

DAVI BOEHRINGER

**EFEITOS DE REDUÇÕES CONTÍNUAS E INTERMITENTES DO POTENCIAL  
MATRICIAL DE ÁGUA NAS TROCAS GASOSAS E NO CRESCIMENTO DE  
CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS — BRASIL  
2014

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

B671e  
2014

Boehringer, Davi, 1982-  
Efeitos de reduções contínuas e intermitentes do potencial  
matricial de água nas trocas gasosas e no crescimento de  
cultivares de cana-de-açúcar / Davi Boehringer. – Viçosa, MG,  
2014.

xvi, 113f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Sérgio Zolnier.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.97-107.

1. Cana-de-açúcar - Cultivo. 2. *Saccharum officinarum*. 3.  
Cana-de-açúcar - Consumo hídrico. 4. Plantas - Estresse hídrico.  
5. Fotossíntese. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.61

DAVI BOEHRINGER


**EFEITOS DE REDUÇÕES CONTÍNUAS E INTERMITENTES DO  
POTENCIAL MATRICIAL DE ÁGUA NAS TROCAS GASOSAS E NO  
CRESCIMENTO DE CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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

APROVADA: 12 de dezembro de 2014.

  
Milton Edgar Pereira Flores

  
Kaciêda Naomi Kuki

  
Thieres George Freire da Silva

  
Wagner Luiz Araújo  
(Coorientador)

  
Sérgio Zolnier  
(Orientador)

À minha família,

DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pelo sustento, e por tudo que tem feito na minha vida.

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

À CAPES pelo auxílio financeiro.

Ao professor Sérgio Zolnier, por toda orientação, dedicação, ajuda e competência.

Aos coorientadores, Márcio Henrique Pereira Barbosa e Wagner L. Araújo, por todo auxílio e sugestões.

À Isadora, pelo amor, carinho, paciência e ajuda em todas as fases do curso.

Ao João Vitor, Marcela, Gabriela, Poliana e Evandro, pela amizade e por toda ajuda na realização do experimento.

Ao funcionário Ricardo, que tanto contribuiu na condução do experimento.

À Graça, por todo empenho, profissionalismo e amizade.

Aos amigos, pelos momentos agradáveis.

## ÍNDICE

LISTA DE ABREVIACÕES .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xii
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 Ecofisiologia da cana-de-açúcar .....	4
2.2 Déficit hídrico .....	5
2.3 Principais efeitos morfofisiológicos causados pela deficiência hídrica .....	8
2.3.1 Alterações morfológicas .....	8
2.3.2 Potencial de água nas folhas .....	12
2.3.3 Condutância estomática .....	13
2.3.4 Trocas gasosas de vapor d'água e de CO <sub>2</sub> .....	14
2.3.5 Pigmentos fotossintéticos: clorofila <i>a</i> e <i>b</i> .....	16
2.3.6 Máxima eficiência do Fotossistema II .....	18
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
3.1 Descrição do local de cultivo da cana-de-açúcar .....	21
3.2 Medição dos elementos meteorológicos .....	26
3.3 Determinação dos graus-dia acumulados após o plantio .....	29
3.4 Potencial matricial de água no substrato de cultivo .....	30
3.5 Descrição geral e específica dos experimentos conduzidos .....	31
3.5.1 Efeito de períodos alternados de estresse hídrico e de reposição de água no substrato de cultivo nas trocas gasosas, eficiência quântica potencial do FSII, potencial de água nas folhas e crescimento dos colmos .....	31
3.5.1.1 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas e o ambiente da casa-de-vegetação .....	33
3.5.1.2 Avaliações da eficiência quântica potencial do FSII .....	33
3.5.1.3 Medições do potencial de água nas folhas .....	34
3.5.1.4 Biometria das cultivares de cana-de-açúcar .....	34
3.5.2 Efeito de reduções contínuas do potencial matricial de água nas trocas gasosas e na eficiência quântica potencial do FSII .....	35
3.5.3 Alterações das trocas gasosas e da emissão de fluorescência da clorofila <i>a</i> na cultivar RB92579 sob deficiência hídrica .....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
4.1 Elementos meteorológicos .....	40
4.2 Efeito de períodos alternados de estresse hídrico e de reposição de água nas trocas gasosas, eficiência quântica potencial do FSII, potencial de água nas folhas e crescimento dos colmos .....	42

4.2.1 Trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente da casa-de-vegetação sob deficiência hídrica leve.....	42
4.2.2 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo no interior da casa-de-vegetação sob deficiência hídrica moderada .....	47
4.2.3 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo no interior da casa-de-vegetação sob deficiência hídrica severa .....	50
4.2.4 Eficiência quântica potencial do FSII .....	53
4.2.5 Potencial de água nas folhas de cana-de-açúcar .....	56
4.2.6 Biometria das cultivares de cana-de-açúcar .....	60
4.2.6.1 Estatura de colmos .....	60
4.2.6.2 Taxa de alongação do colmo.....	64
4.3 Alterações das trocas gasosas e da emissão de fluorescência da clorofila a nas cultivares RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064 sob reduções contínuas do potencial matricial de água no substrato de cultivo.....	66
4.3.1 Elementos meteorológicos.....	66
4.3.2 Potencial matricial de água no substrato de cultivo .....	68
4.3.3 Trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo .....	68
4.3.3.1 Condutância estomática e taxa de transpiração .....	68
4.3.3.2 Taxa de assimilação líquida e concentração intercelular de CO <sub>2</sub> .....	74
4.3.4 Eficiência instantânea do uso da água.....	78
4.3.5 Eficiência quântica potencial do FSII .....	80
4.4 Alterações das trocas gasosas e da emissão de fluorescência da clorofila a na cultivar RB92579 sob deficiência hídrica.....	80
4.4.1 Medição dos elementos meteorológicos aos 213 DAP .....	80
4.4.2 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre a cultivar de cana-de-açúcar RB92579 e o ambiente da casa-de-vegetação aos 213 DAP .....	82
4.4.3 Eficiência instantânea do uso de água.....	87
4.4.4 Fluorescência da clorofila a .....	90
5. CONCLUSÕES .....	95
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97
7. APÊNDICE .....	108

**LISTA DE ABREVIações**

<i>A</i>	Taxa de Assimilação Líquida de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
<i>A/E</i>	Eficiência instantânea do uso de água ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ )
<i>A/g<sub>s</sub></i>	Eficiência intrínseca do uso de água ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ )
ATP	Adenosina trifosfato
<i>C<sub>i</sub></i>	Concentração intercelular de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ )
DAP	Dias após o plantio
DPV <sub>ar</sub>	Déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar
DPV <sub>F</sub>	Déficit da pressão de saturação do vapor d'água entre as folhas de cana-de-açúcar e ar do ambiente de cultivo
<i>E</i>	Taxa de transpiração ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
ETR	Taxa de transporte de elétrons
<i>F<sub>0</sub></i>	Fluorescência mínima emitida por tecidos foliares adaptados ao escuro, obtidas a partir de medições realizadas antes do amanhecer
<i>F<sub>m</sub></i>	Fluorescência máxima emitida por tecidos foliares adaptados ao escuro, obtidas a partir de medições realizadas antes do amanhecer
<i>F<sub>m'</sub></i>	Fluorescência máxima emitida por tecidos foliares adaptados à incidência momentânea de radiação fotossinteticamente ativa
<i>F<sub>s</sub></i>	Fluorescência emitida em condições de equilíbrio dinâmico por tecidos foliares adaptados à incidência momentânea de radiação fotossinteticamente ativa
<i>F<sub>v</sub></i>	Fluorescências variáveis em tecidos vegetais adaptados ao escuro ( $F_v = F_m - F_0$ )

$\Delta F$	Fluorescências variáveis em tecidos vegetais adaptados à incidência momentânea de radiação fotossinteticamente ativa ( $\Delta F = F_m' - F_s$ )
$F_v/F_m$	Eficiência quântica potencial do Fotossistema II
FSI	Fotossistema I
FSII	Fotossistema II
$g_s$	Condutância estomática ao vapor de água ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
IRGA	Analisador de gás a infravermelho – Infra Red Gas Analyser
$J_{\text{FSII}}$	Fluxo de energia para os processos fotoquímicos ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
$J_{\text{NO}}$	Fluxo de energia para a dissipação basal não-regulada ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
$J_{\text{NPQ}}$	Fluxo de energia para a dissipação térmica regulada ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
NADPH	Nicotinamida adenina dinucleotídeo de piridina fosfato reduzida
$q_N$	Extinção não-fotoquímica da fluorescência
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
$t_{\text{ar}}$	Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )
$t_{\text{ard}}$	Temperatura do ar média diária ( $^{\circ}\text{C}$ )
$t_b$	Temperatura base inferior da cultura ( $^{\circ}\text{C}$ )
$t_f$	Temperatura foliar ( $^{\circ}\text{C}$ )
UR	Umidade relativa do ar (%)
$\Phi_{\text{FSII}}$	Rendimento quântico efetivo do FSII (%)
$\Phi_{\text{NO}}$	Rendimento quântico da dissipação basal não regulada (%)
$\Phi_{\text{NPQ}}$	Rendimento quântico da dissipação térmica regulada (%)
$\Psi_w$	Potencial de água nas folhas (MPa)
$\Psi_m$	Potencial matricial de água no solo ou substrato de cultivo (kPa)

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1. Vista geral da disposição das plantas de cana-de-açúcar na casa-de-vegetação aos 60 DAP, a partir do cultivo em vasos plásticos preenchidos com substrato comercial..... 22
- Figura 3.2. Reservatório plástico com capacidade para 120 L (A), para preparo e armazenamento da solução nutritiva. Disposição das quatro motobombas (B), com potência individual de 32 W, na parte inferior do reservatório, as quais foram acionadas para realização dos eventos de irrigação ou de fertirrigação durante o período experimental. .... 23
- Figura 3.3. Microcubos individuais, instalados na superfície do substrato de cultivo, para irrigação ou fertirrigação das cultivares de cana-de-açúcar (A). Disposição dos vasos plásticos utilizados na coleta do excedente de água ou de solução nutritiva (B). . 25
- Figura 3.4. Tubo de PVC aspirado (A), instalado próximo ao centro da casa-de-vegetação, e disposição dos sensores eletrônicos (B): sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar instalado no interior do tubo aspirado (1); sensores de radiação fotossinteticamente ativa (2) e radiação solar global (3) posicionados externamente ao tubo na sua parte superior; sensor de velocidade do ar (4) afastado do tubo de aspiração e posicionado no lado oposto da entrada de ar no tubo aspirado. .... 27
- Figura 3.5. Módulos seriais de aquisição de dados utilizados na conversão analógico-digital dos sinais dos sensores utilizados na medição dos elementos meteorológicos no ambiente de cultivo da cana-de-açúcar..... 29
- Figura 4.2. Valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), observados no período compreendido entre 9:00 e 12:00h, após o início dos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica leve ( $\Psi_m > -50$  kPa). Os dados da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ), nos dois dias anteriores às datas das campanhas de medições, também são apresentados. .... 43
- Figura 4.3. Condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) e concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ), para as cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica leve ( $\Psi_m > -50$  kPa)..... 45
- Figura 4.4. Valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), observados no período compreendido

- entre 9:00 e 12:00h, após o início dos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica moderada ( $\Psi_m > -100$  kPa). Os dados da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ), nos dois dias anteriores às datas das campanhas de medições, também são apresentados. .... 48
- Figura 4.5. Condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) e concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ), para as cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica moderada ( $\Psi_m > -100$  kPa). .... 49
- Figura 4.6. Valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), observados no período compreendido entre 9:00 e 12:00h, após o início dos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica severa ( $\Psi_m > -150$  kPa). Os dados da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ), nos dois dias anteriores às datas das campanhas de medições, também são apresentados. .... 51
- Figura 4.7. Condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) e concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ), para as cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica severa ( $\Psi_m > -150$  kPa). 52
- Figura 4.8. Eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) das cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica. Os dados foram obtidos na antemãnhã dos dias de medições das trocas gasosas entre as cultivares e o ambiente da casa-de-vegetação. .... 54
- Figura 4.9. Potencial de água nas folhas das cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas à deficiência hídrica. Os dados foram obtidos na antemãnhã dos dias de medições das trocas gasosas entre as cultivares e o ambiente da casa-de-vegetação. .... 57
- Figura 4.10. Potencial de água nas folhas das cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica. Os dados foram obtidos no período compreendido entre 9:00 e 12:00h. .... 58
- Figura 4.11. Variação da estatura dos colmos das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064,

- submetidas aos tratamentos controle (a), deficiência hídrica leve (b), moderada (c) e severa (d), ao longo do período de formação, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16 °C. .... 61
- Figura 4.12. Taxa de alongação do colmo (TEC) das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle (a), deficiência hídrica leve (b), moderada (c) e severa (d), em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16°C, Viçosa-MG. .... 65
- Figura 4.13. Valores médios da radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), no interior da casa-de-vegetação. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b). .... 67
- Figura 4.14. Variação do potencial matricial de água no substrato de cultivo ( $\Psi_m$ ) durante o período experimental, após a suspensão das irrigações, referente ao tratamento com restrição hídrica para as quatro cultivares de cana-de-açúcar. Valores correspondem à média  $\pm$  desvio padrão. .... 69
- Figura 4.15. Condutância estomática ( $g_s$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b). .... 70
- Figura 4.16. Taxa de transpiração ( $E$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b). .... 73
- Figura 4.17. Taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b). .... 75
- Figura 4.18. Concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b). .... 77
- Figura 4.19. Eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b). .... 79

- Figura 4.20. Eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. Os dados foram obtidos na antemanhã dos dias de medições das trocas gasosas entre as cultivares e o ambiente da casa-de-vegetação..... 81
- Figura 4.21. Alterações diurnas da temperatura do ar ( $t_{ar}$ ) e do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ) do ambiente de cultivo, juntamente com a alteração da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) fixada no IRGA..... 82
- Figura 4.22. Alterações diurnas na condutância estomática ( $g_s$ ) e na taxa de transpiração ( $E$ ), referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa)..... 83
- Figura 4.23. Alterações diurnas na taxa de assimilação líquida ( $A$ ) e na concentração intercelular de  $CO_2$ , referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa)..... 84
- Figura 4.24. Alterações diurnas nas eficiências do uso de água intrínseca ( $A/g_s$ ) e instantânea ( $A/E$ ), referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa)..... 88
- Figura 4.25. Partição diurna dos rendimentos quânticos percentuais de utilização da radiação fotossinteticamente ativa em componentes efetivo ( $\Phi_{FSII}$ ), dissipação térmica regulada ( $\Phi_{NPQ}$ ) e basal não regulada ( $\Phi_{NO}$ ) pela cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos: (a) controle ( $\Psi_m > -10$  kPa); e deficiências hídricas: (b) leve ( $\Psi_m > -100$  kPa); (c) moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa); e (d) severa ( $\Psi_m > -500$  kPa)..... 91
- Figura 4.26. Alterações na partição de energia para os processos fotoquímicos ( $J_{FSII}$ ), dissipação basal não-regulada ( $J_{NO}$ ) e dissipação térmica regulada ( $J_{NPQ}$ ) pela cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa)..... 94

**LISTA DE TABELAS**

- Tabela 4.1. Parâmetros estimados pelo modelo sigmoidal ( $a$ ,  $b$  e  $x_0$ ) e coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{aj}$ ), para a estatura do colmo de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16 °C, Viçosa-MG ..... 62
- Tabela 4.2. Valores médios da estatura dos colmos das cultivares submetidas a diferentes níveis de estresse, aos 191 DAP ..... 63

## RESUMO

BOEHRINGER, Davi, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2014. **Efeito de reduções contínuas e intermitentes do potencial matricial de água nas trocas gasosas e no crescimento de cultivares de cana-de-açúcar.** Orientador: Sérgio Zolnier. Coorientadores: Márcio Henrique Pereira Barbosa e Wagner Luiz Araújo.

O estresse hídrico está inserido entre os principais fatores que limitam o crescimento e a produtividade agrícola. Embora seja moderadamente resistente à seca, a cultura da cana-de-açúcar tem consideráveis perdas de produtividade em decorrência de períodos prolongados de estiagem ou mesmo períodos intermitentes com precipitação pluvial insuficiente. Essa pesquisa teve como objetivo principal avaliar os efeitos de reduções contínuas e intermitentes do potencial matricial de água nas trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo, assim como o crescimento e as taxas de alongação dos colmos durante a fase de formação da cultura. Foram realizados três experimentos utilizando-se quatro cultivares de cana-de-açúcar, em casa-de-vegetação não climatizada, na área experimental da Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. No primeiro experimento, foram avaliadas as trocas gasosas, a fluorescência da clorofila *a*, o potencial de água nas folhas e o crescimento dos colmos das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, em decorrência de alterações do potencial matricial de água no substrato de cultivo, imposto a partir da suspensão periódica e retorno posterior dos eventos de irrigação e de fertirrigação. No segundo, avaliaram-se as trocas gasosas e a fluorescência da clorofila *a* das mesmas cultivares, no entanto, sob reduções contínuas do potencial matricial de água a partir da suspensão total dos eventos de irrigação. No terceiro experimento, analisou-se o comportamento das trocas gasosas e da fluorescência da clorofila *a* durante o período diurno, em um dia típico de céu claro, utilizando a cultivar RB92579 sob diferentes condições de disponibilidade hídrica. O déficit hídrico aplicado às cultivares de cana-de-açúcar provocou reduções na condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ) e taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ). Em média, no

primeiro experimento, os valores de  $A$  foram 32,9 e 21,6  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para os tratamentos controle e deficiência hídrica leve, respectivamente, não havendo diferenças significativas entre cultivares. As diferenças mais nítidas ocorreram quando as plantas foram submetidas ao déficit hídrico moderado, no qual as reduções em relação ao controle foram, em média, 28, 42, 48 e 52 % para as cultivares RB867515, RB92579, RB928064 e RB855453, respectivamente. A cultivar RB867515 apresentou também os maiores valores de  $g_s$ ,  $E$  e estatura de colmos nos tratamentos com déficit hídrico moderado e severo, podendo ser usada como padrão de comparação. No segundo experimento, as maiores diferenças entre as cultivares ocorreram quando estavam submetidas ao potencial matricial de água em torno de  $-50$  kPa, utilizando as medições obtidas entre 11:00 e 13:00 h. A cultivar RB867515 apresentou valores de  $A$ ,  $g_s$ , e  $E$  duas vezes superiores às demais cultivares, aproximadamente. A eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) foi fortemente influenciada pela disponibilidade de água no substrato de cultivo e pelos níveis de radiação solar reinantes nos dias anteriores às medições. No que se refere à eficiência do uso de água, esta tende a aumentar nos estágios iniciais do estresse hídrico, quando há limitação estomática da fotossíntese. No entanto, com a intensificação do estresse hídrico, também ocorreram limitações bioquímicas e, assim, a eficiência do uso de água diminuiu.

## ABSTRACT

BOEHRINGER, Davi, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2014. **Effect of continuous and intermittent reductions in water matric potential in gas exchange and growth of sugarcane cultivars.** Advisor: Sérgio Zolnier. Co-advisors: Márcio Henrique Pereira Barbosa and Wagner Luiz Araújo.

Water stress is included among the main factors that limit the growth and agricultural productivity. Although it is moderately resistant to drought, the sugarcane crop has considerable loss of productivity due to the prolonged drought periods or intermittent ones with inadequate rainfall. This research was developed with the main objective of evaluating, the effects of continuous and intermittent reductions of the water matric potential on gas exchange of carbon dioxide and water vapor between the plants of sugarcane and the crop environment, as well as the growth and stem elongation rates during the crop formative phase. Three experiments were carried out with four sugarcane cultivars, in a non-controlled environment greenhouse, located at the experimental area of Agricultural Meteorology of the Universidade Federal de Viçosa. In the first experiment, it was evaluated the gas exchange, the fluorescence of chlorophyll a, leaf water potential and the stalk growth of the sugarcane cultivars RB867515, RB92579, RB855453 and RB928064, due to changes of the matric water potential in the growth substrate, imposed by periodic suspension and subsequent return of irrigation and fertigation events. In the second, the gas exchange and chlorophyll a fluorescence of the same cultivars were evaluated, however, under continued reductions of the matric water potential by total suspension of the irrigation events. In the third experiment, the behavior of gas exchange and chlorophyll a fluorescence were analyzed during the diurnal time period, on a typical clear sky day, using the RB92579 cultivar under different water availability conditions. The water deficit applied to sugarcane cultivars caused reductions in stomatal conductance ( $g_s$ ), transpiration rates ( $E$ ) and net  $CO_2$  assimilation rates ( $A$ ). On the average, the measured values in the first experiment were 32.9 and 21.6  $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  for control and mild water stress treatments, respectively, with no significant

differences between cultivars. The most evident differences occurred when the plants were subjected to moderate water deficit, in which reductions compared to the control treatment were on the average 28, 42, 48 and 52% for cultivars RB867515, RB92579, RB928064 and RB855453, respectively. The cultivar RB867515 also presented the largest values of  $g_s$ ,  $E$  and stem heights under moderate or severe water stress treatments and it can be used as standard for comparisons. In the second experiment, the biggest differences between cultivars occurred when they were subjected to the matric water potential next to  $-50$  kPa, during measurements performed between 11:00 and 13:00 h. The cultivar RB867515 presented values of  $A$ ,  $g_s$ , and  $E$  twice higher than the others, approximately. The potential quantum yield of Photosystem II ( $F_v / F_m$ ) was strongly influenced by water availability in the growth substrate and the prevailing solar radiation levels in the days prior to the measurements. As regard to the water use efficiency, it tends to increase during the initial stages of water stress, when there is stomatal limitation of photosynthesis. However, with increased water stress, there are also biochemical limitations and thus the water use efficiency decreases.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de energias renováveis é o modo mais eficiente de alcançar o desenvolvimento sustentável e, adicionalmente, prolongar a existência das reservas de combustíveis fósseis (FRANCO *et al.*, 2011). O uso de biocombustíveis, em substituição a fontes energéticas não-renováveis como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral, tem sido incentivado nos últimos anos para mitigar possíveis alterações climáticas constatadas a partir da era industrial. Além disso, o uso de combustíveis renováveis também favorece o aumento da segurança energética, a criação de empregos e o desenvolvimento rural (MAPA, 2014). Dentre as culturas que podem ser utilizadas como fontes de energia renováveis, destaca-se a cana-de-açúcar, cujo cultivo no Brasil tem crescido significativamente nos últimos anos.

Essa expansão é ocasionada pelo incentivo da indústria sucroalcooleira, alavancada pelo consumo crescente de álcool e pela política mundial de bioenergia (FRONZAGLIA, 2007; YUAN *et al.*, 2008). A área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil, na safra 2012/13, compreendeu cerca de 8,49 milhões de hectares, proporcionando uma produção próxima de 589 milhões de toneladas, sendo que a projeção para a próxima safra mostra um aumento de 3,8% em área e 12% em produção. Já o Estado de Minas Gerais teve uma área plantada de 721,9 mil hectares na safra 2012/13, proporcionando produção de cerca de 51,21 milhões de toneladas. Para a próxima safra, há uma projeção de variação positiva em 8,03% para a área de plantio e 17,9% para a de produção, colocando o estado como o terceiro colocado no Brasil (CONAB, 2014).

Além da expansão de áreas produtoras, é necessário conduzir pesquisas que contemplem o aumento de produtividade da cana-de-açúcar e, paralelamente, o uso eficiente de água. A avaliação do comportamento fisiológico sob diferentes condições ambientais é uma prática importante para uma seleção mais “pontual” de genótipos, objetivando obter altas produtividades em meio à limitação climática (KIM *et al.*, 2006).

Indicadores fisiológicos, como condutância estomática, potencial hídrico, taxa de transpiração, temperatura foliar, transporte fotoquímico de elétrons, fotossíntese e partição de fotoassimilados, são alterados pela deficiência hídrica (TRENTIN, 2010; ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010; ENDRES *et al.*, 2010), resultando, assim, em redução no tamanho das plantas, na área foliar e, conseqüentemente, na produtividade (TAIZ; ZEIGER, 2013). A quantificação dos processos fisiológicos permite selecionar genótipos com maior eficiência fotossintética (GILBERT; ZWIENIECKI; HOLBROOK, 2011), maior eficiência do uso de água e mais adaptados às condições de restrição hídrica (ENDRES *et al.*, 2010; GONÇALVES *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2012).

A tolerância à seca é uma característica multigênica (BRAY, 2002; RODRIGUES *et al.*, 2009), sendo expressa em diferentes níveis organizacionais que incluem desde respostas celulares até modificações morfológicas (PASSIOURA, 1997). Dada tal complexidade, é razoável sugerir que a tolerância diferencial de genótipos de cana-de-açúcar à seca seja ocasionada por mais de uma característica fisiológica, sendo necessário, portanto, a avaliação de características que integrem as respostas em diferentes níveis hierárquicos, tal como a produção de biomassa, área foliar e/ou crescimento da planta. Cabe mencionar que em relação aos genótipos

de cana-de-açúcar cultivados atualmente, pouco se sabe sobre as respostas fisiológicas a condições adversas, sendo conferido o grau de tolerância ou suscetibilidade à seca de acordo apenas com a produção de biomassa, uma medida global da eficiência produtiva.

O uso de técnicas que avaliem os efeitos morfológicos e fisiológicos do déficit hídrico, de forma rápida e não destrutiva, pode ser de grande utilidade para a seleção de genótipos tolerantes à seca (O'NEILL et al. 2006). A caracterização dos materiais genéticos, assim como a elucidação dos possíveis mecanismos responsáveis pelo comportamento diferencial de genótipos sob condição de estresse, pode fornecer parâmetros que auxiliarão na seleção de novos materiais genéticos, com grande probabilidade de redução do tempo de liberação do produto para comercialização (MAGALHÃES *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2007).

Essa pesquisa foi desenvolvida com o objetivo principal de avaliar os efeitos de reduções contínuas e intermitentes do potencial matricial de água nas trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo, assim como o crescimento e as taxas de alongação dos colmos durante a fase de formação da cultura.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Ecofisiologia 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. É uma cultura adaptada a condições de altos valores de radiação solar, de temperatura do ar e de estresse hídrico moderado, sendo que requer quantidades consideráveis de água para suprir sua demanda hídrica, pois, dependendo do estágio fenológico, 70% do seu peso é constituído de água (SEGATO et al., 2006).

Em razão da falta de resistência às baixas temperaturas, a cultura se adapta melhor em uma faixa de latitude situada entre 35°N e 30°S e em altitudes que variam desde o nível do mar até pouco mais de 1.000 m, sendo considerada, essencialmente como uma planta tropical. O ciclo de cultivo é de longa duração, compreendendo o período chuvoso e as estações de inverno e verão (DIOLA, e SANTOS, 2011).

Os principais componentes agrometeorológicos que controlam o crescimento, a produção e a qualidade dos colmos são: temperatura, radiação solar e umidade disponível. Segundo Diola e Santos (2011), o clima "ideal" para máxima produção de açúcar é caracterizado por: uma estação longa, quente e com alta incidência de radiação solar, além de umidade adequada; seguida por uma estação razoavelmente seca, livre de ventos muito fortes, ensolarada e fresca, mas sem ocorrência de geadas para o amadurecimento das plantas.

Um total de chuva entre 1.100 e 1.500 mm é suficiente, desde que a distribuição seja uniforme. Além disso, as chuvas precisam ser abundantes nos meses de crescimento vegetativo e, em seguida, deve ocorrer um período mais seco para o amadurecimento. Durante o período de crescimento ativo, a chuva favorece o crescimento rápido das plantas, o alongamento dos colmos e a formação de entrenós. Porém, durante o período de amadurecimento, não é desejável muita chuva porque isso reduz o teor de sacarose do caldo (DIOLA, e SANTOS, 2011).

## **2.2 Déficit hídrico**

A água é um solvente de grande importância e essencial a todas as formas de vida. As plantas são constituídas de 85% a 95% de água e o déficit hídrico pode promover alterações fisiológicas e bioquímicas (NEUMAIER; NEPOMUCENO, 1994). Segundo Taiz e Zeiger (2013), o déficit hídrico pode ser definido como o conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do maior valor exibido pela planta em um estado de hidratação ótimo. Dessa forma, o déficit é comum à produção de muitas culturas, podendo apresentar um impacto negativo no crescimento e na produtividade (GRAÇA, 2009).

O suprimento de água para uma cultura resulta de interações que se estabelecem ao longo do sistema solo-planta-atmosfera. As influências recíprocas entre esses componentes básicos tornam o sistema dinâmico e fortemente interligado, de tal forma que a condição hídrica da cultura dependerá sempre da combinação desses três segmentos. À medida que o solo seca, a absorção de água pelas plantas torna-se mais difícil porque aumenta a força de retenção. Entretanto, quanto maior for a demanda

evaporativa da atmosfera mais elevada será a necessidade de fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. Segundo Carlesso (1995), o suprimento de água às plantas é determinado pela habilidade da cultura em utilizar a água armazenada no solo, enquanto a demanda da atmosfera, por outro lado, está relacionada à combinação de fatores meteorológicos interagindo com o dossel vegetativo da cultura.

De acordo com previsões ambientais, que sinalizam para o aumento do aquecimento global nas próximas décadas, um aumento dos períodos de seca certamente acompanhará esse fenômeno. Portanto, entender a tolerância das plantas ao déficit hídrico e como explorá-la, devem ser julgados não só como problemas de ordem agrônômica, fisiológica ou ecológica, mas também como importante meta internacional de significância humanitária, econômica e política (GUIMARÃES, 2011)

Neste contexto, em regiões onde ocorre estresse hídrico, um fator importante na produtividade da cultura é o uso de variedades adaptadas às diferentes condições edáficas e climáticas, que sejam capazes de explorar com maior eficiência os nutrientes e a umidade disponíveis em cada situação. Além disso, a variedade é um dos componentes de produção mais fáceis de ser substituído e aceito pelos produtores, por não implicar em maiores acréscimos nos custos de produção (SHIGAKI et al., 2003).

Na cultura da cana-de-açúcar, a deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis por maiores reduções na produção, principalmente por afetar a cultura mesmo nas estações mais chuvosas, em decorrência de veranicos. No entanto, o seu efeito sobre a produtividade varia em função da época do ano, fase do ciclo fenológico da cultura (INMAN-BAMBER; SMITH,

2005) e características das variedades (SILVA *et al.*, 2008a; INMAN-BAMBER; JAGER, 1986).

Durante seu crescimento, a cana-de-açúcar passa por quatro estágios fenológicos distintos, denominados brotação e emergência, perfilhamento, crescimento intenso e maturação (VAN DILLEWIJN, 1952 apud RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000). A fase de perfilhamento, juntamente com a de crescimento intenso, é conhecida como a fase de formação e tem sido identificada como a mais crítica no que diz respeito à demanda hídrica e aos efeitos da limitação de água na produtividade e longevidade da cultura (RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000).

Em condição de deficiência hídrica, as plantas apresentam uma série de alterações morfofisiológicas, tais como enrolamento da folha, alteração do ângulo de inserção da folha no caule, redução dos valores de condutância estomática, de transpiração, de fotossíntese, de área foliar, além de aumento da condutividade hidráulica das raízes. Os decréscimos das taxas fotossintéticas ocorrem em decorrência do comprometimento das etapas fotoquímica e bioquímica, da modificação da atividade de enzimas do metabolismo de nitrogênio e carbono e do aumento no conteúdo de carboidratos solúveis e aminoácidos livres. Dessa forma, alterações no acúmulo de matéria seca da parte aérea e das raízes são comumente observadas (MACHADO, 2009; CHAVES *et al.*, 2002; 2008; FLEXAS *et al.*, 2006; LAWLOR, 2002; PIMENTEL, 2004). Algumas destas respostas fazem parte de mecanismos que visam reduzir os efeitos deletérios da baixa disponibilidade hídrica, constituindo, portanto, mecanismos de tolerância à seca (MACHADO, 2009; KRAMER, 1980).

## **2.3 Principais efeitos morfofisiológicos causados pela deficiência hídrica**

A diminuição do conteúdo de água no solo afeta acentuadamente alguns processos morfofisiológicos, enquanto outros são relativamente insensíveis (CRUSCIOL, *et al.*, 2010; KELLING, 1995). A extensão dos efeitos do déficit hídrico nas espécies vegetais depende da interação entre intensidade e duração, além da capacidade genética das plantas em responder às mudanças do ambiente (SANTOS; CARLESSO; 1998). As respostas mais proeminentes da cana-de-açúcar ao déficit hídrico são:

### **2.3.1 Alterações morfológicas**

A falta de água no solo se torna fator limitante na produção sustentável em todo o mundo, pois afeta simultaneamente um número variado de características morfológicas nas plantas (ARANTES, 2012; SILVA *et al.*, 2008a). As plantas submetidas ao déficit hídrico têm como primeiro efeito a redução na turgescência celular, responsável pelo alongamento de células que dirigem à expansão foliar (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). O déficit hídrico afeta vários aspectos do crescimento vegetal e os efeitos mais óbvios do estresse se referem à redução no tamanho das plantas, na sua área foliar e na produtividade da cultura (KRAMER, 1983; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Adicionalmente, entre as características morfológicas afetadas pela deficiência hídrica, destacam-se a área foliar e número de folhas (INMAN-BAMBER, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2005), a senescência foliar (SMITH; SINGEL, 2006), a altura das plantas (ALMEIDA *et al.*, 2008), o diâmetro de colmos e o número de perfilhos (RAMESH; MAHADEVASWANY, 2000). De acordo com Landell e Silva (2004), os atributos de produção decisivos para o

potencial agrícola são: altura das plantas, diâmetro dos colmos e número de perfilhos. Porém, conforme Domaingue (1995) e Soares et al. (2004), a altura dos colmos é a variável mais severamente reduzida em condições de déficit hídrico.

Características foliares como massa foliar específica, espessura e densidade foliar também são afetadas pela disponibilidade de água (CASTRO-DÍEZ *et al.*, 1997; BUSSOTTI *et al.*, 2000). Existe relação entre a longevidade foliar e características morfológicas das folhas. As espécies que possuem maior longevidade foliar geralmente apresentam menor área foliar específica, ou maior massa foliar específica, devido ao aumento da espessura das folhas e da cutícula, além de uma maior área lignificada, o que aumenta a razão massa/área, permitindo a folha resistir por um longo período em condições adversas, como períodos secos (LIMA *et al.*, 2006).

Sob condições de deficiência hídrica, uma característica muito observada em cultivos de cana-de-açúcar é a ocorrência do enrolamento das folhas para diminuir a superfície de transpiração. A severidade deste sintoma pode variar consideravelmente entre os genótipos de cana-de-açúcar, de acordo com a sua tolerância. Contudo, essa aparência muda rapidamente com o retorno das chuvas ou se as plantas forem irrigadas novamente (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

O crescimento celular é considerado o processo mais sensível à baixa disponibilidade de água no solo, com a divisão e a expansão celular sendo diretamente inibidas pelo estresse hídrico (SAUSEN, 2007). Esta sensibilidade deve-se ao impacto do déficit hídrico sobre a taxa de expansão das células, devido à perda de turgescência das folhas. As plantas podem

manter a turgidez por meio do ajuste osmótico e, possivelmente, pelo controle da elasticidade das suas paredes celulares (CRUSCIOL *et al.*, 2010). Dessa forma, o ajuste osmótico, assim como fechamento dos estômatos, permite a atenuação da desidratação e da perda de turgidez, em decorrência da manutenção do conteúdo de água nas células (SANTOS; CARLESSO, 1998).

O déficit hídrico na fase inicial afeta o rendimento da cultura da cana-de-açúcar, reduzindo o tamanho das plantas, produção de perfilhos, número de colmos industrializáveis, área foliar, altura e diâmetro dos colmos e, finalmente, o peso individual dos colmos (CRUSCIOL *et al.*, 2010; ROBERTSON *et al.*, 1999; RAO *et al.*, 2005).

O baixo teor de umidade nos tecidos pode reduzir pela metade o comprimento de alguns entrenós. Contudo, se houver disponibilidade de água novamente, a perda pode ser recompensada pelo maior comprimento dos entrenós seguintes (CASTRO e KLUGE, 2001). Esta característica morfológica, observada com o período de estiagem, é a aproximação dos nós dos colmos, ou seja, a formação de nós e entrenós muito curtos, diminuindo o volume do parênquima para armazenamento de sacarose (SEGATO *et al.*, 2006). Segundo Silva *et al.* (2008b), a variação na altura da planta é um indicativo de tolerância ou susceptibilidade da cana-de-açúcar à deficiência hídrica.

A redução do crescimento é considerada como uma característica adaptativa para a sobrevivência da cultura, pois permite direcionar assimilados e energia, antes utilizados para o crescimento do caule, em moléculas protetoras para combater o estresse e/ou para manter o

crescimento da raiz, visando à intensificação da absorção de água (SAUSEN, 2007).

A limitação à expansão da área foliar também é uma resposta ao déficit hídrico, pois não limita somente o tamanho de cada folha, mas também o surgimento de novas folhas (SANTOS; CARLESSO, 1998; SHIGAKI *et al.*, 2004). Temperaturas elevadas em períodos de estresse hídrico causam diminuição da área foliar e, de acordo com Inman-Bamber (2004), o tempo de exposição à seca afeta negativamente o crescimento da parte aérea, sobretudo a produção de folhas, acelerando a senescência foliar.

Na cultura da cana-de-açúcar, o aparecimento de novas folhas é lento e há certo retardo sob condições de déficit hídrico, mas a brotação ocorre rapidamente quando as plantas são irrigadas novamente (CRUSCIOL *et al.*, 2010). Os danos causados pelo estresse nos tecidos mais jovens são maiores que nos tecidos adultos. Porém, quando se interrompe a deficiência hídrica, o desenvolvimento é recuperado somente nas folhas mais jovens (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Sabe-se que a expansão das folhas é mais afetada pela falta de água do que o alongamento do colmo. Com a inibição da expansão foliar, a área foliar torna-se menor e a planta transpira menos, conservando, efetivamente, um suprimento de água limitado no solo por um período mais longo (CRUSCIOL *et al.*, 2010). Além disso, com a diminuição da área foliar, ocorre redução da interceptação da radiação solar incidente nas folhas. A redução da área foliar e da interceptação da radiação solar fotossinteticamente ativa afetam expressivamente as taxas de fotossíntese do dossel vegetativo. Portanto, valores baixos do índice de área foliar (IAF) indicam uma captação

ineficiente da energia disponível, enquanto IAFs extremamente altos prejudicam o crescimento pelo sombreamento das folhas inferiores (SANTOS; CARLESSO, 1998). O IAF é indicador efetivo na avaliação do rendimento final da cultura de cana-de-açúcar, sendo que os maiores valores durante o ciclo de desenvolvimento estariam relacionados com a maior produção final de colmos.

### 2.3.2 Potencial de água nas folhas

O potencial de água nas folhas ( $\Psi_w$ ) diminui com o declínio da disponibilidade de água no solo ou substrato de cultivo, levando à perda da turgescência e induzindo também ao fechamento estomático, mas as respostas diferenciam-se de espécie para espécie (MANSUR; BARBOSA, 2000; TAVARES, 2009). O  $\Psi_w$  indica o estado energético foliar, cujos gradientes explicam os fluxos de água no sistema solo-planta-atmosfera. Embora haja variação ao longo do dia, mesmo em plantas irrigadas, essa variável tem sido muito utilizada em estudos das relações hídricas dos vegetais. O valor de  $\Psi_w$  revela a diferença entre o estado energético da planta no sistema considerado e em um estado de referência, cujo potencial de água é considerado zero (BERGONCI *et al.*, 2000). O fechamento estomático pode ocorrer dentro de uma ampla faixa de valores do potencial de água nas folhas, dependendo da espécie (JONES, 1992).

O limiar da fração de água disponível para a planta, que corresponde a quantidade de água existente no solo a partir da qual a condutância diminui, comparada com um valor de referência, varia para diferentes espécies. Além disso, o limiar da fração de água disponível para as plantas é maior para o

potencial de água nas folhas e expansão foliar do que para a condutância estomática e trocas gasosas, e há variações intraespecíficas dependendo das condições experimentais, como o tipo de solo e, principalmente, demanda evaporativa (SADRAS; MILROY, 1996). Quando os valores de  $\Psi_w$  estão próximos de  $-1,3$  MPa, considerando medições realizada às 12:00h, o alongamento celular é praticamente nulo (INMAN-BAMBER; JAGER, 1986).

A sensibilidade de um determinado processo fisiológico a déficit hídrico é, em grande parte, um reflexo da estratégia da planta em lidar com a faixa de variação na disponibilidade de água que ela experimenta em seu ambiente. (TAIZ; ZIEGER, 2013).

### **2.3.3 Condutância estomática**

O controle da abertura e fechamento dos estômatos é um processo extremamente complexo, envolvendo fatores do ambiente e da própria planta. O rápido fechamento estomático é uma característica desejável e variável em genótipos de cana-de-açúcar, sendo causado pela eficiente sinalização entre as raízes e as folhas (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; MACHADO, 2009). Dentre as hipóteses de sinalização entre o sistema radicular e a parte aérea, pode-se dizer que o fechamento estomático, devido à restrição de água no solo ou substrato, ocorre em função de sinais químicos e/ou hidráulicos (DAVIES; ZHANG, 1991; SMITH *et al.*, 2005).

O fechamento dos estômatos restringe a troca de gases entre a câmara sub-estomática e a atmosfera, causando diminuição na transpiração e na difusão de  $\text{CO}_2$  para o interior da folha, sendo o último utilizado no processo fotossintético (CRUSCIOL *et al.*, 2010). É um mecanismo útil de tolerância à

seca, sendo que, com a reidratação da planta no período noturno ou após eventos de precipitação ou de irrigação, o potencial de água nas folhas pode aumentar ou até ser restabelecido. No entanto, em alguns casos, a atividade de controle dos estômatos pode não ser recuperada totalmente, pois a complexidade de resposta irá depender do genótipo e da taxa de redução do potencial matricial de água no solo ou substrato de cultivo ( $\Psi_m$ ) (VENKATARAMANA; RAO; NAIDO, 1986; SANTOS; CARLESSO, 1998). As folhas que crescem sob condições de deficiência hídrica apresentam estômatos menores, mas com densidade estomática maior (LARCHER, 2006; PAIVA; OLIVEIRA, 2006).

De acordo com Smit e Singels (2006), em condições de déficit hídrico, genótipos de cana-de-açúcar mais tolerantes à seca mantêm maior abertura estomática e potencial de água nas folhas que os genótipos suscetíveis. Contudo, a resposta estomática deve ser considerada com cautela, pois alguns estudos demonstraram que os genótipos mais tolerantes apresentam rápida redução da abertura estomática devido à seca (INMAN-BAMBER *et al.*, 2005; SALIENDRA; MEINZER, 1989; SMITH *et al.*, 2005). Segundo Naidu e Bhagyalakshmi (1967), o genótipo de cana-de-açúcar tolerante apresenta rápida resposta estomática tanto em condição de seca (fechamento) como na reidratação (abertura).

#### **2.3.4 Trocas gasosas de vapor d'água e de CO<sub>2</sub>**

A deficiência hídrica no solo afeta as trocas gasosas foliares de cana-de-açúcar, causando decréscimos na transpiração e na fotossíntese. Ambos os processos são regulados pela condutância estomática (JONES, 1998; VU;

ALLEN; GESCH, 2006), que decresce em plantas submetidas à baixa disponibilidade hídrica. Essa resposta adaptativa proporciona a manutenção da hidratação da planta, evitando, em primeira instância, alterações significativas no metabolismo vegetal (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SALIENDRA *et al.*, 1996).

O controle das trocas gasosas é considerado um processo complexo, pois as plantas enfrentam certo dilema. Assim, se ocorrer ligeira diminuição de turgescência celular, suficiente apenas para causar o fechamento parcial dos estômatos, a absorção de dióxido de carbono será dificultada, diminuindo sensivelmente a atividade de assimilação de dióxido de carbono. Portanto, nesta situação, as plantas precisam, simultaneamente, abrir os estômatos para a entrada de CO<sub>2</sub> e também fechá-los para evitar a perda de água (PIMENTEL, 1998; ANGELOCCI, 2002).

Diversos são os trabalhos que mostram a influência da deficiência hídrica nas trocas gasosas sobre as culturas, em especial sobre a cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SMIT; SINGELS, 2006). As variáveis pertinentes às trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta, de acordo com a espécie, tanto por limitações difusivas, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para assimilação, quanto por limitações metabólicas, pelo aumento do efeito fotoinibitório (GONÇALVES *et al.*, 2010). O déficit hídrico reduz o processo fotossintético de três maneiras: pela redução na área foliar disponível para interceptar a radiação solar; pela redução da difusão do CO<sub>2</sub> para dentro da folha; e pela redução da habilidade dos cloroplastos em fixar o CO<sub>2</sub>.

Há alta correlação entre o potencial de água nas folhas e a fotossíntese, pois, em plantas estressadas, a diminuição do  $\Psi_w$  causa o decréscimo de atividades enzimáticas que envolvem o processo de fixação e redução do  $\text{CO}_2$  (KOONJAH *et al.*, 2006). Sob valores de  $\Psi_w$  inferiores a  $-0,9$  MPa, que representam um déficit hídrico moderado, decréscimos na fotossíntese resultam da limitação estomática (DU *et al.*, 1998). A limitação metabólica inicia-se quando os tecidos foliares atingem  $\Psi_w$  menores que  $-1,2$  MPa, apresentando redução da atividade enzimática (piruvatoortofosfatodiquinase) e dos níveis de piruvato (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). A síntese de sacarose é afetada apenas quando os valores de  $\Psi_w$  são inferiores a  $-0,9$  MPa (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

A eficiência fotossintética varia de acordo com as distintas cultivares de cana-de-açúcar. Além disso, a maior inclinação da folha no colmo proporciona maior eficiência fotossintética, devido à penetração mais eficiente da radiação solar no dossel vegetativo (GONÇALVES, 2008). A formação do dossel e sua resposta sobre a fotossíntese e produtividade estão relacionadas, principalmente, à quantidade de energia interceptada e absorvida. Assim, a fotossíntese desempenha importante papel na produção de uma cultura, pois a produção de assimilados afeta diretamente o rendimento final de uma cultura (SANTOS; CARLESSO, 1998).

### **2.3.5 Pigmentos fotossintéticos: clorofila a e b**

Grande parte da radiação incidente sobre a superfície da folha não é utilizada nos processos fotoquímicos. Esta radiação é perdida de várias formas: uma parte é refletida; outra porção é transmitida, ou seja, atravessa a

folha sem ser absorvida; enquanto que uma terceira fração da radiação é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes. No entanto, nem todos os fótons absorvidos pelos pigmentos são utilizados nos processos fotoquímicos (TAIZ; ZEIGER, 2013).

As clorofilas (*a* e *b*) e os carotenóides são pigmentos extremamente abundantes. Em decorrência da instabilidade de sua estrutura química, as clorofilas são facilmente degradadas, resultando em produtos de decomposição que modificam a percepção e qualidade dos vegetais (GONÇALVES, 2008).

As clorofilas localizam-se nos cloroplastos, sendo que nesta organela se realiza a fotossíntese, a qual possui duas reações importantes: a fotoquímica, nas membranas dos tilacóides e a bioquímica, no estroma do cloroplasto. Tais organelas, além das clorofilas, contêm outros pigmentos denominados acessórios, tais como os carotenóides (carotenos e xantofilas) (LARCHER, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Ao absorver os fótons (energia fotossinteticamente ativa), as moléculas de clorofila modificam temporariamente suas configurações eletrônicas, passando do estado basal para o estado excitado, o qual possui nível de energia superior, sendo ainda muito instável e de vida curta (PINCELLI, 2010).

Assim, após absorverem os fótons, esses pigmentos podem dissipar o excesso de energia proveniente da radiação solar por meio de quatro formas competitivas: dissipação fotoquímica (utilizada na fotossíntese), fluorescência (reemissão na forma de luz), conversão direta de energia (retorno da clorofila ao seu estado base sem ocorrer emissão de fótons) e dissipação não-

fotoquímica (reemissão na forma de calor) (TAIZ; ZEIGER, 2013; MAXWELL; JONHSON, 2000).

A deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis pela diminuição de pigmentos nas folhas, fazendo com que o ciclo de crescimento seja alterado (PINCELLI, 2010). Além disso, a relação entre os pigmentos de clorofila *a* e *b* pode ser usada como indicativo de resposta ao sombreamento e à senescência prematura, assim como a relação entre os pigmentos de clorofila e de carotenóides pode ser adotada, porém em menor proporção, para diagnosticar a taxa de senescência sob estresse hídrico (HENDRY; PRICE, 1993). Assim, métodos de quantificação e de estimativa de tais pigmentos também podem ser utilizados como ferramentas para seleção de genótipos de cana-de-açúcar tolerantes à seca (GONÇALVES, 2008).

### **2.3.6 Máxima eficiência do Fotossistema II**

Nas membranas dos tilacóides, os fotossistemas I e II (FSI e FSII) são responsáveis por captar e converter a energia solar fotossinteticamente ativa (fótons) em energia química (ATP e NADPH), sendo a água fundamental para o fotossistema II neste processo. O centro de reação do fotossistema II é formado por um complexo proteico, junto à molécula de clorofila P680, que possui um redutor muito forte que oxida a molécula de água em elétrons, prótons e oxigênio (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Os elétrons produzidos são transferidos para a plastoquinona, que é um carregador de prótons  $H^+$ . Assim, o plastoquinona, tendo recebido os elétrons, transfere os prótons do estroma (externo) para o lúmen (interno) e doa os elétrons para o citocromo *f*. Finalmente, os elétrons do citocromo são

transferidos para a plastocianina, que se move até próximo ao fotossistema I e doa os elétrons para a ferredoxina, a qual, por sua vez, reduz o  $\text{NADP}^+$  em NADPH (PINCELLI, 2010). Os prótons produzidos pela oxidação da água, junto aos prótons transferidos pela plastoquinona, geram um potencial eletroquímico no interior dos tilacóides (lúmen), sendo utilizados na síntese de ATP (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Com base no processo descrito anteriormente, o Fotossistema II depende, portanto, de água para a geração de energia química, a qual será utilizada, posteriormente, para a fixação de  $\text{CO}_2$ . Este fato demonstra que reduções na disponibilidade hídrica resultam em menor eficiência do Fotossistema II, ou seja, menos ATP e NADPH são formados e, como consequência, menos  $\text{CO}_2$  é fixado (LU; ZHANG, 1999; SOUZA *et al.*, 2005).

O rendimento quântico do Fotossistema II (FSII), obtido a partir da fluorescência da clorofila *a*, pode estimar a integridade do FSII de uma determinada folha, pois revela o nível energético de excitação dos pigmentos que dirigem a fotossíntese. Esse nível depende do balanço de energia resultante da irradiação solar e das somas das taxas de fotossíntese e de dissipação térmica (SCHOLLES; HORTON, 1993).

As principais variáveis observadas nas medições da fluorescência da clorofila *a* são: fluorescência mínima ( $F_0$ ), que é a fluorescência quando todos os centros de reação estão abertos; fluorescência máxima ( $F_m$ ), referente à fluorescência quando todos os centros de reação estão fechados; fluorescência variável ( $F_v$ ), determinada pelo estado do centro de reação (aberto ou fechado), e definida como diferença entre  $F_m$  e  $F_0$ ; e eficiência quântica potencial do FSII ( $F_v/F_m$ ).

Em plantas sob condições de estresse, a menor eficiência fotossintética pode ser causada pela: 1) menor dissipação de energia por meio do transporte de elétrons, ocasionando um declínio na eficiência quântica potencial do FSII, a qual é indicada pela menor relação  $F_v/F_m$  e pela taxa de transporte de elétrons (ETR), sendo usualmente associados ao aumento na extinção não-fotoquímica da fluorescência (qN) e no “pool” de zeaxantina; 2) início dos processos de fotoinibição quando a capacidade de fotoproteção é excedida, sendo indicado pelo declínio na relação  $F_v/F_m$  e acompanhado pelo aumento de  $F_0$ , devido à redução excessiva da cadeia de transporte de elétrons (CHAGAS, 2007).

A presença de condições ambientais estressantes leva ao decréscimo característico na eficiência quântica potencial no FSII, sendo ser detectada pela queda na relação  $F_v/F_m$ , paralela à queda da fotossíntese devido à menor eficiência fotoquímica que, por sua vez, pode reduzir a atividade de algumas enzimas do ciclo de Calvin e mudanças nas rotas químicas, como acúmulo de aminoácidos e ácidos orgânicos (CHAGAS, 2007).

Dessa forma, a habilidade em manter elevadas razões de  $F_v/F_m$  sob estresse hídrico pode ser um indicativo de eficiência no uso da radiação pela fotoquímica e pela assimilação de carbono, assim como a resposta relativamente rápida de  $F_v/F_m$  ao estresse hídrico moderado pode ser uma ferramenta importante para seleção de germoplasma de cana-de-açúcar tolerantes à seca (GRAÇA, 2009), pois pode ser indicativo de fotoinibição associada a danos no PSII (MAXWELL; JONHSON, 2000).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição do local de cultivo da cana-de-açúcar

Foram realizados três experimentos com quatro cultivares de cana-de-açúcar em uma casa-de-vegetação não climatizada (Figura 3.1), situada na área experimental da Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (latitude 20°45' S; longitude 42°52' O; e altitude de 690 m). As plantas foram cultivadas simultaneamente nos três experimentos, sendo que o material biológico foi obtido a partir do plantio de toletes de colmos selecionados no dia 26/06/2013, utilizando-se vasos plásticos com capacidade para 15 litros, os quais foram preenchidos com um substrato comercial (Bioplant, Nova Ponte, MG) à base de casca de Pinus, vermiculita, fibra de coco e complementos minerais (NPK e micronutrientes).

Com o objetivo de reduzir possíveis falhas de germinação e, paralelamente, obter um padrão homogêneo de crescimento, dois toletes foram colocados em cada vaso a uma profundidade de 5 cm, aproximadamente. Assim, após a emergência, realizou-se um desbaste para que apenas uma planta fosse mantida em cada vaso, eliminando-se, portanto, as plantas com crescimento diferente do padrão desejado. No total, foram cultivadas 192 plantas com um único colmo durante os seis meses de realização do experimento, o qual, portanto, compreendeu apenas a fase de formação da cana-de-açúcar, que é a mais afetada pelo estresse hídrico.



Figura 3.1. Vista geral da disposição das plantas de cana-de-açúcar na casa-de-vegetação aos 60 DAP, a partir do cultivo em vasos plásticos preenchidos com substrato comercial.

Para implementação dos três experimentos, foram utilizadas as cultivares RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064. A cultivar RB867515 é a mais plantada na região Centro-Sul atualmente, enquanto a RB92579 é a quinta mais utilizada (PMGCA, 2014), sendo ambas consideradas tolerantes ao déficit hídrico. As cultivares RB855453 e RB928064 são consideradas medianamente exigente e suscetível ao déficit hídrico, respectivamente, e também são cultivadas comercialmente (BATISTA, 2012).

Foram realizadas fertirrigações diárias ou periódicas para o fornecimento de água e nutrientes para as plantas, dependendo dos objetivos de cada experimento. A solução nutritiva foi preparada, manualmente, em um reservatório plástico com capacidade para 120 L (Figura 3.2.A), onde o sal fertilizante solúvel (Peters Professional 20-20-20 GP, Marysville – OH, Estados Unidos) foi dissolvido antes da realização dos eventos de fertirrigação.



Figura 3.2. Reservatório plástico com capacidade para 120 L (A), para preparo e armazenamento da solução nutritiva. Disposição das quatro motobombas (B), com potência individual de 32 W, na parte inferior do reservatório, as quais foram acionadas para realização dos eventos de irrigação ou de fertirrigação durante o período experimental.

O fertilizante possui a seguinte composição: 20% de N, 20% de  $P_2O_5$ , 20% de  $K_2O$ , 0,05% de Mg, 0,0068% de B, 0,0036% de Cu, 0,05% de Fe,

0,025% de Mn, 0,0009% de Mo, 0,0025% de Zn. Os eventos de irrigação e fertirrigação foram implementados a partir do acionamento de quatro motobombas com potência nominal de 32 W (Figura 3.2.B).

No fundo de cada vaso, foi perfurado um orifício circular para permitir a drenagem do excesso de água e de solução nutritiva proveniente da irrigação e fertirrigação, respectivamente. Acima deste orifício, foi colocado um disco de tela plástica com malha de 1 mm para impedir a remoção do substrato. Sobre a tela, foram depositados 0,5 L de carvão vegetal visando facilitar a drenagem lateral na parte inferior do vaso de cultivo.

Os eventos de irrigação e de fertirrigação foram realizados por meio de microtubos flexíveis (Figura 3.3.A), derivados de tubulações de PVC. Antes da aplicação dos tratamentos, a umidade no substrato foi mantida próximo à capacidade de campo através de irrigação diária e a condutividade elétrica (CE) da solução percolada nos vasos foi monitorada por meio de um condutivímetro (modelo CDH-42, Omega, Stamford – CT, Estados Unidos) e mantida entre 2,0 e 3,0 dS m<sup>-1</sup>.

Um perfil hidropônico de polipropileno (Hidrogood, Taboão da Serra, SP) com 2,6 m de comprimento foi mantido a uma inclinação de 4% para coleta da solução nutritiva drenada em cada fileira. Na extremidade mais baixa do perfil, foram instalados drenos que estavam conectados a vasos de 4 L, onde foi armazenada a solução excedente após a realização de cada evento de fertirrigação. As extremidades do perfil foram vedadas com uma peça de borracha, específica para essa finalidade. Cada perfil coletou a drenagem proveniente de seis vasos de cultivo, sendo então utilizado um total de 32 perfis de coleta para os 192 vasos cultivados com cana-de-açúcar (Figura 3.3.B).



Figura 3.3. Microcubos individuais, instalados na superfície do substrato de cultivo, para irrigação ou fertirrigação das cultivares de cana-de-açúcar (A). Disposição dos vasos plásticos utilizados na coleta do excedente de água ou de solução nutritiva (B).

Durante o período de crescimento, os perfilhos da cana-de-açúcar foram removidos periodicamente, mantendo-se apenas um colmo em cada vaso. As

plantas foram tutoradas individualmente, para garantir o crescimento vertical e evitar o tombamento causado pelo próprio peso.

### 3.2 Medição dos elementos meteorológicos

A temperatura ( $t_{ar}$ ) e a umidade relativa do ar (UR) foram obtidas por meio de um sensor conjugado (modelo HMP60, Vaisala, Woburn – MA, Estados Unidos), instalado no interior de um tubo de PVC aspirado (Figura 3.4). O objetivo do abrigo foi impedir a incidência direta da radiação solar sobre os elementos sensíveis do sensor e, simultaneamente, garantir uma taxa de ventilação de  $5 \text{ m s}^{-1}$  (ALLEN *et al.*, 1998).

Para obtenção dos valores instantâneos da radiação solar global ( $R_g$ ) e da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), assim como determinação dos valores das integrais diárias, utilizaram-se um piranômetro (modelo LI-200SA, Li-Cor, Lincoln – NE, Estados Unidos) e um sensor quântico (modelo LI-190SA, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA). Com o objetivo de quantificar a movimentação de ar no interior da casa-de-vegetação, a velocidade do ar ( $v_{ar}$ ) foi medida por um anemômetro de fio quente (modelo FMA-903-I, Omega, Stamford – CT, Estados Unidos). O piranômetro e o anemômetro também foram instalados na torre de aspiração constituída de PVC.

Inicialmente, os sensores foram instalados a 2,0 m da superfície do solo e, posteriormente, deslocados verticalmente para cima, à medida que ocorreu o crescimento da cultura, procurando sempre mantê-los acima do dossel vegetativo.

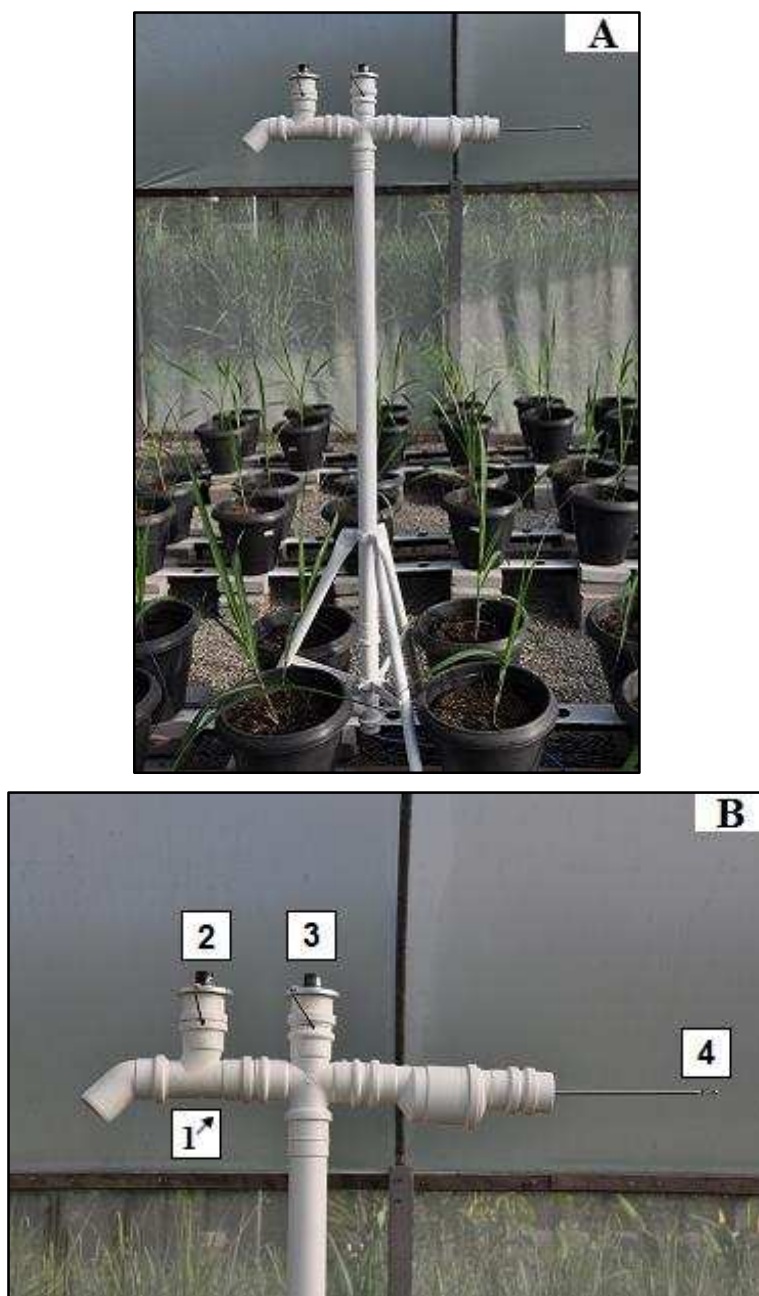


Figura 3.4. Tubo de PVC aspirado (A), instalado próximo ao centro da casa-de-vegetação, e disposição dos sensores eletrônicos (B): sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar instalado no interior do tubo aspirado (1); sensores de radiação fotossinteticamente ativa (2) e radiação solar global (3) posicionados externamente ao tubo na sua parte superior; sensor de velocidade do ar (4) afastado do tubo de aspiração e posicionado no lado oposto da entrada de ar no tubo aspirado.

A medição dos elementos meteorológicos no interior da casa-de-vegetação foi realizada por meio de um sistema computadorizado, onde foi desenvolvido um programa em linguagem C++ Builder, que, além de possibilitar a aquisição de dados, foi responsável pelo acionamento das motobombas de fertirrigação. O acionamento das motobombas foi realizado por relés que estavam conectados à porta paralela do microcomputador.

O sistema de aquisição de dados foi composto por módulos seriais de conversão analógico-digital (modelo LR-7018, LR Informática Industrial, Porto Alegre, RS). Além dos módulos de conversão dos sinais analógicos dos sensores meteorológicos, foi utilizado um módulo conversor de sinais digitais (modelo LR-7520, LR Informática Industrial, Porto Alegre, RS) para possibilitar a comunicação entre os protocolos RS-485 e RS-232, utilizados para transmissão de dados a longas e curtas distâncias, respectivamente. Os dados de cada elemento meteorológico foram armazenados em um microcomputador em períodos de 1 minuto, correspondentes à média de cinco medições realizadas em intervalos de 1 s no período compreendido entre 55 e 59 s.



Figura 3.5. Módulos seriais de aquisição de dados utilizados na conversão analógico-digital dos sinais dos sensores utilizados na medição dos elementos meteorológicos no ambiente de cultivo da cana-de-açúcar.

### 3.3 Determinação dos graus-dia acumulados após o plantio

Os valores de graus-dia acumulados após o plantio têm sido utilizados como uma das variáveis independentes em modelos de estimativa das taxas de crescimento da cana-de-açúcar (BATISTA *et al.*, 2013). Assim, conforme recomendado por Smit; Singels (2006), foi adotada a temperatura base inferior da cultura igual a 16 °C para o crescimento dos colmos. Este valor foi subtraído dos dados diários de temperatura média do ar, cujos resultados foram acumulados como mostrado na Equação 1:

$$GD = \sum_{i=1}^n (t_{ard} - t_b) \quad (1)$$

em que:

GD - graus-dia acumulados após o plantio da cana-de-açúcar (°Cd);

$t_{ard}$  - temperatura média diária do ar (°C);

$t_b$  - temperatura base inferior da cultura (°C).

### 3.4 Potencial matricial de água no substrato de cultivo

Para determinação do potencial matricial de água no substrato de cultivo ( $\Psi_m$ ), foi necessário, primeiramente, obter a massa de cada componente do conjunto constituído de um vaso plástico, substrato, água e massa fresca de uma planta de cana-de-açúcar. Dessa forma, a massa de água contida no substrato de cultivo foi estimada como resíduo do sistema, a partir da utilização da Equação 2:

$$m_a = m_t - m_v - m_{ss} - m_p \quad (2)$$

em que:

$m_a$  - massa de água contida no substrato utilizado em cada vaso de cultivo, kg;

$m_t$  - massa do conjunto constituído de um vaso plástico, substrato, água e uma planta de cana-de-açúcar, kg;

$m_v$  - massa do vaso plástico, incluindo a massa do disco de tela plástica, kg;

$m_{ss}$  - massa do substrato seco, incluindo a massa seca do carvão vegetal, obtidas antes do plantio, kg;

$m_p$  - massa fresca total de uma planta de cana-de-açúcar, kg, estimada a partir das equações propostas por Batista (2012) para as quatro cultivares, tendo como base os valores de altura e diâmetro do colmo.

Utilizando-se a relação  $m_a/m_{ss}$  foi possível obter o potencial matricial de água no substrato de cultivo por meio da curva de retenção de água ajustada por Trentin (2010).

### **3.5 Descrição geral e específica dos experimentos conduzidos**

Foram realizados três experimentos distintos com as 192 plantas de cana-de-açúcar cultivadas na casa-de-vegetação. Até as datas de início da aplicação dos tratamentos, específica para cada experimento, as plantas foram irrigadas diariamente às 9:00 h, com duração que variou de 10 a 25 min do início ao final do período de cultivo de 6 meses. No primeiro (3.5.1), foram avaliados os efeitos de períodos alternados de estresse hídrico e de reposição de água no substrato de cultivo nas trocas gasosas, eficiência quântica potencial do FSII, potencial de água nas folhas e crescimento dos colmos. No segundo (3.5.2), avaliou-se o efeito de reduções contínuas do potencial matricial de água no substrato de cultivo nas trocas gasosas e na eficiência quântica potencial do FSII. No terceiro (3.5.3), o objetivo foi avaliar o comportamento das trocas gasosas e da fluorescência da clorofila *a* na cultivar RB92579 ao longo do período diurno, quando submetida a diferentes disponibilidades de água no substrato.

A seguir serão descritos os detalhes pertinentes a cada experimento.

#### **3.5.1 Efeito de períodos alternados de estresse hídrico e de reposição de água no substrato de cultivo nas trocas gasosas, eficiência quântica potencial do FSII, potencial de água nas folhas e crescimento dos colmos**

O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito das alterações do potencial matricial de água no substrato de cultivo a partir da suspensão periódica e retorno posterior dos eventos de irrigação e de fertirrigação no comportamento fisiológico das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453

e RB928064, com base nas medições de trocas gasosas, eficiência quântica potencial do FSII, potencial de água nas folhas e crescimento de colmos.

As cultivares de cana-de-açúcar foram submetidas a quatro níveis de disponibilidade hídrica, cujos limites do potencial matricial de água no substrato de cultivo ( $\Psi_m$ ) foram aqui denominados, para propósitos comparativos, de controle, deficiência hídrica leve, moderada e severa. A partir dos 84 dias após o plantio (DAP), as quatro cultivares foram submetidas a períodos alternados de estresse hídrico e de reposição de água no substrato de cultivo, cujos limites de  $\Psi_m$  estiveram compreendidos entre a capacidade de campo ( $> -10$  kPa) e os níveis de  $-50$ ,  $-100$  e  $-150$  kPa, respectivamente para deficiência leve, moderada e severa. Para o monitoramento da variação do potencial matricial de água no substrato, o conjunto, constituído de um vaso plástico, substrato de cultivo e uma planta de cana-de-açúcar, foi pesado periodicamente. No entanto, também foram realizadas pesagens ao entardecer do dia anterior às datas de medições e, em seguida, volumes de água diferentes foram adicionados às unidades experimentais para ajuste de  $\Psi_m$ , conforme o potencial matricial estabelecido nos tratamentos.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, no esquema fatorial  $4 \times 4$ , com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando detectada diferença significativa, as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade. O programa de análises estatísticas utilizado foi o Sisvar (FERREIRA, 2011).

### **3.5.1.1 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas e o ambiente da casa-de-vegetação**

As medições das trocas gasosas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e de vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), entre as plantas e o ambiente de cultivo no interior da casa-de-vegetação, foram realizadas com um analisador de gás a infravermelho – Infra Red Gas Analyser (IRGA) – (Modelo LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, USA). A radiação fotossinteticamente ativa foi controlada e mantida constante sob  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Simultaneamente, o  $\text{CO}_2$  atmosférico no interior da câmara do equipamento foi mantido em torno de  $380 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  e a temperatura do bloco da câmara fixada no início de cada avaliação, de acordo com a temperatura do ambiente

O período de medição esteve compreendido entre 9:00 e 12:00 h, sendo que as variáveis medidas, na porção mediana da folha +1 (primeira folha com a lígula exposta), foram: taxa de assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ) e concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ). Com base na relação  $A/E$ , foi calculada a eficiência instantânea do uso de água.

### **3.5.1.2 Avaliações da eficiência quântica potencial do FSII**

As medições da fluorescência da clorofila *a* foram realizadas no período noturno, antes do amanhecer, por meio do fluorômetro acoplado à câmara do analisador de gás a infravermelho (LI-6400XT). A partir dos valores da fluorescência mínima ( $F_0$ ) e máxima ( $F_m$ ), foi calculada a fluorescência variável em tecidos vegetais adaptados ao escuro ( $F_v = F_m - F_0$ ) e em seguida, determinada a eficiência quântica potencial ( $F_v/F_m$ ).

### **3.5.1.3 Medições do potencial de água nas folhas**

O potencial de água nas folhas das quatro cultivares de cana-de-açúcar foi determinado em dois horários distintos: na antemanhã ( $\Psi_{w1}$ ) e simultaneamente ( $\Psi_{w2}$ ) às medições das trocas gasosas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e de vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). As leituras foram efetuadas na porção distal da folha +2 ( $\Psi_{w1}$ ) e da folha +1 ( $\Psi_{w2}$ ), utilizando-se um medidor com câmara de pressão portátil (Modelo 3115, Soil Moisture Equipment, Santa Barbara CA, Estados Unidos).

### **3.5.1.4 Biometria das cultivares de cana-de-açúcar**

O monitoramento biométrico das plantas teve início no dia 31/07/2013 (35 DAP) e término no dia 03/01/2014 (191 DAP). Foi medida a estatura dos colmos com o auxílio de uma régua graduada, da superfície do substrato até a base da lígula da folha +1;

Os dados medidos de estatura do colmo foram submetidos à análise de regressão não-linear, tendo como variável independente graus-dia acumulados após o plantio, obtendo-se ajuste do modelo sigmoidal com três parâmetros:

$$EC = \frac{a}{(1 + \exp(-(GD - GD_0)/b))} \quad (4)$$

em que:

EC – estatura dos colmos, cm;

GD - graus-dia acumulados após o plantio, °Cd;

a, b e  $GD_0$  - parâmetros do modelo.

A taxa de alongação do colmo (TEC,  $\text{cm } ^\circ\text{Cd}^{-1}$ ), foi obtida pela derivação do modelo sigmoidal com três parâmetros, conforme Batista (2012).

### **3.5.2 Efeito de reduções contínuas do potencial matricial de água nas trocas gasosas e na eficiência quântica potencial do FSII**

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o efeito das reduções contínuas do potencial matricial de água, a partir da suspensão dos eventos de irrigação e de fertirrigação, no comportamento fisiológico das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, com base nas medições de trocas gasosas e eficiência quântica potencial do FSII.

Foram utilizadas oito plantas de cada cultivar, com padrão uniforme de crescimento, tendo como base valores semelhantes de altura e área foliar. Quatro plantas de cada cultivar foram submetidas ao tratamento controle enquanto as quatro restantes foram submetidas ao declínio contínuo da disponibilidade hídrica. As plantas submetidas ao tratamento controle foram mantidas em substrato com teor de água próximo à capacidade de campo ( $\Psi_m > -10$  kPa) a partir da aplicação de irrigações ou fertirrigações diárias durante todo o período experimental. Em contraste, o potencial matricial de água no substrato de cultivo das plantas submetidas à deficiência hídrica sofreu reduções contínuas a partir de  $-10$  kPa em razão da interrupção total da irrigação aos 100 DAP.

As medições foram conduzidas entre o primeiro e o sexto dia após a aplicação dos tratamentos. Após esse período, não foi possível a realização de medições, pois as trocas gasosas nas plantas estressadas eram praticamente nulas. Durante o período de avaliações, o conjunto constituído de um vaso plástico, substrato de cultivo e uma planta de cana-de-açúcar foram pesados diariamente para determinação do potencial matricial de água no substrato de cultivo.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, no esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando detectada diferença significativa, as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade. O programa de análises estatísticas utilizado foi o Sisvar (FERREIRA, 2011).

Para possibilitar uma avaliação minuciosa do comportamento fisiológico das distintas cultivares diante da imposição do estresse hídrico, as medições das trocas gasosas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de vapor d'água (H<sub>2</sub>O) foram realizadas em dois períodos distintos. No primeiro período, compreendido entre 8 e 11 h, as medições foram conduzidas em plantas caracterizadas por maior turgescência, enquanto no segundo período, compreendido entre 11 e 13 h, o potencial de água nas folhas foi menor em decorrência do aumento da demanda atmosférica de água próxima ao meio-dia, ainda agravada pela diminuição da disponibilidade hídrica no substrato de cultivo. As leituras foram realizadas na porção mediana da folha +1, com radiação fotossinteticamente ativa controlada pelo IRGA – LI-6400XT e mantida constante sob 1500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . O CO<sub>2</sub> atmosférico no interior da câmara do IRGA foi mantido em torno de 380  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  e a temperatura do bloco da câmara fixada no início de cada avaliação, de acordo com a temperatura do ambiente.

A metodologia utilizada para as medições da eficiência quântica potencial do FSII neste experimento foi igual à descrita no item 3.5.1.2.

### **3.5.3 Alterações das trocas gasosas e da emissão de fluorescência da clorofila a na cultivar RB92579 sob deficiência hídrica**

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento das trocas gasosas e da fluorescência da clorofila a ao longo do dia em plantas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes disponibilidades de água no substrato.

Por apresentar plantas com altura e área foliar mais homogêneas, foi utilizada a cultivar RB92579. As plantas foram submetidas a quatro níveis de disponibilidade hídrica: controle (próximo à capacidade de campo), restrição hídrica leve, moderada e severa; e dispostas no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

As leituras foram realizadas em um dia de céu claro, no período diurno (6-18 horas) em intervalos de 2 horas, na porção mediana da folha +1 (folha mais jovem completamente expandida), com fluxo de ar de  $300 \text{ mL min}^{-1}$ . O  $\text{CO}_2$  atmosférico no interior da câmara do IRGA foi mantido em torno de  $380 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ , enquanto que a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e a temperatura do bloco da câmara foram modificadas em cada horário de medição, a fim de acompanhar as variações do ambiente. O controle da RFA foi realizado a partir da fonte emissora de radiação acoplada ao IRGA. Com os dados da umidade relativa do ar na célula de referência e a temperatura do ar ( $t_{\text{ar}}$ ) medidos pelo IRGA, calculou-se o déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar ( $\text{DPV}_{\text{ar}}$ ).

A metodologia utilizada para as medições da fluorescência da clorofila a em tecidos adaptados ao escuro, foi igual à descrita no item 3.5.1.2. Em tecidos adaptados à incidência momentânea da radiação fotossinteticamente ativa no ambiente de cultivo, foram avaliados os sinais da fluorescência

emitida em condições de equilíbrio dinâmico ( $F_s$ ) e fluorescência máxima ( $F_m'$ ). A partir dessas medições, foi calculada a fluorescência variável ( $\Delta F = F_m' - F$ ) e, em seguida, determinada a eficiência quântica efetiva ( $\Phi_{FSII} = \Delta F / F_m'$ ) do FSII. Para analisar a alocação da energia absorvida pelos complexos antenas do FSII, além do rendimento quântico efetivo ( $\Phi_{FSII}$ ), que mede a proporção de energia que é utilizada pelos processos fotoquímicos, foram determinados os rendimentos quânticos da dissipação térmica regulada ( $\Phi_{NPQ}$ ) e da dissipação basal não-regulada ( $\Phi_{NO}$ ), de acordo com Hendrickson; Furbank e Chow (2004). Assim,  $\Phi_{NPQ} (= F_s / F_m' - F_s / F_m)$  é a fração da energia absorvida que é dissipada termicamente no centro de reação do FSII por meio do ciclo das xantofilas, enquanto  $\Phi_{NO} (= F_s / F_m)$  é a soma das frações perdidas pela dissipação térmica constitutiva e pela fluorescência.

Os fluxos de energia  $J_{FSII}$ ,  $J_{NPQ}$  e  $J_{NO}$  foram determinados pela multiplicação da energia absorvida, estimada no FSII ( $=RFA \times 0,85 \times 0,4$ ), pelos respectivos rendimentos quânticos. O valor 0,4 corresponde ao fator de distribuição da energia para as moléculas de clorofila associadas ao FSII e ao FSI. O valor 0,85 corresponde à porção de radiação fotossinteticamente ativa incidente que é de fato absorvida pela folha.

Nos tratamentos com restrição hídrica, a irrigação foi suspensa aos 205, 207 e 209 dias após o plantio (DAP) para os tratamentos severo, moderado e leve, respectivamente.

As medições foram conduzidas aos 213 DAP, sendo que os potenciais matriciais de água no substrato de cultivo das plantas submetidas aos tratamentos com deficiência hídrica alcançaram valores próximos de  $-100$ ,

-300 e -500 kPa, considerados neste experimento, para propósitos comparativos, como deficiência leve, moderada e severa, respectivamente. Em contraste, os valores de  $\Psi_m$  das plantas do tratamento controle permaneceram acima de -10 kPa, em decorrência da aplicação de irrigações diárias até a data de realização das medições. Com o objetivo de ajustar os valores de  $\Psi_m$  estabelecidos para os diferentes tratamentos, assim como suas repetições, as plantas foram pesadas ao entardecer do dia anterior às medições e, em seguida, volumes de água diferentes foram adicionados em cada unidade experimental, conforme a necessidade.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando detectada diferença significativa, as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade. O programa de análises estatísticas utilizado foi o Sisvar (FERREIRA, 2011).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Elementos meteorológicos

Os valores diários da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ) e valores médios diários do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), temperatura do ar ( $t_{ard}$ ) e umidade relativa do ar (UR), medidos a partir do plantio das quatro cultivares de cana-de-açúcar até o término do período experimental são apresentados na Figura 4.1.

A radiação solar global foi baixa no início do período experimental, com valores médios mensais próximos de  $6,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  no mês de julho. Entre agosto e dezembro, as médias mensais ficaram entre 8 e  $9,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Com relação aos valores máximos, verifica-se também que ocorreram a partir de outubro, estando situados em torno de  $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Figura 4.1.a)

A temperatura do ar na fase inicial de crescimento da cultura foi baixa, com valores médios de  $18,3$  e  $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente nos meses de julho e agosto (Figura 4.1.b). Entretanto, houve um aumento gradativo da temperatura de setembro ao início de janeiro, sendo constatado que a média em setembro foi de  $20,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto no início de janeiro foi de  $28,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

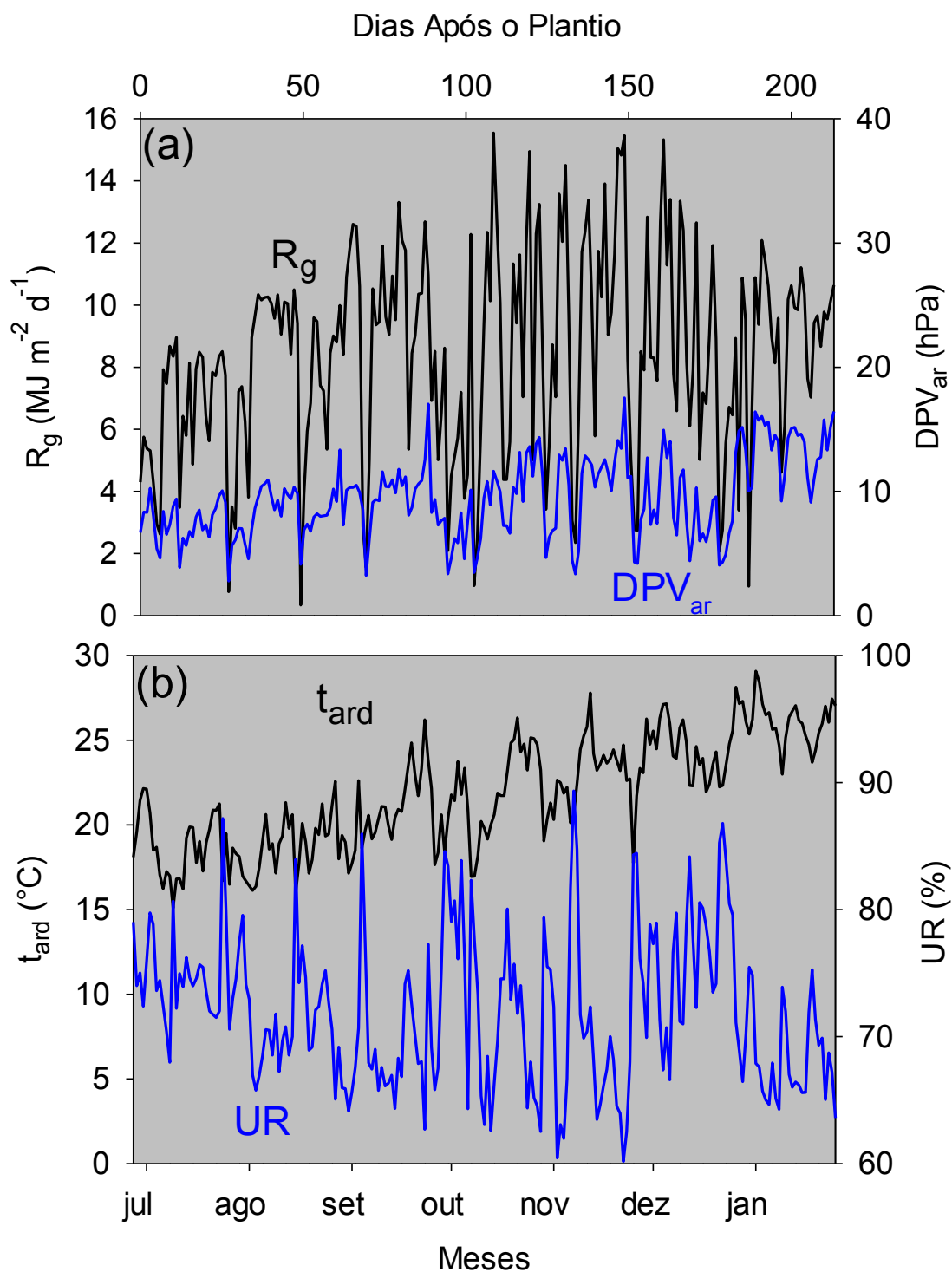


Figura 4.1. Valores diários da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ) e valores médios diários do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), temperatura do ar ( $t_{ard}$ ) e umidade relativa do ar (UR), medidos a partir do plantio das quatro cultivares de cana-de-açúcar até o término período experimental.

A umidade relativa do ar média durante o período experimental foi de 72%, com extremos de 60 e 89%. Por sua vez, o valor médio do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar foi de 9 hPa, com variações compreendidas entre 2,8 e 17,5 hPa.

No que se refere à velocidade do ar, foram constatados valores médios de  $0,21 \text{ m s}^{-1}$  durante o período experimental, com extremos de 0,09 e  $0,41 \text{ m s}^{-1}$ , inferiores aos observados em condições de campo aberto, devido a presença das telas plásticas nas laterais da casa-de-vegetação.

#### **4.2 Efeito de períodos alternados de estresse hídrico e de reposição de água nas trocas gasosas, eficiência quântica potencial do FSII, potencial de água nas folhas e crescimento dos colmos**

##### **4.2.1 Trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente da casa-de-vegetação sob deficiência hídrica leve**

No período de 101 dias após o início da aplicação dos tratamentos, foram conduzidas 5 campanhas de medições de trocas gasosas entre 9:00 e 12:00 h, sendo realizadas aos 0, 6, 27, 42 e 101 dias.

A Figura 4.2 apresenta os valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura do ar ( $t_{ar}$ ) e déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), os quais foram observados no interior da casa-de-vegetação durante o período de três horas (9:00 e 12:00 h). Também na Figura 4.2, foram incorporados os valores diários da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ), correspondentes aos dois dias anteriores às datas de medição das trocas gasosas.

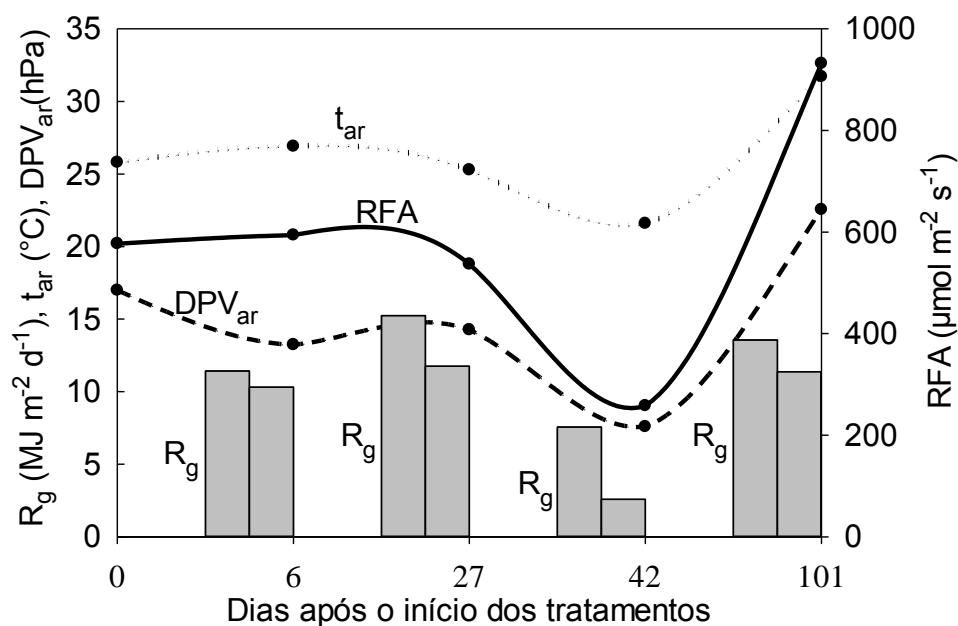


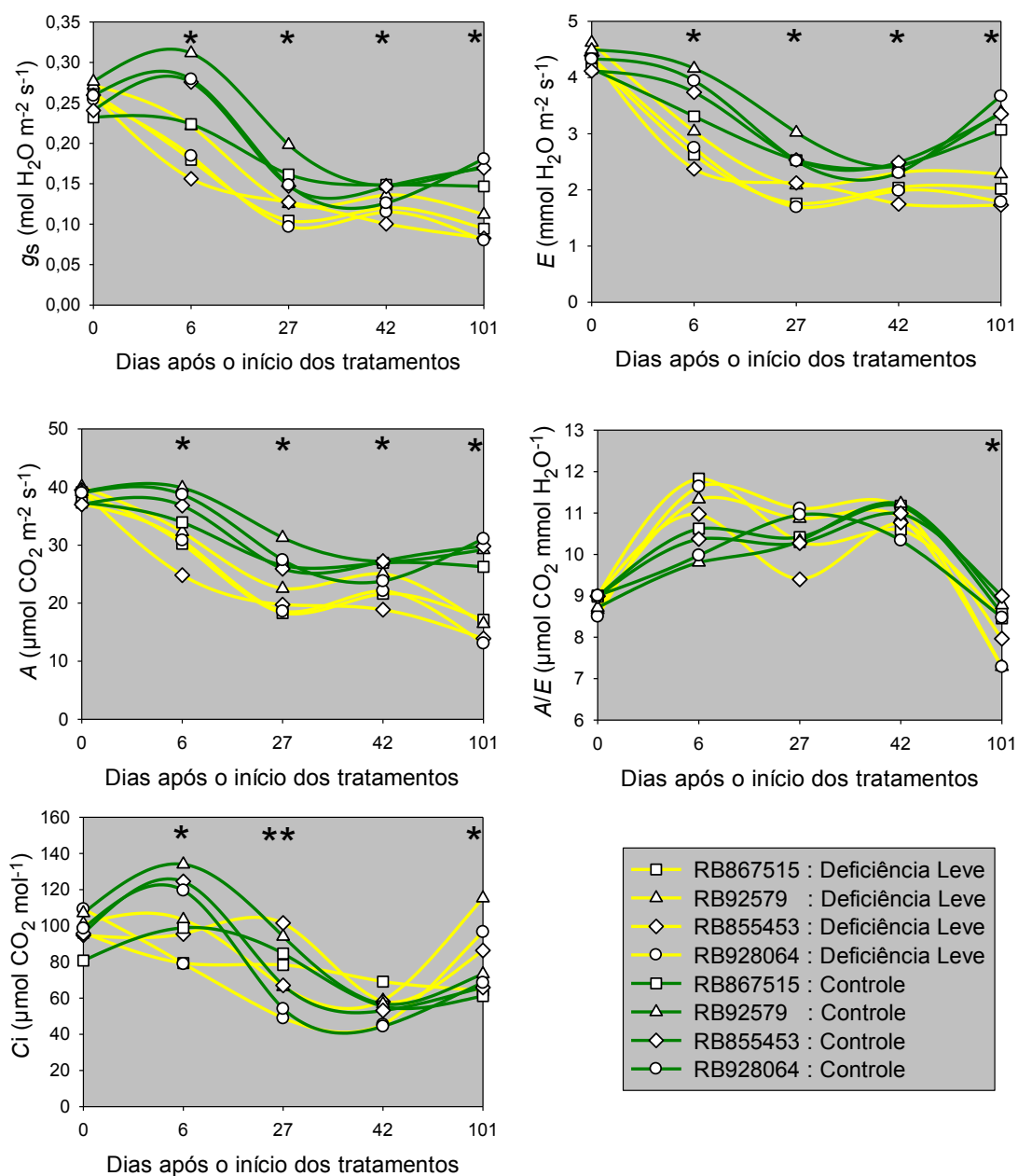
Figura 4.2. Valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), observados no período compreendido entre 9:00 e 12:00h, após o início dos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica leve ( $\Psi_m > -50$  kPa). Os dados da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ), nos dois dias anteriores às datas das campanhas de medições, também são apresentados.

As três primeiras avaliações ocorreram em condições meteorológicas semelhantes, com valores de RFA,  $t_{ar}$  e  $DPV_{ar}$  em torno de  $570 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $26^\circ\text{C}$  e  $15 \text{ hPa}$ , respectivamente. Na 4ª avaliação, realizada aos 42 dias após a aplicação dos tratamentos, os valores foram mais baixos, com médias de  $260 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $21,6^\circ\text{C}$  e  $7,6 \text{ hPa}$ . Por outro lado, na 5ª avaliação, realizada no final de dezembro, as condições meteorológicas foram bem mais estressantes. Os valores de RFA,  $t_{ar}$  e  $DPV_{ar}$  foram  $930 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $31,7^\circ\text{C}$  e  $22,6 \text{ hPa}$ , respectivamente.

Houve redução da condutância estomática ( $g_s$ ) nas plantas submetidas à restrição hídrica leve em relação às plantas controle ( $p < 0,05$ ), na ordem de 32, 30, 17 e 44 % aos 6, 27, 42 e 101 dias após a aplicação dos tratamentos (Figura 4.3). Essa resposta era esperada em plantas submetidas à deficiência hídrica, sendo considerado um dos primeiros mecanismos para impedir a perda de água excessiva das folhas (MACHADO, 2009; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Os menores valores de  $g_s$  afetaram significativamente ( $p < 0,05$ ) a taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ) e a taxa de transpiração ( $E$ ) (Figura 4.3). Em média, as reduções em  $A$  nos tratamentos com déficit hídrico leve foram 21, 29, 16 e 47% e de  $E$  foram 29, 28, 16 e 42%, aos 6, 27, 42 e 101 dias após aplicação dos tratamentos, respectivamente. A maior e menor diferença entre os tratamentos foi observada nos dias com maiores e menores valores de  $t_{ar}$ ,  $DPV_{ar}$  e RFA, respectivamente, verificando-se estreita relação entre as características difusivas da folha e as variáveis meteorológicas.

Com relação à concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ), percebe-se que houve diferença significativa na 2ª e 5ª avaliação (Figura 4.3). Na 2ª avaliação, os tratamentos com déficit hídrico apresentaram valores menores em relação aos tratamentos controle. No entanto, na 5ª avaliação, ocorreu o oposto.



Os asteriscos indicam diferença significativa, em níveis de 5% de probabilidade, para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

Figura 4.3. Condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> ( $A$ ), eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) e concentração intercelular de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ), para as cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica leve ( $\Psi_m > -50$  kPa).

A diminuição de  $C_i$ , juntamente com os menores valores de  $A$ , indica que houve limitação fotossintética de origem estomática. O decréscimo em  $C_i$  devido à redução da condutância estomática tem sido tomado como um sinal da limitação no suprimento de  $CO_2$  para a fotossíntese e ocorre geralmente durante as fases iniciais de deficiência hídrica (GHANNOUM, 2009). Por outro lado, aumentos em  $C_i$  nas plantas estressadas indicam a presença de limitações bioquímicas da fotossíntese (GHANNOUM, 2009; ROZA, 2010). Embora a queda na fotossíntese sob deficiência hídrica seja primariamente devido ao fechamento dos estômatos (GHANNOUM, 2009), sob condições mais severas de estresse, outros fatores relacionados às reações fotoquímicas e ao metabolismo do carbono são afetados (GLAZ; MORRIS; DAROUB, 2004; MACHADO, 2009; PINCELLI, 2010), tais como: redução da atividade e concentração da enzima Ribulose 1-5 bifosfatocarboxilase/oxigenase (Rubisco), fotoinibição, taxa de transferência de elétrons e redução da eficiência fotoquímica do FSII (ROZA, 2010).

Com relação à eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ), somente houve diferença significativa entre os tratamentos na última avaliação, quando os valores de  $A/E$  nas plantas com déficit hídrico foram, em média, 11% menores. Similarmente, para as variáveis  $A$ ,  $E$ ,  $g_s$  e  $A/E$ , não houve diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre cultivares.

#### **4.2.2 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo no interior da casa-de-vegetação sob deficiência hídrica moderada**

No período de 99 dias, após o início da aplicação dos tratamentos, foram conduzidas 5 campanhas de medições de trocas gasosas entre 9:00 e 12:00 h, realizadas aos 0, 8, 32, 48 e 99 dias.

Os menores valores médios de RFA,  $t_{ar}$  e  $DPV_{ar}$  ocorreram na segunda campanha de medição (Figura 4.4), com valores de  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $19,5 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $9,9 \text{ hPa}$ , respectivamente. Posteriormente, os valores médios dessas variáveis foram aumentando gradativamente, atingindo o máximo na última campanha de medição, realizada no fim de dezembro.

O déficit hídrico afetou as trocas gasosas das cultivares estudadas, causando redução ( $p < 0,05$ ) na condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) e taxa de transpiração ( $E$ ). As reduções de  $A$ ,  $E$  e  $g_s$  ocorridas no tratamento com déficit hídrico moderado foram maiores do que no leve. Em média, para  $A$  foram de 35, 33, 35 e 66%;  $g_s$  de 40, 35, 39 e 69 % e  $E$  de 37, 29, 37 e 68%, aos 8, 32, 48 e 99 dias após aplicação dos tratamentos, respectivamente.

A cultivar RB867515 apresentou os maiores valores de  $A$  na 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> campanha de medição. Em relação ao controle, a redução foi em média 28%, enquanto que, na RB92579, RB928064 e RB855453, as reduções foram de 42, 48 e 52 %, respectivamente. Entretanto, mesmo apresentando maiores valores também de  $g_s$  e  $E$ , não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) em relação às demais cultivares.

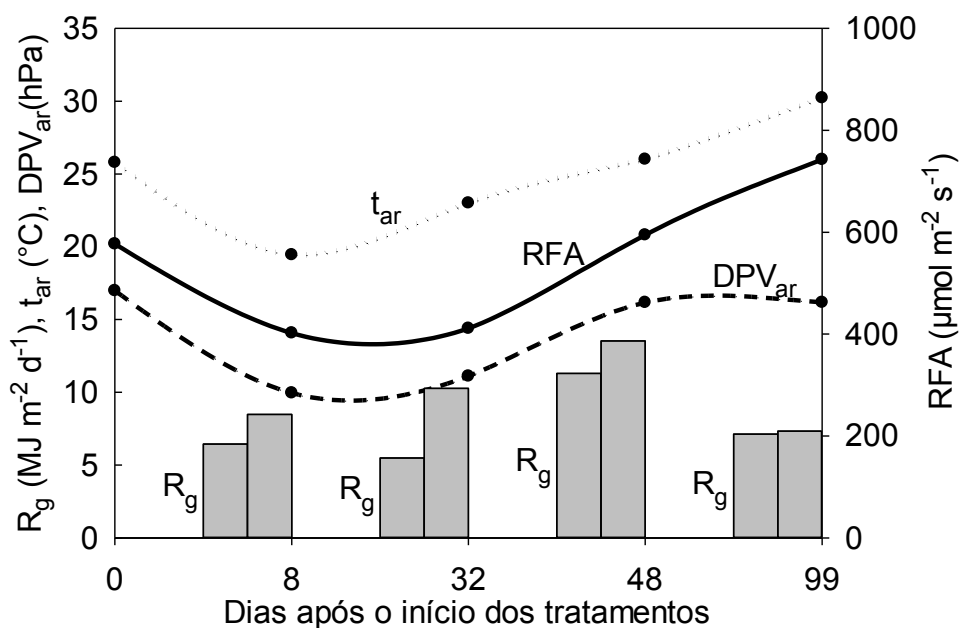
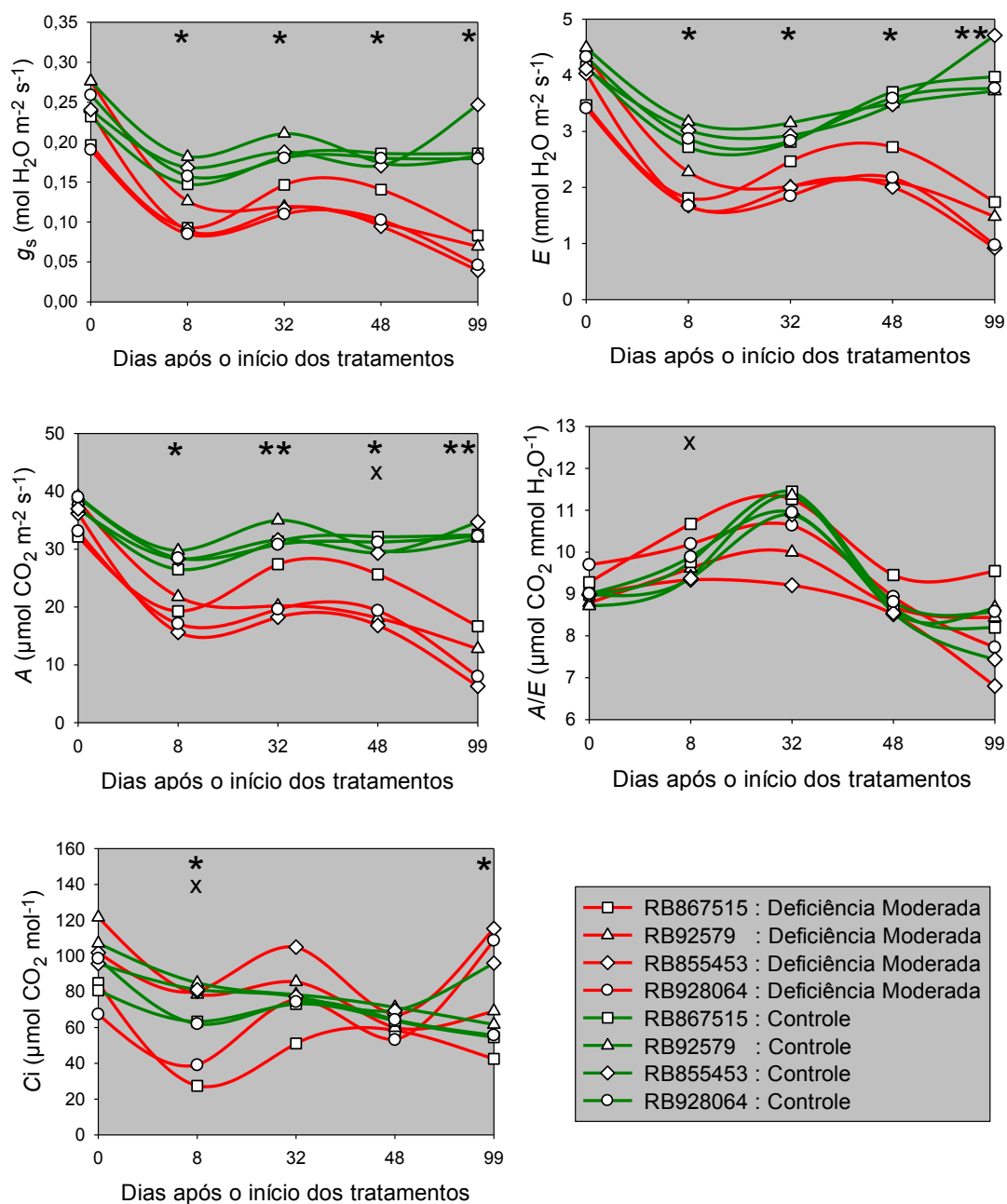


Figura 4.4. Valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $\text{DPV}_{ar}$ ), observados no período compreendido entre 9:00 e 12:00h, após o início dos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica moderada ( $\Psi_m > -100$  kPa). Os dados da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ), nos dois dias anteriores às datas das campanhas de medições, também são apresentados.

Com relação à  $C_i$ , diferenças significativas entre tratamentos de disponibilidade hídrica somente foram observadas na 2ª campanha, quando as cultivares RB855453 e RB92579 apresentaram os maiores valores. A cultivar RB855453 também apresentou os maiores valores na 5ª campanha.

Com relação à eficiência instantânea do uso de água, não houve diferença significativa entre os tratamentos controle e déficit hídrico moderado. Entre cultivares, houve diferença na 2ª campanha, quando a cultivar RB867515 foi superior à RB855453.



Os asteriscos indicam diferença significativa, em níveis de 5% de probabilidade, para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*) e (X) indica diferença significativa entre cultivares.

Figura 4.5. Condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> ( $A$ ), eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) e concentração intercelular de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ), para as cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica moderada ( $\Psi_m > -100$  kPa).

### **4.2.3 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo no interior da casa-de-vegetação sob deficiência hídrica severa**

Ao longo de 104 dias, após o início da aplicação dos tratamentos, também foram conduzidas 5 campanhas de medições de trocas gasosas entre 9:00 e 12:00 h, contudo realizadas aos 0, 15, 36, 51 e 104 dias. Os maiores valores de RFA e  $DPV_{ar}$  foram observados na 1<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> campanhas de medição (Figura 4.6).

As reduções de  $A$ ,  $E$  e  $g_s$  ocorridas no tratamento com déficit hídrico severo foram ainda maiores quando comparadas ao leve e moderado (Figura 4.7). Em média, as reduções de  $A$  foram 42, 57, 41 e 66 %; da  $g_s$  foram 48, 57, 43 e 65 % e de  $E$  foram 42, 57, 43 e 61%, aos 15, 36, 51 e 104 dias após aplicação dos tratamentos, respectivamente.

Embora os valores de  $A$  da cultivar RB867515 apresentarem a tendência de serem maiores ao longo das avaliações, somente houve diferença significativa na última campanha. Isso indica que, se a restrição hídrica for muito severa, pode não haver diferenças entre cultivares.

Com relação à eficiência instantânea do uso de água, somente houve diferença significativa entre os tratamentos controle e déficit hídrico severo na 5<sup>a</sup> avaliação.

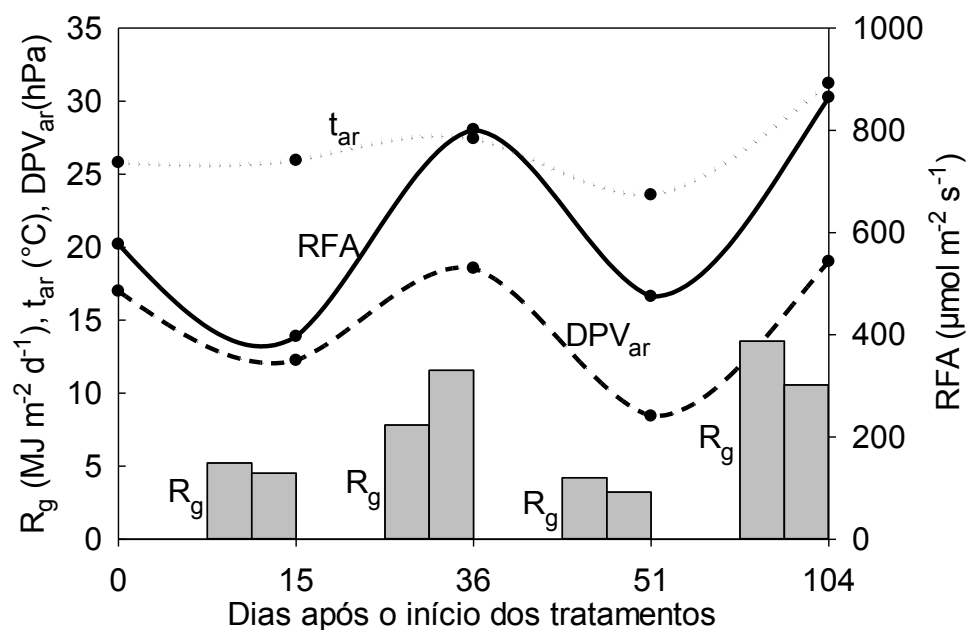
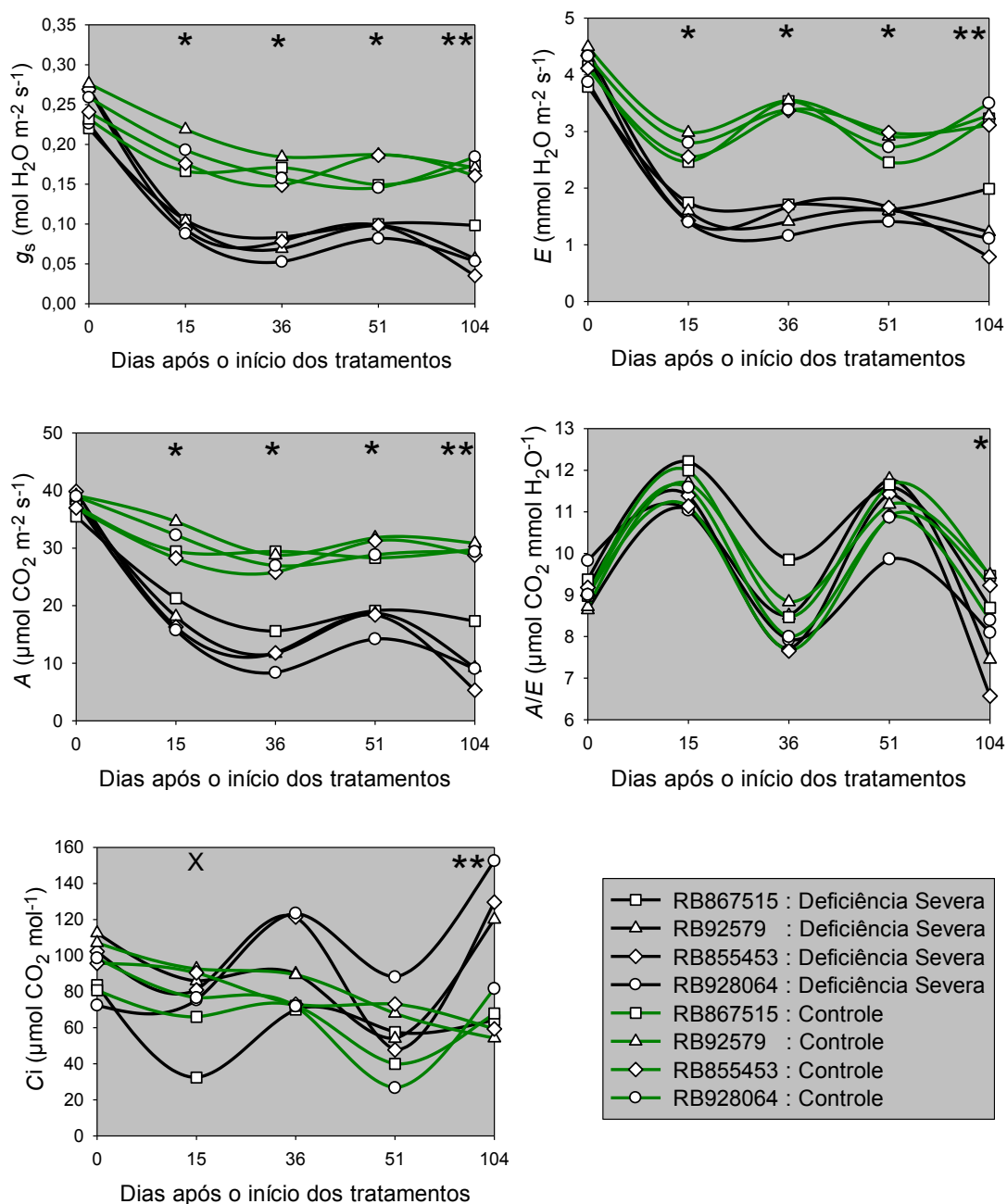


Figura 4.6. Valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $\text{DPV}_{ar}$ ), observados no período compreendido entre 9:00 e 12:00h, após o início dos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica severa ( $\Psi_m > -150$  kPa). Os dados da radiação solar global integrada ao longo do período diurno ( $R_g$ ), nos dois dias anteriores às datas das campanhas de medições, também são apresentados.



Os asteriscos indicam diferença significativa, em níveis de 5% de probabilidade, para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

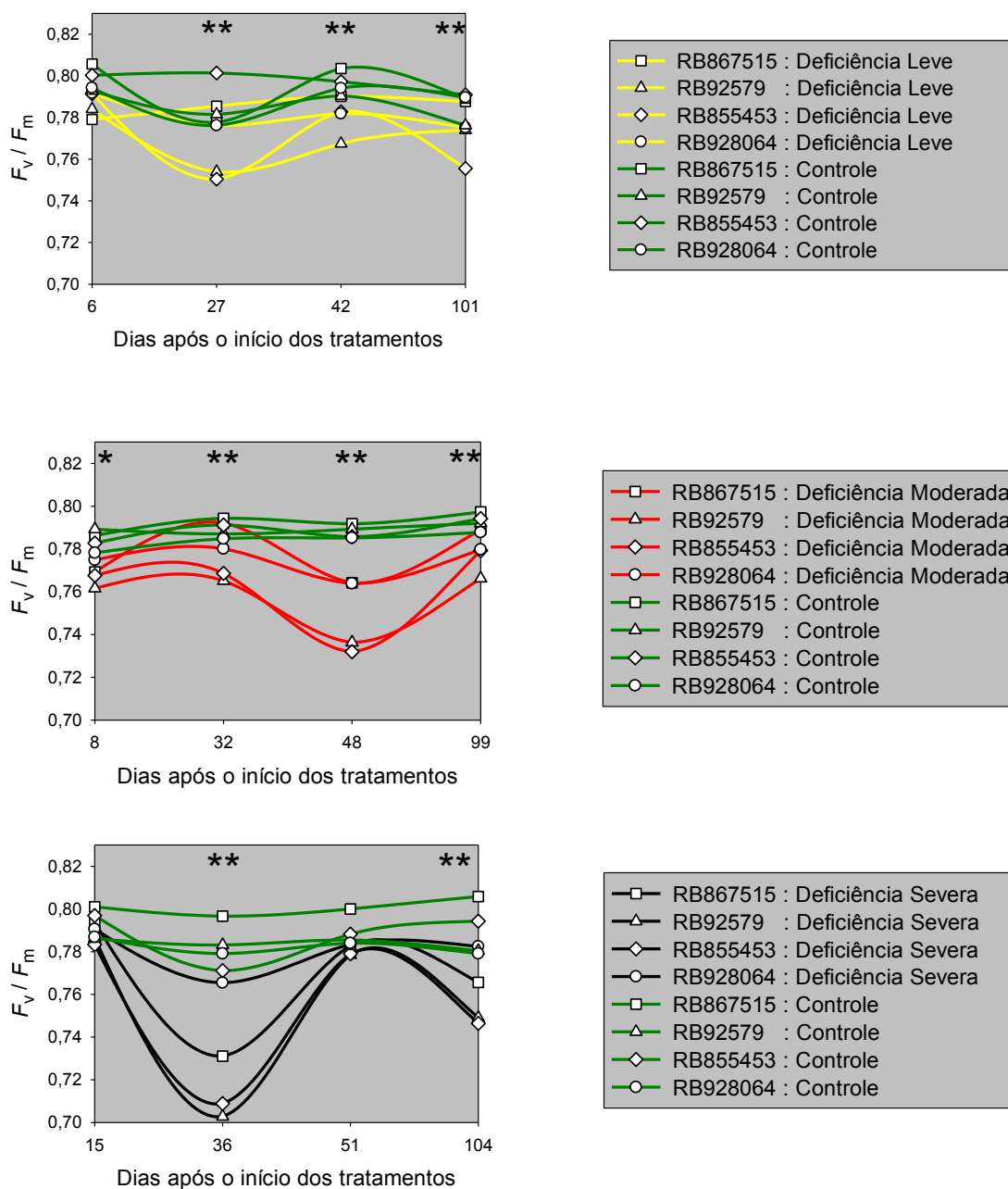
Figura 4.7. Condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), taxa de assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) e concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), para as cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiência hídrica severa ( $\Psi_m > -150$  kPa).

#### 4.2.4 Eficiência quântica potencial do FSII

Nas plantas controle, a relação  $F_v/F_m$  oscilou entre 0,78 e 0,805 (Figura 4.8), indicando a presença de um aparelho fotossintético sem danos (SILVA *et al.*, 2007). Entretanto, nas plantas sob restrição hídrica houve grandes diferenças ao longo das medições. Neste caso, percebe-se a presença de outro fator de estresse, pois o  $\Psi_m$  nos dias de medição, foi sempre o mesmo dentro de cada nível de restrição. Uma das hipóteses, é a fotoinibição resultante da radiação solar incidente nos dias anteriores às medições. Verificou-se que os valores mais baixos de  $F_v/F_m$  ocorreram quando a  $R_g$  foi maior (Figuras 4.2, 4.4 e 4.6). Quando os dias que antecederam às medições eram nublados, as variações de  $F_v/F_m$  eram pequenas, com valores próximos às plantas controle.

As membranas fotossintéticas podem ser facilmente danificadas pelas grandes quantidades de energia absorvida pelos pigmentos. A radiação solar em excesso pode levar à produção de espécies tóxicas, como superóxidos, oxigênio singleto e peróxidos, podendo ocorrer danos se tal energia não for dissipada com segurança. Esses fotoprodutos são extremamente reativos, reagindo e danificando muitos componentes celulares (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A proteção ao dano causado pelo excesso de radiação solar é um processo com muitos níveis. A primeira linha de defesa é a liberação de energia na forma de calor, por meio do ciclo das xantofilas. Esse mecanismo regula o fluxo de excitações para o centro de reação do FSII em um nível aceitável, dependendo da radiação solar incidente e outras condições.



Os asteriscos indicam diferença significativa, em níveis de 5% de probabilidade, para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

Figura 4.8. Eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica. Os dados foram obtidos na antemãhã dos dias de medições das trocas gasosas entre as cultivares e o ambiente da casa-de-vegetação.

Se essa defesa não for suficiente e se formarem fotoprodutos tóxicos, uma variedade de sistemas de remoção (carotenóides, superóxido dismutase, ascorbato peroxidase, etc.) elimina os fotoprodutos reativos. Entretanto, produção excessiva dessas espécies reativas ocorre durante o estresse e condições mais drásticas de desidratação levam a um desequilíbrio entre sua produção e desativação (CHAGAS 2007).

Se essa segunda linha de defesa também falhar, os fotoprodutos resultantes do excesso de energia podem danificar a proteína D1 do FS II. Este dano leva à fotoinibição. A proteína D1 é, então, removida do centro de reação FSII e degradada. Uma nova proteína D1 é sintetizada e inserida no centro de reação FSII, para formar uma unidade funcional (TAIZ; ZEIGER, 2013). A magnitude da fotoinibição depende do balanço entre o dano ao complexo FSII e seu reparo. O reparo do FSII é crítico para a manutenção da fotossíntese. Durante o estresse, o aumento da fotoinibição pode resultar mais do prejuízo à capacidade de reparo do que do aumento do dano ao FSII.

A diminuição da relação  $F_v/F_m$  é um excelente indicador do efeito fotoinibitório (ARAÚJO; DEMINICIS, 2009). A resposta de  $F_v/F_m$  ao estresse hídrico pode ser uma ferramenta importante para seleção de germoplasma de cana-de-açúcar tolerantes à seca (SILVA et al., 2007; GRAÇA, 2009).

Os valores extremos indicam que a relação  $F_v/F_m$  foi menor quanto maior o déficit hídrico. Com deficiência severa, houve valores próximos a 0,7, enquanto que, com deficiência moderada e leve, os valores mínimos foram 0,73 e 0,75, respectivamente. A eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ), portanto, foi fortemente influenciada pelo potencial matricial de água

no substrato de cultivo, assim como pelos níveis de radiação solar observados nos dias anteriores às datas de medições de fluorescência da clorofila *a*.

#### **4.2.5 Potencial de água nas folhas de cana-de-açúcar**

Na Figura 4.9 são apresentados os valores médios do potencial de água nas folhas ( $\Psi_{w1}$ ) de cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico leve, moderado e severo. Estes valores foram obtidos na antemanhã dos dias de medições das trocas gasosas. Não são apresentados os dados das plantas controles, pois nesse horário todos os valores foram próximos de zero. No tratamento com déficit hídrico leve,  $\Psi_{w1}$  permaneceu entre  $-0,045$  e  $-0,07$  MPa. Nos tratamentos com déficit hídrico moderado e severo,  $\Psi_{w1}$  variou bastante nas três avaliações, oscilando entre  $-0,05$  e  $-0,17$  MPa.

Similarmente, na Figura 4.10 são apresentados os valores médios do potencial de água nas folhas ( $\Psi_{w2}$ ) de cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico leve, moderado e severo, cujos valores foram obtidos no mesmo horário das medições das trocas gasosas. Houve diferença significativa entre os tratamentos controle e deficiência leve somente na avaliação realizada aos 27 dias após aplicação dos tratamentos. Neste dia, a média de  $\Psi_{w2}$  foi de  $-0,84$  MPa para o tratamento controle e  $-1,44$  MPa para o tratamento com déficit leve.

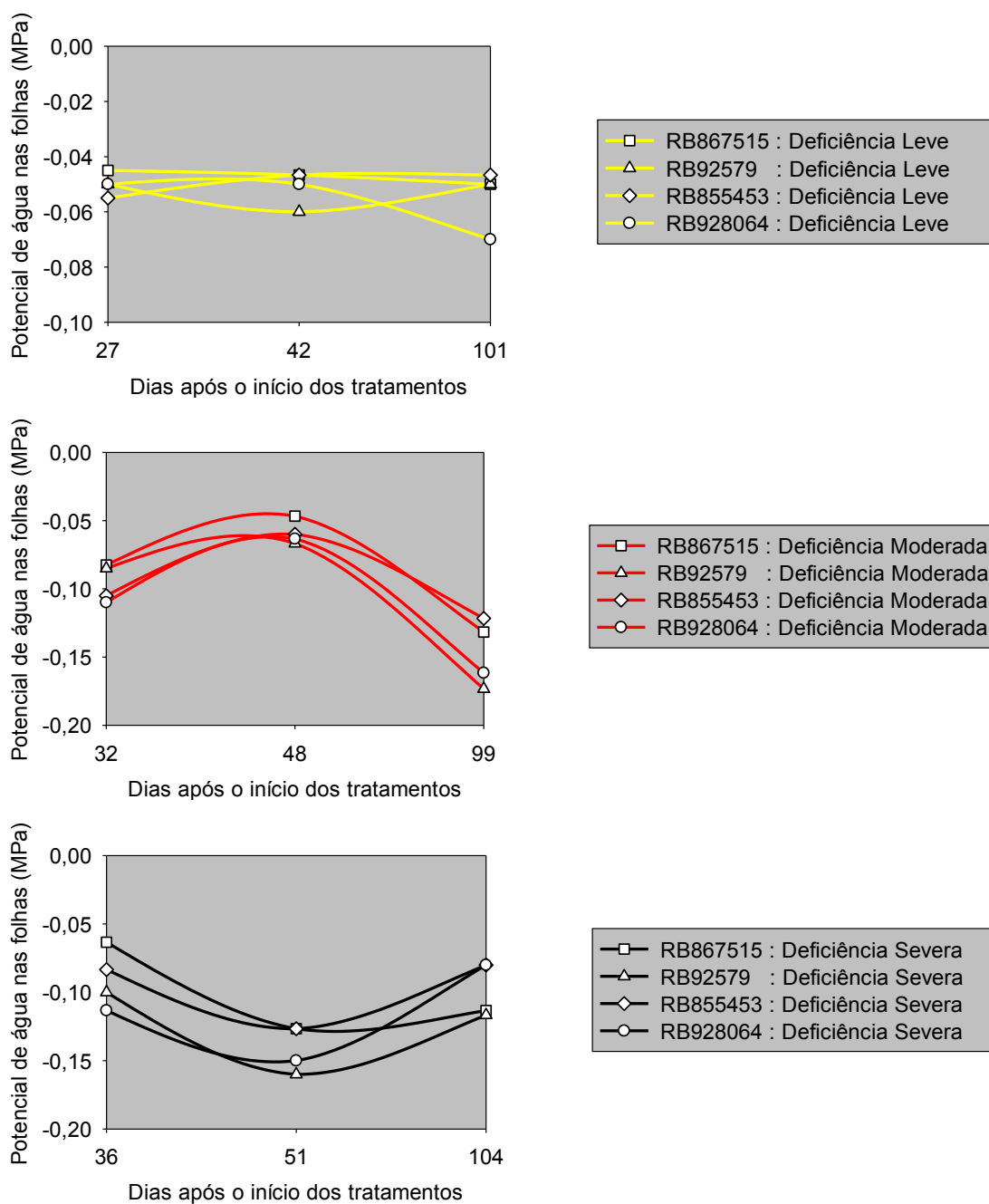
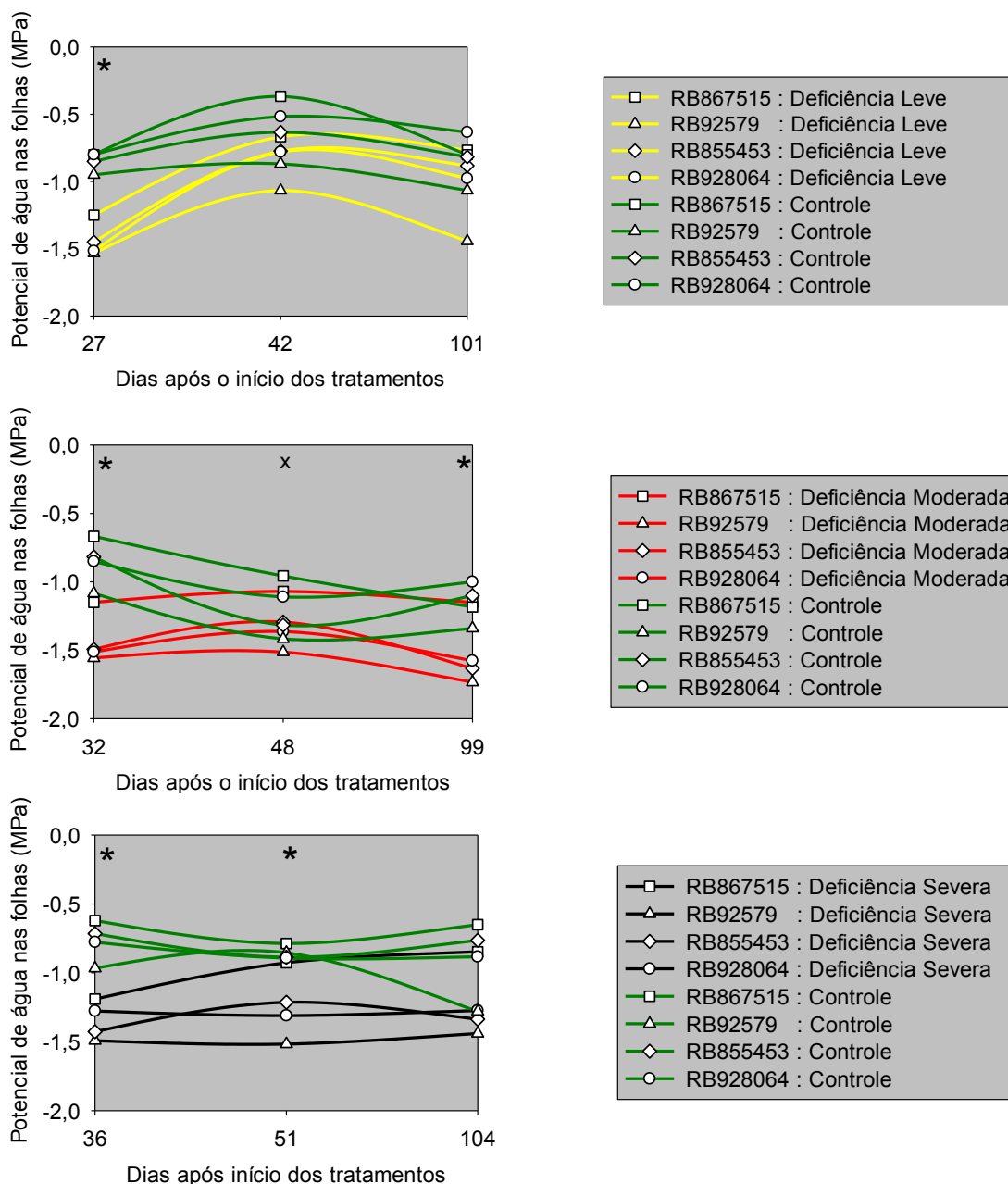


Figura 4.9. Potencial de água nas folhas das cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas à deficiência hídrica. Os dados foram obtidos na antemãnhã dos dias de medições das trocas gasosas entre as cultivares e o ambiente da casa-de-vegetação.



Os asteriscos indicam diferença significativa, em níveis de 5% de probabilidade, para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*) e (\*) indica diferença significativa entre cultivares.

Figura 4.10. Potencial de água nas folhas das cultivares de cana-de-açúcar RB86715, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica. Os dados foram obtidos no período compreendido entre 9:00 e 12:00h.

De modo geral, não houve diferença significativa entre cultivares no tratamento controle. O  $\Psi_{w2}$  variou entre  $-0,4$  e  $-1,4$  MPa, devido principalmente às variações nas condições meteorológicas dos dias de medições. Tanto no tratamento controle, quanto nos tratamentos com deficiência hídrica, a cultivar RB867515 tendeu a apresentar os maiores valores de  $\Psi_{w2}$ , enquanto a RB92579 os menores, sendo que esse comportamento também foi verificado por Silva *et al.* (2012a). Nos tratamentos com deficiência moderada e severa não houve grandes variações nos valores de  $\Psi_{w2}$  ao longo das medições. Em média, os valores de  $\Psi_{w2}$  foram  $-1,12$ ,  $-1,47$ ,  $-1,48$  e  $-1,60$  MPa no tratamento com déficit hídrico moderado, enquanto que no tratamento severo constataram-se  $-0,99$ ,  $-1,33$ ,  $-1,29$  e  $-1,48$  MPa, respectivamente para as cultivares RB867515, RB855453, RB928064 e RB92579.

Devido à perda de água por transpiração para a atmosfera, as plantas estão em constante desidratação. A tendência do  $\Psi_w$  é ser menor em dias ou horários mais quentes. Holanda (2012) mediu o  $\Psi_w$  em plantas de cana-de-açúcar às 8 horas e encontrou valores variando de  $-0,4$  a  $-1,1$  MPa nas plantas controle e de até  $-1,3$  MPa em plantas submetidas ao déficit hídrico. Por outro lado, Pincelli (2010), fazendo as medições entre 10:00 e 14:00 horas, encontrou  $\Psi_w$  menores que  $-3$  MPa em plantas estressadas.

#### **4.2.6 Biometria das cultivares de cana-de-açúcar**

O monitoramento biométrico das plantas teve início no dia 31/07/2013 (35 DAP) e término no dia 03/01/2014 (191 DAP).

##### **4.2.6.1 Estatura de colmos**

O modelo sigmoidal com três parâmetros, tendo como variável independente graus-dia acumulados após o plantio (GD), apresentou ajuste satisfatório à estatura do colmo das cultivares estudadas durante o período de 0 a 191 DAP. Na Figura 4.11 são apresentadas as curvas ajustadas para as cultivares de cana-de-açúcar, nos diferentes tratamentos com déficit hídrico. Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros ajustados do modelo, onde se verifica elevados valores para o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), indicando alta correlação entre a variável estatura de colmo e o tempo térmico acumulado, independentemente do nível de estresse aplicado.

Houve interação significativa entre os níveis de déficit hídrico e cultivares (Tabela 4.2). Devido à condição plena de suprimento hídrico na qual as plantas do tratamento controle estiveram submetidas ao longo do período experimental, a estatura do colmo foi superior à observada nas plantas dos demais tratamentos (Figura 4.11). Ao final das avaliações biométricas (191 DAP), os valores observados dessa variável foram, em ordem decrescente: 149,5 (RB867515), 142,3 (RB928064), 129,8 (RB92579) e 122,3 cm (RB855453).

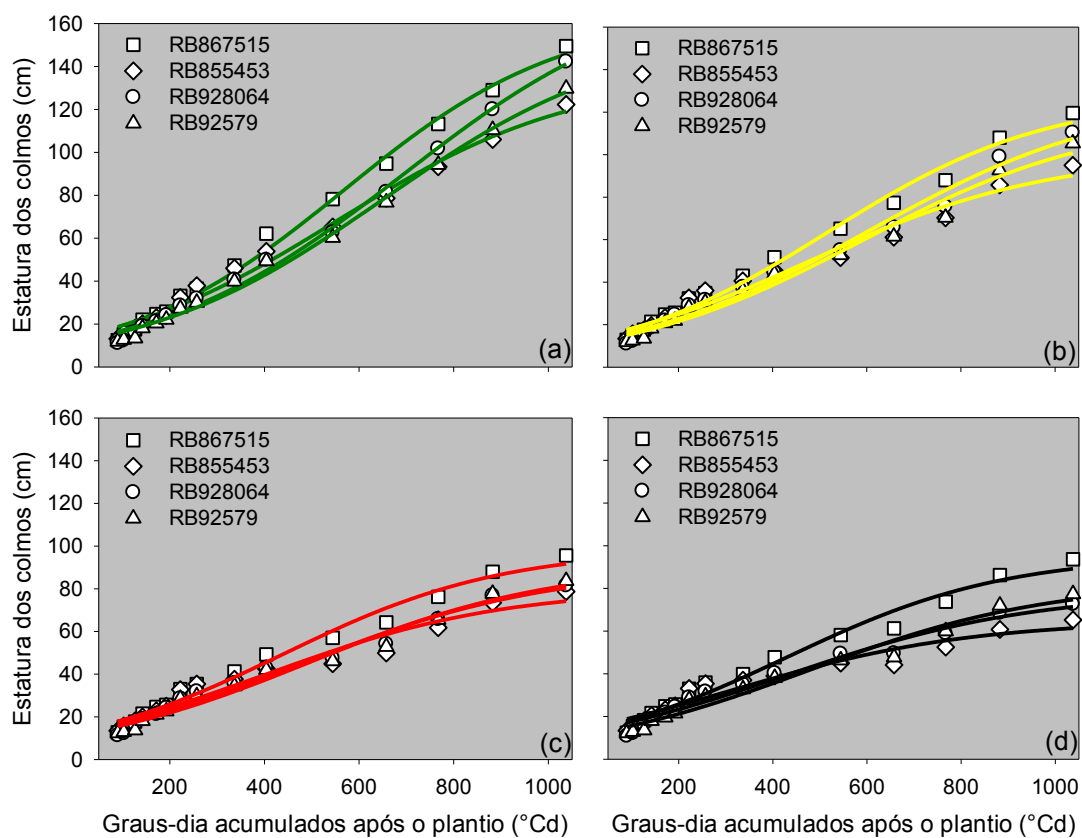


Figura 4.11. Variação da estatura dos colmos das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle (a), deficiência hídrica leve (b), moderada (c) e severa (d), ao longo do período de formação, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16 °C.

Tabela 4.1. Parâmetros estimados pelo modelo sigmoidal (a, b e  $x_0$ ) e coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{aj}$ ), para a estatura do colmo de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16 °C, Viçosa-MG

		Parâmetros do Modelo Sigmoidal			
		a	b	$x_0$	$R^2_{aj}$
Controle	RB92579	156,8 ±	257,5 ±	652,8 ±	0,9924
	RB867515	165,0 ± (8,1)	231,4 ±	568,5 ±	0,9921
	RB928064	179,4 ±	263,7 ±	693,2 ±	0,9939
	RB855453	136,8 ±	252,4 ±	555,3 ±	0,9866
Déficit leve	RB92579	118,4 ± (5,4)	—	587,4 ±	0,9774
	RB867515	127,5 ± (3,7)	—	518,9 ±	0,9874
	RB928064	128,4 ± (5,4)	—	604,8 ±	0,9818
	RB855453	100,1 ± (4,1)	—	479,5 ±	0,9702
Déficit moderado	RB92579	91,6 ± (3,7)	—	497,7 ±	0,9743
	RB867515	98,6 ± (3,2)	—	438,7 ±	0,9789
	RB928064	90,2 ± (3,6)	—	481,5 ±	0,9736
	RB855453	80,3 ± (3,9)	—	406,2 ±	0,9469
Déficit severo	RB92579	83,2 ± (3,4)	—	475,6 ±	0,9700
	RB867515	95,6 ± (3,3)	—	430,4 ±	0,9749
	RB928064	78,4 ± (3,3)	—	427,3 ±	0,9649
	RB855453	64,9 ± (3,0)	—	315,1 ±	0,9297

NOTA: 1) Os parâmetros do modelo sigmoidal são significativos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t;

2) Os valores entre parênteses correspondem ao erro padrão de estimativa dos parâmetros;

3) O parâmetro "b" está relacionado com a taxa máxima de alongação relativa do colmo, que ocorre após a emergência. Assim, para os tratamentos com estresse hídrico leve, moderado e severo, iniciados após 84 DAP, este parâmetro foi estimado, para as respectivas cultivares, pelos valores apresentados nas linhas iniciais da presente tabela.

Nos tratamentos com restrição hídrica, o crescimento foi afetado (Figura 4.11). Em comparação ao controle, as cultivares apresentaram, em média, 21, 37 e 44% de reduções na estatura final dos colmos quando submetidas ao déficit hídrico leve, moderado e severo, respectivamente. A RB867515

apresentou os maiores valores finais em todos os tratamentos, sem diferença significativa ( $p < 0,05$ ) com a cultivar RB928064 nos tratamentos controle e déficit hídrico leve (Tabela 4.2). Por outro lado, a cultivar RB928064 foi a mais afetada pelos efeitos do déficit hídrico moderado e severo, apresentando valores 43 e 49 % menores nestes tratamentos em relação ao controle. Assim, estes resultados indicam que esta cultivar não é capaz de manter a elongação dos colmos sob condições mais severas de estresse hídrico.

As limitações na produtividade das culturas causadas pela falta de água são dependentes da intensidade e frequência em que o déficit hídrico ocorre (SANTOS; CARLESSO, 1998). Inman-Bamber (2004) relatou redução de 35% na fitomassa da cana-de-açúcar, em consequência da deficiência hídrica, enquanto que Batista (2012) verificou reduções na estatura de colmos de aproximadamente 60%. Segundo Silva et al. (2008), é desejável selecionar cultivares que se revelem capazes de manter maior elongação dos colmos sob as condições de estresse hídrico. Assim, a cultivar RB867515 pode ser considerada tolerante ao estresse hídrico durante a fase de formação.

Tabela 4.2. Valores médios da estatura dos colmos das cultivares submetidas a diferentes níveis de estresse, aos 191 DAP

Cultivares	Estatura do colmo (cm)			
	Níveis de déficit hídrico			
	Controle	Leve	Moderado	Severo
RB92579	129,8 Ab	105,4Bb	83,8Cb	74,6Cb
RB867515	149,5 Aa	119,6Ba	95,6Ca	93,6 Ca
RB928064	142,3 Aa	110,4 Bab	81,5Cb	72,1Cb
RB855453	122,3Ab	95,0Bc	78,8Cb	65,3Db

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

#### **4.2.6.2 Taxa de alongação do colmo**

Os valores da taxa de alongação dos colmos (TEC) são apresentados na Figura 4.12. Em todos os casos, a TEC apresentou valores baixos no início do ciclo, aumentando rapidamente até atingir um valor máximo, para em seguida decrescer. Essa mesma tendência foi relatada por Batista (2012), Silva et al. (2012b) e Gava et al. (2001), ao estudarem as taxas de crescimento da cana-de-açúcar.

Os maiores valores de TEC observados foram no tratamento controle, na ordem de 0,178, 0,170, 0,152 e 0,135  $\text{cm } ^\circ\text{Cd}^{-1}$  para os cultivares RB867515, RB928064, RB92579 e RB855453, respectivamente. As cultivares RB928064 e RB92579 atingiram os valores máximos de TEC por volta dos 690 e 650  $^\circ\text{Cd}$ , enquanto que a RB867515 e a RB855453, alcançaram por volta dos 560  $^\circ\text{Cd}$ .

Com a imposição dos níveis de déficit hídrico, a TEC das cultivares foi afetada. Com déficit hídrico leve, todas as cultivares apresentaram reduções em torno de 26% na TEC máxima, em comparação com os valores do controle. Com déficit hídrico moderado, a redução foi de 41% nas cultivares RB867515, RB92579 e RB855453 e 50 % na RB928064. Com déficit hídrico severo, as reduções foram 42, 47, 53 e 56% para as cultivares RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, respectivamente.

Com o agravamento da restrição hídrica, os valores máximos de TEC ocorreram cada vez mais cedo. Em média, os valores máximos ocorreram aos 617, 548, 456 e 412  $^\circ\text{Cd}$ , nos tratamentos controle, déficit hídrico leve, moderado e severo, respectivamente.

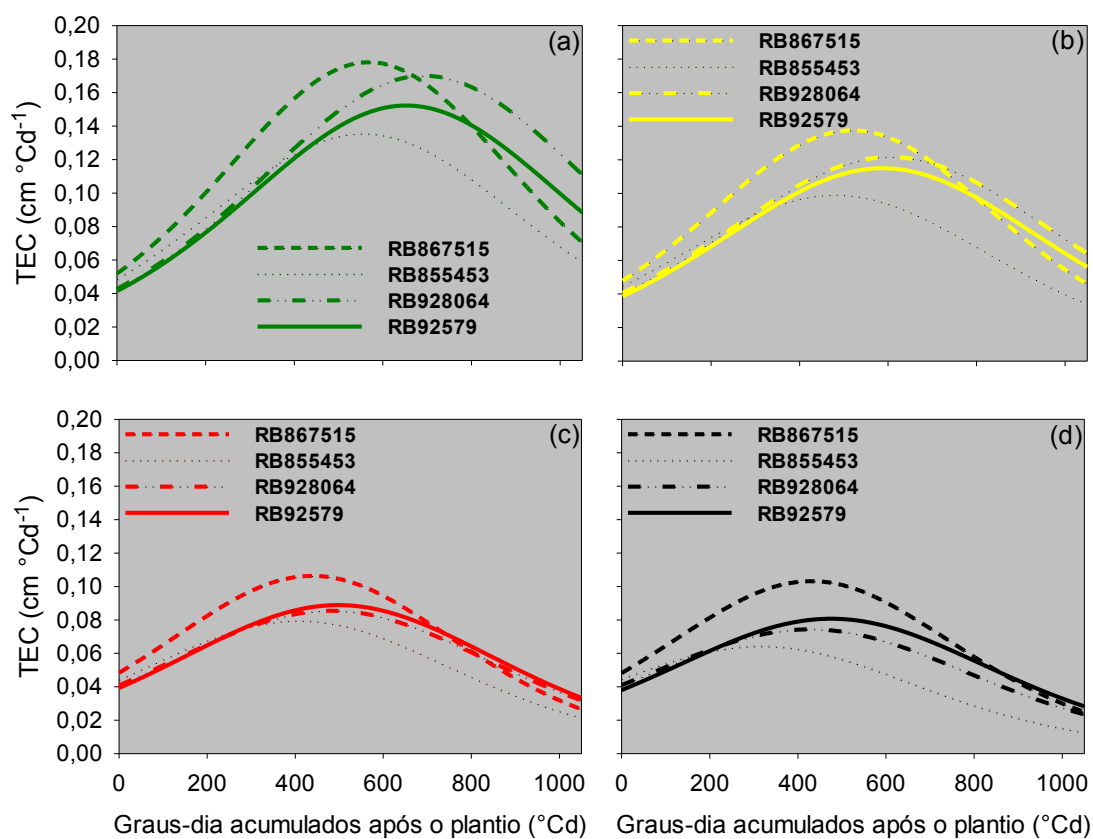


Figura 4.12. Taxa de alongação do colmo (TEC) das cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, submetidas aos tratamentos controle (a), deficiência hídrica leve (b), moderada (c) e severa (d), em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de  $16^\circ\text{C}$ , Viçosa-MG.

### **4.3 Alterações das trocas gasosas e da emissão de fluorescência da clorofila a nas cultivares RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064 sob reduções contínuas do potencial matricial de água no substrato de cultivo**

#### **4.3.1 Elementos meteorológicos**

Na Figura 4.13 são apresentados os valores médios da radiação solar global ( $R_g$ ), temperatura ( $t_{ar}$ ) e déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ), observados no interior da casa-de-vegetação durante a realização do experimento, no primeiro (a) e no segundo período de medição (b).

No primeiro período, os valores médios de RFA,  $t_{ar}$  e DPV foram  $633 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $28,9 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $12,8 \text{ hPa}$ , enquanto no segundo foram  $1170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $33,5 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $25,1 \text{ hPa}$ , respectivamente. Percebe-se que os valores foram muito maiores no segundo período de medição.

Com relação aos dias transcorridos, os maiores valores foram observados no 2° e o 4° dia após o início dos tratamentos. Os dias com maior radiação solar global são também os dias com maiores valores de temperatura e  $DPV_{ar}$ .

No segundo período de medição, os dados são apresentados somente até o 5° dia pois, devido ao severo estresse hídrico apresentado pelas plantas no 6° dia de medição, não foi possível avaliar as trocas gasosas ao meio-dia.

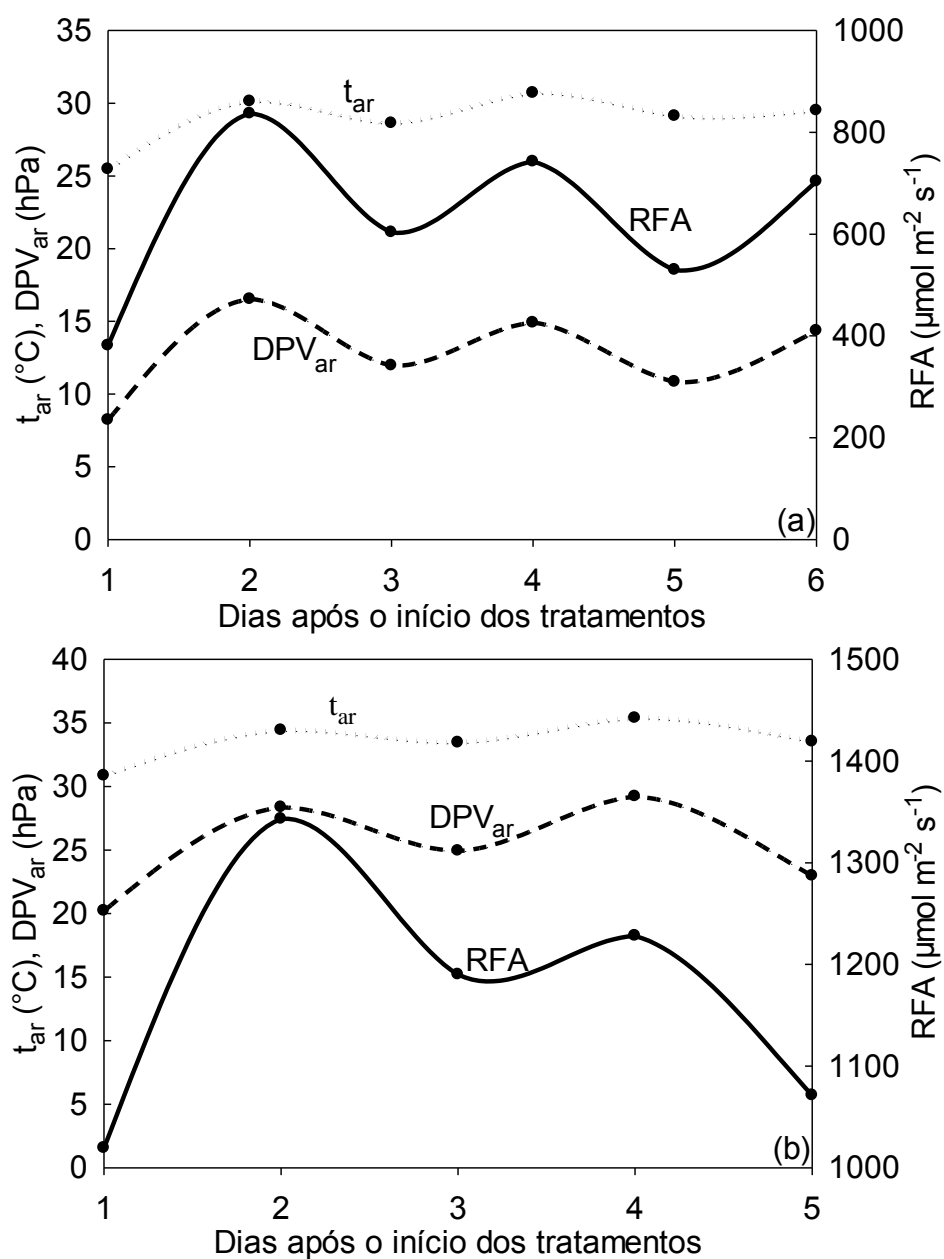


Figura 4.13. Valores médios da radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura ( $t_{ar}$ ) e déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV<sub>ar</sub>), no interior da casa-de-vegetação. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b).

### **4.3.2 Potencial matricial de água no substrato de cultivo**

A variação do potencial matricial de água no substrato de cultivo ao longo do experimento nos tratamentos com restrição hídrica está representada na Fig. 4.14. No 1° e 2° dia, a umidade do solo ficou acima da capacidade de campo. A partir do 3° dia, o potencial matricial de água no substrato diminuiu rapidamente, chegando a  $-270$  kPa no 6° dia. A queda do teor de água seguiu um padrão quantitativamente semelhante, indicando que as condições de consumo de água foram semelhantes em todas as cultivares.

### **4.3.3 Trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre as plantas de cana-de-açúcar e o ambiente de cultivo**

#### ***4.3.3.1 Condutância estomática e taxa de transpiração***

Houve redução da condutância estomática ( $g_s$ ) nas plantas submetidas à restrição hídrica a partir do terceiro dia, quando o potencial matricial de água no substrato de cultivo estava em torno de  $-50$  kPa (Fig. 4.15). Com a diminuição contínua da disponibilidade de água no substrato, as plantas estressadas apresentaram níveis de  $g_s$  cada vez menores. Essa resposta é esperada em plantas submetidas à deficiência hídrica, sendo considerada um dos primeiros mecanismos para impedir a desidratação excessiva das folhas (MACHADO, 2009). Este mecanismo faz parte de um conjunto de medidas que tem como objetivo reduzir o consumo de água pelas plantas, podendo ainda ser citadas o enrolamento foliar, a menor área individual e a redução no surgimento de folhas (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SMIT; SINGELS, 2006; MACHADO, 2009).

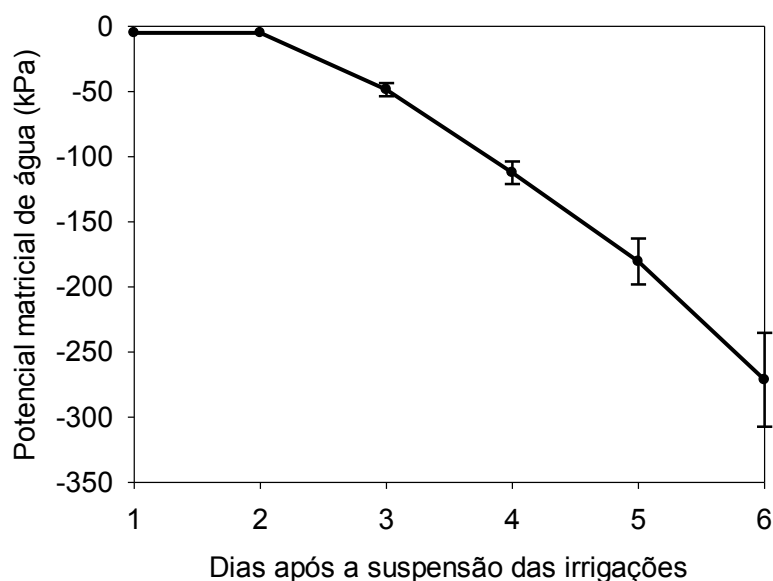
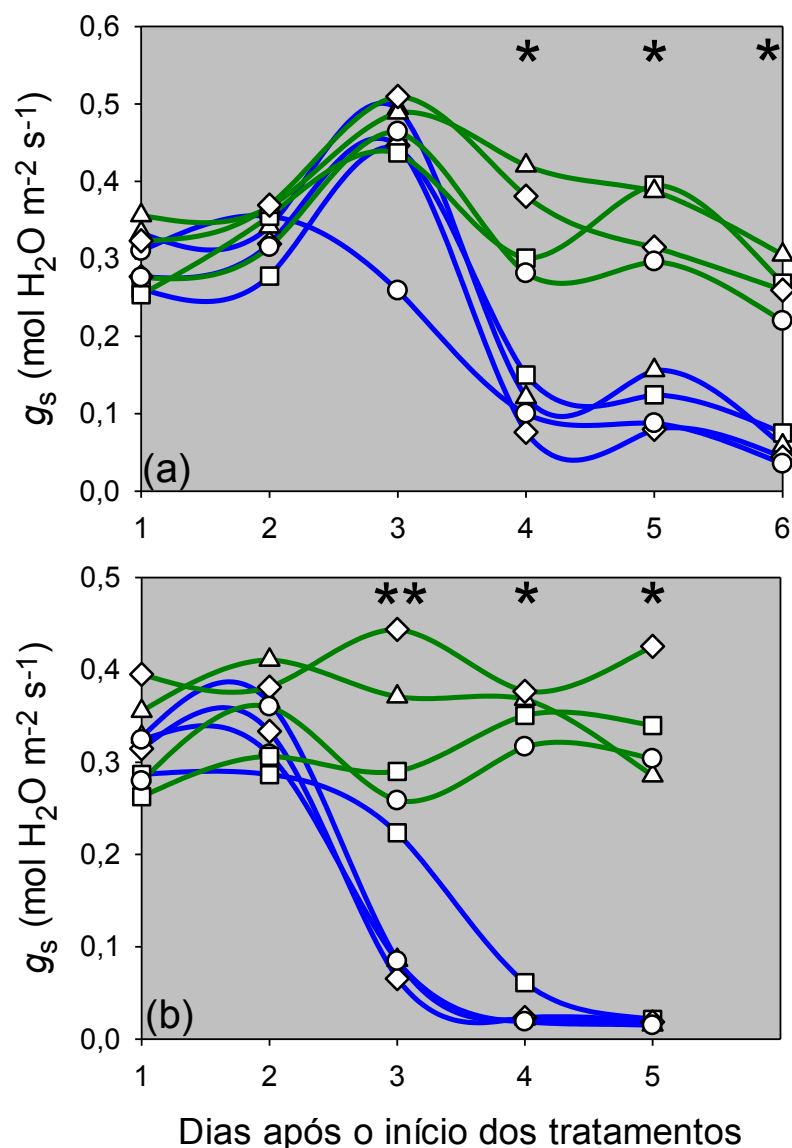


Figura 4.14. Variação do potencial matricial de água no substrato de cultivo ( $\Psi_m$ ) durante o período experimental, após a suspensão das irrigações, referente ao tratamento com restrição hídrica para as quatro cultivares de cana-de-açúcar. Valores correspondem à média  $\pm$  desvio padrão.

Ao comparar os períodos de medições, percebe-se que o efeito do déficit hídrico foi mais evidente nas avaliações realizadas ao meio-dia. Em média, os valores de  $g_s$  foram 72, 72 e 84% menores no segundo período de medição do 3º, 4º e 5º dia, respectivamente. O déficit hídrico nas plantas pode ser provocado por uma deficiência no suprimento de água na zona radicular e por uma excessiva demanda evaporativa da atmosfera (FRANÇOIS, 2012). O aumento da radiação solar, da temperatura e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar potencializaram as restrições hídricas impostas pela baixa disponibilidade de água no substrato, provocando, deste modo, quedas expressivas neste parâmetro fisiológico. Machado (2009) também observou comportamento semelhante quando analisou plantas de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico no período matutino e vespertino.



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e para interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

Figura 4.15. Condutância estomática ( $g_s$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b).

Não houve diferença significativa entre as cultivares no tratamento controle. As médias foram superiores a  $0,3 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$  nos dois períodos avaliados. Na literatura, há uma ampla gama de valores de  $g_s$  para plantas de cana-de-açúcar em condições normais de irrigação. As diferentes épocas do ano, condições meteorológicas, estágio fenológico da planta e radiação fotossinteticamente ativa na câmara do IRGA são causas da grande variação entre os resultados. Em geral, encontram-se valores que vão desde 0,14 até  $0,4 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010; SILVA *et al.*, 2012; MACHADO, 2009).

Quando submetida ao déficit hídrico, verificou-se que a cultivar RB867515, tolerante ao estresse hídrico, foi a última a apresentar os efeitos da menor disponibilidade de água. Esta cultivar mostrou forte fechamento estomático somente no 4º dia, quando o potencial matricial de água no substrato de cultivo estava em torno de  $-110 \text{ kPa}$ . Por outro lado, a RB92579, outra cultivar tolerante, não apresentou diferença em relação às demais cultivares e a redução ocorreu no 3º dia.

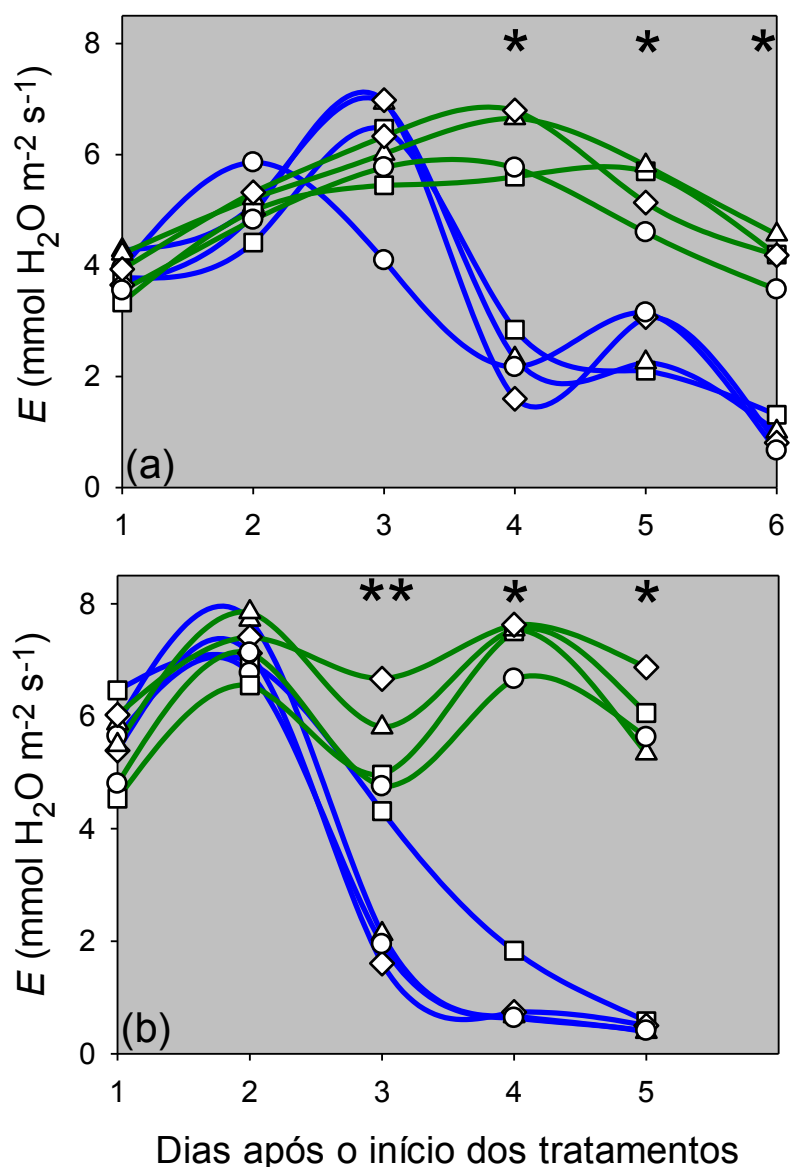
A partir do 4º dia, todas as cultivares apresentaram acentuada redução na  $g_s$  em plantas estressadas. Em relação às plantas controle, a redução foi de 61, 64, 71 e 80% para as cultivares 15, 64, 79 e 53, respectivamente. Entretanto, em valores absolutos, não houve diferença significativa entre as cultivares, sendo que todas apresentaram média em torno de  $0,1 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Nos dias subsequentes,  $g_s$  foi ainda menor, chegando a uma média de  $0,05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$  na sexta avaliação.

Smit e Singels (2006) sugeriram que genótipos mais tolerantes à seca mantêm maior abertura estomática que os suscetíveis quando submetidos ao

déficit hídrico. Entretanto, nem sempre há tal resposta (GRAÇA *et al.*, 2010; MACHADO, 2009; SILVA *et al.*, 2012), devido aos diferentes mecanismos de tolerância que as plantas possuem. A resposta estomática deve ser considerada com cautela, pois alguns estudos demonstraram que os genótipos mais tolerantes apresentam rápida redução da abertura estomática devido à seca (INMAN-BAMBER *et al.*, 2005; SALIENDRA; MEINZER, 1989; SMITH *et al.*, 2005). Segundo Naidu e Bhagyalakshmi (1967), o genótipo tolerante apresenta rápida resposta estomática tanto em condição de seca (fechamento) como na reidratação (abertura) das plantas de cana-de-açúcar.

A tolerância à seca também se baseia na capacidade de exploração do solo pelo sistema radicular das plantas (PIMENTEL, 2004). É possível que o fator de tolerância da RB92579 seja o sistema radicular mais robusto em relação às demais. Silva *et al.* (2005) mostrou que essa cultivar teve praticamente o dobro de densidade radicular que a SP79-1011 e a RB72454, e Endres *et al.* (2010) sugere que a maior capacidade de absorção de água da RB92579 seja devido a maior condutividade hidráulica das raízes em relação a outras variedades.

A menor condutância estomática nos tratamentos submetidos ao déficit hídrico afetou a taxa de transpiração (Figura 4.16). Conseqüentemente, a redução de  $E$  nas plantas submetidas à restrição hídrica também ocorreu a partir do terceiro dia.



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e para interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

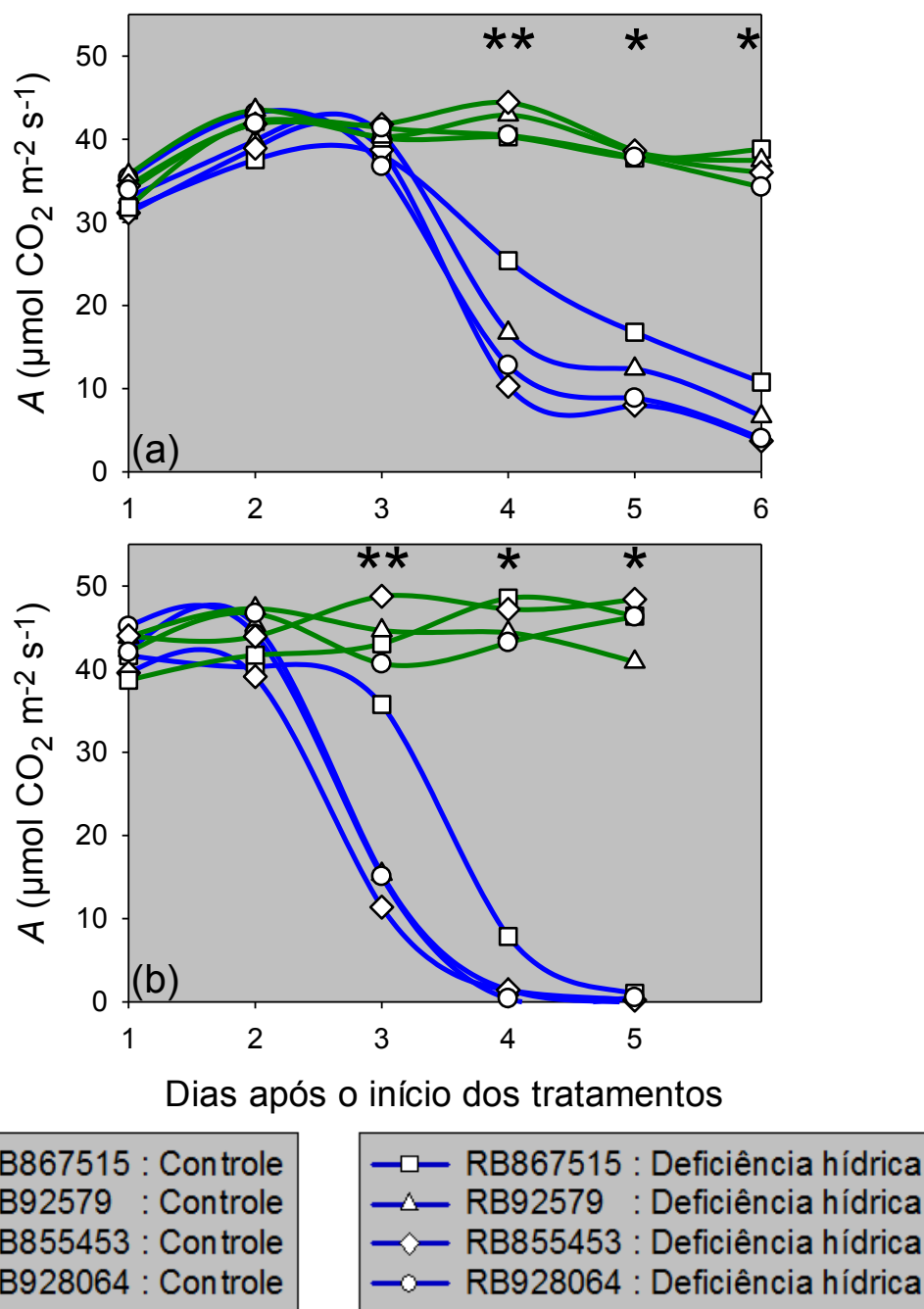
Figura 4.16. Taxa de transpiração ( $E$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b).

Nas plantas estressadas, as taxas transpiratórias foram menores ao meio-dia. Em média, os valores de  $E$  foram 59, 57 e 82% menores no segundo período de medição do 3º, 4º e 5º dia, respectivamente. Por outro lado, as taxas transpiratórias foram, em média, 20% maiores ao meio-dia nas plantas controle. Inúmeros trabalhos relatam a influência da  $g_s$  nas taxas transpiratórias (LARCHER, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2013; ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010). Segundo Endres *et al.* (2010), o estômato tem uma forte influência na transpiração, principalmente quando a condutância estomática é baixa. Para valores mais altos de  $g_s$ , a correlação entre as duas não é tão alta, pois, neste caso, a transpiração sofre forte influência do déficit de pressão de saturação de vapor d'água entre a folha e a atmosfera. Se os estômatos permanecerem com um grau de abertura constante, a quantidade de água perdida será proporcional à capacidade evaporativa do ar (LARCHER, 2006).

Não houve diferença significativa entre as cultivares no tratamento controle. Por outro lado, quando submetidas ao déficit hídrico, verificou-se que a RB867515 manteve altas taxas transpiratórias por mais tempo. Nessa cultivar, a redução nos valores de  $E$  ocorreu no 4º dia.

#### **4.3.3.2 Taxa de assimilação líquida e concentração intercelular de $CO_2$**

Os decréscimos em  $g_s$ , induzidos pelo déficit hídrico, também afetaram significativamente a assimilação de  $CO_2$  nos dois períodos avaliados (Figura 4.17). Novamente, o efeito do déficit hídrico foi mais evidente nas avaliações realizadas ao meio-dia. Em média, os valores de  $A$  foram 50, 83 e 96% menores no segundo período de medição do 3º, 4º e 5º dia, respectivamente.



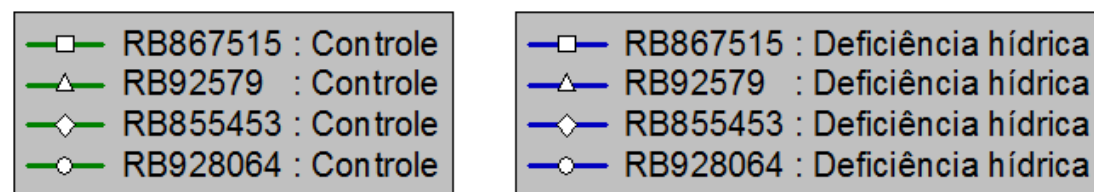
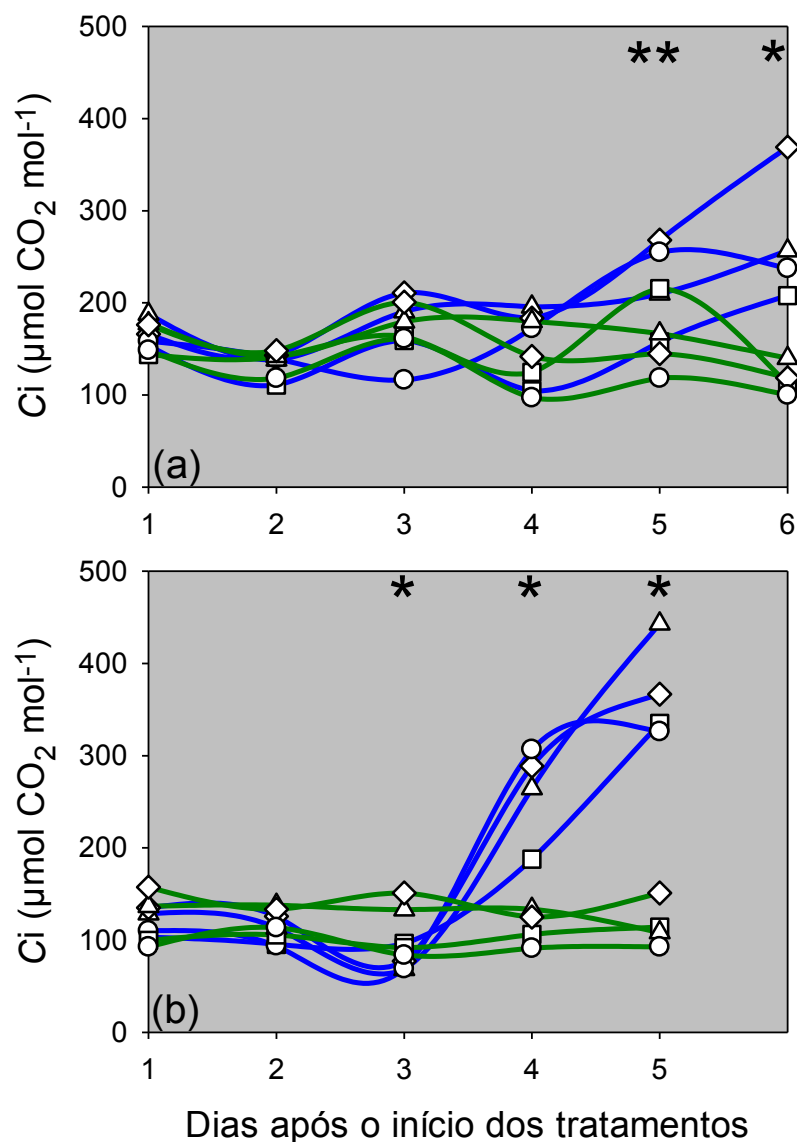
Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e para interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

Figura 4.17. Taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b).

No período da manhã, a taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> foi significativamente diferente entre plantas controle e submetidas ao déficit hídrico a partir do 4º dia. Os valores de *A* nas plantas estressadas foram 49, 61, 68 e 77% menores para as cultivares RB867515, RB92579, RB928064 e RB855453, respectivamente. Neste dia, a cultivar RB867515 foi significativamente superior às cultivares sensíveis, apresentando valores pelo menos duas vezes superiores. Com a redução contínua do potencial matricial de água no substrato, a taxa fotossintética foi cada vez menor e os valores de *A* ficaram entre 4 e 10  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no 6º dia.

No segundo horário de medição, a taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> foi significativamente diferente entre os tratamentos de disponibilidade hídrica a partir do 3º dia, com exceção da cultivar RB867515 que apresentou diferença somente no 4º. No tratamento controle, não houve diferença significativa entre cultivares. No período da manhã, a média foi de 39  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  e ao meio-dia, de 44,5  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Por sua vez, a concentração intercelular de CO<sub>2</sub> também foi afetada pela restrição hídrica (Figura 4.18). As diferenças foram percebidas primeiramente nas medições ao meio-dia, quando houve diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica a partir do 3º dia. Neste dia em especial, os valores de *C<sub>i</sub>* das plantas estressadas foram menores do que nas plantas controle. Esta diminuição, juntamente com as menores taxas fotossintéticas registradas, indica que houve limitação fotossintética de origem estomática (GHANNOUM, 2009). Nessas condições, os níveis fotossintéticos geralmente recuperam-se de maneira relativamente rápida quando as plantas são reidratadas (GHANNOUM, 2009).



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e para interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

Figura 4.18. Concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (Ci) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b).

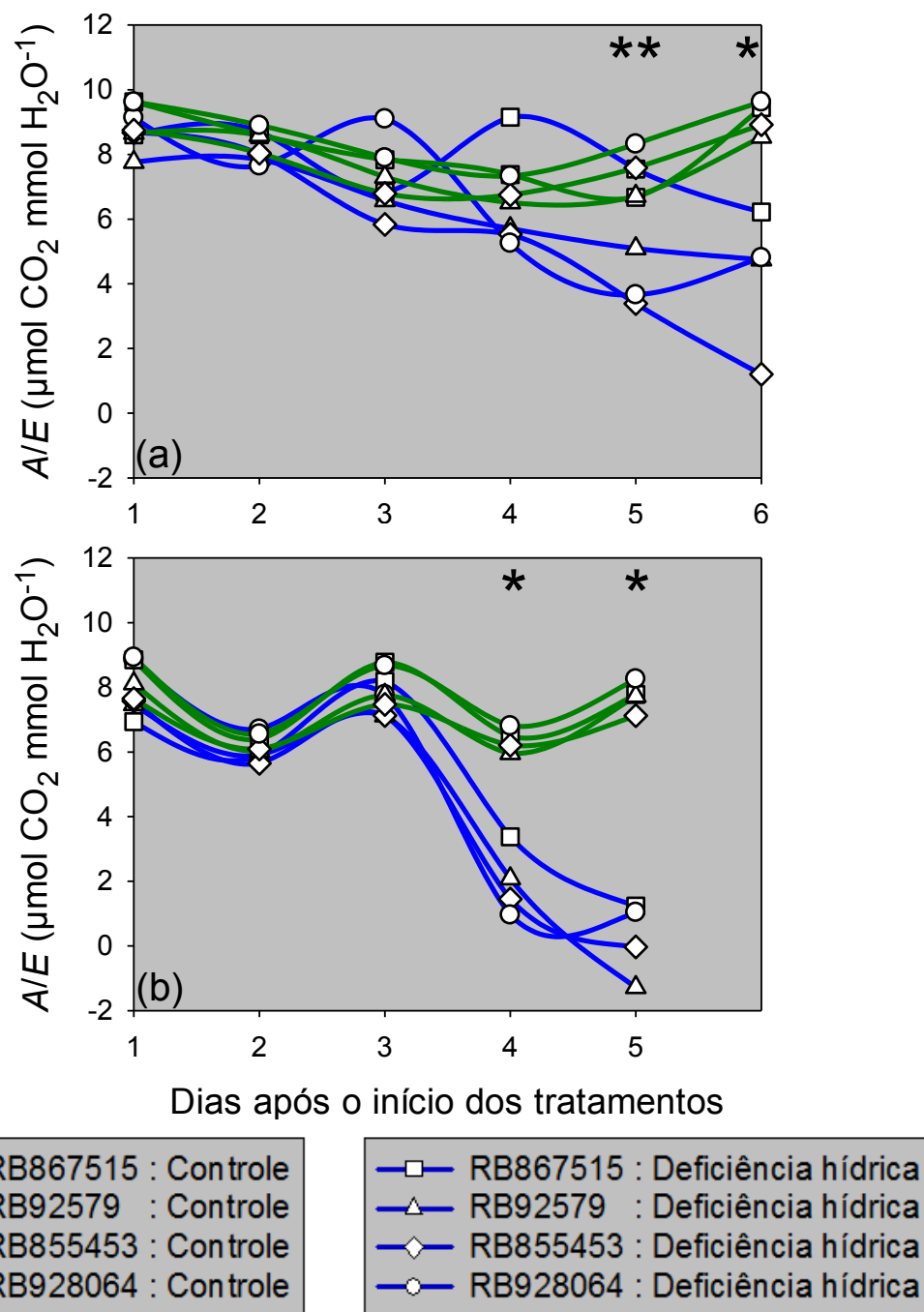
A partir do 4º dia, os valores de  $C_i$  das plantas estressadas aumentaram significativamente. Este aumento, juntamente com os baixos níveis fotossintéticos, indica a presença de limitações bioquímicas da fotossíntese. Nessa fase, geralmente a fotossíntese não volta aos níveis pré-estresse mesmo após a remoção da restrição hídrica (GHANNOUM, 2009).

Um aumento na concentração intercelular de  $CO_2$  também foi descrito em plantas de Sorghum (COUSINS *et al.*, 2002) e cana-de-açúcar (GRAÇA, 2009) sob regime de déficit hídrico, bem como o observado no presente trabalho, que apresentou um aumento significativo da concentração intercelular de  $CO_2$  para todas as cultivares sob déficit hídrico.

#### **4.3.4 Eficiência instantânea do uso da água**

A eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) das quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica está apresentada na Figura 4.19. Houve diferença significativa entre tratamentos de disponibilidade hídrica a partir do 4º dia, nas medições realizadas próximo ao meio-dia. Neste momento, o potencial de água no substrato de cultivo estava em torno de  $-110$  kPa. A partir desse momento, quando as plantas também apresentaram limitações bioquímicas da fotossíntese, os valores de  $A/E$  foram muito inferiores nas plantas com deficiência hídrica.

Tanto nas plantas controle, como nas estressadas, a relação  $A/E$  foi maior no período da manhã, quando os valores do  $DPV_{ar}$  foram baixos. Da mesma forma, os valores de  $A/E$  foram fortemente influenciados pela variação do  $DPV_{ar}$  entre os dias de medições, principalmente no segundo período de medição.



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e para interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

Figura 4.19. Eficiência instantânea do uso de água ( $A/E$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. As medições foram realizadas entre 8:00 e 11:00 h (a) e entre 11:00 e 13:00 h (b).

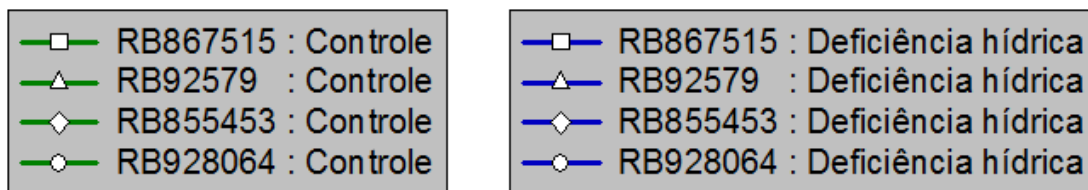
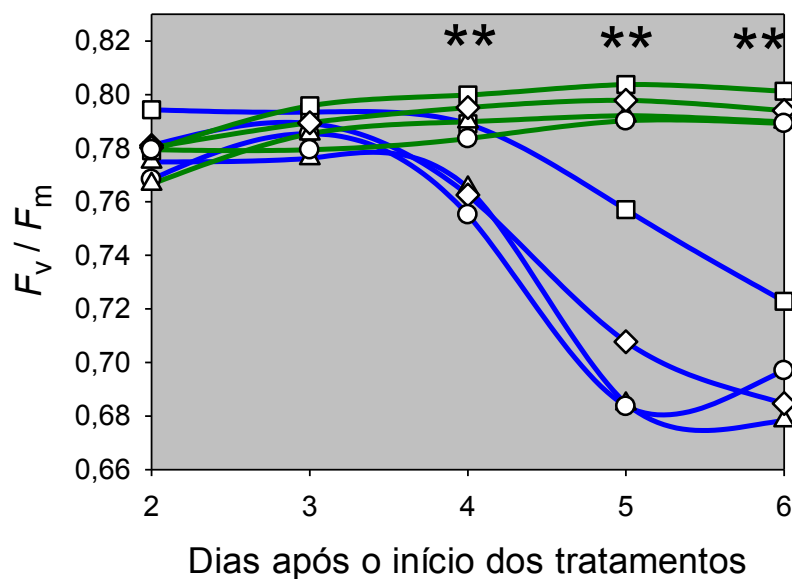
### **4.3.5 Eficiência quântica potencial do FSII**

A eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas aos dois níveis de disponibilidade hídrica está apresentada na Figura 4.20. As cultivares RB92579, RB855453 e RB928064 apresentaram reduções nos valores de  $F_v/F_m$  a partir do 4º dia, enquanto a RB867515 a partir do 5º.

## **4.4 Alterações das trocas gasosas e da emissão de fluorescência da clorofila a na cultivar RB92579 sob deficiência hídrica**

### **4.4.1 Medição dos elementos meteorológicos aos 213 DAP**

As alterações da temperatura do ar ( $t_{ar}$ ) e do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ) do ambiente de cultivo, juntamente com a alteração da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) fixada no IRGA, são mostradas na Figura 4.21. A variação da RFA aplicada pela fonte de radiação artificial acoplada ao IRGA seguiu a curva característica típica de um dia de céu claro, com o pico de radiação ocorrendo ao meio-dia. Os valores de  $t_{ar}$  e  $DPV_{ar}$  variaram de acordo com um comportamento senoidal até alcançarem os maiores valores entre 14 e 16 h. As medições foram realizadas aos 213 dias após o plantio (DAP), na cultivar de cana-de-açúcar RB92579.



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica (\*) e para interação cultivares x disponibilidade hídrica (\*\*).

Figura 4.20. Eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) de quatro cultivares de cana-de-açúcar, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica: controle e deficiência hídrica a partir da suspensão das irrigações. Os dados foram obtidos na antemã dos dias de medições das trocas gasosas entre as cultivares e o ambiente da casa-de-vegetação.

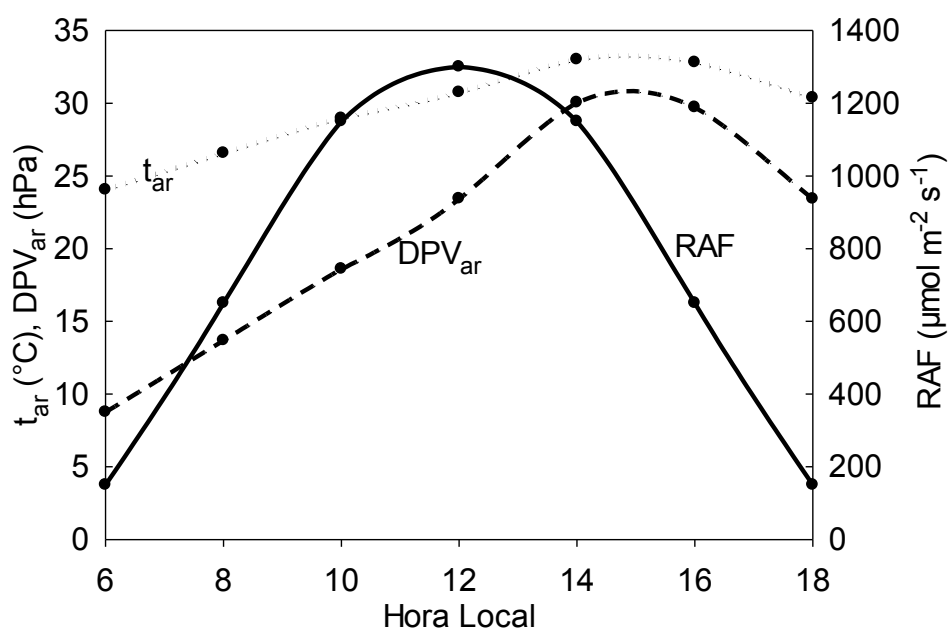
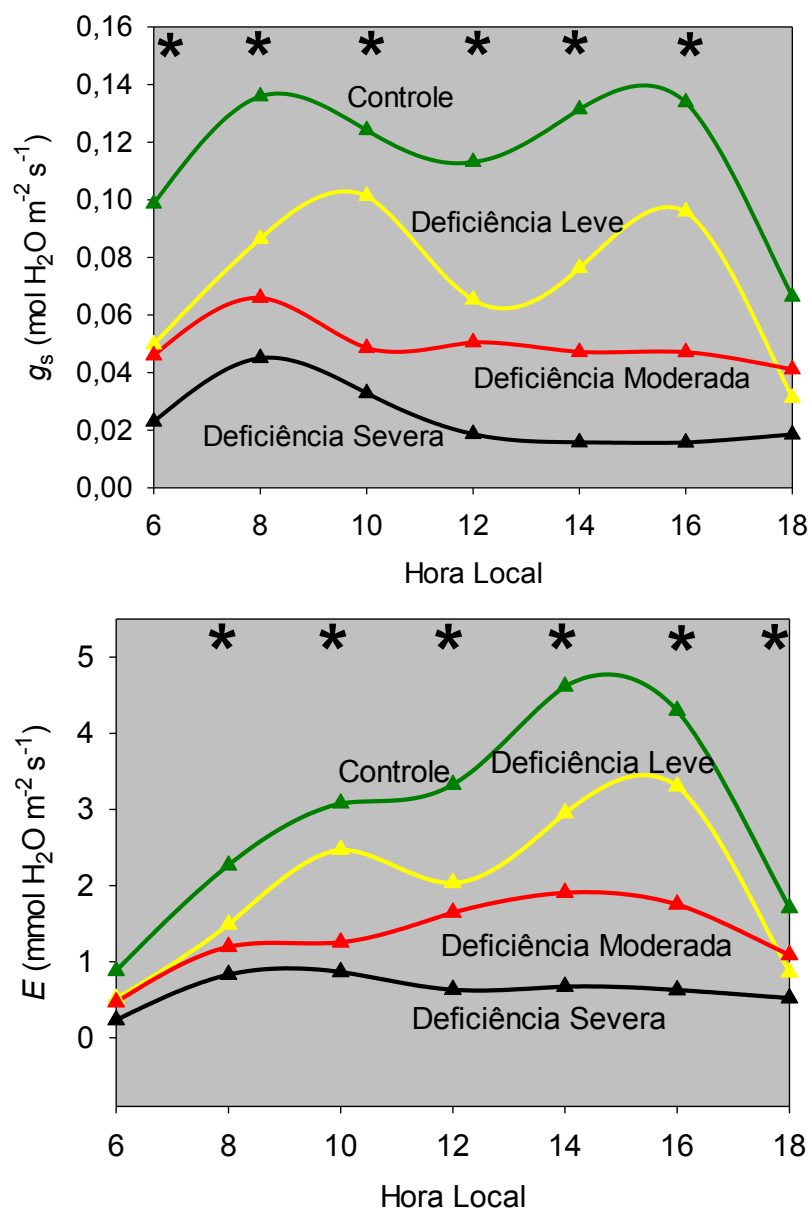


Figura 4.21. Alterações diurnas da temperatura do ar ( $t_{ar}$ ) e do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar ( $DPV_{ar}$ ) do ambiente de cultivo, juntamente com a alteração da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) fixada no IRGA.

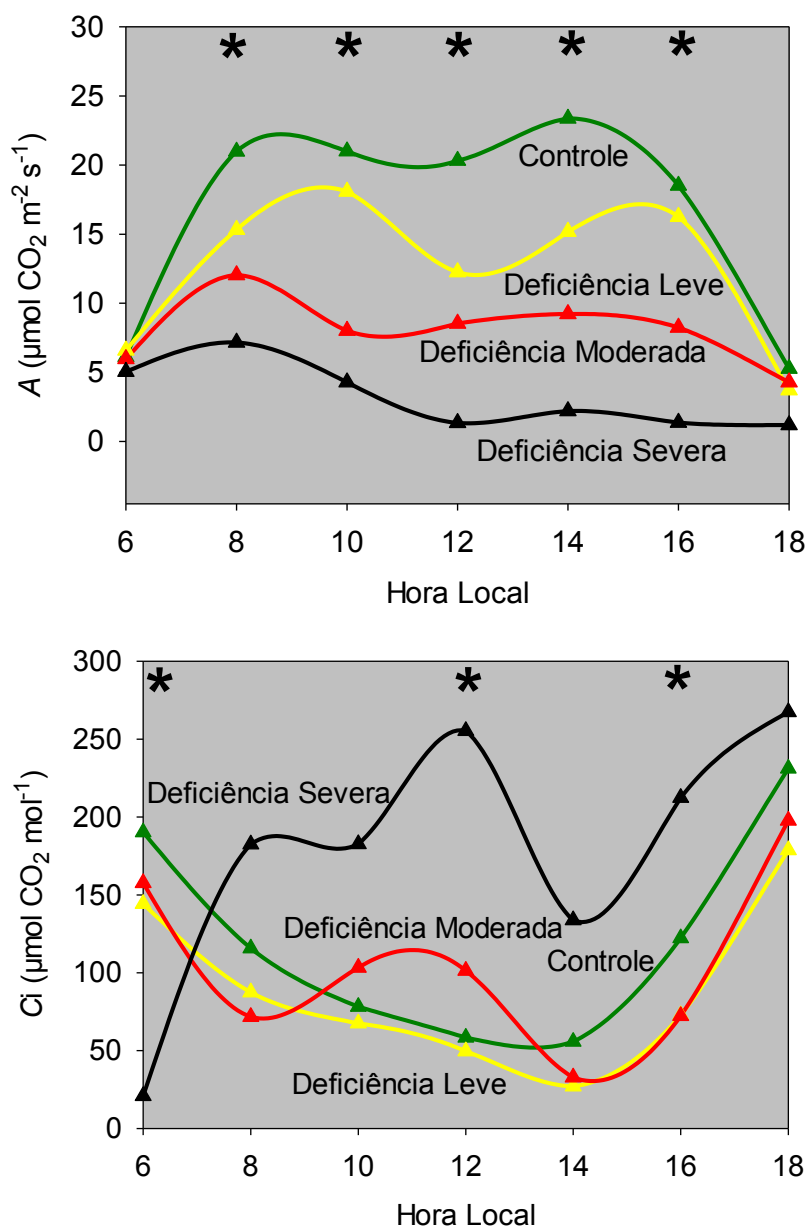
#### 4.4.2 Avaliações das trocas gasosas de dióxido de carbono e de vapor d'água entre a cultivar de cana-de-açúcar RB92579 e o ambiente da casa-de-vegetação aos 213 DAP

Houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) das trocas gasosas nas plantas submetidas ao déficit hídrico, quando comparadas com as do tratamento controle (Figura 4.22 e 4.23), cujas plantas foram mantidas na capacidade de campo ( $\Psi_m > -10$  kPa), por meio de irrigações diárias. Quanto maior a restrição hídrica, maior a redução na condutância estomática ( $g_s$ ), na taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) e na taxa de transpiração ( $E$ ). Esta resposta, esperada em plantas submetidas à deficiência hídrica (LARCHER, 2006), reflete o forte ajuste estomático para evitar a perda excessiva de água em condições de estresse (ROMERO; BOTÍA, 2006).



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica.

Figura 4.22. Alterações diurnas na condutância estomática ( $g_s$ ) e na taxa de transpiração ( $E$ ), referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica.

Figura 4.23. Alterações diurnas na taxa de assimilação líquida ( $A$ ) e na concentração intercelular de  $\text{CO}_2$ , referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).

No início da manhã, houve diferença de  $g_s$  entre os tratamentos, reflexo da diferença de hidratação dos tecidos foliares. Plantas mais túrgidas tendem a apresentar maior abertura estomática (TAIZ; ZEIGER, 2013). Entretanto, devido aos baixos valores de radiação fotossinteticamente ativa no início da manhã, as taxas de assimilação de  $CO_2$  foram baixas e praticamente iguais em todos os tratamentos. Percebe-se um comportamento diferenciado do tratamento severo em relação aos demais. Para obter a taxa fotossintética de  $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , o  $C_i$  foi praticamente todo consumido, já que os estômatos encontravam-se mais fechados, dificultando a difusão de  $CO_2$  para a câmara subestomática.

Com o aumento da radiação fotossinteticamente ativa, constataram-se grandes diferenças nos valores das variáveis medidas entre os tratamentos. Enquanto que, no tratamento controle, as taxas fotossintéticas atingiram níveis de  $23,5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , nos tratamentos com deficiência leve, moderada e severa, os valores máximos chegaram somente a 18, 12 e  $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente. Evidentemente, as diferenças na abertura estomática contribuíram para tal fato (GUO *et al.*, 2009; GRASSI *et al.*, 2009). Além disso, o comportamento das variáveis  $A$  e  $g_s$  foram semelhantes durante todo o dia e em todos os tratamentos (Apêndice 7.9), mostrando a forte relação entre ambas (ENDRES *et al.*, 2010).

Quanto maior a restrição hídrica, mais cedo e mais drástica foi a redução na taxa de assimilação de  $CO_2$ . Menor disponibilidade de água no substrato de cultivo resulta em maior dificuldade de absorção. Com o aumento da incidência de radiação fotossinteticamente ativa e do  $DPV_{ar}$ , as plantas não são capazes de extrair água em uma taxa compatível com suas necessidades,

obrigando as folhas a reduzirem a abertura estomática para evitarem a desidratação excessiva (PEREIRA *et al.*, 2013). A partir das 12 horas, as plantas do tratamento severo fecharam os estômatos de tal forma que praticamente não realizaram mais trocas gasosas. No tratamento moderado, ocorreu um pico de assimilação às 8 horas, caindo logo após e ficando estável, em torno de  $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , no restante do dia. No tratamento leve, os ganhos fotossintéticos caíram ao meio-dia, mas houve recuperação logo em seguida, quando a densidade de fluxo de radiação fotossintética começou a decrescer.

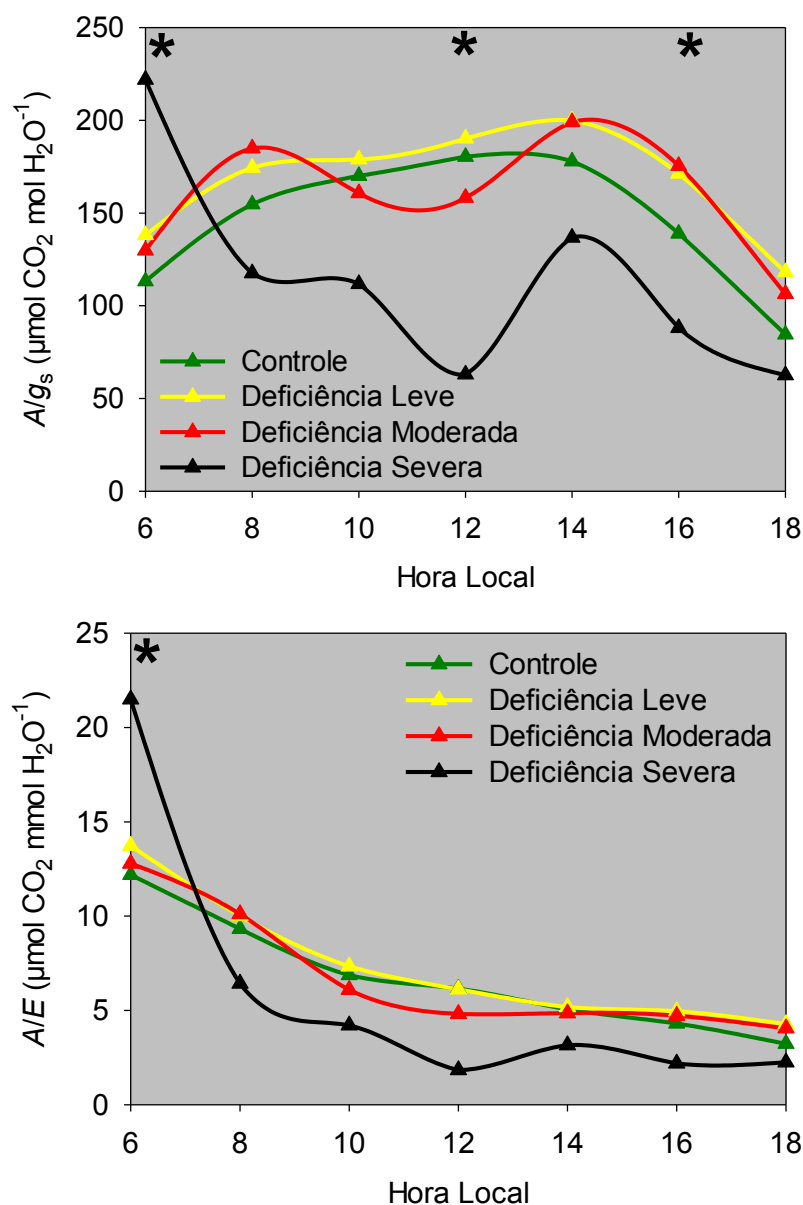
Pode-se dizer que as plantas dos tratamentos controle e deficiência hídrica leve apresentaram somente limitação fotossintética de origem estomática. A forte relação entre essas duas variáveis ( $A$  e  $g_s$ ) e o decréscimo nos valores de  $C_i$  comprovam tal argumento (HUANG *et al.*, 2006). Por outro lado, as plantas submetidas às deficiências moderada e severa, além da limitação estomática, apresentaram também a chamada limitação não-estomática ou limitação bioquímica da fotossíntese. Os baixos níveis fotossintéticos, aliados aos altos valores de  $C_i$ , mostram que, no tratamento com deficiência severa, houve limitação bioquímica durante quase todo o dia. Por sua vez, as plantas do tratamento com deficiência moderada apresentaram tal limitação somente nos horários mais quentes do dia. Roza (2010) sugeriu que o aumento de  $C_i$ , sob baixa disponibilidade hídrica, pode estar relacionado à queda na atividade de enzimas envolvidas no processo de fixação de  $\text{CO}_2$ . Embora a queda da fotossíntese sob deficiência hídrica seja devida primariamente ao fechamento dos estômatos (GHANNOUM, 2009), sob condições mais severas de estresse, outros fatores relacionados às

reações fotoquímicas e ao metabolismo do carbono são afetados (GLAZ; MORRIS; DAROUB, 2004; MACHADO, 2009; PINCELLI, 2010).

Neste estudo, ficou evidenciada a forte relação das taxas transpiratórias com a demanda atmosférica (Apêndice 7.10) e com a disponibilidade de água no substrato de cultivo. Como esperado, quanto maior a restrição hídrica, menores foram os valores da transpiração ( $E$ ). Por meio da regulação da abertura estomática, a planta é capaz de modular as taxas transpiratórias de acordo com as possibilidades e as necessidades de seu balanço hídrico (LARCHER, 2006). Esse comportamento garante a sobrevivência das plantas aos mais diversos ambientes (PEREIRA *et al.*, 2013). Se os estômatos permanecerem com um grau de abertura constante, a quantidade de água perdida será proporcional à capacidade evaporativa do ar (LARCHER, 2006). Como o  $DPV_{ar}$  é muito maior à tarde, as taxas transpiratórias são maiores em comparação ao período da manhã.

#### **4.4.3 Eficiência instantânea do uso de água**

Os maiores valores de eficiência do uso da água instantânea ( $A/E$ ) ocorreram no início da manhã, quando os valores do  $DPV_{ar}$  foram baixos (Figura 4.24). Com o aumento da demanda hídrica atmosférica e, conseqüentemente, da transpiração, a eficiência foi decrescendo continuamente até chegar a valores mínimos no final da tarde.



Asteriscos indicam diferença significativa em níveis de 5% de probabilidade para os tratamentos de disponibilidade hídrica.

Figura 4.24. Alterações diurnas nas eficiências do uso de água intrínseca ( $A/g_s$ ) e instantânea ( $A/E$ ), referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).

Percebe-se que os tratamentos controle e deficiência hídrica leve apresentaram comportamento semelhante ao longo do período diurno, com pequena vantagem para o leve. Taiz e Zeiger (2013) ressaltaram que à medida que os estômatos se fecham após o início do estresse hídrico, a eficiência do uso de água pode aumentar, porque o fechamento estomático inibe mais a transpiração que diminui as concentrações intercelulares de  $\text{CO}_2$ . Com relação aos tratamentos moderado e severo, nos horários em que as plantas apresentaram limitação bioquímica da fotossíntese, a relação  $A/E$  diminuiu. No tratamento severo, o estresse foi tão intenso que,  $A/E$  foi extremamente baixa durante todo o dia.

Com relação à eficiência intrínseca do uso de água ( $A/g_s$ ), observa-se que, enquanto não houve limitação bioquímica da fotossíntese, a eficiência das plantas com restrição hídrica foi maior que a do controle (Figura 4.24). Tal fato é comprovado pelos valores do tratamento leve e moderado.

Quando não houve limitação bioquímica da fotossíntese, os valores de  $A/g_s$  aumentaram gradativamente até atingir a eficiência máxima às 14 horas. Esse horário se caracterizou por apresentar os maiores valores de temperatura do ar e alta incidência de radiação solar, ou seja, a eficiência intrínseca do uso de água aumentou quando as condições meteorológicas foram ótimas para o processo fotossintético.

#### 4.4.4 Fluorescência da clorofila a

A eficiência quântica potencial do FSII ( $F_v/F_m$ ) foi de 0,78, 0,75, 0,73 e 0,7 para os tratamentos controle, deficiência hídrica leve, moderada e severa, respectivamente. A Figura 4.25 ilustra as alterações do rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $\Phi_{FSII}$ ) e dos rendimentos quânticos da dissipação térmica regulada ( $\Phi_{NPQ}$ ) e não regulada ( $\Phi_{NO}$ ) ao longo do período diurno. De modo geral, o comportamento foi semelhante ao encontrado na literatura (DING *et al.*, 2006; ISHIDA *et al.*, 2014), ou seja, pequena flutuação de  $\Phi_{NO}$  ao longo do período diurno, enquanto  $\Phi_{PSII}$  e  $\Phi_{NPQ}$  foram inversamente proporcionais e fortemente influenciados pela incidência de radiação fotossinteticamente ativa (RFA). No início da manhã, tomando por base o tratamento controle, a maior parte da energia absorvida pelos complexos antenas do FSII foi utilizada nos processos fotoquímicos (média de 62%), 7% na dissipação térmica regulada e 31 % na dissipação basal não-regulada. Estes valores foram continuamente modificados pelas alterações de incidência da RFA até que, ao meio-dia, somente 21% foram utilizados nos processos fotoquímicos e 51% na forma de calor. Quanto maior a incidência de radiação solar, maior a fração de energia dissipada por calor. Tal comportamento tem como objetivo evitar danos ao aparato fotossintético em situações de excesso de incidência de radiação (DING *et al.*, 2006).

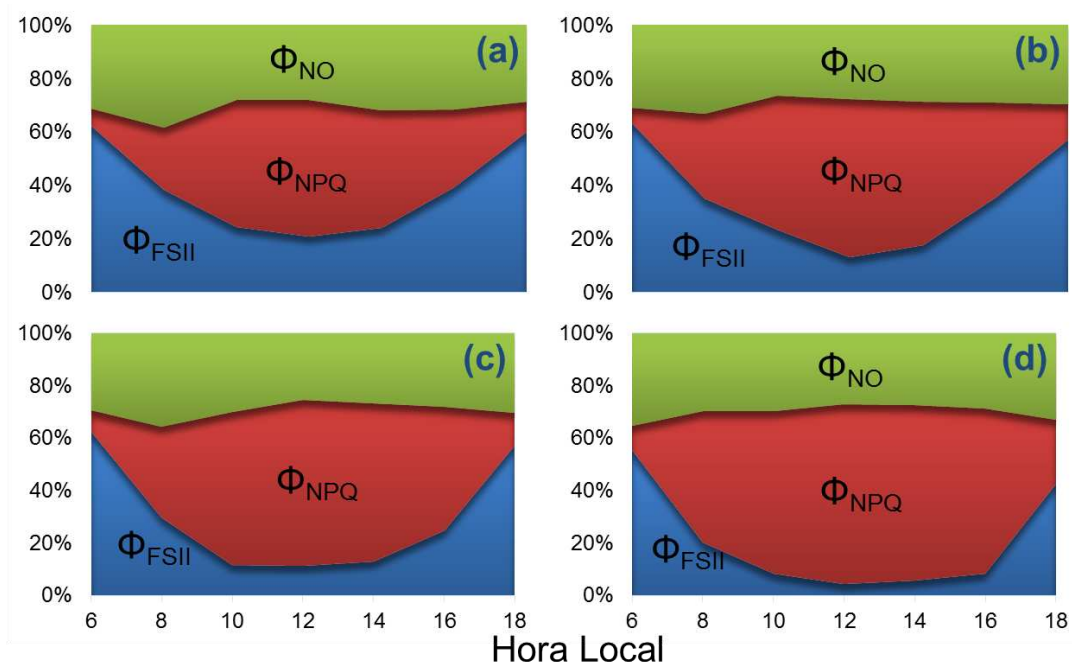


Figura 4.25. Partição diurna dos rendimentos quânticos percentuais de utilização da radiação fotossinteticamente ativa em componentes efetivo ( $\Phi_{FSII}$ ), dissipação térmica regulada ( $\Phi_{NPQ}$ ) e basal não regulada ( $\Phi_{NO}$ ) pela cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos: (a) controle ( $\Psi_m > -10$  kPa); e deficiências hídricas: (b) leve ( $\Psi_m > -100$  kPa); (c) moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa); e (d) severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).

A disponibilidade de água no substrato de cultivo afetou fortemente esta dinâmica. Quanto maior a restrição hídrica, menor a fração de energia utilizada nos processos fotossintéticos e maior a fração dissipada na forma de calor. Embora, no início da manhã, os valores das plantas estressadas tenham sido semelhantes ao tratamento controle, percebe-se, ao meio-dia, grande diferença entre os tratamentos. O  $\Phi_{PSII}$  foi de 13, 11 e 4% nos tratamentos com deficiência leve, moderada e severa, respectivamente.

O  $\Phi_{PSII}$  está relacionado à habilidade da folha em remover elétrons dos aceptores quinona do FSII, que por sua vez, está diretamente relacionado à

taxa em que os produtos do transporte de elétrons fotossintéticos (ATP e NADPH) são consumidos. Decréscimos na taxa de consumo de ATP e NADPH podem resultar na diminuição da eficiência de carboxilação, ou seja, na taxa de regeneração da ribulose 1,5-bisfosfato, no suprimento de CO<sub>2</sub> ou no transporte de carboidratos para fora das células (BAKER; ROSENQVIST, 2004)

As restrições no transporte de elétrons do FSII podem resultar em um aumento do gradiente de H<sup>+</sup> entre o lúmen da tilacóide e o estroma, sendo isto, um sinal imediato para a ativação do ciclo das xantofilas, responsáveis por dissipar energia na forma de calor. O controle do pH do lúmen permite indução e reversão do ciclo das xantofilas, e é rápido o bastante para acompanhar as mudanças na incidência de radiação solar, decorrentes da passagem de nuvens (MÜLLER; LI; NIYOGI, 2001). Esse mecanismo regulatório tenta manter a eficiência dos fotossistemas, sendo reconhecido como uma estratégia de fotoproteção e de adaptação fotossintética em curto prazo a condições adversas. (MACHADO, 2009).

O decréscimo no teor de água da folha, induz, inicialmente, ao fechamento dos estômatos, impondo uma diminuição no suprimento de CO<sub>2</sub> para as células do mesófilo e, conseqüentemente, resultando em diminuição das taxas fotossintéticas. Isto pode não impactar a eficiência dos eventos primários no FSII ou modificar os parâmetros de indução da fluorescência, tais como  $F_v/F_m$ . Com a intensificação do estresse hídrico, a diminuição da fotossíntese pode ser acompanhada pela diminuição do consumo de ATP e NADPH, o que resultará em diminuição no transporte linear de elétrons e, conseqüentemente, no  $\Phi_{PSII}$  (MACHADO *et al.*, 2009).

No tratamento controle, os valores do  $\Phi_{PSII}$  foram semelhantes no período da manhã e à tarde. Entretanto, nas plantas estressadas, os valores foram maiores pela manhã e a diferença aumentou com a intensificação do estresse hídrico. Alguns estudos mostram que esta diferença ocorre mesmo em plantas não estressadas (ISHIDA *et al.*, 2014), sendo explicado pelo maior potencial de água nas folhas ( $\Psi_w$ ) na parte da manhã.

O fluxo de energia absorvida pelas antenas do FSII foi fortemente influenciado pela disponibilidade de RFA e pelo nível de estresse (Figura 4.26). A maior parte da energia foi dissipada na forma de calor. O fluxo de energia para a dissipação térmica regulada ( $J_{NPQ}$ ) acompanhou bem a variação da RFA ao longo do dia e quanto maior o estresse, maiores os valores. Ao meio-dia, os valores de  $J_{NPQ}$  foram de 226, 262, 280 e 303  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nos tratamentos controle e deficiência hídrica leve, moderada e severa, respectivamente, de um total de 442  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  absorvidos. Isso significa que o mecanismo de dissipação via ciclo das xantofilas é bastante eficiente e extremamente importante para evitar maiores danos ao aparato fotossintético devido ao excesso de energia na forma de radiação fotossinteticamente ativa (ISHIDA *et al.*, 2014).

É considerado que a dissipação térmica constitutiva ocorre independentemente das condições meteorológicas que afetam a disponibilidade de radiação solar (HENDRICKSON *et al.*, 2004). Ela pode explicar por que a eficiência fotoquímica potencial do FSII ( $F_v/F_m$ ) está em torno de 0,8 em folhas não afetadas por estresses abióticos.

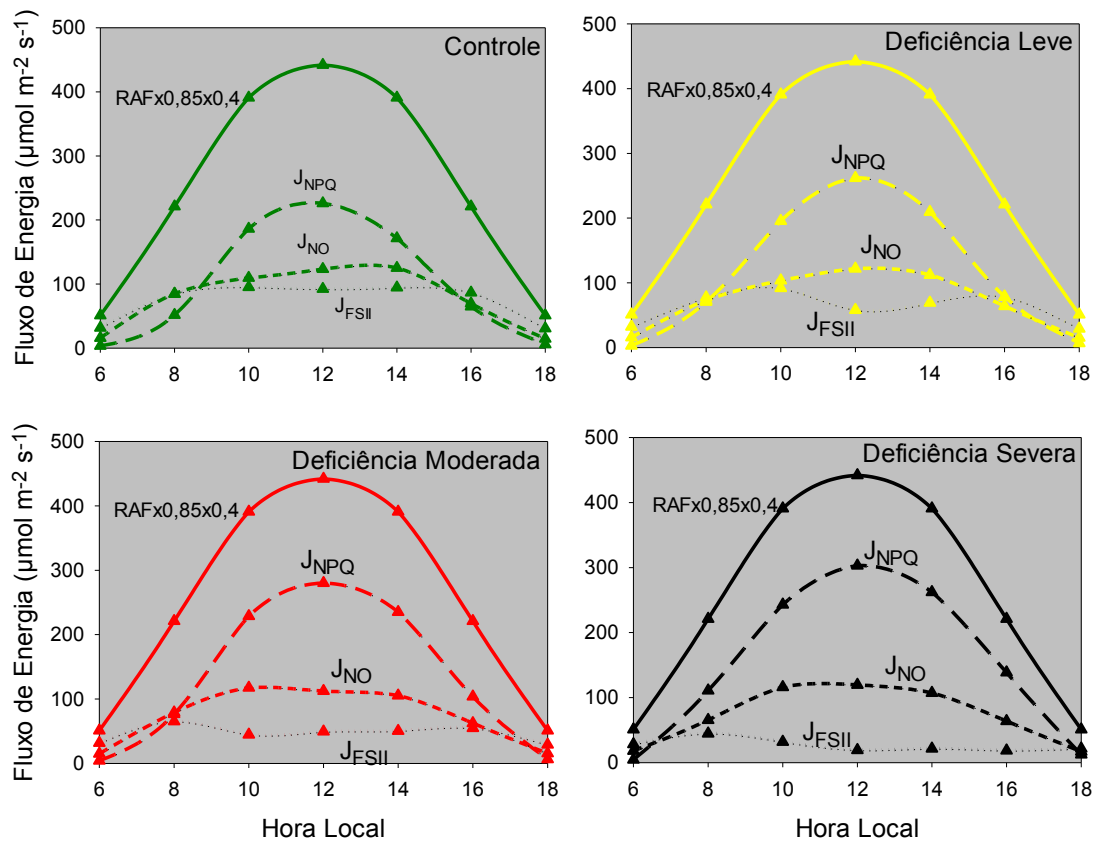


Figura 4.26. Alterações na partição de energia para os processos fotoquímicos ( $J_{FSII}$ ), dissipação basal não-regulada ( $J_{NO}$ ) e dissipação térmica regulada ( $J_{NPQ}$ ) pela cultivar de cana-de-açúcar RB92579, a qual foi submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).

## 5. CONCLUSÕES

Na condição de disponibilidade hídrica plena ( $\Psi_m > -10$  kPa), não houve diferenças significativas entre as cultivares de cana-de-açúcar RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064, referentes às avaliações de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* e potencial de água nas folhas.

Os tratamentos com deficiência hídrica aplicados nas quatro cultivares de cana-de-açúcar provocaram reduções na condutância estomática ( $g_s$ ), na taxa de transpiração ( $E$ ) e na taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ). As maiores reduções dessas variáveis, em relação ao tratamento controle, foram constatadas sob condições severas de deficiência hídrica.

Na ausência de estresse hídrico, o crescimento das plantas ocorre de forma contínua durante a fase de formação da cultura, caracterizada por altas taxas de alongação dos colmos. No entanto, o estresse hídrico altera este padrão de crescimento vertical, não somente reduzindo, mas também antecipando a ocorrência das quedas nas taxas de alongação do colmo.

O comportamento fisiológico das cultivares foi semelhante tanto em decorrência de alterações do potencial matricial de água, a partir da suspensão periódica e retorno posterior dos eventos de irrigação e de fertirrigação, quanto em decorrência de reduções contínuas do potencial matricial a partir da interrupção total das irrigações.

As diferenças mais nítidas entre as cultivares foram constatadas quando estavam submetidas ao potencial matricial de água em torno de  $-100$  kPa. Assim, sob valores de  $\Psi_m$  em torno de  $-50$  kPa, foi possível verificar diferenças somente em condições de alta demanda hídrica atmosférica. Em

contraste, sob valores de  $\Psi_m$  abaixo de  $-150$  kPa, as reduções das trocas gasosas são muito intensas, não permitindo identificar diferenças entre as cultivares.

A cultivar RB867515 apresentou os maiores valores de  $g_s$ ,  $E$ ,  $A$  e estatura dos colmos, nos tratamentos com deficiência hídrica moderada e severa, sendo portanto, mais tolerante ao déficit hídrico e podendo ser adotada como referência de comparação em estudos relacionados com a seleção de genótipos mais tolerantes à seca.

A eficiência quântica potencial do Fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) foi fortemente influenciada pelo potencial matricial de água no substrato de cultivo, assim como pelos níveis de radiação solar observados nos dias anteriores às datas de medições de fluorescência da clorofila *a*.

A eficiência do uso da água tende a aumentar nos estágios iniciais de estresse hídrico, quando há limitação estomática da fotossíntese. Por outro lado, em estágios mais avançados, quando também ocorrem limitações bioquímicas, a eficiência do uso da água tende a diminuir.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**, v. 32, p.1441-1448, 2008.

ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: Edição do autor. 2002. 272 p.

ARANTES, M.T. **Potencial produtivo de cultivares de cana-de-açúcar sob os manejos irrigado e sequeiro**. 2012. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2012.

ARAÚJO, S. A. do C.; DEMINICIS, B.B. **Fotoinibição da fotossíntese**. Revista brasileira de Biociências. v. 7, n. 4, p. 463-472. 2009.

BAKER, N. R.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of experimental Botany**, v. 55, p. 1607–21, ago. 2004.

BATISTA, E. L. da S., **Efeito do estresse hídrico sobre o crescimento de cultivares de cana-de-açúcar**. 2012. 97f. Dissertação (mestrado Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

BATISTA, E. L. da S.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; LYRA, G. B.; SILVA, T. G. F. da; BOEHRINGER, D. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.1080–1087, 2013.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p.1531-1540, 2000.

BUSSOTTI, F.; BORGHINI, F.; CELESTI, C.; LEONZIO, C.; BRUSCHI, P. Leaf morphology and macronutrients in broad-leaved trees in central Italy. **Trees – Structure and Function**, Berlin, v. 14, p. 361-368, 2000.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extrínseca e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.1, p.183-188, 1995.

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

CASTRO-DÍEZ, P.; VILLAR-SALVADOR, P.; PÉREZ-RONTOMÉ, C.; MAESTRO-MARTÍNEZ, M.; MONTSERRAT-MARTÍ, G. Leaf morphology and leaf chemical compositions in three *Quercus* (Fagaceae) species along a rainfall gradient in NE Spain. **Trees – Structure and Function**, v. 11, p. 127-134, 1997.

CHAGAS, R. M. **Alterações fotossintéticas e respostas oxidativas em plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) tratadas com paraquat**. 2007. 82f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2007.

CHAVES, M.M.; PEREIRA, J.S.; MAROCO, J.; RODRIGUES, M.L.; RICARDO, C.P.P., OSÓRIO, M.L.; CARVALHO, I.; FARIA, T.; PINHEIRO, C. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, v. 89, p. 907-916, 2002.

CHAVES, M.M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, p. 551-560, 2008.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **4º Levantamento de Cana-de-açúcar da safra 2013-14** – Abril de 2014. Disponível em: < [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_04\\_10\\_09\\_00\\_57\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_4o\\_lev\\_-\\_13](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_10_09_00_57_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_13) > Acesso em: 06 de junho de 2014.

COUSINS, A. B. et al. Photosystem II energy use, nonphotochemical quenching and the xanthophylls cycle in *Sorghum bicolor* grown under drought and free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) conditions. **Plant, Cell & Environmental**, Logan, v. 25, p. 1551-1559, 2002.

CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETTO, R.; SORATTO, R.P. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar** / Editores T764 técnicos: Carlos Alexandre Costa Crusciol ... [et al.]. – Botucatu: FEPAF - Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2010 111 p.

DAVIES, W.J; ZHANG, J. Root Signals and the Regulation of Growth and Development of Plants in Drying Soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.42, p.55-76, 1991.

DING, L. WANG, K. J.; JIANG, G. M.; LI, Y; G.; JIANG, C. D.; LIU, M. Z.; NIU, S.L.; PENG, Y. Diurnal variation of gas exchange, chlorophyll fluorescence, and xanthophyll cycle components of maize hybrids released in different years. **Photosynthetica**, v. 44, p. 26–31, 2006.

DIOLA, V.; SANTOS, F. **Fisiologia**. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol. Tecnologia e perspectivas. 2ª edição. Viçosa, MG. 2011. p. 27-49.

DOMAINGUE, R. Family and varietal adaptation of sugarcane to dry conditions and relevance to selection procedures. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 21., Bangkok, 1995. **Proceedings...** Bangkok: ISSCT, 1995. p. 418-435.

DU, Y.C.; NOSE, A.; WASANO, K.; UCHIDA, Y. Responses to water stress of enzyme activities and metabolite levels in relation to sucrose and starch synthesis, the Calvin cycle and the C4 pathway in sugarcane (*Saccharum sp.*) leaves. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.25, p.253–260, 1998.

ENDRES, L.; SILVA, J. V.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S. Photosynthesis and Water Relations in Brazilian Sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, v.4, p.31-37, 2010.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; BOTA, J. GALMES, J.; HENKLE, M.; MARTINEZ-CANELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO<sub>2</sub> concentration. **New Phytologist**, v.172, p. 73-82, 2006.

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. C. A. de; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, v.121, p.29–41, 2011.

FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas à irrigação deficitária**. 2012. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/ Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

FRONZAGLIA, T. Cana-de-açúcar: expansão alarmante. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v.1, p. 1-3, 2007.

GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 1347-1354, 2001.

GAVA, G. J. de C.; SILVA, M, de A.; SILVA, R.C. da; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 250-255, 2011.

GHANNOUM, O. C<sub>4</sub> photosynthesis and water stress. **Annals of Botany**, 103, 635–644, 2009.

GILBERT, M., ZWIENIECKI, M., HOLBROOK, N. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in eleven soybean genotypes before and during mild drought. **Journal of Experimental Botany**. v. 62, p. 2875-2887, 2011.

GLAZ, B.; MORRIS, D. R.; DAROUB, S. H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table. **Crop Science**, v.44, p.1633-1641, 2004.

GONÇALVES, E. R; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W. de G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em variedade de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 378-386, 2010.

GONÇALVES, E.R. **Fotossíntese, osmorregulação e crescimento inicial de quarto variedades de cana-de-açúcar submetida à deficiência hídrica**. 2008. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Universidade Federal do Alagoas, Rio Largo, AL, 2008.

GRAÇA, J. P. **Avaliação de parâmetros fisiológicos em cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico**. 2009. 52 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, 2009.

GRAÇA, J. P. da, et al. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Society of Plant Physiology**, v.22, p.189-197, 2010.

GRASSI, G. et al. Contribution of diffusional and non-diffusional limitations to midday depression of photosynthesis in *Arbutus unedo* L. **Trees** 23, 1149–1161, 2009.

GUIMARÃES, A. C. R. **Caracterização de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a déficit hídrico**. 66p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2011.

GUO, W.D. et al. Midday depression of photosynthesis is related with carboxylation efficiency decrease and D1 degradation in bayberry (*Myrica rubra*) plants. **Scientia Horticulturae**, v. 123, p. 188–196, 2009.

HENDRICKSON, L.; FURBANK, R. T.; CHOW, W. S. A simple alternative approach to assessing the fate of absorbed light energy using chlorophyll fluorescence. **Photosynthesis research**, v. 82, p. 73–81, 2004.

HENDRY, G. A. F.; PRICE, A. H. Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: HENDRY, G. A. F.; GRIME, J. P. (Eds.) **Methods in comparative plant ecology**. London: Chapman e Hall, 1993. p. 148-152.

HOLANDA, L. A. de. **Resposta varietal da cana-de-açúcar à deficiência hídrica, durante o desenvolvimento inicial em um latossolo vermelho distroférico**. 2012. 66f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2012.

HUANG, L. F.; ZHENG, J. H.; ZHANG, Y. Y.; HU, W. H.; MAO, H. H.; ZHOU, Y. Z.; YU, J. Q. Diurnal variations in gas exchange, chlorophyll fluorescence quenching and light allocation in soybean leaves: The cause for midday depression in CO<sub>2</sub> assimilation. **Scientia Horticulturae**, v. 110, p. 214–218, 2006.

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., JAGER, J.M., Effect of water stress on growth, leaf resistance and canopy temperature in field-grown sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologist's Association**, v.60, p. 156-161, 1986.

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

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SMITH, D.M.; THORBURN, P.J. Sugarcane physiology: Integration from cell to crop to advance sugarcane production. **Field Crops Research**, v.92, p. 115-117, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.59, p. 13-26, 2008.

ISHIDA, S.; UEBAYASHI, N.; TAZOE, Y.; IKEUCHI, M., HOMMA, K.; SATO, F.; ENDO, T. Diurnal and developmental changes in energy allocation of absorbed light at PSII in field-grown rice. **Plant & cell physiology**, v. 55, p.171–82, 2014.

JONES, H. D. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, p. 387-398, 1998.

JONES, H. G. **Plant and microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. 2. ed. Cambridge: University Press, 1992. 428.p

KELLING, C.R.S. **Efeito da disponibilidade de água no solo sobre os componentes do balanço hídrico e o rendimento do feijoeiro**. 1995. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 1995.

KIM, S. H.; et al. Canopy photosynthesis, evapotranspiration, leaf nitrogen, and transcription profiles of maize in response to CO<sub>2</sub> enrichment. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, p. 588–600, 2006.

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**, v. 80, p. 148-158, 2006.

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

KRAMER, P.J. Drought stress, and the origins of adaptations. In: Turner, N.C.; Kramer, P.J. (ed). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York, Wiley, p. 7-22, 1980.

LANDELL, M. G. A.; SILVA, M. A. As estratégias de seleção da cana em desenvolvimento no Brasil. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, p. 18-23, 2004.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos. Editora Rima. 2006.

LAWLOR, D.W. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. **Annals of Botany**, v. 89, p. 871-885, 2002.

LIMA, A. L. S; ZANELLA, F.; SCHIAVINATO, M.A.; HADDAD, C.R.B. Nitrogenous compounds, phenolic compounds and morphological aspects of leaves: comparison of deciduous and semideciduous arboreal legumes. **Scientia Agricola**, v. 63, p. 40-45, 2006.

LU, D.; ZHANG, J. Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, p. 1199-1206, 1999.

MACHADO, R. S. et al. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.1575-1582, 2009.

MACHADO, R. S. **Respostas fisiológicas de genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico imposto na fase inicial de desenvolvimento**. 2009. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2009.

MAGALHÃES, P. C. et al. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8, p. 223-232, 2009.

MANSUR, R. J. C. N.; BARBOSA, D. C. A. Comportamento fisiológico em plantas jovens de quatro espécies lenhosas da caatinga submetidas a dois ciclos de estresse hídrico. **Phyton**, v. 68, p. 97-106, 2000.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Disponível em: <[www.agricultura.gov.br](http://www.agricultura.gov.br)> Acesso em 16 de março de 2014.

MAXWELL C.; JOHNSON, G. M. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, p. 659-668, 2000.

MÜLLER, P.; LI, X.-P.; NIYOGI, K. K. Non-Photochemical Quenching. A Response to Excess Light Energy. **Plant Physiology**, v. 125, p. 1558–1566, 2001.

NAIDU, K.M.; BHAGYALAKSHMI, K.V. Stomatal movement in relation to drought resistance in sugarcane. **Current Science**, v.20, p. 555-556, 1967.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Water management. In FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, ed, Tropical soybean:

Improvement and production. FAO - **Plant Production and Protection Series**, v.27, p. 153-160, 1994.

O'NEILL, P. M. et al. Use of chlorophyll fluorescence assessments to differentiate corn hybrid response to variable water conditions. **Crop Science**, Madison, v. 46, p. 681-687, 2006.

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. da. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agraria**, v. 6, p. 85-89, 2005.

PAIVA, R.; OLIVEIRA, L.M. **Fisiologia e Produção Vegetal**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 104p.

PASSIOURA, J.B. Drought and drought tolerance. In: Belhassen, E. (ed.). **Drought tolerance in higher plants**. Genetical, physiological and molecular biological analysis. Dordrecht, Kluwer, p. 1-5, 1997.

PEREIRA, A.R.; et al. **Evapotranspiração**. Piracicaba. Editora Fundag, 2013. 323p

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: EDUR, 2004. 191p.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: EDUR, 1998. 150 p.

PINCELLI, R.P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 78f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2010.

PMGCA- Programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar. Disponível em <[www.pmgca.dbv.cca.ufscar.br](http://www.pmgca.dbv.cca.ufscar.br)>. Acesso em dezembro de 2014.

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 of Agronomy and Crop Science**, v.185, p. 249-258, 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 of Agronomy and Crop Science**, v.185, p. 249-258, 2000.

RAO, C.M.; et al. Management of sugarcane clones under limited moisture situations (drought) at formative stage. **Indian Sugar**, p. 949-953, 2005.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, v. 64, p. 211-227, 1999.

RODRIGUES, F.A.; LAIA, M.L.; ZINGARETTI, S.M. Analysis of gene expression profiles under water stress in tolerant and sensitive sugarcane plants. **Plant Science**, Clare, v. 176, p. 286-302, 2009.

ROMERO, P.; BOTÍA, P. Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 56, p. 158–173., 2006.

ROZA, F. A. **Alterações morfofisiológicas e eficiência de uso da água em plantas de *Jatropha curcas* L. submetidas à deficiência hídrica**. 2010. Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus (BA), 2010.

SADRAS, V. O.; MILROY, S. P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: a review. **Field Crop Research**, v. 47, p. 253-266, 1996.

SALIENDRA, N.Z.; MEINZER, F.C. Relationship between root/soil hydraulic properties and stomatal behaviour in sugarcane. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.16, p. 241-250, 1989.

SALIENDRA, N.Z.; MEINZER, F.C.; PERRY, M.; THOM, M. Associations between partitioning of carboxylase activity and bundle sheath leakiness to CO<sub>2</sub>, carbon isotope discrimination, photosynthesis, and growth in sugarcane. **Journal of Experimental botany**, v.47, p.907- 914, 1996.

SANTOS E SILVA, C. D.; et al. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica. **Caatinga**, v. 23, p. 7-13, 2010.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 287-294, 1998.

SAUSEN, T.L. **Respostas fisiológicas de *Ricinus communis* à redução na disponibilidade de água no solo.** 2007. 61f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

SCHOLES, J. D.; HORTON, P. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence: simultaneous measurements. In: HENDRY, G. A. F.; GRIME, J. P. (Eds.). **Methods in comparative plant ecology: a laboratory manual.** London: Chapman e Hall, 1993. p. 130-135.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. **Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar.** In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.de P.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. de. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Livrocere, 2006. p. 19-36.

SHIGAKI, F.; BERTO, A.; LIMA, E.; ZONTA, E.; CEDDIA, M.B.; FREITAS, N. Influência do estresse hídrico nos parâmetros de crescimento, acúmulo de N e produtividade de diferentes variedades de cana-de-açúcar em Miracema - RJ. **Revista Universidade Rural - Série Ciências Exatas e da Terra, Seropédica**, v. 24, n. 1, p. 63-71, 2004.

SILVA, D. K. T. et al. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana-soca no noroeste do Paraná na safra de 2002/2003. **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 6, p. 47-53, 2005.

SILVA, M. A., et al. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, v. 67, p. 656-661, 2008a.

SILVA, M.A. et al. Use of physiological parameters to detect differences in drought tolerance among sugarcane genotypes. In: International Society Of Sugar Cane Technologists Congress, 26, 2007, Durban. **Proceedings.** Durban: ISSCT, 2007. p. 541-547.

SILVA, M.A. et al. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agrícola**, v. 65, p. 620-627, 2008b.

SILVA, P. P. da. et al. Path analysis for selection of drought tolerant sugarcane genotypes through physiological components. **Industrial Crops and Products**, v.37, p.11– 19, 2012a.

SILVA, T. G. da. et al. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 3, p. 500-509, jul-set, 2012b.

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

SMITH, D.M. et al. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p. 169-183, 2005.

SOARES, R.A.B.; et al. V. 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**, v. 22, p. 38-41, 2004.

SOUZA, R.P. et al. Photosynthetic responses of Young cashew plants to varying environmental conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, p. 735-744, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre- RS. Ed. Artmed, 2013. 918p.

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

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

VENKATARAMANA, S.; RAO, P.N.G.; NAIDO, K.M. The effects of water stress during the formative phase on stomatal resistance and leaf water potential and relationship with yield in ten sugarcane varieties. **Field Crops Research**, v. 13, p.345-353, 1986.

VU, J.C.V.; ALLEN, L.H.; GESCH, R.W. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO<sub>2</sub>. **Plant Science**, Clare, v.171, p. 123–131, 2006.

YUAN, J.S. et al. Plants to power: bioenergy to fuel the future. **Trends in Plant Science**, London, v.18, p. 421-429, 2008.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C. Sugarcane Response to Water-Deficit Stress during Early Growth on Organic and Sand Soils. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v.5, p.403-414, 2010.

## 7. APÊNDICE

Apêndice 7.1 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (Ci), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 27 dias após a aplicação dos tratamentos.

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	4234,6	1411,5	4,285 *
DH	1	8,8	8,8	0,03
Cultivar x DH	3	3045,1	1015,0	3,256 *
Resíduo	16	4988,1	311,7	--
Total	23	12276,6		
CV (%)	23,74			

	Concentração intercelular de CO <sub>2</sub> (Ci)			
	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
Controle	84,6 Aa	67,1 Ab	54,1 Aa	94,1 Aa
Leve	78,3 ABa	101,6 Ba	48,9 Aa	66,3 ABa

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.2 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 32 dias após a aplicação dos tratamentos.

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	78,82	26,61	4,282 *
DH	1	703,30	703,30	113,18 *
Cultivar x DH	3	105,18	35,06	5,642 *
Resíduo	16	99,42	6,21	--
Total	23	987,72		
CV (%)	9,31			

	Taxa de assimilação líquida de CO <sub>2</sub> (A)			
	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
Controle	31,33 Aa	31,60 Aa	30,80 Aa	35,01 Aa
Moderado	27,40 Aa	18,24 Bb	19,61 Bb	20,19 Bb

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.3 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 99 dias após a aplicação dos tratamentos

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	74,79	24,93	2,157
DH	1	2883,36	2883,36	249,43
Cultivar x DH	3	139,16	46,39	4,01 *
Resíduo	16	184,95	11,56	--
Total	23	3282,26		
CV (%)	15,53			

	Taxa de assimilação líquida de CO <sub>2</sub> (A)			
	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
Controle	32,50 Aa	34,73 Aa	32,26 Aa	31,90 Aa
Moderado	16,66 Ab	6,31 Bb	7,97 Bb	12,78 ABb

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.4 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à taxa de transpiração (E), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 99 dias após a aplicação dos tratamentos

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	0,91	0,30	1,637
DH	1	45,95	45,95	249,19 *
Cultivar x DH	3	2,42	0,81	4,37 *
Resíduo	16	2,95	0,18	--
Total	23	52,23		
CV (%)	16,15			

	Taxa de transpiração (E)			
	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
Controle	3,98 Aa	4,71 Aa	3,77 Aa	3,72 Aa
Moderado	1,74 Ab	0,92 Ab	0,97 Ab	1,48 Ab

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.5 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 104 dias após a aplicação dos tratamentos

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	132,25	44,08	7,90
DH	1	2276,24	2276,24	407,77
Cultivar x DH	3	105,55	35,18	6,30*
Resíduo	16	89,31	5,58	--
Total	23	2603,35		
CV (%)	11,84			

	Taxa de assimilação líquida de CO <sub>2</sub> (A)			
	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
Controle	29,79 Ab	28,77 Ab	29,38 Ab	30,84 Ab
Severo	17,32 Ba	5,31 Aa	9,03 Aa	9,21 Aa

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.6 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à taxa de transpiração (E), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 104 dias após a aplicação dos tratamentos

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	1,31	0,44	3,90
DH	1	24,04	24,04	213,94
Cultivar x DH	3	1,24	0,41	3,69*
Resíduo	16	1,80	0,11	--
Total	23	28,39		
CV (%)	14,7			

	Taxa de transpiração (E)			
	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
Controle	3,23 Ab	3,11 Ab	3,50 Ab	3,28 Ab
Severo	1,99 Ba	0,79 Aa	1,11 Aa	1,23ABa

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.7 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à eficiência quântica potencial ( $F_v/F_m$ ), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 104 dias após a aplicação dos tratamentos

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	0,00218	0,000728	4,48
DH	1	0,004817	0,004817	29,64
Cultivar x DH	3	0,002183	0,000728	4,48*
Resíduo	16	0,002600	0,000163	-
Total	23	0,011783		
CV (%)	1,64			

	Eficiência quântica potencial ( $F_v/F_m$ )			
	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
Controle	0,81 Bb	0,79 ABb	0,78 Aa	0,78 Ab
Severo	0,77 Aba	0,75 Aa	0,78 Ba	0,75 Aa

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.8 – Resumo da análise de variância e valores médios referentes à condutância estomática ( $g_s$ ), de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas a dois níveis de deficiência hídrica (DH), aos 104 dias após a aplicação dos tratamentos

	Teste F			
	GL	SQ	QM	Fc
Cultivar	3	0,0048	0,001626	5,83
DH	1	0,075938	0,075938	272,02
Cultivar x DH	3	0,003479	0,001160	4,15*
Resíduo	16	0,004467	0,000279	
Total	23	0,088763		
CV (%)	14,37			

	RB867515	RB855453	RB928064	RB92579
	Controle	0,17 Ab	0,16 Ab	0,19 Ab
Severo	0,10 Ba	0,03 Aa	0,05 Aa	0,06 Aa

\* Significativo a 5% de probabilidade

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Apêndice 7.9 – Correlações entre a taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> ( $A$ ) e a condutância estomática ( $g_s$ ), concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), déficit da pressão de saturação do vapor d'água na folha (DPV<sub>F</sub>) e no ar (DPV<sub>ar</sub>), temperatura foliar ( $t_F$ ) e temperatura do ar ( $t_{ar}$ ), referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).

	$g_s$	$C_i$	$E$	RFA	DPV <sub>F</sub>	DPV <sub>ar</sub>	$t_F$	$t_{ar}$
<b>Controle</b>	0,87	-0,94	0,79	0,88	0,53	0,45	0,45	0,60
<b>Déficit leve</b>	0,97	-0,84	0,81	0,73	0,36	0,29	0,32	0,43
<b>Déficit moderado</b>	0,89	-0,83	0,42	0,54	0,15	0,08	0,03	0,18
<b>Déficit severo</b>	0,89	-0,52	0,17	-0,17	-0,73	-0,77	-0,79	-0,70

Apêndice 7.10 – Correlações entre a taxa de transpiração ( $E$ ) e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), déficit da pressão de saturação do vapor d'água na folha (DPV<sub>F</sub>) e no ar (DPV<sub>ar</sub>), temperatura foliar ( $t_F$ ) e temperatura do ar ( $t_{ar}$ ), referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).

	RFA	DPV <sub>F</sub>	DPV <sub>ar</sub>	$t_F$	$t_{ar}$
<b>Controle</b>	0,73	0,89	0,86	0,86	0,90
<b>Déficit leve</b>	0,70	0,79	0,76	0,78	0,83
<b>Déficit moderado</b>	0,72	0,95	0,93	0,91	0,96
<b>Déficit severo</b>	0,66	0,40	0,34	0,35	0,48

Apêndice 7.11 – Correlações entre a condutância estomática ( $g_s$ ) e a concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), déficit da pressão de saturação do vapor d'água na folha ( $DPV_F$ ) e no ar ( $DPV_{ar}$ ), temperatura foliar ( $t_F$ ) e temperatura do ar ( $t_{ar}$ ), referentes a cultivar de cana-de-açúcar RB92579, submetida aos tratamentos controle ( $\Psi_m > -10$  kPa) e deficiências hídricas leve ( $\Psi_m > -100$  kPa), moderada ( $\Psi_m > -300$  kPa) e severa ( $\Psi_m > -500$  kPa).

	<b><math>C_i</math></b>	<b><math>E</math></b>	<b>RFA</b>	<b><math>DPV_F</math></b>	<b><math>DPV_{ar}</math></b>	<b><math>t_F</math></b>	<b><math>t_{ar}</math></b>
<b>Controle</b>	-0,78	0,65	0,62	0,25	0,19	0,20	0,30
<b>Déficit leve</b>	-0,73	0,76	0,60	0,24	0,19	0,22	0,32
<b>Déficit moderado</b>	-0,48	0,04	0,22	-0,26	-0,31	-0,33	-0,21
<b>Déficit severo</b>	-0,09	0,50	0,00	-0,57	-0,61	-0,61	-0,50