seu acúmulo de biomassa e sacarose. Os mesmos autores classificam a resposta da cana-de-açúcar à irrigação, ou a falta desta, de acordo com três fases: 1ª) Início de desenvolvimento do dossel, 2ª) Desenvolvimento final da copa e alongação dos colmos e 3ª) Maturação.

Considerando a primeira fase (IAF<2), Robertson et al. (1999) observaram que após a irrigação normal de plantio, instalou-se um período de quase cinco meses de supressão da irrigação (durante o inverno) o IAF reduziu de 1,8 a 0,9; já o rendimento da cultura e a quantidade de sacarose não foram afetados. As análises foram realizadas sob condições climáticas da Austrália, em um solo argiloso (30 cm) sobreposto a uma areia grossa, utilizando-se quatro variedades e diferentes ciclos da cana-de-açúcar (cana-planta e cana-soca) e estudando-se o comportamento fisiológico e produtividade para épocas diferentes de estresse. Partindo dessa premissa, Inman-Bamber e Smith (2005) concluem que a cultura pode se recuperar do estresse hídrico durante essa fase.

De acordo com Inman-Bamber (2004) e Robertson et al. (1999), para a segunda fase (IAF>2), o estresse hídrico pode prejudicar consideravelmente o rendimento em biomassa e sacarose. Robertson et al. (1999) observaram que a cultura nesta fase, sob estresse hídrico, reduz o IAF e assim a interceptação de radiação, consequentemente diminuindo o uso eficiente da radiação. Na terceira fase (*drying-off*), o estresse hídrico é importante, conforme descrito no item 3 deste trabalho.

Segundo Idso et al. (1981), para o desenvolvimento do IEHC_e utilizando a termometria a infravermelho e seguindo a metodologia proposta neste trabalho, é necessário assegurar que somente o material vegetativo está dentro

do campo de visada do sensor para se evitar a influência do aquecimento da superfície (GARDNER et al.,1992).

Li et al. (2010) obtiveram valores de $IEHC_e$ superiores a 1 (valor teórico máximo) para as culturas do trigo e milho, ambos na fase inicial de desenvolvimento, sob condições climáticas da China em um solo siltoso. Eles atribuíram a estes valores encontrados um erro associado às leituras de t_c , já que, enquanto a cobertura do solo não estava completa, $IAF \geq 2,5$, o aquecimento do solo descoberto entre as fileiras era mensurado pelo sensor.

5.5.1. Condições de alta disponibilidade hídrica no solo

5.5.1.1. Início da fase de crescimento ($IAF < 3$)

Na Figura 22 está apresentado o comportamento médio horário, período diário da radiação solar global (R_g) e do déficit de pressão de vapor (DPV_{ar}), para 161, 162 e 167 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c). Esses dois últimos para a cultura da cana-de-açúcar, variedade RB867515.

Como esperado para região no período final do verão, que vai de 22/12 a 20/03 (75 a 163 DAP), e no início do outono, foi possível perceber uma época chuvosa, maiores temperaturas anuais e uma densidade de fluxo de radiação solar incidente alta (Figuras 10 e 11). Na Figura 22, a densidade de fluxo de radiação solar global (R_g) variou bastante entre os dias avaliados, principalmente devido a presença de nuvens. A R_g foi superior a zero entre 7h e 18h para todos os dias.

Aos 161 DAP, os valores horários estiveram normalmente abaixo de 400 W m^{-2} , com pico de radiação ao meio-dia (600 W m^{-2}) e posterior queda. Aos 162 DAP, a R_g atingiu valores superiores a 1000 W m^{-2} , entre 12h e 13h. Aos 167 DAP, os valores oscilaram bastante e foram inferiores a 600 W m^{-2} na maior parte do dia. Para a região, dias totalmente claros não ocorrem com muita frequência ao longo do ano.

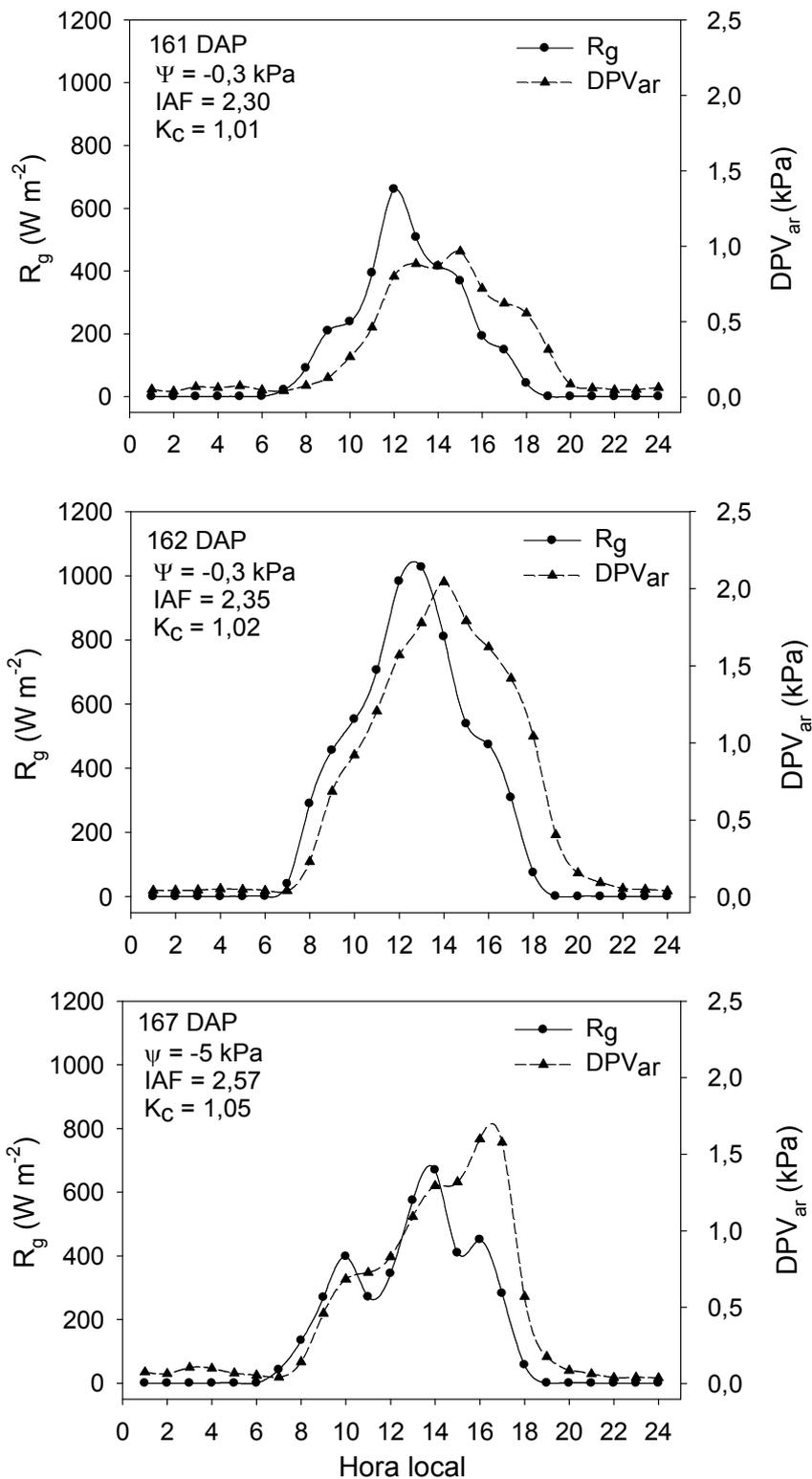


Figura 22 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente.

O DPV_{ar} manteve-se bem próximo a zero durante o período noturno e com tendência a aumentar principalmente nos horários mais quentes do dia. Para todos os dias, o aumento dos níveis de R_g , com conseqüente aumento da t_{ar} (Figura 22) e diminuição da UR_{ar} , resultou no aumento do DPV_{ar} com uma defasagem no tempo geralmente de 1 h. Aos 161 DAP, os valores foram inferiores a 1 kPa; já para 162 DAP, os valores foram superiores a 1,5 kPa nos horários mais quentes do dia. Aos 167 DAP, o pico do DPV_{ar} foi entre 16h e 17h.

Segundo Salisbury e Ross (1994), para maior t_{ar} , a atmosfera é capaz de reter maior quantidade de vapor d'água, e assim a UR_{ar} diminui. O DPV_{ar} é a diferença da quantidade máxima de umidade que o ar pode reter quando está saturado, da quantidade atual de umidade no ar. Maiores valores de DPV_{ar} estão associados a um ar mais seco, facilitando o processo de transpiração, que é decorrente de um gradiente de potencial hídrico entre a câmara estomática e a atmosfera.

Na Figura 23 está apresentado o comportamento horário, período diário da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cultura da cana-de-açúcar, variedade RB867515. Além da temperatura do ar (t_{ar}), para 161, 162 e 167 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

A variação média horária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) esteve fortemente correlacionada à variação da R_g , com os valores mais altos coincidindo com os picos de R_g . Já para a t_{ar} , apesar de estar correlacionada a R_g , a defasagem em relação ao tempo é perceptível na escala horária. A partir do pôr do sol, a t_c tende a decrescer rapidamente e entre 21h e 22h o seu valor é igual ou ligeiramente superior à t_{ar} .

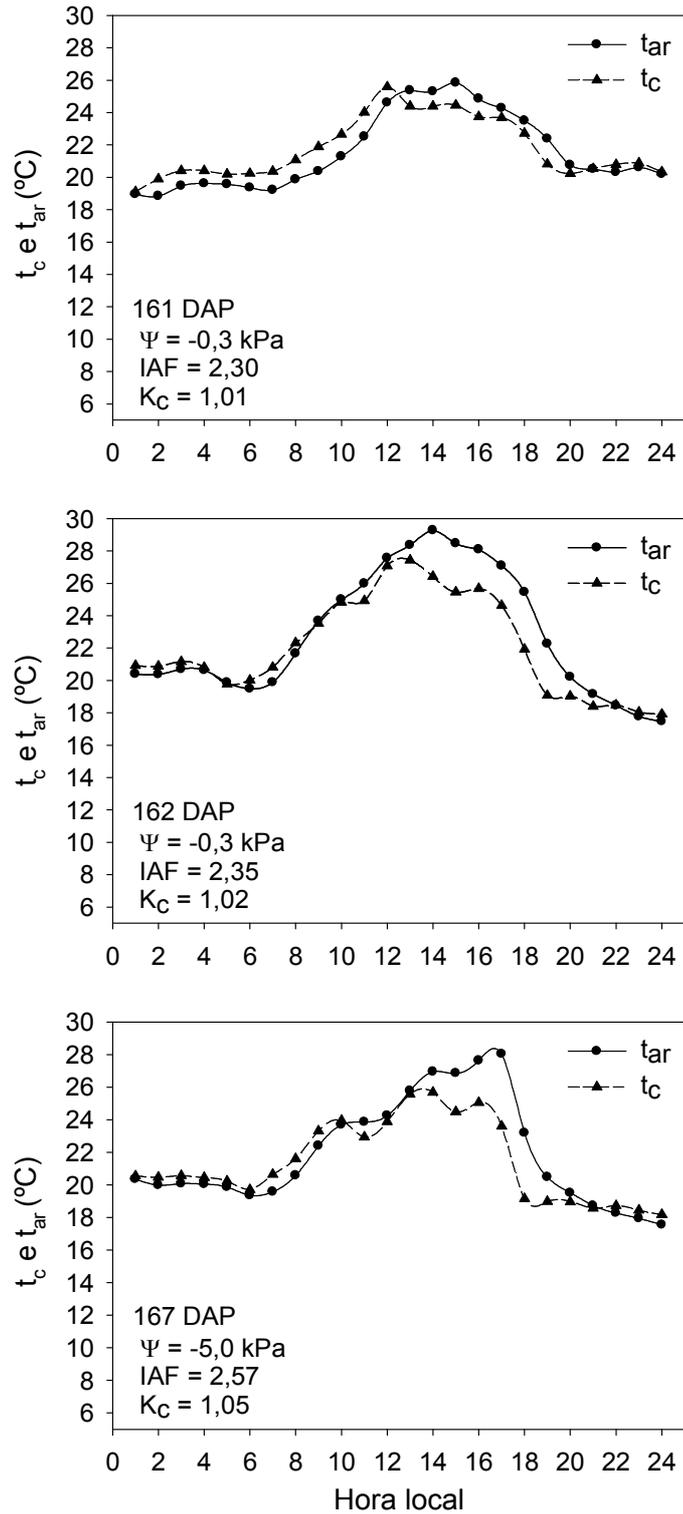


Figura 23 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta e temperatura do ar (t_{ar}), para 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente.

Para uma noite nublada com valores de DPV_{ar} próximos ou iguais a zero, a radiação de onda longa emitida pela superfície (solo + cultura) é absorvida pelo vapor d'água e por outros componentes atmosféricos (gás carbônico, oxigênio, ozônio e poluentes). Parte dela é reemitida para a superfície, gerando um maior aquecimento do dossel vegetativo em relação ao ar circundante, pela transferência de calor sensível da atmosfera para o dossel. Aos 161 DAP a partir de 2h foi possível perceber esse efeito mais proeminente que aos 162 e 167 DAP. Segundo Zolnier et al. (2001), teoricamente, sob condições padrões de estabilidade do ar e sem a presença de R_g e de resfriamento evaporativo, a t_c pode ser igual a do ar.

Durante o período diurno, foi possível observar que a t_c a partir das 10h para 162 e 167 DAP se torna inferior a t_{ar} ; já para 161 DAP, esse efeito somente foi observado a partir das 12h. Esse comportamento foi associado ao aumento de R_g e do DPV_{ar} com maior intensidade e velocidade para os dois últimos dias.

A ausência do estresse hídrico, associada a uma alta demanda atmosférica, fez com que a planta transpirasse potencialmente. Assim, ocorreu um resfriamento evaporativo do vapor de água do dossel vegetativo para a atmosfera circunvizinha.

Khera e Sandhu (1986) conduzindo um experimento de campo com a cultura da cana-de-açúcar no ciclo da cana-soca, para um clima quente e seco do extremo norte Indiano, sobre um solo profundo de boa drenagem e de textura franco arenosa, observaram que a t_c acompanhou a tendência da t_{ar} . Entretanto, os valores foram sempre menores para um mesmo período de 24h. A mesma tendência foi observada por Idso et al. (1981) para um clima árido nos Estados Unidos. Eles observaram que a t_c da abóbora (*Cucurbita pepo* L.) manteve o mesmo comportamento diário relatado pelos primeiros autores.

O comportamento reportado pelos autores esteve associado possivelmente ao clima da região, onde se observa pouca presença de nuvens, baixa umidade relativa e grande amplitude de temperatura do ar entre o dia e a noite, favorecendo o resfriamento foliar noturno. As variedades estudadas também podem influenciar nos resultados. Silva et al. (2007) estudando a tolerância ao estresse hídrico de oito variedades de cana-de-açúcar comerciais

para Texas (EUA), sendo quatro susceptíveis e as outras quatro tolerantes, afirmaram que a temperatura foliar em espécies tolerantes foi relativamente menor, devido a mecanismos que mantêm favorável o *status* hídrico da folha e estômatos mais abertos, havendo manutenção do resfriamento foliar pela transpiração.

Trentin (2010), realizando medições horárias diurnas da t_c para cana-de-açúcar cultivada em um ambiente protegido e em condições de ausência de estresse hídrico, observou comportamento similar ao verificado neste trabalho. Entretanto, o efeito de altas densidades de fluxo de radiação solar não pôde ser tão perceptível.

Wen-Zhong et al. (2007) relacionando a t_c com o conteúdo de água no solo, para a cultura do arroz (variedade: Liaojing 294) na China, observaram que a t_c estava significativamente correlacionada a intensidade luminosa, e para os tratamentos 55, 90 e 175% do conteúdo volumétrico de água no solo a t_c foi menor que t_{ar} .

Na Figura 24 está apresentado o comportamento horário, período diário do diferencial t_c-t_{ar} e da evapotranspiração da cultura (ET_c), em função da cultura da cana-de-açúcar, para 161, 162 e 167 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

O valor de ET_c é resultado da interação das variáveis meteorológicas expressadas por ET_o e do ajuste para a cana-de-açúcar pelo K_c . Vale ressaltar que a evaporação direta no solo é insignificante para dosséis fechados. Assim, observou-se que a ET_c acompanhou a tendência geral da R_g . Os maiores valores horários de ET_c estiveram associados a uma queda no diferencial t_c-t_{ar} , que se manteve negativo até o pôr do sol devido ao ar mais seco com maiores DPV_{ar} , mesmo com a queda de R_g . Quanto mais negativo o valor deste diferencial, maior é a quantidade de energia dissipada na forma de calor latente do dossel para a atmosfera, já que os menores diferenciais foram observados nas horas mais quentes o dia.

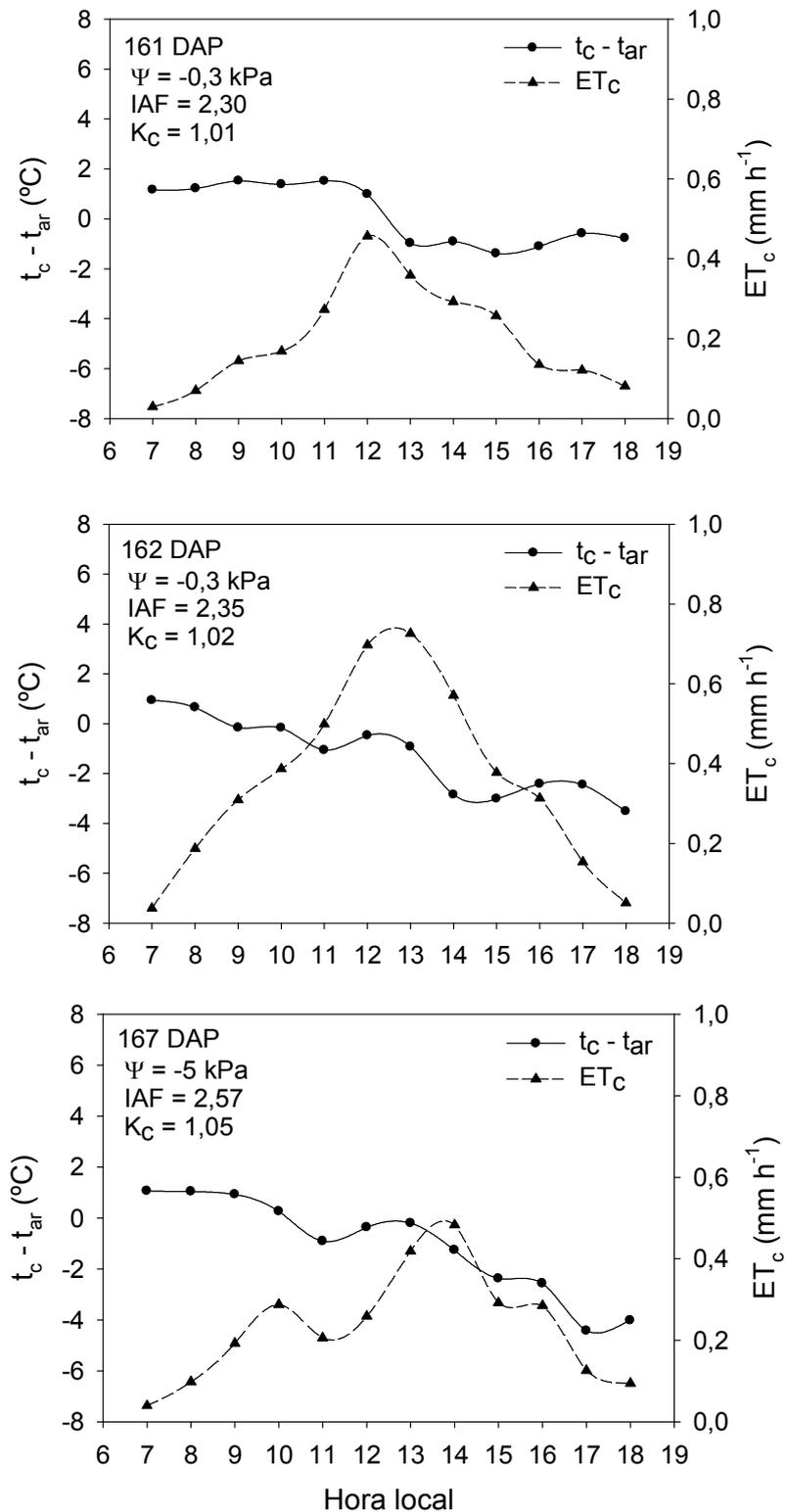


Figura 24 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, em 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado e com potenciais hídricos no solo de -0,3; -0,3; e -5,0 kPa, respectivamente.

Trentin (2010) realizando medições gravimétricas do processo de transpiração, já que o processo de evaporação do substrato era evitado por um filme plástico, obteve picos de transpiração entre 10h e 13h e menores diferenciais de t_c-t_{ar} , principalmente no final da tarde. Khera e Sandhu (1986) verificaram valores de t_c-t_{ar} iguais a $-12,4\text{ }^\circ\text{C}$ e $-11,2\text{ }^\circ\text{C}$ no horário mais quente do dia para a cultura da cana-de-açúcar recebendo 100 e 50% da sua demanda evapotranspirométrica, respectivamente.

Baroomand-Nasab et al. (2005) analisaram a necessidade hídrica da cana-de-açúcar para a cana-planta e cana-soca de segundo corte, para um clima árido no Irã, verificando valores inferiores a $-10\text{ }^\circ\text{C}$ para o diferencial t_c-t_{ar} , com valores de DPV_{ar} superiores a 7 kPa.

Simões et al. (2010) obtiveram para a cana-de-açúcar um valor estatisticamente superior de condutância estomática, para a irrigação por sulco comparada ao gotejamento subsuperficial e superficial sob condições climáticas do semiárido nordestino (Pernambuco), comparando três sistemas de irrigação, sobre um neossolo quartzarênico. Entretanto, apesar de valores visualmente inferiores de temperatura foliar e superiores de fotossíntese e transpiração para a irrigação por sulco, os valores não diferiram estatisticamente, já que não envolvia um controle sem irrigação.

Moreland (1937) utilizou a variedade P.O.J. 213, em Louisiana (EUA), e realizou medições de temperatura foliar com termopares inseridos no limbo foliar ou na nervura principal. O autor observou temperaturas foliares menores que a temperatura do ar somente sob condições nubladas e ventos fortes, ou a partir de amostras destrutivas sob condições nubladas e alta umidade.

Olufayo et al. (1996) utilizando a cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), cultivada em um solo profundo franco argiloso, na França, verificaram que para um comportamento diário do diferencial t_c-t_{ar} a cultura sem estresse hídrico apresentou valores próximos a $0\text{ }^\circ\text{C}$. Ainda, as flutuações diárias destes valores provavelmente estavam relacionadas à variação das condições climáticas diárias, principalmente radiação solar e umidade relativa.

Ajayi e Olufayo (2004), sob as mesmas condições edafoclimáticas do trabalho anterior e também para a cultura do sorgo, constataram que t_c-t_{ar} manteve-se negativo para a maior parte do tempo para a cultura devidamente

irrigada. SanMartin e Acevedo (2001), avaliando o rendimento de genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.), relataram que, para medidas de t_c nos horários mais quentes do dia, $t_c - t_{ar}$ foi mais negativa para o tratamento sem irrigação, sob um clima semiárido no Chile em um solo franco arenoso.

Grantz e Meinzer (1991) concluíram que a resistência estomatal para a cana-de-açúcar é regulada de acordo com a energia disponível para o processo de transpiração, sem, contudo, induzir o aquecimento excessivo das folhas. Assim, as células-guardas do estômato respondem à pressão de vapor no ar circunvizinho e à densidade de fluxo de radiação.

Segundo Taiz e Zeiger (2004), para condições de disponibilidade de água no solo, a planta realiza a abertura dos estômatos durante o período diurno. Isso acontece indiretamente pelo início do processo de fotossíntese que necessita da entrada de CO_2 na folha. Ao anoitecer, a taxa fotossintética cessa e não há demanda por CO_2 . Assim, as aberturas estomáticas tendem a diminuir impedindo a perda desnecessária de água.

5.5.1.2. Limite inferior empírico do diferencial $t_c - t_{ar}$

Vale ressaltar que todas as análises referentes ao estudo da relação do diferencial $t_c - t_{ar}$ em função das variáveis independentes R_g e DPV_{ar} foram realizadas utilizando-se valores de t_c , t_{ar} , DPV_{ar} e R_g , para um nível de R_g superior a 300 W m^{-2} . Al-Faraj et al. (2001) analisaram a cultura da festuca-gigante (*Festuca arundinacea* Schreb.), um tipo de gramínea hibernal exótica e concluíram que a entrada de dados para o cálculo de $IEHC_e$, com dados associados a uma R_g menor que 300 W m^{-2} , fornece valores não acurados para previsão do estresse hídrico da cultura. Isso devido a baixas densidades de fluxo de radiação solar global que podem ser insuficientes para causar a abertura estomatal e manter o resfriamento evaporativo.

A Figura 25 apresenta a variação da diferença $t_c - t_{ar}$ em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), nas diferentes condições de radiação solar global (R_g), valores superiores a 300 W m^{-2} , para 161, 162 e 167 DAP sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente. Nesta figura também estão apresentadas as respectivas equações combinadas

do efeito de R_g e DPV_{ar} sobre t_c-t_{ar} e os coeficientes de determinação ajustados (r^2 aj).

Conforme esperado, o diferencial t_c-t_{ar} esteve bem correlacionado a R_g e ao DPV_{ar} . Durante grande parte do período diurno, t_c-t_{ar} tem uma relação linear para plantas transpirando potencialmente, independente de outros parâmetros ambientais, exceto cobertura por nuvens, assim como proposto por Idso et al. (1981). Em complemento, segundo Zolnier et al. (2001), mesmo que altos valores de DPV_{ar} resultem em um grande resfriamento evaporativo, altos valores de R_g inevitavelmente promovem o aumento na temperatura do dossel.

Aos 161 DAP foi possível notar uma grande concentração dos valores de t_c-t_{ar} em torno dos valores de DPV_{ar} entre 0 e 1,2 kPa. Sob estas condições, o resfriamento evaporativo foi baixo, pois a concentração de vapor d'água na atmosfera era alta. O aumento da t_{ar} nas horas mais quentes, com DPV_{ar} em torno de 1 kPa, mesmo com R_g menor que 500 W m^{-2} , provocou um resfriamento evaporativo já que a diferença t_c-t_{ar} reporta valores menores que zero. Segundo a equação para cada aumento de 100 W m^{-2} em R_g , tem-se um aumento superior de $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ em t_c-t_{ar} , enquanto que para o aumento de 1 kPa no DPV_{ar} há uma diminuição de $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ nesta diferença.

Segundo Idso et al. (1981) cada cultura tem sua única e própria equação. Idso (1982), sob condições de um clima árido, comparou os parâmetros de ajuste da equação clássica de t_c-t_{ar} em função do DPV_{ar} para dias de céu claro e nublado. Verificou que somente para uma variedade de abóbora (*Cucurbita pepo* L.) a inclinação da linha de regressão foi maior para condições de céu nublado do que céu claro. Os valores de R_g não foram citados; mesmo sob condições nubladas, o DPV_{ar} alcançou valores superiores a 5 kPa.

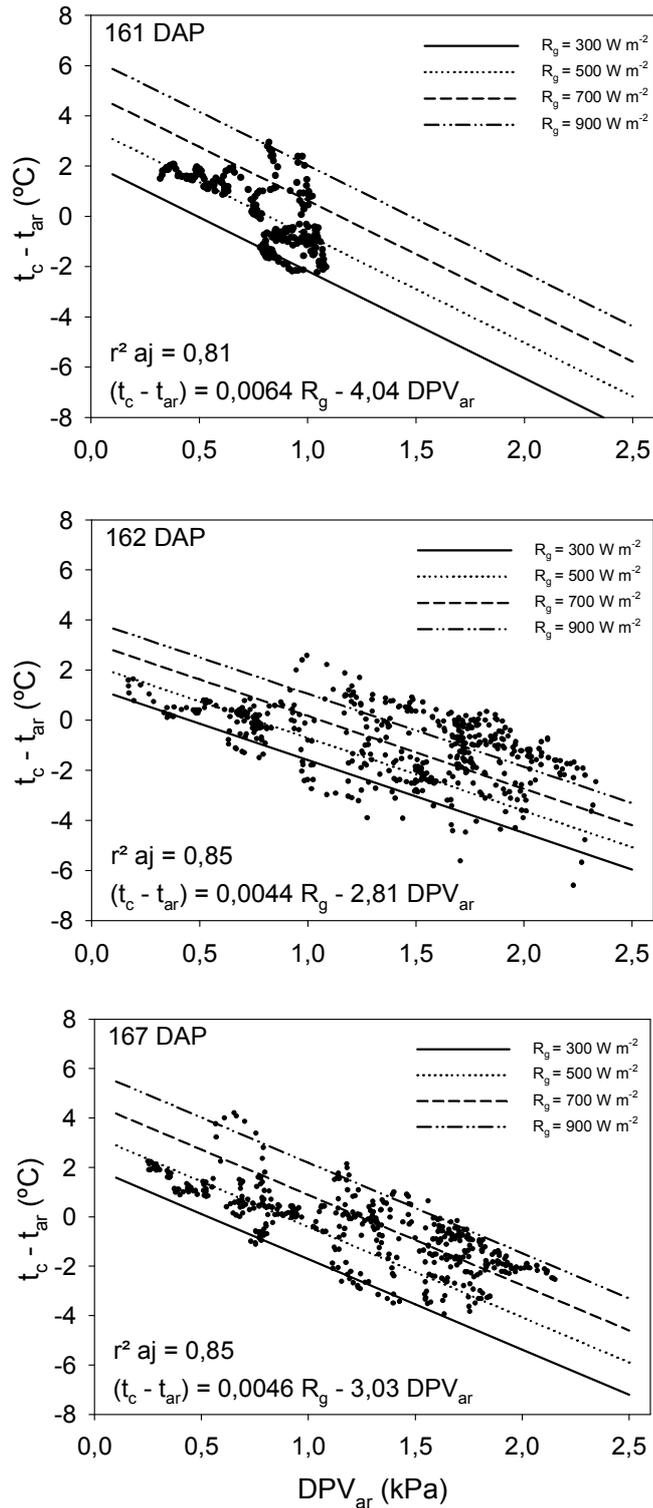


Figura 25 - Diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 161, 162 e 167 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, ausência de estresse hídrico, sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente.

Aos 162 DAP foi possível notar uma grande dispersão dos valores de t_c-t_{ar} em função da variação no R_g e no DPV_{ar} . Olufayo et al. (1996) observaram o mesmo comportamento e afirmaram que tal dispersão diária provavelmente está relacionada às variações das condições meteorológicas, principalmente radiação solar e umidade relativa. Segundo a equação, para cada aumento de 100 W m^{-2} em R_g , tem-se um aumento superior a $0,4^\circ\text{C}$ em t_c-t_{ar} , enquanto que para um aumento de 1 kPa no DPV_{ar} há uma diminuição de $2,8^\circ\text{C}$ nesta diferença. Segundo Idso (1982), para climas úmidos como o da região do presente trabalho, o estabelecimento de uma linha-base inferior com devida acurácia é um desafio para os pesquisadores, já que há uma necessidade de ter-se um amplo intervalo de DPV_{ar} .

Khera e Sandhu (1986) encontraram valores bem dispersos de t_c-t_{ar} para a cana-de-açúcar, porém com DPV_{ar} entre 2 e 6 kPa , uma inclinação de $-0,24$ e $r^2 = 0,83$. Baroomand-Nasab et al. (2005) verificaram a mesma tendência, e encontraram uma inclinação igual a $-0,012$ (em kPa), $r^2=0,86$; com o DPV_{ar} variando de 3 a 10 kPa .

Inman-Bamber e Jager (1986) obtiveram valores bem dispersos, verificando uma inclinação de $-4,00$ e $r^2=0,64$; uma variação no DPV_{ar} de 0 a 2 kPa , faixa considerada normal para o cinturão costeiro de cana-de-açúcar na África do Sul. Lebourgeois et al. (2010) encontraram uma grande flutuação nos valores de t_c-t_{ar} medidos entre $13\text{h}30\text{min}$ e 14h devido a grandes variações na cobertura de nuvens e umidade. Entretanto, o intervalo de DPV_{ar} ficou entre $0,5$ e $2,1 \text{ kPa}$, mesmo durante cinco meses de medições. A inclinação da linha encontrada foi de $-1,77$ e $r^2=0,67$.

Trentin (2010) observou valores de DPV_{ar} entre 0 e $3,2 \text{ kPa}$, porém com uma densidade de fluxo de radiação solar inferior aos verificados nesse trabalho já que se tratava de um ambiente protegido. Utilizando a mesma metodologia proposta neste trabalho para a determinação da linha-base inferior, encontrou um coeficiente de $0,01$ e uma inclinação de $-3,32$ com $r^2=0,61$. Os valores da inclinação da linha-base inferior para regiões úmidas estiveram próximos aos valores encontrados neste trabalho. Pode-se concluir que para a cultura da cana-de-açúcar em climas áridos, onde a UR_{ar} é muito

baixa associada a altas t_{ar} durante o dia, a resposta a variação do DPV_{ar} é muito menor do que para regiões úmidas.

Sob condições de clima úmido, Olufayo et al. (1996) e Ajayi e Olufayo (2004) encontraram inclinações iguais a $-2,51$ ($r^2=0,74$) e $-1,88$ ($r^2= 0,91$), respectivamente, ambos para a cultura do sorgo na França. Cárcova et al. (1998) encontraram uma inclinação igual a $-1,78$ ($r^2=0,80$) para a cultura do milho (*Zea mays* L.) em solo franco argilo-siltoso na Argentina. Kar e Kumar (2010), também para a cultura do milho, verificaram um valor de inclinação igual a $-1,103$ (r^2 não reportado), na Índia (região subtropical).

Sob condições de um clima árido ou semiárido, Carrow (1989) determinou a linha-base inferior para três espécies de gramíneas. Os valores encontrados foram $-1,25$ ($r=-0,50$), $-1,41$ ($r=-0,55$) e $-0,86$ ($r=-0,40$) para as espécies *Cynodon dactylon* L. Pears, *Zoysia japonica* e *Eremochloa ophiuroides*, respectivamente, nos Estados Unidos. SanMartin e Acevedo (2001) reportaram o valor de $-0,276$ ($r= -0,75$) para o trigo em fase vegetativa, no Chile. Irmak et al. (2000) encontraram para o milho o valor de $-0,86$ ($r^2=0,92$), sobre um solo argiloso, na Turquia. Emekli et al. (2008) reportaram para a grama-bermuda (*Cynodon dactylon* L.) o valor de $-1,061$ ($r^2= 0,97$), sobre um solo franco argiloso na Turquia. Dagdelen et al. (2008), utilizando milho híbrido (Pioneer 3394) durante dois anos de cultivo, observaram os valores de $-2,18$ ($r^2=0,89$) e $-2,51$ ($r^2=0,96$) para os anos de 2003 e 2004, respectivamente, também na Turquia, embora os valores encontrados para esse tipo de região são geralmente menores ou bem próximos a -1 .

Aos 167 DAP, os parâmetros associados a R_g e a DPV_{ar} estiveram entre os valores encontrados para 161 e 162 DAP. Segundo a equação, para cada aumento de 100 W m^{-2} em R_g , tem-se um acréscimo superior a $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ em t_c-t_{ar} . Enquanto para o aumento de 1 kPa no DPV_{ar} há uma diminuição de $3,0 \text{ }^\circ\text{C}$ nesta diferença. Jackson et al. (1982), comparando as linhas-base inferiores entre a metodologia empírica e teórica, concluíram que dias de cobertura intermitente de nuvens devem ser excluídos de análises diárias. Sendo assim propõe-se optar, em análises utilizando conjuntamente mais de um dia de medição, pelos dias totalmente claros ou nublados, ventos fracos e um largo intervalo de DPV_{ar} .

5.5.1.3. Fase de crescimento (IAF>3)

Na Figura 26 está apresentado o comportamento horário, o período diário da radiação solar global (R_g) e o déficit de pressão de vapor (DPV_{ar}), para 184, 186 e 188 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

Com a chegada do outono (20/03 ou 163 DAP) no início do mês de abril, foi possível notar o fim do período chuvoso, a diminuição das temperaturas médias diárias e a menor densidade acumulada diária de fluxo de radiação solar incidente (Figura 11). Como pode ser visto na Figura 26, a densidade de fluxo de radiação solar global (R_g) variou significativamente entre os dias avaliados. Isso se deve principalmente pela presença de nuvens, apesar da R_g ter continuado maior que zero entre 7h e 18h no horário local para todos os dias, ela não atinge médias horárias tão altas quanto no primeiro período avaliado.

Aos 184 DAP os valores horários estiveram geralmente abaixo de 400 W m^{-2} , com pico de radiação às 13h, acompanhado de uma posterior queda e manutenção de valores inferiores a 400 W m^{-2} durante o resto do dia. Aos 186 DAP a R_g chegou a valores máximos inferiores a 800 W m^{-2} , entre 11 h e 13 h. Essa inferioridade é da ordem de 300 W m^{-2} quando comparada ao período anterior (161, 162 e 167 DAP). Aos 188 DAP os valores oscilaram consideravelmente, com valores inferiores a 600 W m^{-2} , com exceção de um pico às 13h.

O DPV_{ar} manteve-se bem próximo de zero durante o período noturno e com tendência a aumentar principalmente nos horários mais quentes do dia. Para todos os dias, o aumento dos níveis de R_g , com consequente aumento da t_{ar} (Figura 26) e diminuição da UR_{ar} , resultou no acréscimo do DPV_{ar} com uma defasagem no tempo superior a 1 h. Aos 184 DAP os valores foram inferiores a 1,5 kPa. Já para 186 DAP os valores tenderam a serem superiores a este valor principalmente no final da tarde. Aos 188 DAP o pico do DPV_{ar} foi entre 14 h e 16 h.

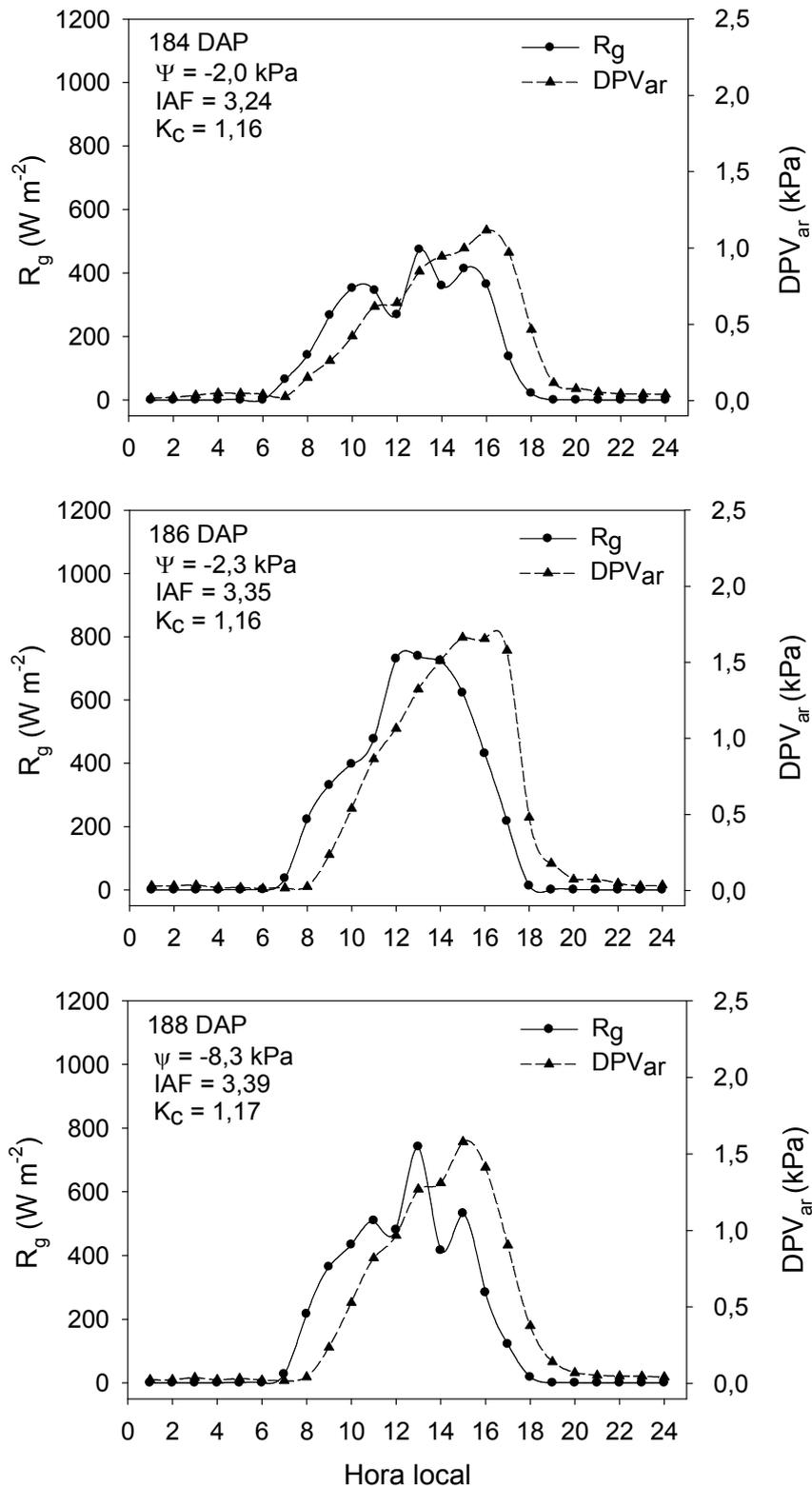


Figura 26 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente.

Na Figura 27 estão apresentados o comportamento horário, o período diário da temperatura do dossel vegetativo (t_c) e a temperatura do ar (t_{ar}), para 184, 186 e 188 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

Novamente, a variação média horária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) esteve fortemente correlacionada à variação da R_g , com os valores mais altos coincidindo com os picos de R_g . A defasagem em relação ao tempo é perceptível na escala horária para t_{ar} , apesar de estar correlacionada a R_g . A partir do pôr do sol, a t_c tende a decrescer rapidamente e entre 21 e 22 h o seu valor é igual ou ligeiramente superior do que t_{ar} , a não ser para 188 DAP que esse efeito ocorreu após as 24h.

Considerando o dossel com maiores valores de IAF, a energia interceptada pelas folhas é superior e o fluxo de calor no solo é menor. Assim a energia armazenada no dossel vegetativo para estas condições gerou t_c superiores a t_{ar} durante a madrugada em comparação ao período anterior. Segundo Inman-Bamber e Smith (2005), para IAF maiores que 3 para a cultura da cana-de-açúcar, pelo menos 92% da radiação solar fotossinteticamente é interceptada. Conforme observado por Silva et al. (2011), o aumento do valor de IAF e a quantidade de radiação associada ao BOL apresentam tendência decrescente (menos negativa). Ainda, há maior retenção de energia pelo dossel da cultura e, conseqüentemente, menor incidência de radiação sobre a superfície do solo.

Durante o período diurno foi possível observar que a t_c se torna inferior a t_{ar} a partir das 14h, 13h e 11h para 184, 186 e 188 DAP, respectivamente. Esse efeito pode ser explicado pelo comportamento da R_g , t_{ar} , e UR_{ar} (estas duas últimas variáveis sob a forma de DPV_{ar}). Uma menor densidade de fluxo de R_g gerou um menor aquecimento do ar. Assim sua capacidade de reter vapor d'água diminuiu provocando menores valores de DPV_{ar} . Para as condições de 184 e 186 DAP, a diminuição de t_c em relação à t_{ar} ocorreu uma hora mais cedo se comparados ao período anterior, porém na mesma hora para 188 DAP.

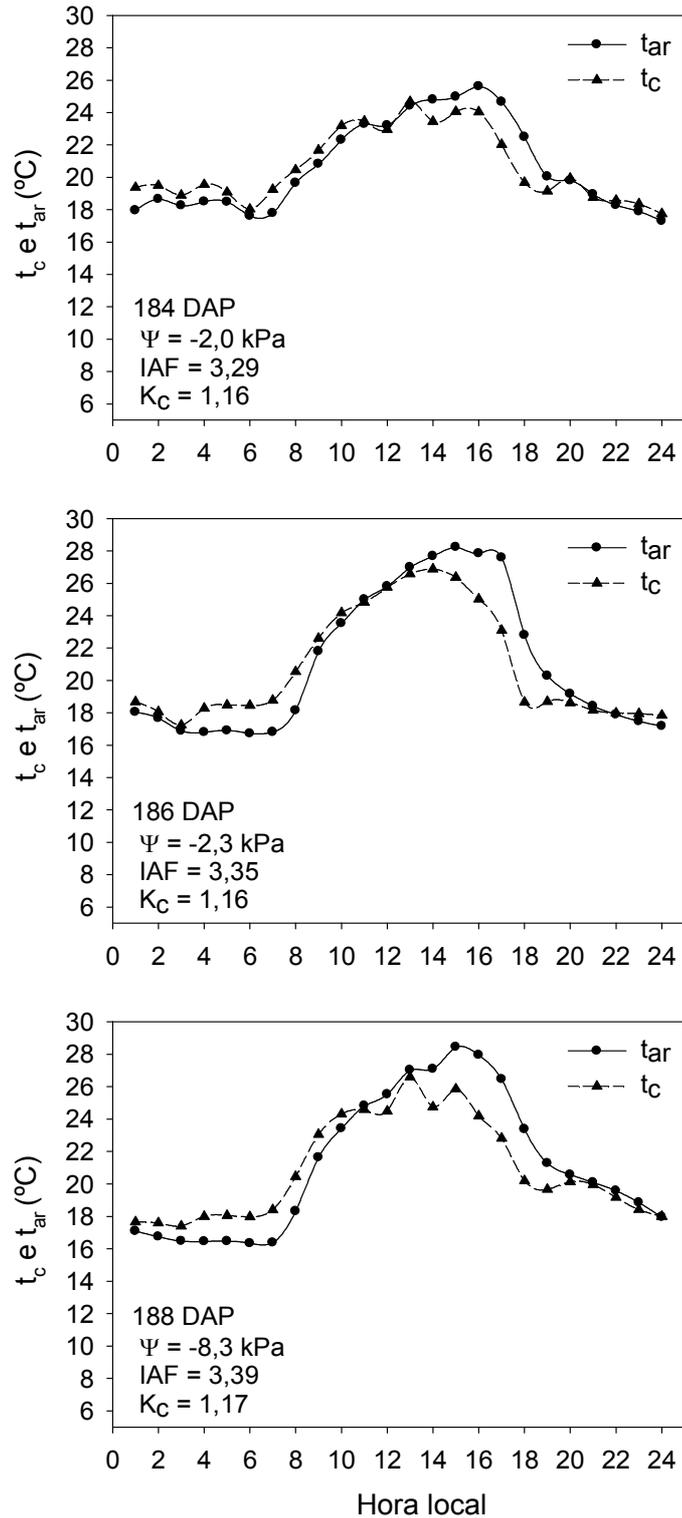


Figura 27 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da canaplanta e temperatura do ar (t_{ar}), para 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente.

Na Figura 28 está apresentado o comportamento horário, período diário do diferencial t_c-t_{ar} e da evapotranspiração da cultura (ET_c) para a cultura da cana-de-açúcar, variedade RB867515, para 184, 186 e 188 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

Novamente observou-se que a ET_c acompanhou a tendência geral da R_g e do DPV_{ar} . Os maiores valores horários de ET_c estiveram associados a uma queda no diferencial t_c-t_{ar} . Estes mantiveram um diferencial negativo até o pôr do sol devido ao ar mais seco com maiores DPV_{ar} , mesmo com a queda de R_g . Segundo Kar e Kumar (2010), o fluxo de calor latente (LE) é a transferência de energia ocasionada pela evaporação (transpiração para as plantas) ou condensação, sendo o componente mais importante do balanço de energia para o manejo da irrigação. Observaram, ainda, que o LE foi muito dependente do IAF e do conteúdo de água no solo, e que os máximos valores deste parâmetro analisado diariamente estão associados a valores de IAF máximos, para o milho cultivado em um solo franco argiloso.

Apesar da maior demanda de água pela planta (ET_c), relacionado a um maior IAF, a t_c-t_{ar} não tendeu a ser mais negativa quando comparada ao período anterior. Isso se deve a uma menor demanda evapotranspirométrica da atmosfera (ET_o) para este período (Figura 11).

Silva et al. (2011) concluíram que a maior parte da energia disponível na interface cultura/atmosfera é destinada ao LE para a cana-de-açúcar (RB92579) irrigada sob condições climáticas do semiárido brasileiro em um solo argiloso. Ruhoff et al. (2009) afirmaram que o processo de evapotranspiração para a cana-de-açúcar em São Paulo foi comandado por três componentes que explicam 82% da variância dos dados: i) variação da oferta de energia, R_g e R_n ; ii) circulação atmosférica local, que regula as precipitações e umidade do ar; e iii) condições da vegetação que apresentam modificações significativas com alternância de estações.

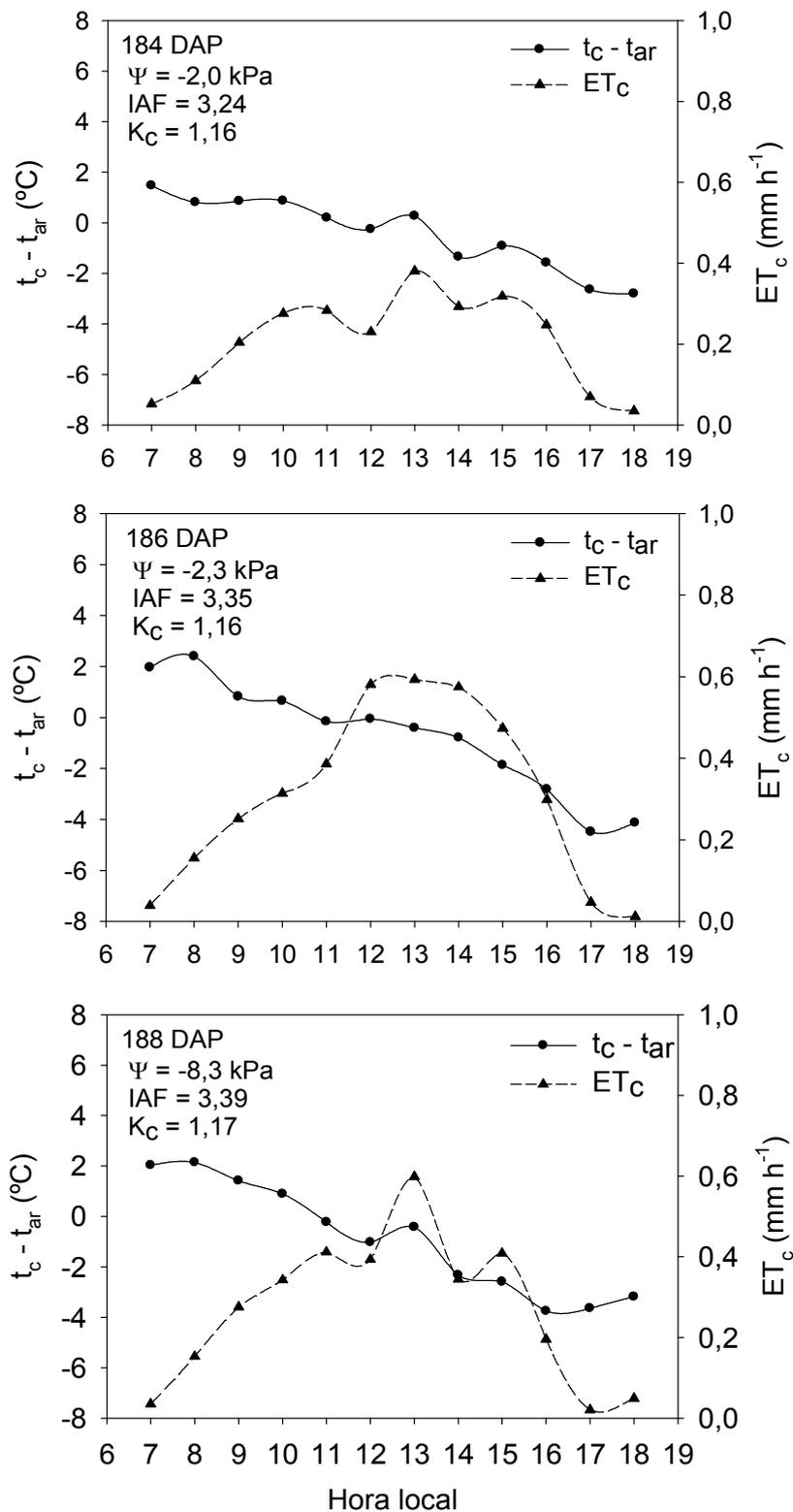


Figura 28 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$), para 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado e com potenciais hídricos no solo de -2,0; -2,3; e -8,3 kPa, respectivamente.

5.5.1.4. Limite inferior empírico do diferencial t_c-t_{ar}

A Figura 29 apresenta a variação da diferença t_c-t_{ar} em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para diferentes condições de radiação solar global (R_g), valores superiores a 300 W m^{-2} , para 184, 186 e 188 DAP sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente. Nesta figura também estão apresentadas as respectivas equações combinadas do efeito de R_g e DPV_{ar} sobre t_c-t_{ar} e os coeficientes de determinação ajustados.

Novamente foi possível notar que o diferencial t_c-t_{ar} esteve bem correlacionado a R_g e ao DPV_{ar} . Os maiores valores dos coeficientes de determinação ajustados (r^2_{aj}) mostraram que a variância em t_c-t_{ar} foi mais bem explicada pelas variáveis independentes, para as condições da cultura e meteorológicas neste período.

Aos 184 DAP foi possível notar uma grande concentração dos valores de t_c-t_{ar} em torno dos encontrados para DPV_{ar} , entre 0 e 1,2 kPa. Foi observado um dia tipicamente nublado com uma estreita faixa de R_g , com grande parte dos valores inferiores a 500 W m^{-2} . Segundo a equação, para cada aumento de 100 W m^{-2} em R_g , tem-se um aumento superior a $0,7^\circ\text{C}$ em t_c-t_{ar} . Ainda, o aumento de 1 kPa no DPV_{ar} mostrou uma diminuição de $3,8^\circ\text{C}$ nesta diferença. Isso provocou mudanças, quando comparada a equação 161 DAP, na resposta de t_c-t_{ar} principalmente devido ao DPV_{ar} .

Para 186 DAP de acordo com a equação, para cada aumento de 100 W m^{-2} em R_g , tem-se um aumento inferior a $0,6^\circ\text{C}$ em t_c-t_{ar} . Para o aumento de 1 kPa no DPV_{ar} há uma diminuição de $3,2^\circ\text{C}$ nesta diferença. Assim, a resposta de t_c-t_{ar} mudou em relação a R_g e DPV_{ar} , e os valores observados foram maiores comparados a 162 DAP.

Aos 188 DAP os parâmetros associado a R_g estiveram entre os valores encontrados para 184 e 186 DAP e o associado ao DPV_{ar} foi maior. De acordo com a equação para cada aumento de 100 W m^{-2} em R_g , tem-se um aumento superior a $0,6^\circ\text{C}$ em t_c-t_{ar} . Já para um aumento de 1 kPa no DPV_{ar} há uma diminuição de $3,9^\circ\text{C}$ nesta diferença, e foi o maior valor para o período.

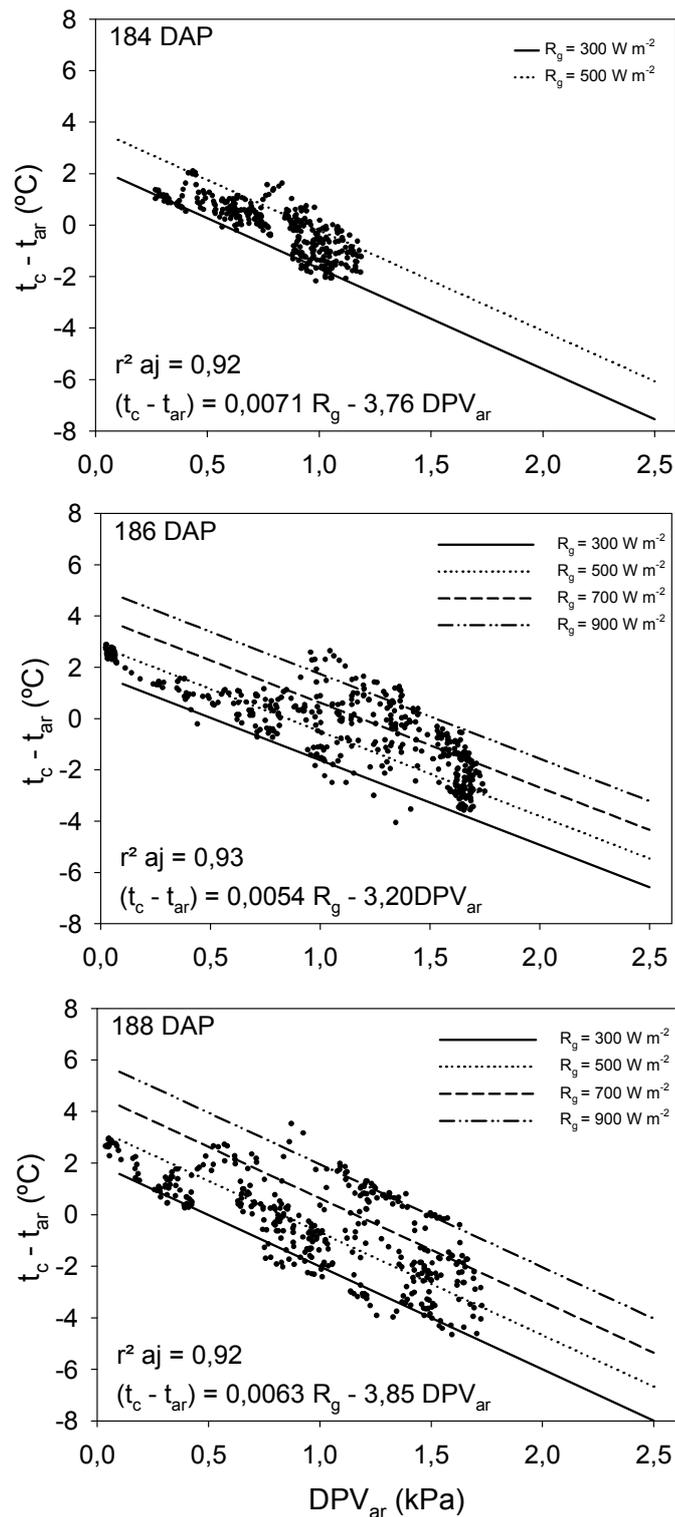


Figura 29 - Diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 184, 186 e 188 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, sob ausência de estresse hídrico e sob condições de céu nublado, claro e parcialmente nublado, respectivamente.

A resposta de t_c-t_{ar} foi praticamente igual e maior para R_g e DPV_{ar} , respectivamente, em relação aos 167 DAP.

A concentração de valores próximos a 2°C para t_c-t_{ar} e 0 kPa para DPV_{ar} , para os dias 186 e 188 DAP, foi observada devido ao efeito das baixas R_g e DPV_{ar} . No início da manhã (principalmente manhãs ensolaradas), o início do processo fotossintético é iminente e há alta umidade relativa do ar. Como a planta havia armazenado CO_2 no poro estomático e não ocorreu fotossíntese durante a noite, ela utiliza este gás e evita a perda de água por transpiração. À medida que a quantidade de gás diminui, os poros estomáticos se abrem e a entrada de CO_2 é acompanhada pelo resfriamento foliar provocado pela transpiração.

Neste trabalho foi possível obter seis equações da linha-base inferior (LBI) para a cultura da cana-de-açúcar no ciclo da cana-planta sob condições de sequeiro, em função da R_g e DPV_{ar} , para diferentes condições meteorológicas e IAF. A transformação destas equações na equação clássica proposta por Idso et al. (1981) torna-se simples, bastando substituir o valor de R_g no momento da medição da t_c . Ao considerarmos dois extremos, um dia típico de céu claro (162 DAP) e um de céu nublado (184 DAP), pode-se simular um dia de céu claro e nublado com valores de R_g aproximadamente iguais a 800 e 300 W m^{-2} ($R_n = 0,75.R_g$), respectivamente, como proposto por Jackson et al. (1981) para estimar uma LBI teórica. Assim, os pontos de interceptação do eixo das ordenadas (t_c-t_{ar}) seriam 3,52 e 2,13 para a cana-de-açúcar sem estresse hídrico, sob dias típicos de céu claro e nublado, respectivamente.

Trentin (2010) encontrou um parâmetro associado a R_g igual a 0,01; novamente substituindo por 800 e 300 W m^{-2} , obtém-se os valores de 8,00 e 3,00, respectivamente. Para encontrar tal parâmetro, utilizaram-se três dias de medições horárias diárias, sob condições descritas de céu parcialmente nublado, em casa de vegetação.

Sob condições de clima úmido, os seguintes autores encontram os seus respectivos valores de interceptação para condições típicas de céu claro. Inman-Bamber e Jager (1986) encontraram o valor de 4,14 para a cana-de-açúcar. Lebourgeois et al. (2010) encontraram o valor de 2,33 para um número de observações (N) igual a 8, para a mesma cultura anterior. Olufayo et al.

(1996) e Ajayi e Olufayo (2004) observaram interceptações iguais a 3,76 (N=25) e 4,00 (N=91), respectivamente, ambas para a cultura do sorgo. Cárcova et al. (1998) encontraram um valor igual a 2,95 (N=30) para a cultura do milho. Kar e Kumar (2010), também para a cultura do milho, observaram um valor de inclinação igual -3,77.

Sob condições de clima árido ou semiárido, Khera e Sandhu (1986) encontraram, para a cana-de-açúcar, o valor de 2,62. Baroomand-Nasab et al. (2005) obtiveram o valor de 0,52 também para a cana-de-açúcar. Carrow (1989), trabalhando com três espécies de gramíneas, encontrou 5,74 (N=37), 6,26 (N=39) e 4,69 (N=38) para as espécies *Cynodon dactylon* L. Pears, *Zoysia japonica* e *Eremochloa ophiuroides*, respectivamente. SanMartin e Acevedo (2001) reportaram o valor de 1,16 para o trigo em fase vegetativa. Irmak et al. (2000) encontraram para o milho o valor de 1,39 (N=28). EMEKLI et al. (2008) citaram para a grama-bermuda (*Cynodon dactylon* L.) o valor de 0,86. Dagdelen et al. (2008), utilizando o milho híbrido (Pioneer 3394) durante dois anos de cultivo, observaram os valores de 2,90 e 3,22 para os anos de 2003 e 2004, respectivamente. Esses resultados mostram que para regiões de clima úmido e árido/semiárido os valores variam significativamente.

Assim, para a cultura da cana-de-açúcar no ciclo da cana-planta sob condições de sequeiro e ausência de estresse hídrico, os efeitos combinados de R_g e DPV_{ar} sobre o diferencial $t_c - t_{ar}$ foram fornecidos pelos parâmetros de regressão linear (Tabela 5).

Conforme proposto por Jackson et al. (1981), as principais fontes de erro associadas à metodologia utilizada neste trabalho seriam: vento, nebulosidade e erros associados ao instrumento de medição. Porém, vários autores reportaram as dificuldades e as variações encontradas na determinação da linha-base inferior confrontando seus resultados com os encontrados na literatura. Eles atribuíram as diferenças a tais fatores como as condições meteorológicas, tipo de solo, diferentes culturas ou variedades da mesma (CARROW, 1989; IRMAK et al., 2000; EMEKLI et al., 2007; DAGDELEN et al., 2008). Em relação ao último fator, porém, Cárcova et al. (1998) concluem que não houve diferenças na linha-base inferior para 3 variedades de milho testadas.

Tabela 5 - Resultados das análises de regressão linear de t_c-t_{ar} versus R_g e DPV_{ar} .

DAP	Condições (céu)	N*	a	b	r^2 aj	$S_{t_c-t_{ar}}$	S_a	S_b
161	Nublado	277	0,0064	-4,04	0,81	0,61	0,0002	0,1192
162	Claro	483	0,0044	-2,81	0,85	0,56	$6,09.e^{-5}$	0,0323
167	P. nublado	445	0,0046	-3,03	0,85	0,60	0,0001	0,0593
184	Nublado	340	0,0071	-3,76	0,92	0,28	0,0001	0,0584
186	Claro	459	0,0054	-3,20	0,93	0,46	$8,59.e^{-5}$	0,0418
188	P. nublado	380	0,0063	-3,85	0,92	0,54	0,0001	0,0581

* N = número de observações, a = parâmetro associado a R_g , b = parâmetro associado a DPV_{ar} , r^2 aj = coeficiente de determinação ajustado a N, $S_{t_c-t_{ar}}$ = erro padrão da estimativa de t_c-t_{ar} por R_g e DPV_{ar} , S_a = erro padrão do parâmetro a, S_b = erro padrão do parâmetro b, para a regressão linear $t_c-t_{ar} = a R_g - b DPV_{ar}$, com t_c , t_{ar} , R_g e DPV_{ar} expressos em °C, °C, $W m^{-2}$ e kPa. Para todas as análises $P < 0,0001$.

Olufayo et al. (1996) citam a importância de se dividir em classes a radiação solar global e a velocidade do ar. Entretanto, as classes de R_g não foram apresentadas. Apesar disso, Olufayo et al. (1996) e Ajayi e Olufayo (2004), ambos trabalhando com a cultura do sorgo na França, concluem que a dispersão dos dados na representação da LBI foi pouco representada pela R_g . Provavelmente porque a maioria dos dados diminuiu dentro de um estreito intervalo de altos valores de radiação, obtidos pelos autores em suas medições.

Idso (1982) apresentou resultados das regressões lineares para a LBI de 26 diferentes espécies e em diferentes condições meteorológicas e adicionou um novo fator aos resultados obtidos, que até então não era considerado uma variante. Assim, reportou a importância da diferenciação entre a fase vegetativa e reprodutiva para as culturas do trigo (*Triticum durum* Desf.) e cevada (*Hordeum vulgare* L.). Foi observado um efeito devido a baixa taxa de ET_c , para a fase reprodutiva, já que as partes reprodutivas absorvem a energia radiante e convertem em calor sensível, e ainda provê uma barreira aerodinâmica contra a transferência de calor sensível para a superfície transpirante.

Silva (2009) reportou que o requerimento de água pela cultura da cana-de-açúcar está ligado ao IAF. Sadler et al. (2000), estudando o uso da água em

milho, percebeu que, para três diferentes variedades, o comportamento do K_c foi hiperbólico e que os maiores valores estiveram relacionados à IAF maiores. Em complemento, Jackson et al. (1981) observaram, em trigo, que a senescência foliar mesmo sob irrigação ou precipitação tem pequeno efeito na transpiração da planta, e, portanto, na temperatura foliar. Sacks e Kucharik (2011), estudando o balanço de energia, evapotranspiração e rendimento da cultura do milho em uma série climática de 25 anos, observaram que o LE aumentou e H diminuiu, considerando maiores valores de área foliar verde.

5.5.2. Condições de redução da disponibilidade hídrica no solo

5.5.2.1. Resposta da temperatura do dossel vegetativo às condições meteorológicas e à redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 120$ kPa)

Na Figura 30 está apresentado o comportamento horário, o período diário da radiação solar global (R_g) e o déficit de pressão de vapor (DPV_{ar}), para 219, 223 e 227 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

Como no período anterior, o comportamento do DPV_{ar} em relação a R_g , teve a mesma tendência, e assim uma densidade de fluxo de radiação solar global da ordem de 400 W m^{-2} , para condições de céu nublado e picos máximos próximos a 800 W m^{-2} , para céu claro. Valores médios horários superiores a 0 W m^{-2} ocorreram neste período entre 8 h e 17h; dessa forma, este comportamento remeteu a dias mais curtos.

Na Figura 31 estão apresentados o comportamento horário, o período diário da temperatura do dossel vegetativo (t_c) e a temperatura do ar (t_{ar}), para 219, 223 e 227 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

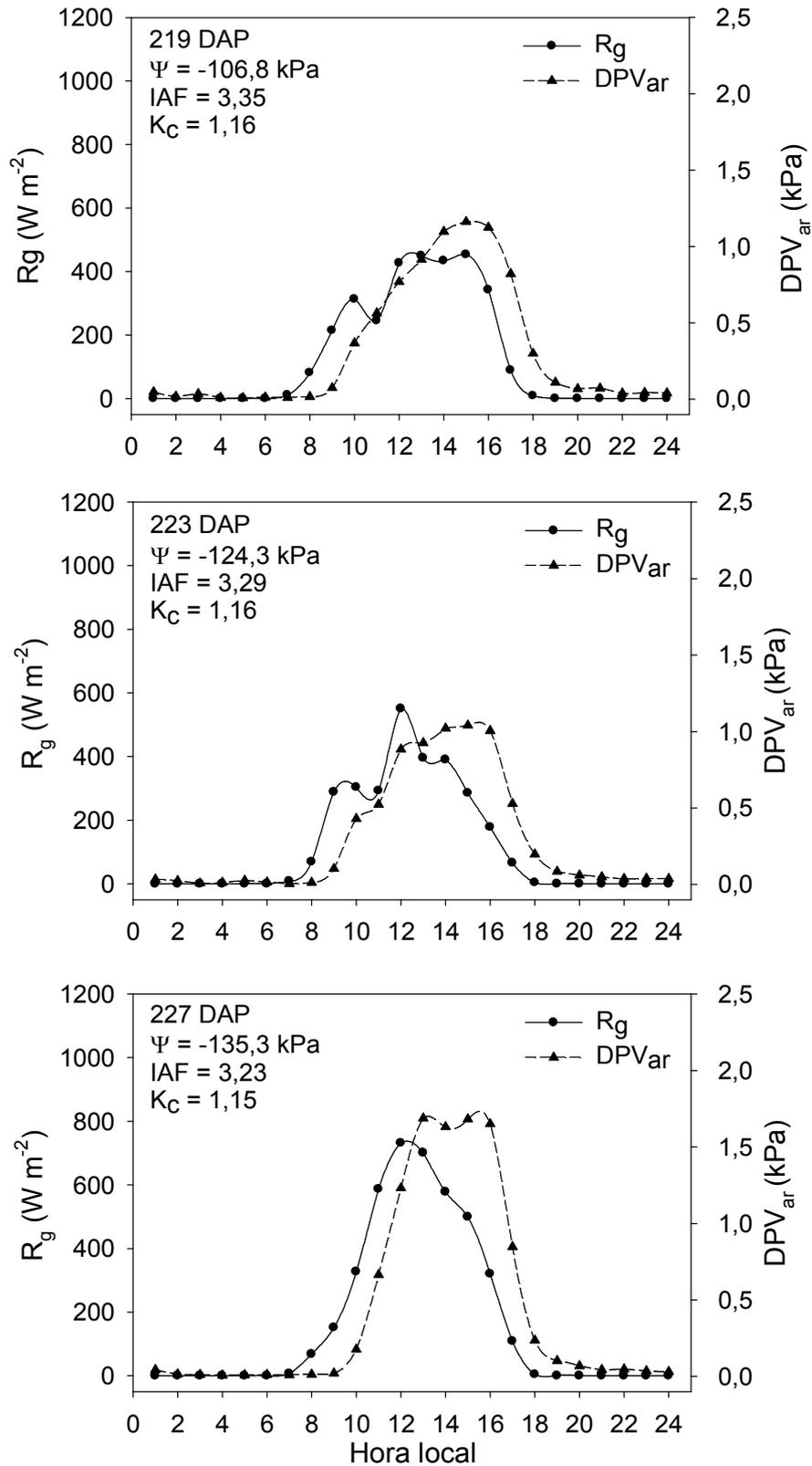


Figura 30 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente.

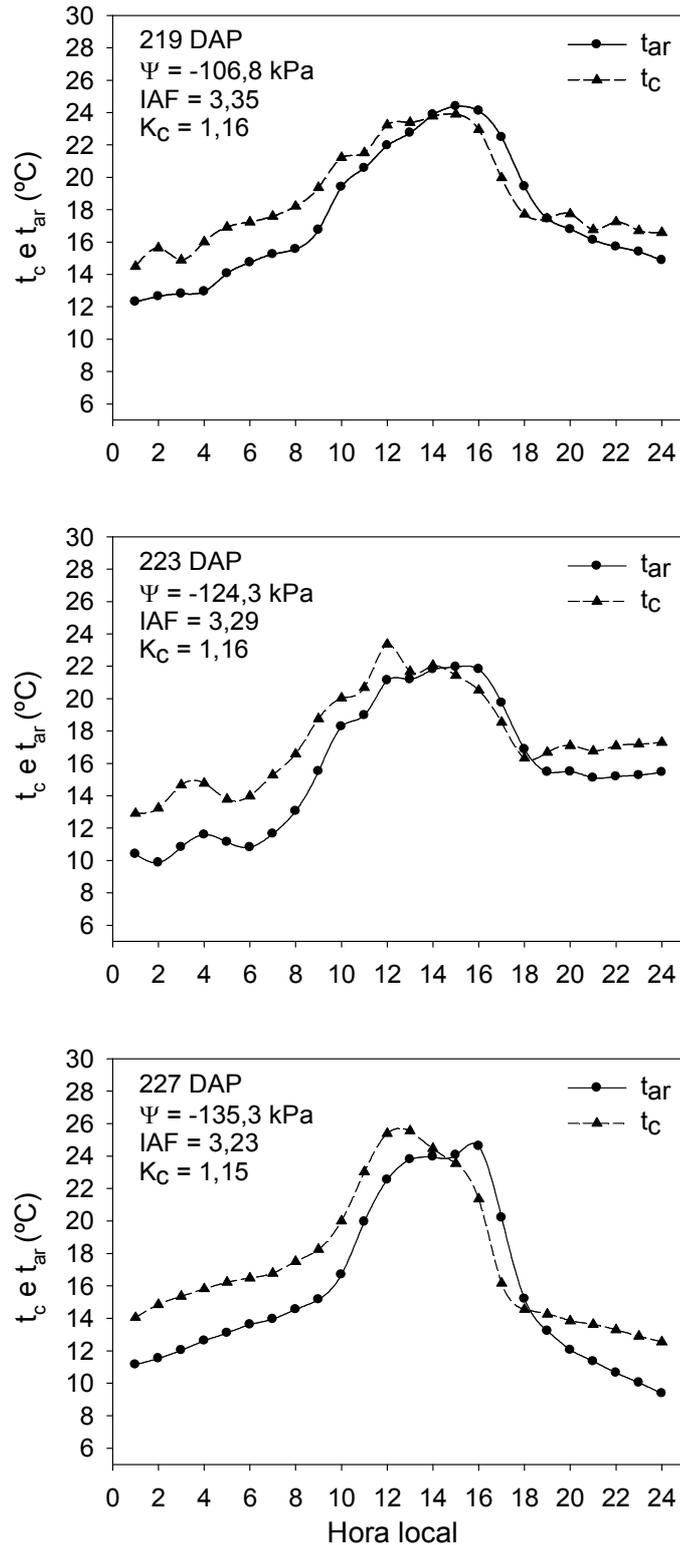


Figura 31 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta e temperatura do ar (t_{ar}), para 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente.

Em consequência da menor disponibilidade hídrica no solo, o efeito do resfriamento foliar (menor t_c em relação à t_{ar}) foi mais atrasado em uma escala diária, e este foi perceptível para os três dias somente após as 15 h. Os valores de t_c menores que t_{ar} coincidem para os três dias com os valores máximos do DPV_{ar} , e uma queda acentuada da R_g . Como pode ser visto na Figura 31, os valores de t_{ar} remetem às máximas diárias.

O controle estomático para a perda de água tornou-se maior e o efeito do resfriamento evaporativo ocorreu para um ar seco e uma menor densidade de fluxo de radiação, comparada aos horários de pico. A dissipação de energia na forma de calor latente não foi tão eficaz quanto no período anterior.

Segundo Khera e Sandhu (1986), com a diminuição da disponibilidade hídrica no solo, a absorção de água pela cana-de-açúcar torna-se defasada em relação à transpiração, reduzindo o potencial de água na folha, acompanhado do fechamento estomatal e do aumento da t_c para a cultura estressada.

O potencial crítico de água no solo é o valor abaixo do qual a planta começa a perder em produtividade devido ao esforço de adsorção e capilaridade da água no solo. Este varia de cultura para cultura, com o clima, com a natureza do solo, com o método de irrigação empregado, dentre outros fatores (TAVARES, 2010). Conforme Vieira (1995), para a cana-de-açúcar este valor está entre -80 e -150 kPa. Souza (1976) concluiu que a cana-de-açúcar permite uma variação de potencial de água de até aproximadamente -120 kPa (1,2 atm), sem afetar o rendimento desta cultura.

Sob tais condições apresentadas acima, verificou-se que durante tal período a cana-de-açúcar estava em seu limiar para entrada no estresse hídrico, devido ao atraso na diminuição de t_c em relação à t_{ar} . A t_c noturna se tornou superior a t_{ar} a partir das 19 h. Este efeito está associado à maior amplitude de t_{ar} durante o dia e a noite e quedas bruscas no final da tarde.

Na Figura 32 está apresentado o comportamento horário, período diário do diferencial t_c-t_{ar} e da evapotranspiração da cultura (ET_c) para a cultura da cana-de-açúcar, variedade RB867515, para 219, 223 e 227 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

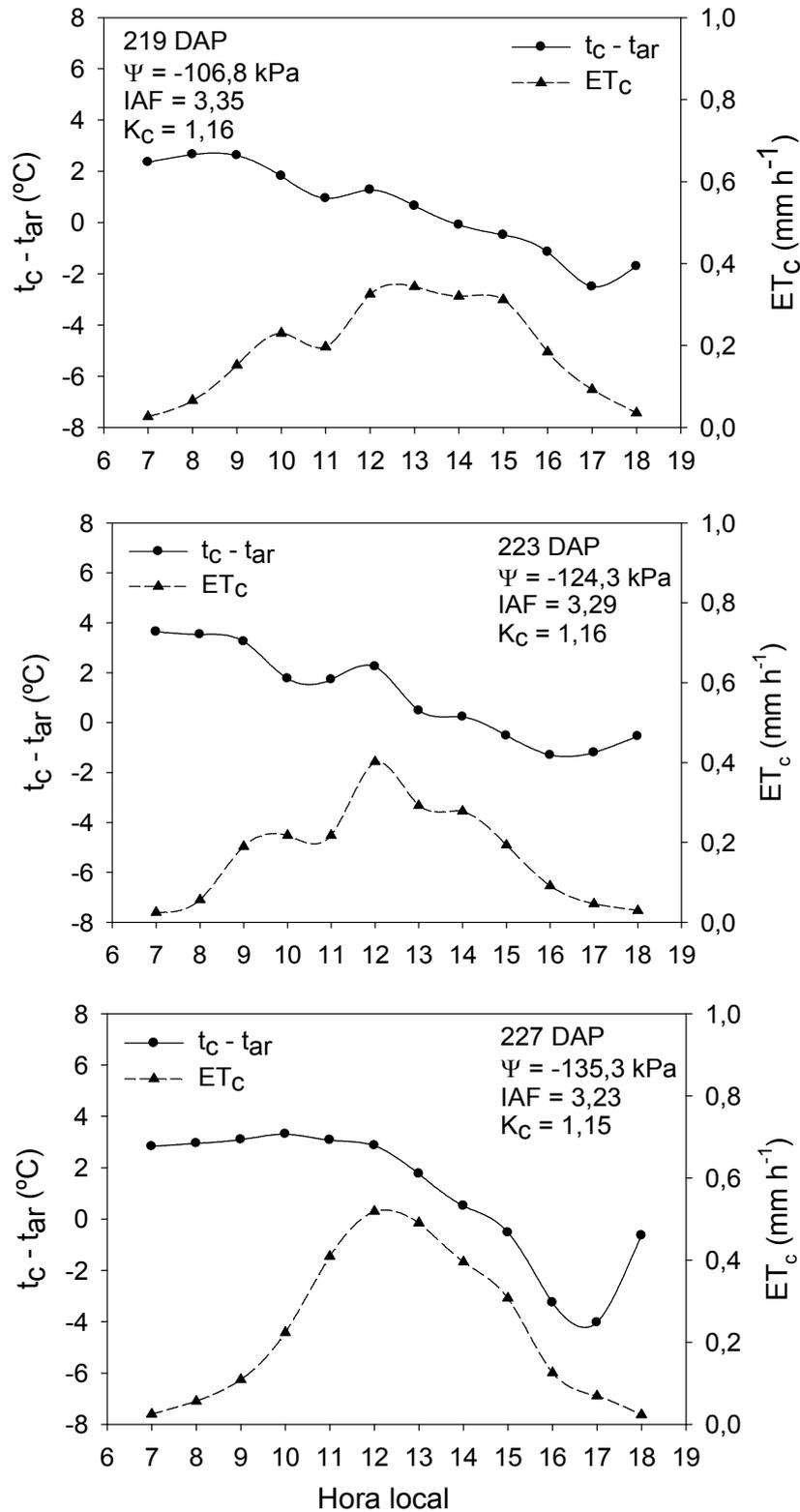


Figura 32 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$), para 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro e com potenciais hídricos de -106,8; -124,3; e -135,3 kPa, respectivamente.

À medida que ET_c horária tendeu a ser maior, o diferencial t_c-t_{ar} tendeu a diminuir tornando-se inferior a 0°C somente após as 15 h para todos os dias. Entretanto, o aumento de ET_c para 219 e 223 DAP às 12 h elevou discretamente o diferencial de temperaturas, com posterior queda, mais uma vez indicando que o controle estomático da cana-de-açúcar é maior e menos energia foi dissipada na forma de calor latente.

Trentin (2010) verificou que a transpiração diária para a cana-de-açúcar submetida a estresse hídrico moderado foi menor que para um tratamento sem restrição hídrica. Com a redução da disponibilidade hídrica no substrato utilizado, a transpiração é reduzida e, conseqüentemente, a redução na temperatura foliar é menor em comparação com uma planta sem restrição hídrica.

5.5.2.2. Deslocamento do limite inferior empírico de t_c-t_{ar} sob condições de redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 120$ kPa)

A Figura 33 apresenta a variação da diferença t_c-t_{ar} em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para diferentes condições de radiação solar global (R_g), valores superiores a 300 W m^{-2} , para 219, 223 e 227 DAP sob condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente. Nesta figura também estão apresentadas as respectivas equações combinadas do efeito de R_g e DPV_{ar} sobre t_c-t_{ar} e os coeficientes de determinação ajustados.

A dispersão dos dados esteve relacionada à cobertura de nuvens. O valor dos parâmetros associados à DPV_{ar} , como no primeiro período foi menor para o dia nublado seguido por parcialmente nublado e claro, com valores da ordem de 3, assim reduções de 1 kPa no DPV_{ar} não geram reduções nos valores de t_c-t_{ar} superiores a 1°C quando comparadas ao período anterior.

Já para o parâmetro associado a R_g ocorreu uma inversão, em relação à condição de céu claro, que era inferior a condições de céu parcialmente e nublado, respectivamente. Para estas duas últimas condições, os valores foram muito semelhantes. Estes dados em relação aos períodos anteriores foram superiores, pois um aumento de 100 W m^{-2} gerava aumentos inferiores a $0,7^\circ\text{C}$ e para 219, 223 e 227 DAP gerou valores de aproximadamente a $0,9^\circ\text{C}$.

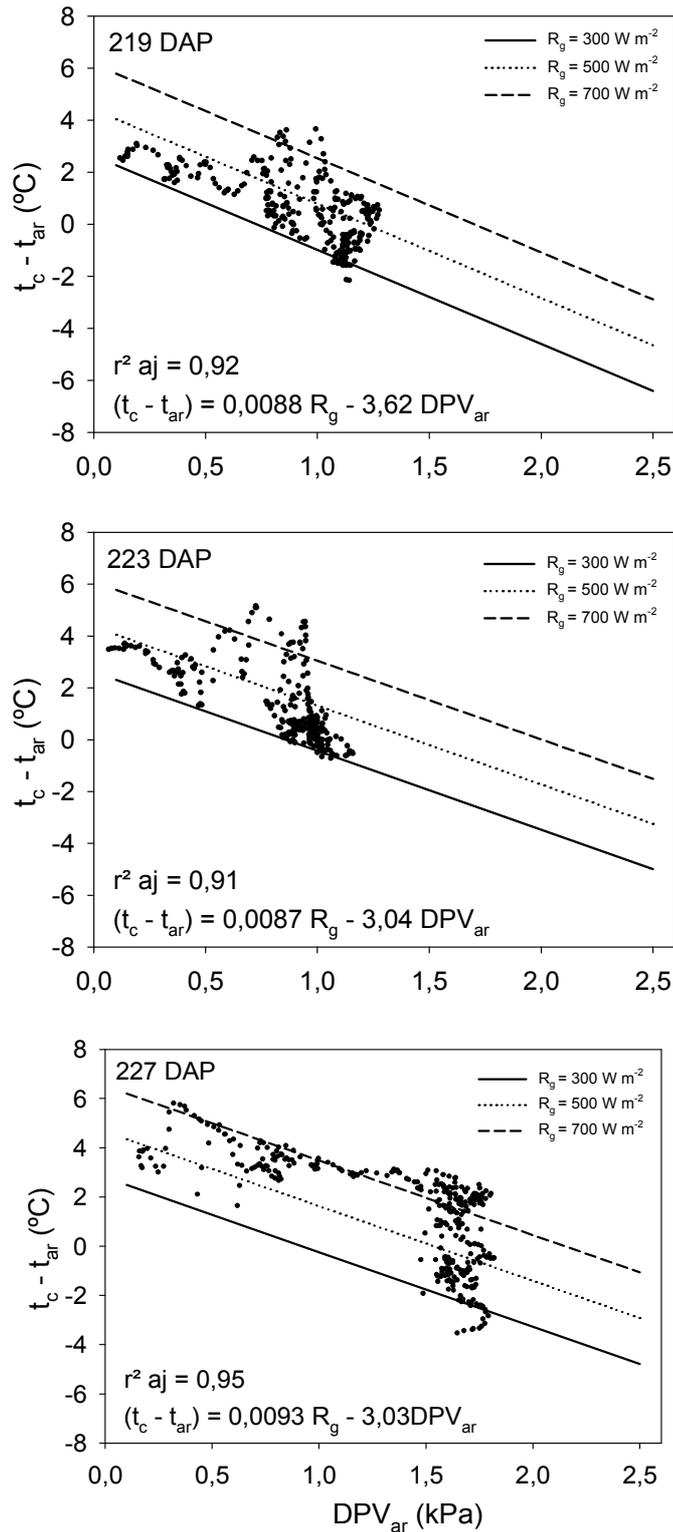


Figura 33 - Diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 219, 223 e 227 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, sob condições de redução da disponibilidade hídrica no solo e céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente.

Desta forma, verificou-se que para um mesmo aumento no DPV_{ar} comparado ao período anterior, que possui IAF semelhante, não gera um resfriamento foliar ($t_c - t_{ar}$ mais negativa) mais eficaz. Além disso, um mesmo aumento de R_g fornece um maior aquecimento do dossel ($t_c - t_{ar}$ mais positiva).

A concentração dos dados, observada para as respectivas máximas diárias do DPV_{ar} em todos os dias foi relacionada a uma queda brusca de R_g , diminuindo a t_c , maior concentração pode ser observada para R_g inferior a 500 W m^{-2} .

5.5.2.3. Resposta da temperatura do dossel vegetativo às condições meteorológicas e à redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 180 \text{ kPa}$)

Na Figura 34 está apresentado o comportamento horário, o período diário da radiação solar global (R_g) e o déficit de pressão de vapor (DPV_{ar}), para 240, 241 e 242 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

Este último período avaliado remete ao final do outono para a região, os dias 240 e 242 (DAP) foram bem característicos para dias tipicamente claros e nublados, respectivamente. A R_g foi maior que 0 W m^{-2} , entre 8h e 17h semelhante ao período anterior, para os três dias. O valor máximo da R_g foi menor que 700 W m^{-2} , aos 240 DAP. Para a situação de céu nublado (242 DAP) os valores de R_g não foram superiores a 225 W m^{-2} . Outro efeito deste período do ano, nas condições meteorológicas, pôde ser observado pelo DPV_{ar} perceptivelmente superior a 0 kPa durante a noite para 240 e 242 DAP, associado a menores UR_{ar} .

Na Figura 35 estão apresentados o comportamento horário, o período diário da temperatura do dossel vegetativo (t_c) e a temperatura do ar (t_{ar}), para 240, 241 e 242 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

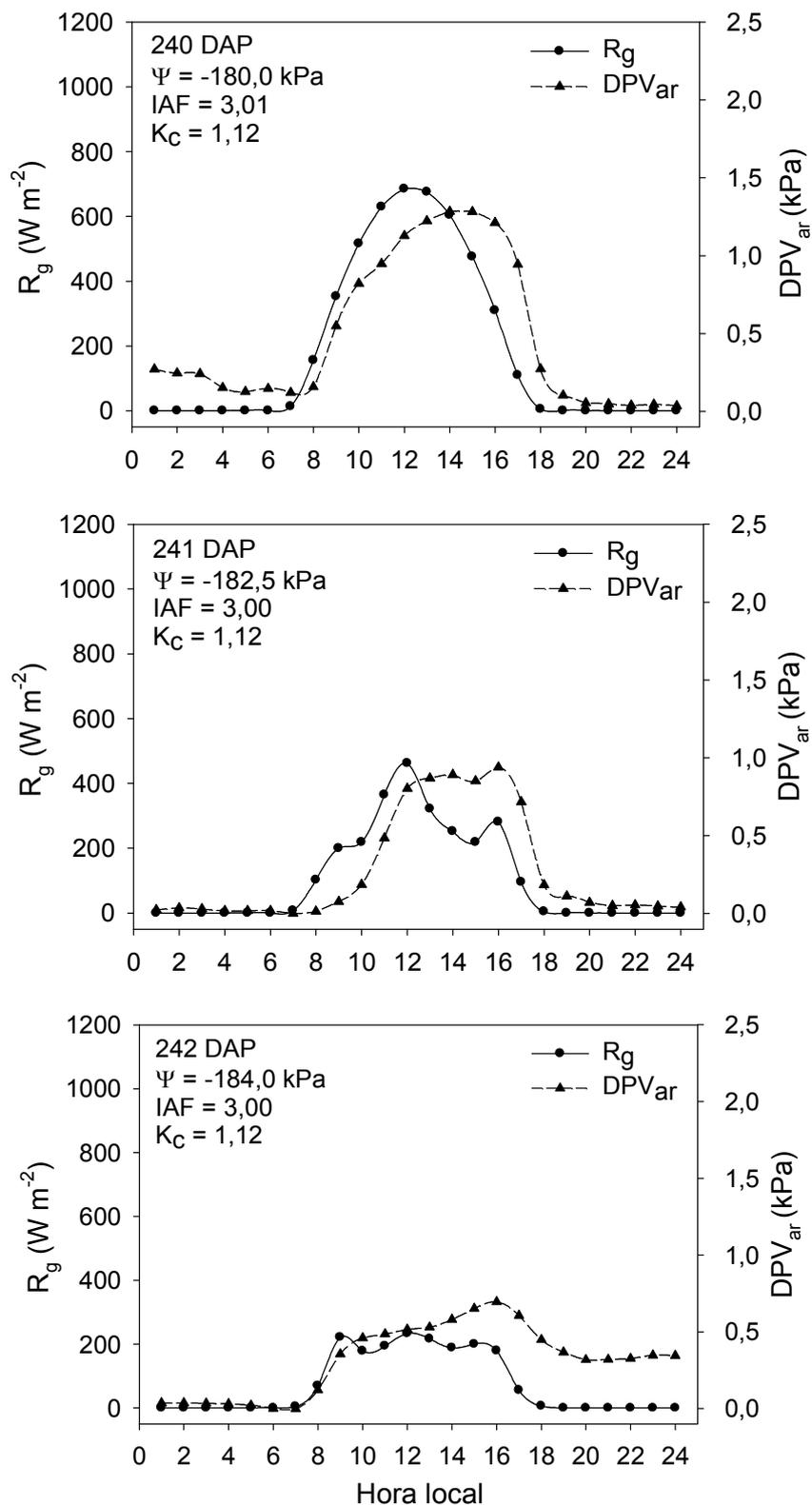


Figura 34 - Variação horária diária da radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente.

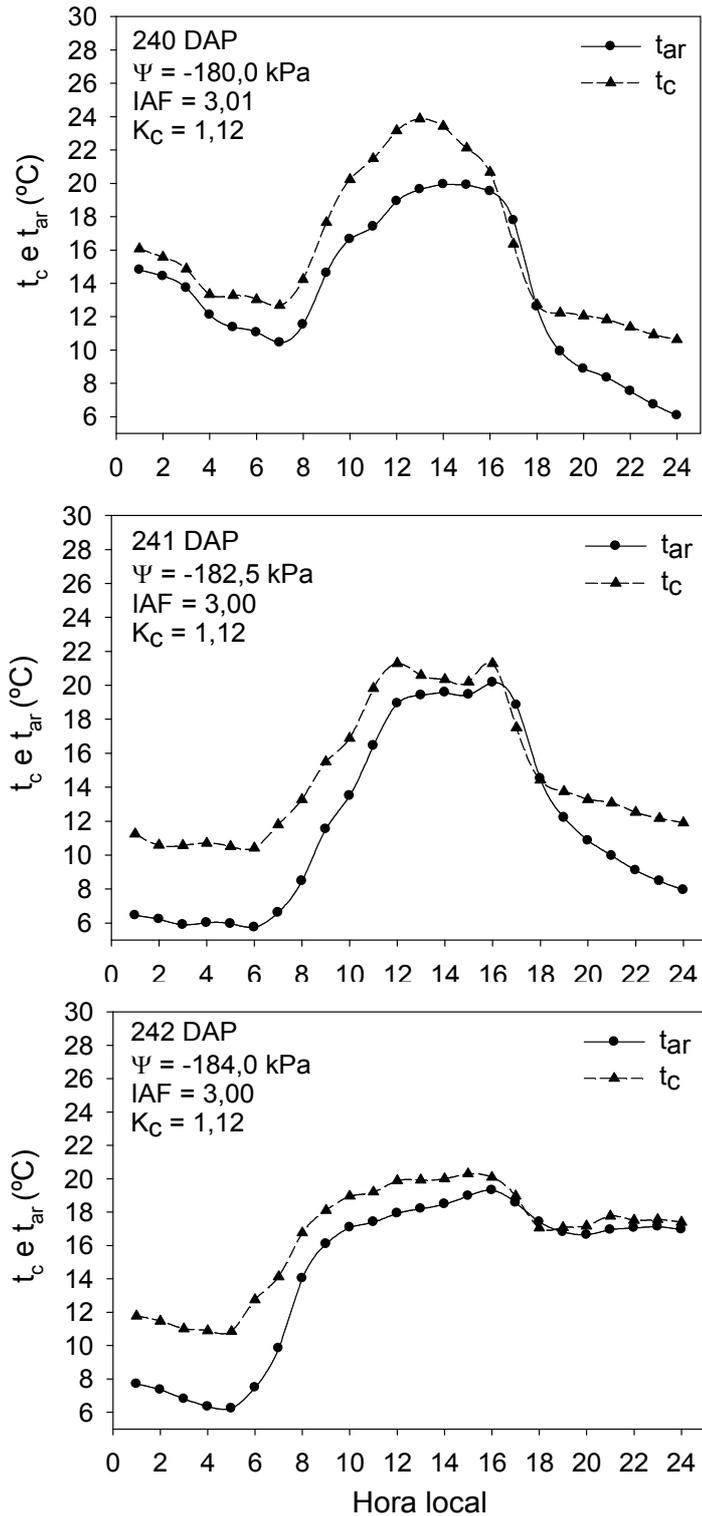


Figura 35 - Variação horária diária da temperatura do dossel vegetativo (t_c) para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta e temperatura do ar (t_{ar}), para 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente.

A t_c para os três dias analisados se manteve superior a t_{ar} , somente entre 17h e 18 h houve uma tendência a ser menor ou igual. A queda acentuada de R_g final da tarde fez com que a t_c acompanhasse esta tendência. Trentin (2010) observou o mesmo efeito para a cana-de-açúcar sob um nível de estresse severo. Durante a noite este efeito relatado foi normal, ao observado e discutido anteriormente, mesmo para a cana-de-açúcar sob ausência de estresse hídrico. Entretanto, para as horas mais quentes do dia (maiores t_{ar} e R_g), a t_c se manteve superior a t_{ar} .

Para condições de céu nublado, o observado é devido à baixa densidade de fluxo de radiação, a necessidade de luz para a realização do processo fotossintético com abertura estomática para a entrada de CO_2 atmosférico faz com que a planta se exponha a perda de água pela transpiração. O controle estomático é realizado no sentido de poupar água para a planta, já que a luz necessária a fotossíntese não é suficiente.

Al-Faraj et al. (2001) verificaram para a cultura da festuga-gigante (*Festuca arundinacea* Schreb.), sob condições de câmara de crescimento ou casa de vegetação, que durante dias em que a R_g máxima foi de 150 W m^{-2} , a energia solar para estes dias provavelmente não foi suficiente para causar uma abertura estomatal significativa, permitindo assim resfriamento foliar por transpiração.

Segundo Silva (2009), a cana-de-açúcar, sob condições de redução da disponibilidade hídrica de água no solo, tende a realizar o fechamento estomatal visando reduzir a perda de água por transpiração, o que resulta em maior transferência de calor sensível do dossel vegetativo para a atmosfera. Segundo Kar e Kumar (2010), com a secagem do solo, a água torna-se menos disponível para a evapotranspiração e a energia que adentra o dossel vegetativo será absorvida no aquecimento do solo (G) ou aquecimento do ar (H).

Na Figura 36 está apresentado o comportamento horário, o período diário do diferencial $t_c - t_{ar}$ e da evapotranspiração da cultura (ET_c) para a cultura da cana-de-açúcar, variedade RB867515, para 240, 241 e 242 DAP, com seus respectivos potenciais hídricos no solo (Ψ), índices de área foliar (IAF) e coeficiente da cultura (K_c).

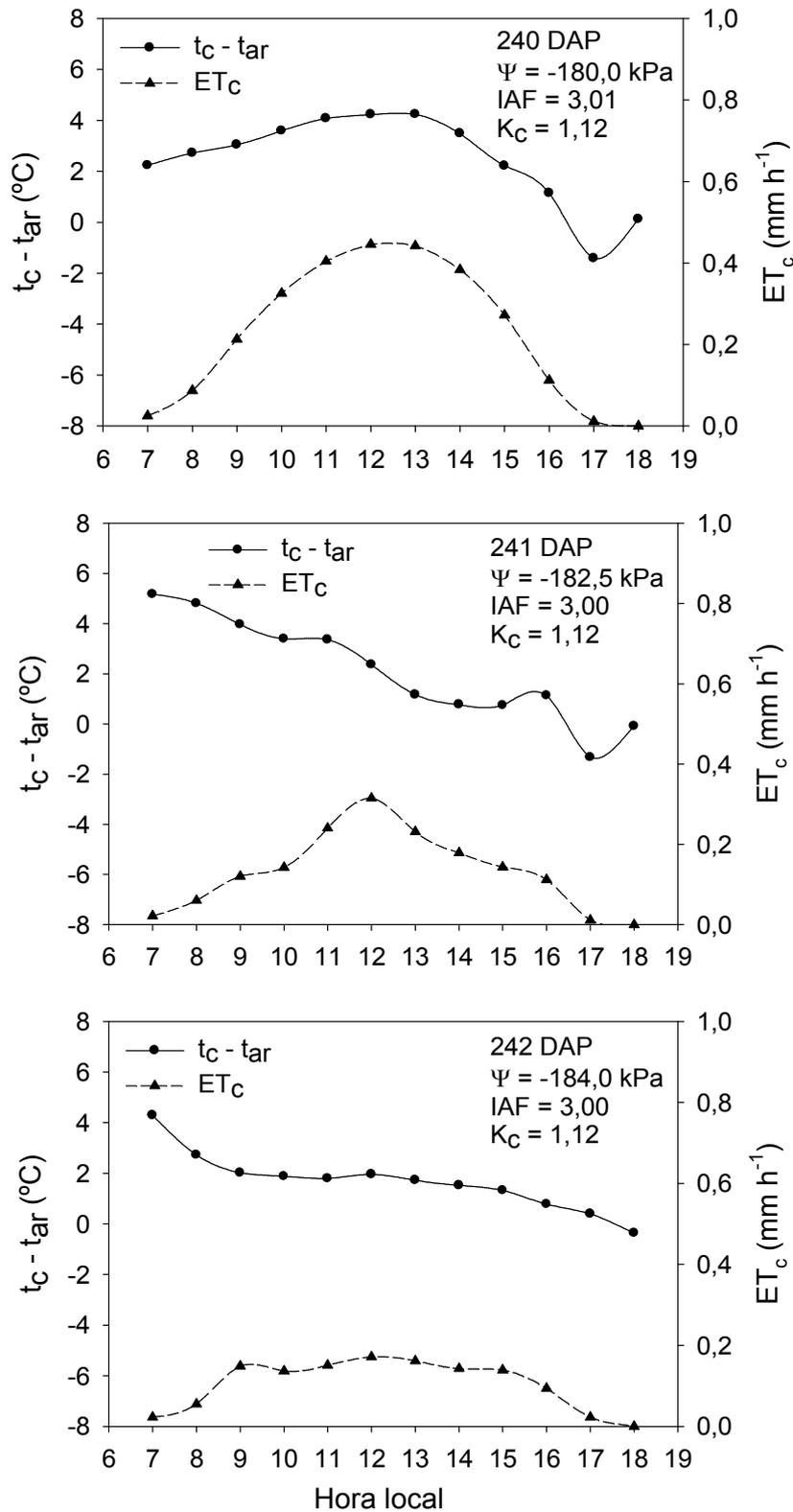


Figura 36 - Valores horários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$), para 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP) sob condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado e com potenciais hídricos de -180,0; -182,5; e -184,0 kPa, respectivamente.

A demanda atmosférica no período foi a menor em relação a todos os períodos anteriores (Figura 11). Entretanto, o IAF apesar da queda se manteve em um patamar para uma cobertura completa do solo. Silva et al. (2011) constataram que, a partir do momento da supressão da irrigação, a cana-de-açúcar reduz seu IAF, e mesmo para um nível de cobertura completa do solo, houve maior absorção de energia pelo solo e menor retenção de energia pelo dossel da cultura. Ainda, associado ao acúmulo de palhada na superfície do solo e à maior exposição de folhas mortas, o G foi relativamente pequeno, porém H se mostrou bastante elevado. A senescência foliar foi apresentada no subitem 5.3.3.

O aumento da demanda por água pela planta durante o dia não mostrou o efeito da redução de t_c em relação à t_{ar} (valores negativos), a não ser para 241 DAP no qual houve uma tendência de queda no t_c-t_{ar} . Porém, os valores desse diferencial nos horários de maior demanda se mantiveram superiores a 0°C. A redução significativa do conteúdo de água no solo para a absorção pela planta de cana-de-açúcar se tornou limitante, ao passo que a abertura estomática foi controlada nas horas de maior demanda de água, diminuindo, assim, o resfriamento evaporativo por transpiração. O diferencial médio horário máximo foi reportado aos 241 DAP, para as 12h e 13h, com valores iguais de 4,2°C.

Khera e Sandhu (1986) observaram para a cana-de-açúcar que a diferença entre t_c para a cultura mantida sob estresse e sem estresse hídrico varia de acordo com as condições meteorológicas diárias. Encontraram diferenças diárias entre a cana-de-açúcar mantida sob e com ausência de estresse hídrico, no intervalo entre 0,2°C a 2,7°C e 0,7°C a 3,7°C, para um dia tipicamente nublado e claro, respectivamente.

Inman-Bamber e Jager (1986) obtiveram t_c-t_{ar} de cerca de 6,0 °C, para a cana-de-açúcar sob estresse hídrico severo. Ainda, observaram uma diferença de 1°C a 2°C entre a parametrização empírica e teórica, que foi atribuída a mudanças na altura do dossel da cana-de-açúcar. Baroomand-Nasab et al. (2005) indicaram que um diferencial igual a 1°C já seria indício de estresse hídrico na cana-de-açúcar.

Trentin (2010) encontrou uma diferença ($t_c - t_{ar}$) média diária de 1,9 e 3,8°C, para a cultura de cana-de-açúcar sob estresse hídrico moderado (400 a 600 kPa) e estresse hídrico severo (> 1100 kPa), respectivamente com R_g superior a 300 W m⁻². Lebourgeois et al. (2010) reportaram o valor do diferencial de temperaturas de 3,8°C para a cana-de-açúcar sob máximo estresse hídrico ocorrido, valor encontrado entre 13h30min e 14h.

Moreland (1937) reportou valores de temperatura foliar para a cana-de-açúcar superiores a do ar de 5°C a 7°C, sob alta incidência de radiação solar e baixo fluxo de ar no sistema planta-atmosfera. O fato foi atribuído a baixas umidades relativas (altos DPV_{ar}).

Koonjah et al. (2006) estudaram o efeito do estresse hídrico na fotossíntese da cana-de-açúcar, na África do Sul, utilizando a variedade NCo376, em um solo argiloso. Comparando dois tratamentos (sob e com ausência de estresse hídrico), observaram que para medições entre 12h e 14h de folhas diretamente exposta à luz solar, o potencial de água na folha cai drasticamente após um potencial de água no solo de -140 kPa (após 20 dias sem irrigação). Assim, a partir deste momento, a cultura está sob estresse hídrico. A interceptação luminosa diminui em 25% em relação à cultura sem estresse hídrico, potencial hídrico também é inferior a -140 kPa. A taxa de fotossíntese foi mais sensível, pois a partir de -60 kPa, ela tendeu a diminuir, e este fato foi atribuído ao fechamento estomatal. Para a cana-de-açúcar sob estresse hídrico foi observado que para o aumento na temperatura foliar a taxa fotossintética diminuía linearmente. Os referidos autores, então, concluíram que a alta resistência estomatal, advinda do fechamento dos estômatos, gerou um aumento na temperatura foliar devido à redução na taxa de transpiração.

Silva et al. (2007) observaram para as oito variedades estudadas, o estresse hídrico geralmente resulta em aumento da temperatura foliar da cana-de-açúcar para todos os genótipos (tolerantes ou sensíveis ao estresse), no período de medição entre 9 h e 15h, para dias com menor presença de nuvens. Entretanto, algumas espécies sensíveis respondem mais acentuadamente ao estresse que os genótipos tolerantes. Verificaram também que, em geral, a temperatura foliar das plantas sob estresse foi maior ($\approx 4,0^\circ\text{C}$) em comparação as plantas sob condições ideais de água. Contudo, o aumento relativo foi maior

entre genótipos suscetíveis. Sob déficit hídrico, a temperatura foliar dos genótipos tolerantes foi, em média, 2,2°C menor do que a dos genótipos suscetíveis.

Patil (2008), utilizando a variedade CoC-671 de cana-de-açúcar cultivada sobre um solo negro argiloso e profundo, sob condições climáticas da Índia, observou que entre os 13 tratamentos (sendo 1 controle bem irrigado e outros sob estresse hídrico) com diferentes fertilizantes e formas de aplicação, o controle sob estresse hídrico diminuiu significativamente a taxa de transpiração entre todos os outros tratamentos e em todos o estágios da cultura.

Sob condições de um clima úmido, os seguintes autores encontram os seus respectivos valores do limite superior de $t_c - t_{ar}$ para as culturas totalmente estressadas. Olufayo et al. (1996) e Ajayi e Olufayo (2004) observaram os valores iguais a 7,0°C e 8,0°C, respectivamente, ambos para a cultura do sorgo. Cárcova et al. (1998) encontraram para a cultura do milho valores superiores a 4°C, de acordo com a faixa de t_{ar} considerada.

Sob condições de clima árido ou semiárido, Carrow (1989) estimou valores superiores a 6°C para três espécies de gramíneas, aumentando de acordo com a t_{ar} e atingindo cerca de 9°C para $t_{ar} = 40^\circ\text{C}$. Irmak et al. (2000) encontraram, para o milho, valores entre 4,0°C e 5,1°C. Emekli et al. (2008) reportaram para a grama-bermuda (*Cynodon dactylon* L.) o valor de 11,2°C para $t_{ar} = 40^\circ\text{C}$. Dagdelen et al. (2008), utilizando o milho híbrido durante dois anos de cultivo, observaram os valores de 3,6°C e 3,3°C para os anos de 2003 e 2004, respectivamente.

5.5.2.4. Deslocamento do limite inferior empírico de $t_c - t_{ar}$ sob condições de redução da disponibilidade hídrica no solo ($\Psi \approx 180$ kPa)

A Figura 37 apresenta a variação da diferença $t_c - t_{ar}$ em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), para diferentes condições de radiação solar global (R_g), valores superiores a 300 W m^{-2} , para 240, 241 e 242 DAP sob condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente. Nessa figura, também estão apresentadas as respectivas

equações combinadas do efeito de R_g e DPV_{ar} sobre t_c-t_{ar} e os coeficientes de determinação ajustados.

Para níveis iguais ou superiores a 300 W m^{-2} de R_g , verificou-se que todos os valores do diferencial t_c-t_{ar} estiveram superiores a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Houve aumento do parâmetro associado ao DPV_{ar} , para os três dias avaliados, conferindo menor inclinação da reta, e maior valor foi observado para o dia de céu claro (maior demanda hídrica). O parâmetro associado a R_g não foi tão afetado, comparado ao período anterior, entretanto ele alcançou seu máximo para dia tipicamente nublado, o que não ocorria anteriormente, para este dia um aumento de 100 W m^{-2} em R_g , resulta em um aumento superior a 1°C . Aos 240 DAP foi possível visualizar que t_c-t_{ar} tendeu a acompanhar a evolução diária de R_g , com um deslocamento para valores mais positivos de t_c-t_{ar} de acordo com os maiores valores registrados no final da tarde para o DPV_{ar} .

Considerando condições típicas de céu claro ($R_g = 700 \text{ W m}^{-2}$ aos 240 DAP) e de céu nublado ($R_g = 300 \text{ W m}^{-2}$ aos 242 DAP) para o período, os pontos de interceptação do eixo das ordenadas (t_c-t_{ar}) seriam 6,16 e 3,12 para a cana-de-açúcar, respectivamente. Isso se deve a um potencial hídrico de aproximadamente -180 kPa .

SanMartin e Acevedo (2001) encontraram os valores de 4,99 para a interceptação de t_c-t_{ar} e 0,0069 para o parâmetro associado ao DPV_{ar} , na cultura do trigo em fase vegetativa sob estresse hídrico severo. Ünlü et al. (2011) verificaram os valores de 3,22 para a interceptação e $-0,0217$ para o parâmetro associado ao DPV_{ar} , avaliando a cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L. cv.) variedade Delta Pine SG-125, na Turquia, sobre solo argiloso.

Trentin (2010) observou para a faixa de R_g superior a 300 W m^{-2} , os valores de 3,89 e $-1,43$, para um estresse hídrico moderado e 4,78 e $-0,53$, com a cultura da cana-de-açúcar sob estresse hídrico severo, para a interceptação de t_c-t_{ar} e o parâmetro associado ao DPV_{ar} , respectivamente. Os valores encontrados dos parâmetros associados ao DPV_{ar} são muito semelhantes ao encontrado por Trentin (2010), para condições de estresse hídrico moderado, principalmente para 240 DAP observado neste trabalho. Entretanto, a interceptação do eixo das ordenadas seria próxima para valores de R_g inferiores a 700 W m^{-2} .

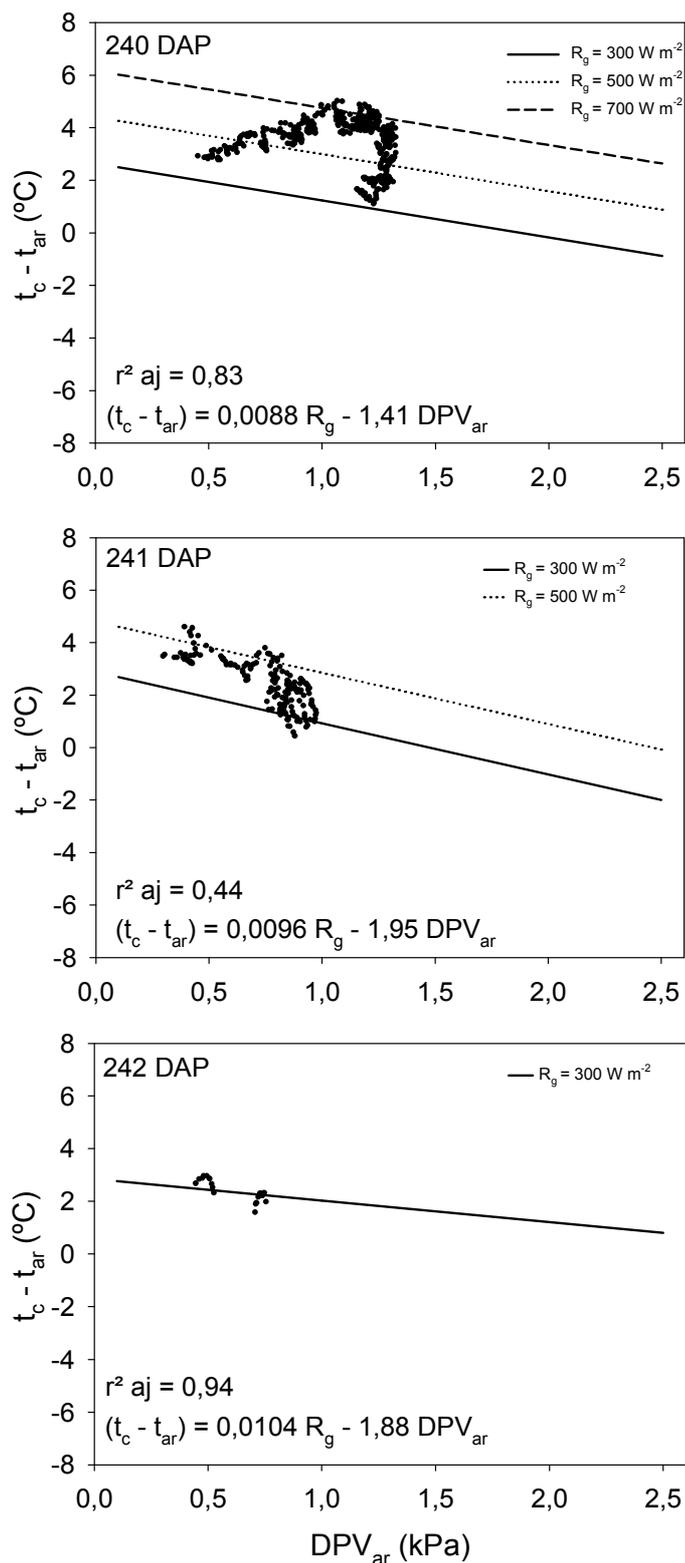


Figura 37 - Diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) em função do déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a radiação solar global (R_g) em 240, 241 e 242 dias após o plantio (DAP), para a cana-de-açúcar de sequeiro (RB 867515) no ciclo da cana-planta, sob condições de redução do potencial hídrico no solo e de céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente.

Por outro lado, Ibrahim (2005) concluiu que, para a cana-de-açúcar irrigada, durante dois anos de cultivo, cultivada em um solo argiloso sob condições climáticas do Sudão, atrasos na irrigação após 70% ($p=0,7$) de depleção da água disponível no solo para a cultura é prejudicial para o crescimento da cultura e irá resultar em perdas econômicas e de rendimento em sacarose. Tal prejuízo pode ser evitado utilizando-se valores entre 40 e 50% (p entre 0,4 e 0,5).

Segundo Patil (2008), a temperatura foliar é um importante parâmetro de avaliação do *status* hídrico da planta. A temperatura foliar deve ser menor que a do ar para se obter maior produtividade. Lopes et al. (2011) relatam que plantas cultivadas sob estresse hídrico tendem a exibir altas temperaturas foliares, porque diminui a taxa transpiratória e assim decresce a perda por calor latente.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que a presença de nebulosidade altera significativamente a temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar (t_c), devido à brusca variação da densidade de fluxo de radiação solar global. A combinação dos efeitos da radiação solar global (R_g) e do déficit de pressão de vapor (DPV_{ar}) sob a forma da relação linear " $t_c - t_{ar} = a R_g - b DPV_{ar}$ ", em diferentes faixas de R_g , explica o comportamento diário da t_c , comparando-a a temperatura do ar (t_{ar}), para a cultura da cana-de-açúcar sob ausência de estresse hídrico ou sob condições de redução do potencial hídrico do solo.

Os altos coeficientes de determinação ajustados (r^2 aj), superiores a 0,80, explicam a variância em $t_c - t_{ar}$ em função das variáveis independentes, para as condições meteorológicas, do potencial hídrico do solo e do desenvolvimento da cultura. Entretanto, aos 241 DAP, o r^2 aj foi igual a 0,44, advindo da alternância dos valores de R_g e da concentração dos dados de $t_c - t_{ar}$ em uma faixa estreita do DPV_{ar} .

Sob ausência de estresse hídrico ($\Psi < -10$ kPa), foi possível observar que os parâmetros da relação " $t_c - t_{ar} = a R_g - b DPV_{ar}$ " são afetados pelas condições de nebulosidade. A presença de nuvens resultou, respectivamente, no aumento e redução dos parâmetros "a" e "b", tanto para o índice de área foliar médio de 2,40 como 3,35. O aumento do índice de área foliar (IAF), também resultou em

mudanças nos parâmetros "a" e "b", houve um acréscimo de "a" em relação ao período com IAF médio de 2,40 e ao período com IAF médio de 3,35. Em relação a "b", este aumentou para o dia de céu nublado e diminuiu para os outros dias. Essa variação está acompanhada da mudança nas estações do ano e assim nas condições meteorológicas.

Com a redução do conteúdo de água disponível no solo, constatado aos 220 ($\Psi \approx -120\text{kPa}$) e 240 ($\Psi \approx -180\text{kPa}$) dias após o plantio (DAP), observou-se também um ligeiro aumento do parâmetro "a", mas um efeito contrário no parâmetro "b" que estava associado ao DPV_{ar} . Este fato pode ser explicado pela diminuição da disponibilidade hídrica no solo, que faz com que a abertura estomática seja controlada nas horas de maior demanda de água, diminuindo, assim, o resfriamento evaporativo por transpiração.

A termometria a infravermelho tem potencial para estimativa da disponibilidade hídrica no solo, com base no *status* hídrico da planta, na fase fenológica de crescimento da cana-de-açúcar, mesmo sob a presença de nebulosidade.

REFERÊNCIAS

AHMED, M.F.; DAWI, I.; IBRAHIM, O.H. Use of infrared thermometer for water stress detection in faba bean. **Agricultural Research and Technology Corporation UnitWad Mednai (Sudan)**, v. 17, p. 84-91, 2006.

AJAYI, A.E.; OLUFAYO, A.A. Evaluation of two temperature stress indices to estimate grain sorghum yield and evapotranspiration. **Agronomy Journal**. n. 96, p.1282-1287, 2004.

AL-FARAJ, A.; MEYER, G.E.; HORST, G.L. A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making – a traditional method. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 31, p. 107-124, 2001.

ALDERFASI, A.A.; NIELSEN, D.C. Use of crop water stress index for monitoring waterstatus and scheduling irrigation in wheat. **Agricultural and Water Management**. v. 47, p. 69-75, 2001.

ALEXANDER, A.G. **Sugar cane physiology**: a comprehensive study of the Saccharum source-to-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 725 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 requirements. Roma: FAO, 1998. 328p. (Irrigation and drainage paper, 56).

ALMEIDA, A.C.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.

ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C. Crescimento da parte aérea de cana crua e queimada. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4, p. 1069-1079, 1999.

ALVAREZ V., V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5.^a aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 322 p.

ALVES, E.L. **Desenvolvimento de um sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida para a cultura de cana-de-açúcar a partir do fluxo de seiva**. 1999. 71 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

ANDERSON, D.L.; BOWEN, J.E. **Nutrição da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Potafós, 1992. 40 p.

ANSARI, A.Q.; LOOMIS, W.E. Leaf temperatures. **American Journal of Botany**, v. 46, p. 713-717, 1959.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS – ALMG. **Municípios mineiros**. Disponível em: <<http://www.almg.gov.br/index.asp?grupo=estado&diretorio=munmg&arquivo=municipios&municipio=71303>>. Acesso em: 03 nov. 2010.

AUDE, M.I.S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 241-248, 1993.

BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. cap. 2, p. 24-37.

BACCHI, O.O.S.; SOUZA, J.A.G.C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16, 1977 São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 1977. v. 2, p. 1733-1741.

BAKER, J.M.; KOSKINEN, W.C.; DOWDY, R.H. Volatilization of EPTC: simulation and measurement. **Journal of Environmental Quality**. v. 25, p. 169-177, 1996.

BAKER, J.M.; NOMAN, J.M.; KANO, A. A new approach to infrared thermometry. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, p. 281-292, 2000.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1981, 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): Um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 140 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP.

BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1, 1979, Mossoró. **Anais...** Mossoró: SBA, 1979. p. 6-8.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR, 1977. 122 p.

BARBOSA, M.H.P.; SILVEIRA, L.C.I.; OLIVEIRA, M.W.; SOUZA, V.F.M, RIBEIRO, N.N. RB867515 sugarcane cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 1, n. 4, p. 437-438, 2001.

BARBOSA, M.H.P.; SILVEIRA, L.C.I. Melhoramento genético e recomendação de cultivares. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bionergia, açúcar e álcool - tecnologias e perspectivas**. Viçosa-MG: UFV, 2010. p. 313-331.

BARROS, F.F. **A melhoria contínua no processo de plantio da cana-de-açúcar**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

BEAUCLAIR, E.G.F. **Produtividade da cana-de-açúcar em função de alguns macronutrientes presentes no caldo e no solo**. 1994. 98 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BLANCO, F.; SENTELHAS, P.C. Determinação dos coeficientes da equação de Angström para a estimativa da radiação solar global e insolação para Piracicaba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO, 12, e REUNIÃO LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Fundação Cearense de Agrometeorologia, 2001. v. 1, p. 115-116.

BODDEY, R. Green energy from sugar cane. **Chemistry and Industry**, v. 10, p. 355-358, 1993.

BOROOMAND-NASAB, B.; KASHKULI, H.A.; RASHID ZADEH, F. Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference for sugarcane. **CropResearch**, Hisar, v. 30, p. 355-359, 2005.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: CP8, 2008.

CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba-SP: FEALQ, 1993. 242 p.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **Introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 1998. 286 p.

CAPUTO, M.M. **Efeito do tombamento nas características tecnológicas e biométricas de variedades de cana-de-açúcar**. 2003. 63 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

CÁRCOVA, J.; MADDONNI, G.A.; GHERSA, C.M. Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality. **Field Crops Research**, v. 55, p. 165-174, 1998.

CARROW, J.N. Turfgrass irrigation scheduling by infrared thermometry. In: GEORGIA WATER RESOURCES CONFERENCE, 1989, Athena, Georgia. **Proceedings...** Athena, Georgia: Institute of Natural Resources, 1989. p. 63-65.

CARVALHO, G.L. **Eficiência da produção agrícola da cana-de-açúcar no estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006**. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP.

CARY, J.W.; FISHER, H.D. Irrigation decisions simplified with electronics and soil water sensors. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p. 1219-1223, 1983.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 137 p.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. (Eds.). **Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendezeiro e oliveira**. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138 p.

CASTRO, P.R.C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In. SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 4, 1999, Piracicaba. **Anais... Saccharum**, 1999. v. 1, p. 12-16.

CHARD, J. **Watermark**: soil moisture sensors - characteristics and operating instructions. Disponível em: <<http://www.usu.edu/cpl/PDF/WatermarkOperatingInstructions2.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2011.

CHU, S.; GOLDEMBERG, J.; ARUNGU OLENDE, S.; EL-ASHRY, M.; DAVIS, G.; JOHANSSON, T.; KEITH, D.; JINGHAI, L.; NAKICENOVIC, N.; PACHAURI, R.; SHAFIE-POUR, M.; SHPILRAIN, E.; SOCOLOW, R.; YAMAJI, J.; LUGUANG, Y. Lighting the way: toward a sustainable energy future. **Inter Academy Council**, 2007.

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS – CIIAGRO. **Manejo agrometeorológico de pragas e doenças visando aplicação de agroquímicos**: uma análise preliminar. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/pragas.html>>. Acesso em: 20 set. 2010.

CLARK, R.N.; HILER, E.A. Plant measurements as indicators of crop water deficit. **Crop Science**, v. 3, p. 466-469, 1973.

CLAWSON, K.L.; BLAD, B.L. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 311-316, 1982.

CLEMENTS, H.F. Integration of physiologic and climatic factors reference to the production of sugar cane. **Hawaiian Planters Record**. Honolulu, v. 44, p. 210-233, 1940.

COLLICHIO, E. **Zoneamento edafoclimático e ambiental para a cana-de-açúcar e as implicações das mudanças climáticas no estado de Tocantins**, 2008. 156 p. Dissertação (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar**: 1.º levantamento safra 2010/11. 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar**: 3.º levantamento safra 2010/11. 2011.

COSTA, L.M. **Modelo de evolução das propriedades físicas e químicas dos solos de terraços fluviais, na região de Viçosa, e sua interpretação para uso agrícola**. 1973, 55 p. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal Viçosa, Viçosa, MG.

CURTIS, O.F. Leaf temperatures and the cooling of leaves by radiation. **Plant Physiology**, v. 11, n. 2, p. 343-364, 1936.

DAĞDELEN N.; GÜRBÜZ T.; ERDEM Y.; SEZGIN F.; YILMAZ E.; AKÇAY S.M.; YEŞİLIRMAK E. Determination of crop water stress index (CWSI) of second crop corn in a semiarid climate. In: INTERNATIONAL MEETING ON SOIL FERTILITY LAND MANAGEMENT AND AGROCLIMATOLOGY, 2008, Turquia. **Proceedings...** Turquia, 2008. p. 805-814.

D'ANGIOLELLA, G.; VASCONCELLOS, V.L.D.; SILVA, J.F.; SANCHES, A.V. Radiação: estudo das características e suas aplicações no Recôncavo Baiano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12 e REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBA/FUNCEME, 2001. p. 135.

DELGADO ROJAS, J.S. **Modelo agrometeorológico para estimativa dos efeitos de deficiência hídrica na produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar**. 1998. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botânica, 1952. 371 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yields response to water**. Rome: FAO, 1979. 306 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. (Irrigação e Drenagem, 33).

EBRAHIM, M.K.; ZINGSHEIM, O.; EL-SHOUBAGY, M.N.; MOORE, P.H.; KOMORE, E. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperature below na above optimum. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, n. 5-6, p. 593-602, 1998.

EHLER, W.L.; VAN BAVEL, C.H.M. Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. **Agronomy Journal**, v. 65, p. 404-409, 1973.

EPIPHANIO, J.C.N. Avaliação da condição hídrica da cultura do milho através de sensoriamento remoto termal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 18, n. 11, p. 1233-1241, 1983.

ELAWAD, S.H.; GASCHO, G.J.; STREETJ. J. Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 481-483, 1982.

EMEKLI, Y.; BASTUG R.; BUYUKTA, S.; EMEKLI, N.Y. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, n. 3, p. 205-212, 2007.

ERDEM, T.; ERDEM, Y.; ORTA, A.H.; OKURSOY, H. Use of a crop water stress index for scheduling the irrigation of sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 30, p. 11-20, 2006.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FERREIRA JUNIOR, R.A. **Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada pela radiação solar**. 2010. 68 p.. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, AL.

FIGUEIREDO, P.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. **Cana-de-açúcar**. 6.ed. Campinas: IAC, 1995. (Boletim 200).

FOOD OF AGRICULTURAL ORGANIZATION – FAO. The state of food and agriculture. Part I. Biofuels: prospects, risks and opportunities. Rome: FAO, 2008. (FAO Agriculture Series, 39).

FISCHER, G.; TEIXEIRA, E.; HIZSNYIK, E.T.; VELTHUIZEN, H. Land use dynamics and sugarcane production. In: ZUURBIER, P.; VAN DE VOOREN, J. (Eds.). **Sugarcane ethanol: contribution to climate change mitigation and the environment**. Wageningen: Wageningen Academic, 2008. p. 29-62.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELLO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

FRANCIS, C.A.; RUTGER, J.N.; PALMER, A.F.E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**. v. 9, p. 537-539, 1969.

FUCHS, M. Canopy thermal infrared observations. **Remote Sensing Reviews**, v. 5, p.323-333, 1990.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A.B.; VILA NOVA, N.A. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, n. 1/2, p. 62-68, 1997.

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**, v. 53, p.169-183, 1991.

GARCIA, A.; ANDRE, R.G.B.; FERREIRA, M.I.; PAÇO, T. Comparação de modelos para avaliação do estresse hídrico em cultura de nectarinas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 43-48, 2000.

GARCIA, N.; ANDRÉ, R.G.B. Desempenho de dois modelos para a determinação do estresse hídrico em feijoeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 2, p. 201-210, 2001.

GARDNER, B.R.; BLAD, B.L.; WATTS, D.G. Plant and air temperatures in differentially-irrigated corn. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 25, p. 207-217, 1981.

GARDNER, B.R.; NIELSEN, D.C.; SHOCK, C.C. Infrared thermometry and the crop water stress index: II. Sampling procedures and interpretation. **Journal Production Agriculture**, v. 5, p. 466-475, 1992.

GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. (Eds.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GEMENTE, A.C.; PINAZZA, A.H.; BRUGNARO, C.; GUMARÃES, E.; OLIVEIRA NETO, G.R.; KRUGLIANSKAS, I.; SEBRAGIA, R. Planejamento agrícola. In: BRUGNARO, C.; SBRAGIA, R. **Gerência agrícola em destilarias de álcool**. 2.ed. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1986. p. 29-83. (Coleção PLANALSUCAR, 1).

GOMES, B.H.; FERREIRA, R.A.; GOMES, H.B., FILHO, M.R.T.; AMORIM, R.C.F.; CABRAL, S.L. Associação das variações meteorológicas com o florescimento da cana-de-açúcar em alagoas – um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004.

GONTIA, N.K.; TIWARI, K.N. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 1144-1152, 2008.

GONZÁLEZ-DUGO, M.P.; MORAN, M.S.; MATEOS, L.; BRYANT, R. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. **Irrigation Science**, v. 24, p. 233-240, 2006.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a áreafoliar de cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.

HUMBERT, R.P. **The growing of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 779 p.

IBRAHIM, H.S. Determination of irrigation interval for sugarcane by monitoring changes in soil moisture in the field at the Guneid Scheme. In: MEETINGS OF THE NATIONAL CROP HUSBANDRY COMMITTEE, 37, 2005. **Proceedings...** Soba Research Station, Khartoum, Agricultural Research Corporation, 2005. p. 52-60.

IDE, B.Y.; BANCHI, A.D. Influência do clima na produtividade da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONOMICA, 2, Piracicaba, 1986. **Anais....** São Paulo: COPERSUCAR, 1984. p.196-204.

IDE, B.Y.; OLIVEIRA, M.A. Efeito do clima na produção de cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONOMICA, 3, Piracicaba, 1986. **Anais...** São Paulo: COPERSUCAR, 1986. p. 573-583.

IDSO, S.B. Non-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 27, p. 59-70, 1982.

IDSO, S.B. Measuring yield-reducing plant water potential depressions in wheat by infrared thermometry remote sensing of plant water stress. **Irrigation Science**. v. 2, p. 205-212, 1981.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 24, p. 45-55, 1981.

IDSO, S.B.; CLAWSON, K.L.; ANDERSON, M.G. Foliage temperature: effects of environmental factors with implications for plant water stress assessment and the CO₂/climate connection. **Water Resources Research**, Washington, v. 22, n. 12, p. 1702-1716, 1986.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J. Remote-sensing of crop yields. **Science**, Washington, v. 1, p. 19-25, 1977.

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.; JAGER, J.M. Effect of water stress on growth, leaf resistance and canopy temperature in field-grown sugarcane. **Proceedings of the South African Technologists Association**, p. 156-161, 1986.

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

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.

IRMAK, S.; HAMAN, D.Z.; BASTUG, R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 1221-1227, 2000.

ISRAELSEN, O.W.; HANSEN, V.E. **Principios y relaciones del riego**. 2.ed. Barcelona: Riverté, 1965. 396 p.

JACKSON, R.D.; ISON, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER JUNIOR, R.J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v. 17, p. 1133-1138, 1981.

JACKSON, R.D. Canopy temperature and crop water stress In: HILLEL, D. **Advances in Irrigation**. New York: Academic Press, 1982. p. 43-85.

JACKSON, R.D.; HATFIELD, J.L.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B.; PINTER JUNIOR, P.J. Estimation of daily evapotranspiration from one time of day measurements. **Agricultural and Water Management**, v. 7, p. 351-362, 1983.

JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, Washington, v. 13, p. 651-656, 1977.

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

JIANG, P.; KITCHEN, N.R.; ANDERSON, S.H.; SADLER, E.J.; SUDDUTH, K.A. Estimating plant-available water using the simple inverse yield model for claypan landscapes. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 830-836, 2007.

KAR, G.; KUMAR, A. Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. **Irrigation Science**. v. 28, p.211-220, 2010.

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

KATSOULAS, K.; BAILLE, A.; KITTAS, C. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 106, p. 233-247, 2001.

KENNER, M.E.; KIRCHER, P.L. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. **Agricultural Meteorology**, v. 28, p. 339-349, 1983.

KHERA, K.L.; SANDHU, B.S. Canopy temperature of sugarcane influenced by irrigation regime. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 37, p. 245-258, 1986.

KIRKHAN, M.B. **Principles of soil and water plant relations**. Elsevier Academic Press, 2004. 500 p.

KOONJAH, S.S.; WALKER, S.; SINGELS, A.; VAN ANTWERPEN, R.; NAYAMUTH, A.R. A quantitative study of water stress effect on sugarcane photosynthesis. **Proceedings South African Sugar Technology Association**, South Africa, v. 80, p. 148-158, 2006.

KORNDÖRFER, G.H.; RIBEIRO, A.C.; ANDRADE, L.A.B. Cana-de-açúcar. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5.^a aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999. 322 p.

KRAMER, P.J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 1983. cap. 6, p. 146-186.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. **Water Resource Research**, v. 33, p. 1495-1508, 1997.

LANA, M.A.; VIEIRA, H.J. Fator de conversão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação solar global. In: CONGRESSO..., 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2001.

LARCHER, W. A planta sob estresse. In: LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. p. 341-478.

LEÃO, R.A.O.; TEIXEIRA, A.S.; CANAFÍSTULA F.J.F.; MESQUITA, P.E.G.; COELHO, S.L. Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para a calibração de sensores de umidade no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal. v. 27, n. 1, p. 294-303, 2007.

LEBOURGEOIS, V.; CHOPART, J.L.; BÉGUE, A.; MÉZO L.L. Towards using a thermal infrared index combined with water balance modeling to monitor sugarcane irrigation in a tropical environment. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 75-82, 2010.

LI, L.; NIELSEN, D.C.; YU, Q.; MA, L.; AHUJA, L.R. Evaluating the Crop Water Stress Index and its correlation with latent heat and CO₂ fluxes over winter wheat and maize in the North China plain. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1146-1155, 2010.

LOPES, M.S.; ARAUS, J.L.; VAN HEERDEN, P.D.R.; FOYER, C.H. Enhancing drought tolerance in C₄ crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 9, p. 3135–3153, 2011.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFÓS, 1987. p. 113-118.

MALAVOLTA, E.; HAAG, H.P. **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1964. p. 237-278.

MARIN, F.R.; SUGUITANI, C.; DONZELLI, J.L.; PALLONE, W.J.; NASSIF, D.S.P.; SAKAI R.H.; POLZER, D.L.; VIANA, M.S. Avaliação do modelo Canegro/Dssat para quatro cultivares de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2009. **CD-ROM...** SBMET, 2009.

MARIN, F.R. **Pré-produção características clima**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_10_711200516716.html>. Acesso em: 12 maio 2011.

MARCHIORI, L.F.S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. 273 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

MIRANDA, F.R.; SANTANA, M.G.S.; SOUZA, C.C.M.; OLIVEIRA, C.H.C. Calibração do sensor dielétrico ECH₂O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 3, p. 317-321, 2007.

MONTEITH, J.L.; SZEICZ, G. Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v. 88, p. 496-501, 1962.

MORELAND, C.F. Leaf temperatures of sugar cane. **Plant Physiology**, v. 12, n. 4, p. 989-995, 1936.

MOTA, F.S. **Meteorologia agrícola**. 7.ed. São Paulo: Nobel, 1987.

MOZAMBANI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualizações em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006.

NABLE, R.O.; ROBERTSON, M.J.; BERTHELSEN, S. Response of shoot growth and transpiration to soil drying in sugarcane. **Plant and Soil**, v. 207, p. 59-65, 1999.

NAQVI, H.A.; QAYYUM, R. Effect of drought on sugar cane. **Integral Sugar Journal**, v. 75, p. 168-169, 1973.

NEMIR, A.S. Alcohol fuels-the Brazilian experience and its implications for the United States. **Sugar Journal**, v. 45, p.10-13, 1983.

NETAFIM. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.netafim.com.br/crop/sugar-cane-bio-energy>>. Acesso em: 21 set. 2010.

NETAFIM. **Clima para cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.sugarcane.com/p/climate/>>. Acesso em: 21 set. 2010.

NICKELL, L.G. Ecophysiology of sugar cane. In: ALVIM, P.T. (Coord.). **Ecophysiology of tropical crops**. Itabuna: CEPLAC, 1975. p. 1-52.

NIELSEN, D.C. Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). **Field Crops Research**, v. 23, p. 103-116, 1990.

NIELSEN, D.C.; CLAWSON, K.L.; BLAD, B.L. Effect of solar azimuth and infrared thermometer view direction on measured soybean canopy temperature. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 840-842, 1984.

NÓBREGA, J.Q.; FIDELIS FILHO, J.; RAMANA RAO, T.V.; BELTRÃO, N.E.M.; DANTAS, R.T. Uso da termometria a infravermelho em diferentes densidades populacionais do feijoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2000. p. 318-322. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbmfiles/12d606ff371855d8718075403eaf7a59bf.pdf>>. Acesso: 05 ago. 2010.

NORMAN, J.M.; BECKER, F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 77, p. 153-166, 1995.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; SILVA, D.K.T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; SILVA, D.K.T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná. **Scientia Agrária**, v. 5, n. 1-2, p. 87-94, 2004.

OLUFAYO, A.; BALDY, C.; RUELLE, P. Sorghum yield, water use and canopy temperatures under different levels of irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 30, p.77-90, 1996.

OMETTO, J.C. An equation for the estimation of agro-industrial sugar cane yield in the Piracicaba region. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16, 1978, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ceres, 1978. p. 899-905.

OMETTO, J.C. **Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ. 1980. 17p.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 440 p.

ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983.

ORLANDO FILHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. **Seja o doutor do seu canavial**. Piracicaba: POTAFÓS, 1994. 6 p. (Arquivo do Agrônomo, 6 e Encarte de Informações Agrônômicas, 67).

ORTA, A.H.; ERDEM, Y.; ERDEM, T. Crop water stress index for watermelon. **Scientia Horticulturae**, v. 98, p. 121-130, 2003.

ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M.B.P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Eds.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 71-79.

PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 431 p.

PATIL, R.P. **Physiological approaches for drought tolerance in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.)**. 2008, 152 p. Thesis (Doctor of Physiology and Crop Physiology) – University of Agricultural Sciences, India, Dharwad.

PATTON, E.G. **Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a plant canopy**. 1997. 145 p. Thesis (Doctor) – University of California, Davis.

PAULA, A.L. **Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar em ambiente protegido sob diferentes níveis freáticos**. 2008. 149 p. Dissertação (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

PAYERO, J.O.; IRMAK, S. Variable upper and lower crop water stress index baselines for corn and soybean. **Irrigation Science**, New York, v. 25, p. 21-32, 2006.

PEÑUELAS, J.; SAVÉ, R.; MARFÃ, O.; SERRANO, L. Remotely measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, p. 63-77, 1992.

PEREIRA, A.R.; BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Condicionamento climático da indução ao florescimento em cana-de-açúcar. **Boletim Técnico PLANALSUCAR**, Piracicaba, v. 5, n. 3, p. 5-14, 1983.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PILLAR, V.D. **Clima e vegetação**. Disponível em: <<http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br>>. Acesso em: 14 jul. 2011.

PINTER JUNIOR, R.J.; REGINATO, R.J. A thermal infrared technique for monitoring cotton water stress and scheduling irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, p. 1651-1655, 1982.

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 279 p.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 185, p. 83-89, 2000.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot, mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 185, p. 249-258, 2000.

REECE, C.F. Evaluation of a line heat dissipation sensor for measuring soil matric potential. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p.1022-1028, 1996.

REICHARDT, K.; SOUZA, D.L. Estimativa da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 20, p. 183-189, 1996.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5.^a aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999. 322 p.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science**, Baltimore, v. 68, n. 1, p. 95-112, 1949.

RICHARDS, L.A. **Physical conditions of water in soil**. In: BLACK, C.A.; BLACK, D.D.; EVANS, J.L.; WHITE, L.E.; ENSMINGE, F.E.; CLARK, E.D. Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison: ASASSSA, 1965. p. 128-152.

RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

RITCHIE, J.T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant Soil**, n. 58, p. 81-96, 1981.

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**, v. 64, p. 211-227, 1999.

ROCHECOUSTE, E. **Weed control in sugar cane**. Réduit: Mauritius Sugar Industry Research Institute, 1967. 117 p.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100 p. (Apostila).

ROSILLO-CALLE, F.A. Re-assessment of the Brazilian National Alcohol Programme (PNA). **Industrial Biotechnology**. v. 3, p. 11-16, 1984.

RUHOFF, A.L.; SALDANHA, C.B.; COLLISCHONN, W.; UVO, C.B.; ROCHA, H.R.; CABRAL, O.M.R. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de cerrado e cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 4, p. 137-146, 2009.

SACKS, W.J.; KUCHARICK, C.J. Crop management and phenology trends in the U.S. Corn belt: impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 882-894, 2011.

SADLER, E.J.; BAUER, P.J.; BUSSCHER, W.J.; MILLEN, J.A. Site-specific analysis of a droughted corn crop: II. Water use and stress. **Agronomy Journal**, n. 92, p. 403-410, 2000.

SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. **Fisiología vegetal**. Editorial: Iberoamérica, 1994. 759 p.

SANMARTIN, J.P.; ACEVEDO, E. **Temperatura de canopia, CWSI e rendimento en genotipos de trigo**. 2001. 58 p. Laboratorio de Relación Suelo-Água-Planta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.

SANTOS, S.M.; LEAL, L.M.; SILVA, M.M. Caracterização de estação seca e chuvosa para a cidade de Viçosa-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. p. 1263-1265.

SANTOS, V.R. **Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo**. 2006. 88 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, AL.

SANTOS, V.R.; FILHO, G.M.; ALBUQUERQUE, A.W.; COSTA, J.P.V.; SANTOS, C.G.; SANTOS, A.C.I. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 389-396, 2009.

SAUNDERS, L.C.U. **Métodos de determinação e variabilidade espacial da condutividade hidráulica sob condições de campo**. 1978. 58 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP.

SCARPARI, M.S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In. SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualizações em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006.

SERRANA. Calagem na cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Fertilizantes**, 2001.

SHEN, S.; LECLERC, M.Y. Modelling the turbulence structure in the canopy layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 87, p. 3-25, 1997.

SILVA, A.L.C.; COSTA, W.A.J.M. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. **Tropical Agricultural Research**, v. 16, p. 1-12, 2004.

SILVA, B.S.; FERREIRA, J.A.; RAO, T.V.R.; SILVA, P.R.S. Crop water stress index and water-use efficiency for melon (*Cucumis melo L.*) on different irrigation regimes. **Agricultural Journal**, v. 2, n. 1, p. 31-37, 2007.

SILVA, M.A.; CARLIN S.D.; PARECIN D. Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 51, n. 296, p. 457-466, 2004.

SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; SILVA, J.A.G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, p. 193-201, 2007.

SILVA, T.G.F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semi-árido brasileiro**. 2009. 168 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 139-147, 2011.

SIMÕES W.L.; CALGARO M.; SOUZA M.A.; LIMA J.A. **Influência do sistema de irrigação nas respostas fisiológicas da cana-de-açúcar no submédio São Francisco**. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24487/1/Welson1-2010.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2011.

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**, v. 88, p. 171-178, 2004.

SMITH, D.M. **Growth and function of the sugarcane root system**. Amsterdam: Elsevier, 2005. 35 p.

SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.

SPREER, W.; WIRIYA-ALONGKORN, W.; SPOHRER, K.; ONGPRASERT, S.; MULLER, J. Wind speed affects drought stress monitoring in mango and longon by thermal photography. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRRIGATION OF HORTICULTURAL CROPS, 6, 2009, Chile. **Proceedings...** Chile, 2009.

SOARES, R.A.B.; OLIVEIRA, P.F.M.; CARDOSO, H.R.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A.; ROSENFELD, J. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, p. 38-41, 2004.

SOUSA, J.A.G.C. **Efeito da tensão da água no solo na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1976. 163 p. Dissertação (Doutorado em Ciências) - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, SP.

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, 1998.

STULL, R.B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer, 1988. 666 p.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. 62 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

TANNER, C.B. Plant temperature. **Agronomy Journal**, v. 55, p. 210-211, 1963.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAVARES, A.C.S. **Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao excesso de água no solo**. 2009. 220 p. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

TEIXEIRA, E.N. **Interceptação de água pelo dossel e influência da época da irrigação na qualidade da cana-de-açúcar**. 2009. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TESTI, L.; GOLDHAMER, D.A.; INIESTA, F.; SALINAS, M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. **Irrigation Science**, v. 26, p. 395-405, 2008.

TRENTIN, R. **Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar**. 2010. 61 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TRINTINALHA, M.A.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; FOLEGATTI, M.V.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 3, p. 353-360, 2004.

ÜNLÜ, M.; KANBER, R.; KAPUR, B.; TEKIN, S.; KOÇ, L. The crop water stress index (CWSI) for drip irrigated cotton in a semi-arid region of Turkey. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 21, p. 2258-2273, 2011.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugar cane**. Waltham: The Chronica Botânica, 1952. 371 p.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892- 898, 1980.

VAN LIER, Q.J. Índices da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 95-106.

VAREJÃO-SILVA, M.A.; BARROS, A.H.C. **Zoneamento de aptidão do Estado de Pernambuco para três distintos cenários pluviométricos**. Disponível em: <http://www.itep.br/meteorologia/lamepe/zoneamento/docs/doc_can.html>. Acesso em: 20 set. 2010.

VERTUAN, C.A. **Fluxos de transpiração de três variedades de cana-de-açúcar sob altas condições de demanda hídrica**. 2003. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, UFV, 1991. 449 p.

VIEIRA, D.B. **As técnicas de irrigação**. 2.ed. São Paulo: Globo, 1995. 263 p.

WAGGONER, P.E.; SHAW, R.H. Temperature of potato and tomato leaves. **Plant Physiology**, v. 27, p. 710-724, 1952.

WANG, X.; YANG, W.; WHEATON, A.; COOLEY, N.; MORAN, B. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: a first step towards automated plant water stress monitoring. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 73, p. 74-83, 2010.

WHEN-ZONG, Z.; YA-DONG, H.; HONG-JUAN, D. Relationship between canopy temperature at flowering stage and soil water content, yield components in rice. **Rice Science**, v. 1, n. 14, p. 67-70, 2007.

WILSON, J.D. Turbulent transport within the plant canopy: estimation of areal evapotranspiration. **IAHS Pub**, v. 177, p. 43-80, 1989.

YANG, X.; SHORT, T.H.; FOX, R.D.; BAUERLE, W.L. The microclimate and transpiration of a greenhouse cucumber crop. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 6, p. 2143-2150, 1989.

YUAN, G.; LUO Y.; SUN, X; TANG, D. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 64, p. 29-40, 2004.

ZIA, S.; SPOHRER, K.; DU, W.; SPREER, W.; HE, X.; MÜLLER, J. Effect of wind and radiation on the crop water stress index derived by infrared thermography. In: CONFERENCE ON INTERNATIONAL RESEARCH ON FOOD SECURITY, NATURAL RESOURCE MANAGEMENT AND RURAL DEVELOPMENT, 2010, Tropentag. **Proceedings...** Tropentag: ETH Zurich, 2010.

ZOLNIER, S. **Dynamic misting control techniques for poinsettia propagation**. Lexington: UK, 1999. 343 p. Thesis (Ph.D. in Biosystems and Agricultural Engineering) - University of Kentucky.

ZOLNIER, S.; GATES, R.S.; ANDERSON R.G.; NOKES, S.E.; DUNCAN, G.A. Non-water-stressed baseline as a tool for dynamic control of a misting system for propagation of poinsettias. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n.1, p. 137-147, 2001.