

TRANSPIRAÇÃO FOLIAR E CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DO CLIMA E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA

GUSTAVO CAVALARI BARBOZA¹ E JOSÉ TEIXEIRA FILHO²

¹ Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas- SP – Brasil. CEP:13083-875, gu.cbarboza@gmail.com.

² Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas- SP – Brasil. CEP:13083-875, jose@feagri.unicamp.br.

1 RESUMO

Diversos trabalhos utilizam da porometria como metodologia para quantificar a transferência de água para a atmosfera. No entanto, para a cana-de-açúcar essa metodologia é escassa. Assim, o objetivo do trabalho foi verificar o comportamento da transpiração foliar (E) e da condutância estomática (Gs) da cana-de-açúcar em função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e do deficit de pressão de vapor (DPV), e correlacionar com os diferentes potenciais hídricos das plantas (Ψ_{pd}). Esse experimento foi conduzido na área experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, no qual foi instalada uma parcela de cana-de-açúcar, variedade RB867515 e utilizado o analisador automático de fotossíntese - IRGA LI6400XT, na escala horária. A partir dos resultados, conclui-se que os valores de E e Gs estão correlacionados positivamente com as condições meteorológicas e também com a disponibilidade de água no solo.

Palavras-chave: Trocas gasosas, potencial hídrico foliar, radiação fotossinteticamente ativa.

BARBOZA, G. C.; TEIXEIRA FILHO, J.

LEAF TRANSPIRATION AND STOMATAL CONDUCTANCE OF SUGARCANE IN FUNCTION OF WEATHER AND AVAILABILITY OF WATER

2 ABSTRACT

There are several studies using porometry as method to quantify the transfer of water to the atmosphere. However, for sugarcane this methodology is scarce. The objective of the study was to investigate the behavior of leaf transpiration (E) and stomatal conductance (Gs) of sugarcane in function of photosynthetically active radiation (PAR) and vapour-pressure deficit (VPD), and to correlate with the different water potential of plants (Ψ_{pd}). This experiment was conducted in the experimental area of the Faculty of Agricultural Engineering/UNICAMP, where was installed a parcel of sugarcane, RB867515 variety was installed, and an infrared gas analyzer - IRGA LI6400XT was used in hourly scale. Based on the results, it is concluded that the values of E and Gs are positively correlated with the weather conditions and with the availability of water in the soil.

Keywords: Gas Exchange, leaf water potential, photosynthetically active radiation.

3 INTRODUÇÃO

O Brasil utiliza a cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção em larga escala de bioetanol por mais de 30 anos (MARIANO et al., 2013). Essa condição pode ser explicada por uma combinação de condições favoráveis tais como a taxa fotossintética da cana-de-açúcar por hectare, as condições climáticas e o ciclo de vida da cultura, denotando uma relação de energia renovável (MACRELLI; MOGENSEN; ZACCHI, 2012). A produtividade vegetal está associada com a quantidade de água transferida do solo para a atmosfera, processo denominado de transpiração, e essa quantificação deste fluxo é um desafio para os pesquisadores (KOOL et al., 2014).

A utilização da porometria representa uma das metodologias indicadas para caracterização dos mecanismos dos fluxos de transferência de água para a atmosfera pela vegetação. Essa metodologia é poderosa e rápida nos estudos com objetivo de caracterização ecofisiológicas entre o solo, a planta e a atmosfera (VALENTINE et al., 2013).

Poucos trabalhos são encontrados na literatura no intuito de verificar as relações ecofisiológicas (transpiração e condutância estomática) de uma única folha pelo método da porometria para cana-de-açúcar (TONELLO; TEIXEIRA FILHO, 2011). No entanto, nos últimos anos, pesquisadores utilizaram essa metodologia para mensurar o comportamento ecofisiológico de diferentes espécies e culturas, a fim de estabelecer uma relação com o consumo de água. Essa metodologia foi utilizada para mensurar os comportamentos ecofisiológicos a fim de verificar o efeito da adubação nitrogenada no fluxo de água de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), conforme o trabalho desenvolvido por Matimati, Verboom e Cramer (2014). A porometria foi utilizada a fim de determinar se as condições ambientais do Cerrado poderiam influenciar diretamente as trocas gasosas de assa-peixe (*Vernonia polyanthes*) (BARON et al., 2015). Sun et al. (2015) aplicaram o método para analisar as trocas gasosas entre a folha de luzerna-cortada (*Medicago truncatula*) e a atmosfera. Essa metodologia foi utilizada para verificar as alterações relacionadas à altura em características fisiológicas e morfológicas das folhas da floresta tropical em Bornéu (KENZO et al., 2015). A porometria também foi utilizada para verificar as trocas gasosas foliares de videiras (*Vitis vinifera*) sob diferentes lâminas de irrigação, conforme o trabalho realizado por Beis e Patakas (2015). Outro trabalho observou as respostas ecofisiológicas de Kiwi (*Actinidia deliciosa*) em função do tempo de irrigação (TORRES-RUIZ et al., 2016). E por fim, o artigo publicado por Girón et al. (2015) utilizaram o método para constatar quais os efeitos de uma restrição de água, na qual as plantas apresentaram potenciais hídricos foliares igual a -1,8 MPa, nas trocas gasosas foliares de (*Olea europaea*).

Especificamente para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), são escassos os trabalhos que utilizam a porometria para medidas ecofisiológicas em folhas, especialmente para estabelecer a transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera. Nas pesquisas relacionadas com a utilização de medidas ecofisiológicas por porometria, destacam-se os trabalhos de Anderson et al. (2015) que utilizaram o método para determinar a evapotranspiração de cana-de-açúcar irrigada sob influência das condições de vento. Jackson et al. (2015) compararam a variação genética de cinco genótipos de cana-de-açúcar em relação à eficiência da transpiração foliar. Sales et al. (2015) testaram a hipótese de que a tolerância à seca em cana-de-açúcar está associada a uma resposta metabólica (antioxidante) eficaz durante a fase de amadurecimento, o que permite manter alta as taxas de fotossíntese durante a seca. Simões et al. (2015) avaliaram as variáveis fisiológicas (transpiração e condutância estomática) da cana-de-açúcar em função do sistema de irrigação.

Assim, inspirado nestes diversos experimentos realizados, o presente trabalho tem como objetivo verificar o comportamento da transpiração foliar (E) e da condutância estomática (Gs) da cana-de-açúcar em função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e do déficit de pressão de vapor (DPV), e correlacionar com os diferentes potenciais hídricos das plantas (Ψ_{pd}).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas - FEAGRI/UNICAMP, localizada nas coordenadas geográficas de latitude 22°53'20"S e longitude 47°04'40" W de Greenwich, altitude média de 640 m. Segundo a classificação de Köppen, a região possui clima de transição entre os tipos Cwa e Cfa, caracterizado como clima tropical de altitude com inverno seco e verão úmido. A temperatura média do mês mais quente (fevereiro) é superior a 22°C e, a do mais frio (junho), inferior a 18°C e umidade relativa média de 47,6%. A precipitação pluvial média anual é de 1.382 mm, com o período chuvoso entre outubro e março, o que representa 75% do total de chuva anual, ao passo que o período mais seco ocorre de junho a setembro (TONELLO; TEIXEIRA FILHO, 2011).

A parcela de 780 m² (13 x 60 m) contendo a cana-de-açúcar variedade RB867515, foi instalada em julho de 2014, com espaçamento entre linhas de 1m, atentando para a distribuição de 12 a 18 gemas por metro linear e com profundidade de 0,30 m. Essas condições foram realizadas para maior disponibilidade de plantas a serem utilizadas no experimento. As adubações foram realizadas, após análise do solo, em cobertura entre as linhas de plantio nos dias 21 de novembro de 2014 e 18 de julho de 2015. As doses aplicadas foram 30, 80 e 80 Kg.ha⁻¹ de nitrogênio, fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O). O solo predominante da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico.

As medidas iniciaram a partir de 390 dias após o plantio no período de agosto a novembro de 2015, com o monitoramento dos fluxos de transpiração foliar (E), condutância estomática (Gs), potencial hídrico foliar antemanhã (Ψ_{pd}), radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV). Nesse período, escolheram-se três datas, 17/08/2015, 21/09/2015 e 19/10/2015, em função de diferenças entre indivíduos dos Ψ_{pd} na parcela e das condições de clima semelhantes do PAR e do DPV, para explicitar as diferenças destas condições ambientais no comportamento ecofisiológico da cana-de-açúcar variedade RB867515.

Para as medições do fluxo da transpiração foliar (E) e condutância estomática (Gs), foram escolhidas oito plantas escolhidas ao acaso, excluído as plantas da bordadura. As leituras se procederam em intervalos horários ao longo do dia, no período das 6:00 às 19:00, com auxílio do analisador de gás-infravermelho (IRGA - Modelo LI6400XT, Li-Cor). Para tanto, escolheram-se para cada planta, três folhas sadias e totalmente expandidas (+3, +4 e +5), localizadas na parte superior da copa, expostas à radiação solar por todo período de avaliação.

Para o acompanhamento das disponibilidades hídricas no solo, foram realizadas medidas do potencial hídrico foliar antemanhã (Ψ_{pd}), antes do nascer do sol, utilizando uma câmara de pressão de Scholander (SCHOLANDER et al., 1965), modelo 3035 (Soil Moisture Equipment Corp., USA). Para isso, foram coletadas três folhas inteiras (cortadas na altura da bainha), sadias e totalmente expandidas nas plantas escolhidas para as medidas. Estas folhas

foram armazenadas em sacos plásticos, para evitar a perda de água, e levadas imediatamente ao Laboratório de Hidrologia da FEAGRI/UNICAMP, onde se procederam as medidas.

Variáveis ambientais tais como, radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV) foram escolhidos para correlacionar com a transpiração foliar (E) e condutância estomática (Gs).

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) na superfície da folha foi determinada simultaneamente às medições de transpiração foliar (E) e condutância estomática (Gs), utilizando-se o sensor acoplado na câmara do analisador de gás-infravermelho (IRGA - modelo LI6400XT, Li-Cor), sempre disposto perpendicularmente à luz solar incidente na superfície foliar ao longo de cada dia de trabalho. O aparelho, também, fornece dados de déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV). Dessa maneira, para cada registro de transpiração foliar (E) e condutância estomática (Gs), havia um valor instantâneo de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV).

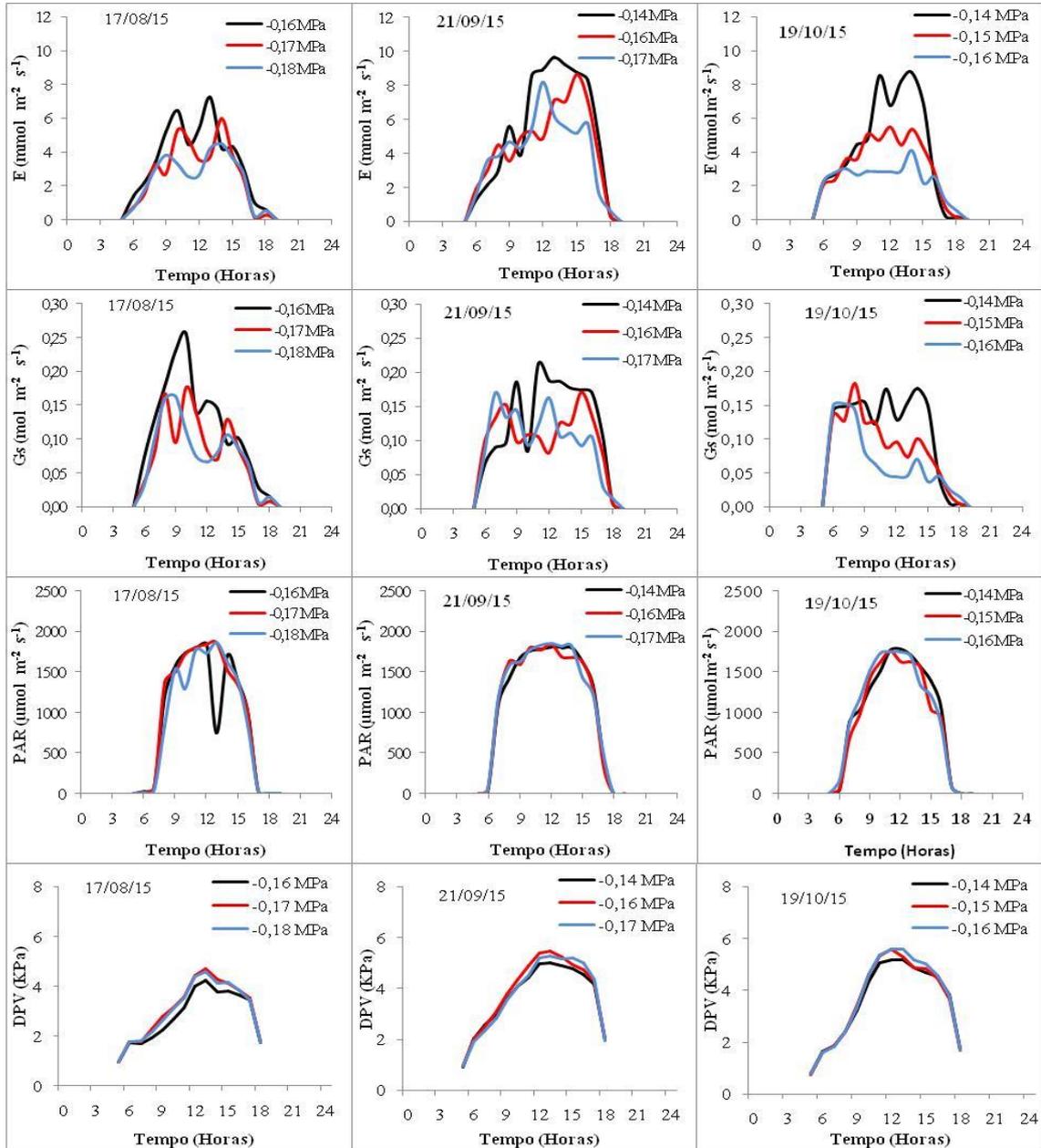
A partir de todos os valores horários medidos de E, Gs, PAR e DPV, em um total de 49 dias de observação, calculou-se os valores totais da transpiração foliar (E_{total}) e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR_t) e os valores médios da condutância estomática (G_m) e do déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV_m), no período das 8:00 às 16:00. Um modelo simplificado diário será proposto utilizando as relações E_{total}/PAR_t, E_{total}/DPV_m, G_m/PAR_t e G_m/DPV_m para cada dia em função do valor medido de Ψ_{pd} de cada planta.

A análise estatística e os gráficos foram elaborados por meio do software estatístico SPSS 16.0 para o Sistema Operacional Windows. Os comportamentos ecofisiológicos (E e Gs) em função do Ψ_{pd} , da PAR e do DPV, foram submetido à análise de variância, e quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste Tukey.

5 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta o comportamento diurno da E, Gs, PAR e DPV em cana-de-açúcar em diferentes condições de Ψ_{pd} , para os dias 17/08/2015, 21/09/2015 e 19/10/2015. Os valores de Ψ_{pd} das plantas são diferentes mesmo com a proximidade espacial dos indivíduos devido às condições locais do solo na área.

Figura 1. Variação diurna da transpiração (E), condutância estomática (Gs), radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e déficit de pressão de vapor (DPV) em diferentes potenciais hídricos antemanhã (Ψ_{pd}) para cana-de-açúcar nos dias 17/08/2015, 21/09/2015 e 19/10/2015.

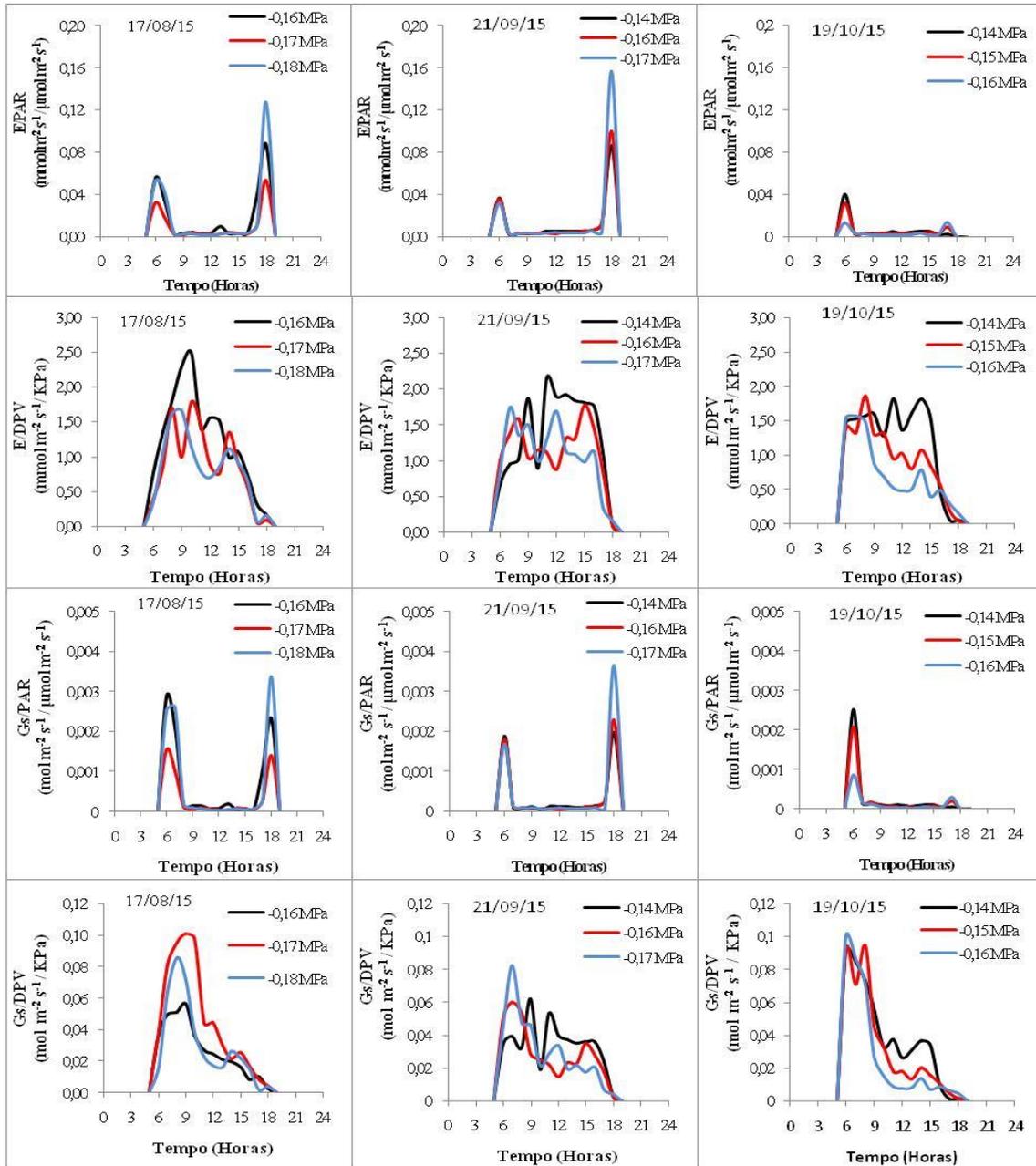


Na Figura 1 pode-se observar que os valores variam de forma diferente de E e Gs em relação ao (Ψ_{pd}) e que plantas com menores restrições de água apresentam valores mais elevados de E e Gs em relação às plantas que apresentam maiores restrições de água. Para o dia 17/08/2015, a planta com maior Ψ_{pd} (-0,16 MPa) a E foi superior as demais plantas que apresentaram menores Ψ_{pd} (-0,17 e -0,18 MPa) respectivamente. Para a planta com Ψ_{pd} igual a de -0,16 MPa, a E atingiu o valor máximo de 7,3 mmol.m⁻².s⁻¹ as 13:00 hs, enquanto que plantas com Ψ_{pd} de -0,17 e -0,18 MPa, os valores máximos de E foram de 6,0 e 4,5 mmol.m⁻².s⁻¹ às 14:00 hs, respectivamente. Verifica-se, nesse dia, que às 11:00 hs houve uma redução acentuada dos valores da E, aumentando o valor na hora seguinte. Esse mesmo

comportamento da E foi observado no dia 19/10/2015 para a planta que apresentou Ψ_{pd} de -0,14 MPa. Essa mesma planta apresentou ao longo do dia valores mais elevados do que as demais plantas, com valor de E máximo de $8,7 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ às 14:00 hs, enquanto que as plantas com Ψ_{pd} de -0,15 e -0,16 MPa, apresentaram valores máximos de 5,4 e $4,1 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, respectivamente. Desta maneira, a E máxima da planta com menor restrição (-0,14 MPa) foi 38% superior em relação à planta com Ψ_{pd} de -0,15 MPa e 53% à E da planta com Ψ_{pd} de -0,16 MPa. A Figura 1 mostra que a E acompanhou a Gs em várias situações, destacando o dia 21/09/2015, principalmente, no período após às 12:00 hs em que verificou-se uma similaridade entre a E e Gs de todas as plantas. No período da manhã a planta com menor restrição de água ($\Psi_{pd} = -0,14$ MPa) apresentou valores mais baixos de E e Gs em relação às plantas com maiores restrições de água (Ψ_{pd} -0,16 e 0,17 MPa) até 08:00 hs, quando ocorreu um aumento dos valores de E e Gs dessa planta e uma redução acentuada da E e Gs às 10:00 hs. Provavelmente, esses maiores valores de E e Gs das plantas com maiores restrições de água são relacionados com a PAR, já que nesse período, os valores da radiação foram maiores para os indivíduos com menor restrição de água. Destaca-se, também, que no dia 17/08/2015 houve uma redução drástica da PAR às 13:00 hs para a planta com Ψ_{pd} igual a -0,16 MPa e que não influenciou no resultado da E e Gs. Esse fato, provavelmente, pode ser explicado pelo valor alto de DVP que atingiu o pico nesse horário, contribuindo para a elevação da E e Gs dessa planta. Ainda em relação ao DPV, observa-se que os valores máximos para o período avaliado ocorreram entre 12:00 e 14:00 hs para todas as plantas, destacando-se uma ligeira elevação no fim da tarde, aproximadamente, às 16:00 hs, o que resulta em uma elevação nos valores da E e Gs em todas as plantas, independentemente da quantidade de água na planta.

Para melhor compreender a interdependência entre as variáveis fisiológicas (E e Gs) e o Ψ_{pd} , DPV e PAR, foi estabelecida uma razão entre a E e Gs dos valores horários observados por unidade em relação ao DPV e PAR dos respectivos dias de avaliação em função dos valores de Ψ_{pd} (Figura 2). Na Figura 2 podem-se observar dois picos distintos no início e no final do dia para todos os dias nas relações E/PAR e Gs/PAR. O pico no início do dia representa o efeito da reidratação das plantas na madrugada, pois no início do dia com os valores mais baixos da PAR e DPV, a planta mantém seus estômatos abertos e elevando os valores das relações entre E/PAR e Gs/PAR. Em torno das 9:00 hs, inicia o processo de fechamento dos estômatos, evitando assim, o menor fluxo de E. No final do dia, o segundo pico, ocorre uma elevação tanto nos valores de E/PAR e Gs/PAR, principalmente após as 16:00 hs, esse efeito demonstra a influência dos valores mais elevados de DPV, sendo o principal condicionante nas relações nestas condições para todas as plantas e todos os dias.

Figura 2. Relação entre transpiração/radiação fotossinteticamente ativa (E/PAR), transpiração/déficit de pressão de vapor (E/DPV), condutância estomática/radiação fotossinteticamente ativa (Gs/PAR) e condutância estomática/déficit de pressão de vapor (Gs/DPV) em diferentes potenciais hídricos antemanhã (Ψ_{pd}) para cana-de-açúcar nos dias 17/08/2015, 21/09/2015 e 19/10/2015.



Para o dia 17/08/2015 observou-se que tanto para a E como para a Gs por unidade de radiação (E/PAR e Gs/PAR), as plantas que apresentam Ψ_{pd} maior (-0,16 MPa) apresentam as relações maiores tanto para E/PAR como para Gs/PAR, seguidas das plantas com maiores restrições de água (-0,18 MPa), enquanto que plantas com (-0,17 MPa) apresentam as menores taxas nas relações. No entanto, durante o período das 10:00 às 17:00 hs, cujo período apresenta maiores valores de radiação, observa-se que os valores de E/PAR e Gs/PAR foram

maiores para as plantas que apresentavam menores restrições de água (Ψ_{pd} -0,16 MPa), seguida das plantas com Ψ_{pd} (-0,17 Mpa e -0,18 Mpa). De modo geral, observa-se que plantas com menores restrições de água apresentavam maiores taxas de E/PAR e Gs/PAR e com potencial maior de desenvolvimento.

Em relação à E e Gs por unidade de déficit de pressão de vapor (E/DPV e Gs/DPV), para a E/DPV verificou-se que nos três dias avaliados, de modo geral, no período da manhã, as plantas apresentavam crescimento semelhante, independentemente do Ψ_{pd} , exceto para o dia 21/09/2015. No entanto, especificamente no final da tarde, plantas com maiores restrições de água apresentavam menores valores de E por unidade de DPV, enquanto os valores de E/DPV foram maiores para plantas com menores restrições de água. Em relação ao Gs/DPV, os resultados mostraram que, no período da manhã, as plantas mais hidratadas (Ψ_{pd} maiores) apresentam valores menores, provavelmente esse comportamento pode ser resultado de um controle mais eficiente do fechamento estomático. No entanto, no final da tarde, os valores de Gs/DPV se inverteram em relação ao período da manhã, no qual as plantas menos hidratadas (Ψ_{pd} menores) apresentam os menores valores de Gs/DPV enquanto nas plantas mais hidratadas (Ψ_{pd} maiores) os valores de Gs por unidade de DPV foram maiores. Provavelmente, esse resultado ocorre devido ao aumento da demanda evaporativa do ar promovendo a retirada de água das folhas mais hidratadas.

Na Tabela 1, estão representados os valores médios diários da razão entre a E e Gs por unidade de DPV e PAR para os respectivos dias e valores de Ψ_{pd} , na escala horária das 8:00 às 16:00 hs. Essa condição foi necessária para excluir os efeitos observados no início e no final do dia, conforme mostrado na Figura 2.

Tabela 1. Relação entre transpiração/radiação fotossinteticamente ativa (E/PAR), transpiração/déficit de pressão de vapor (E/DPV), condutância estomática/radiação fotossinteticamente ativa (Gs/PAR) e condutância estomática/déficit de pressão de vapor (Gs/DPV) em diferentes potenciais hídricos antemanhã (Ψ_{pd}) para cana-de-açúcar nos dias 17/08/2015, 21/09/2015 e 19/10/2015.

Dia	Ψ_{pd}	E/PAR	Gs/PAR	E/DPV	Gs/DPV
17/08/15	-0,16	0,0036 a	0,00011 a	1,66 a	0,059 a
	-0,17	0,0027 b	0,00007 b	1,19 b	0,037 b
	-0,18	0,0022 c	0,00006 b	1,00 b	0,032 b
21/09/15	-0,14	0,0045 a	0,00010 a	1,75 a	0,041 a
	-0,16	0,0041 a	0,00009 a	1,41 b	0,036 a b
	-0,17	0,0029 b	0,00006 b	1,12 c	0,029 b
19/10/15	-0,14	0,0040 a	0,00008 a	1,41 a	0,033 a
	-0,15	0,0032 b	0,00007 a	1,07 b	0,027 a
	-0,16	0,0022 c	0,00005 a	0,77 c	0,022 a

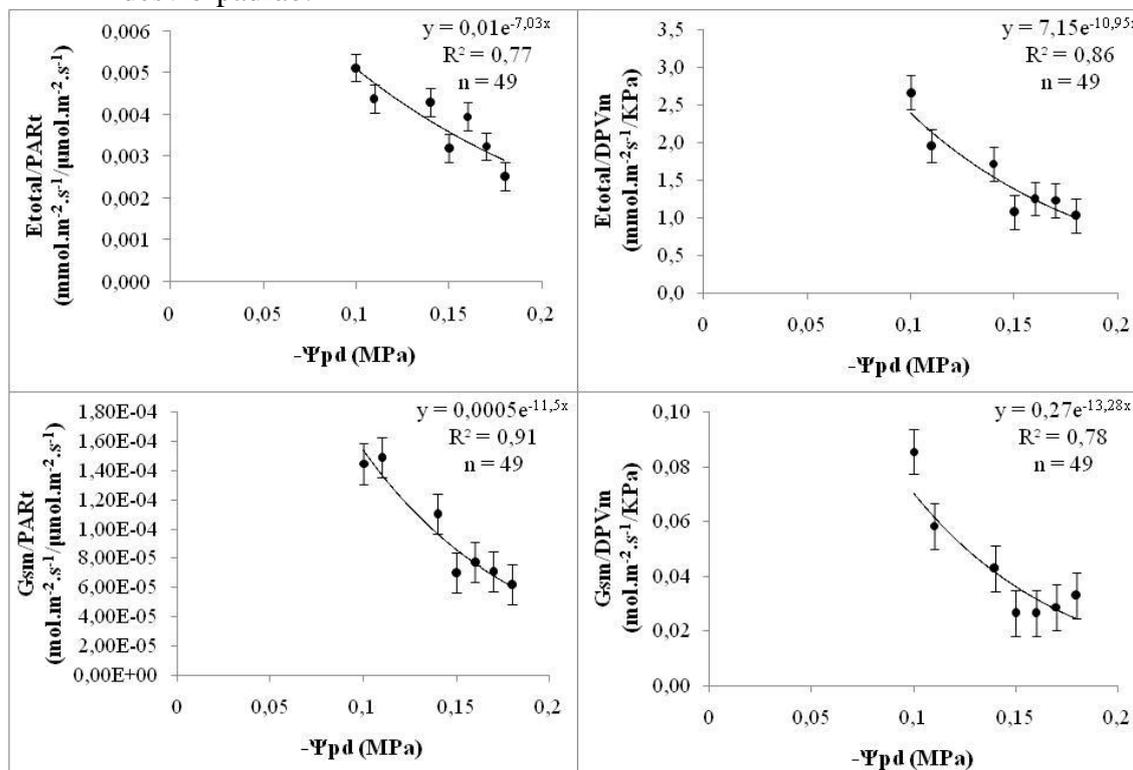
Letras iguais na coluna, para o mesmo dia, não diferem estatisticamente entre si ($P < 0,05$).

Na Tabela 1 pode-se observar que no dia 17/08/15, todos os valores das relações foram reduzidas à medida que houve a redução da disponibilidade de água, apresentada pelo valor do Ψ_{pd} . Ainda, observa-se que a planta com Ψ_{pd} igual a -0,16 MPa (maior disponibilidade de água) diferiu estatisticamente, da planta com Ψ_{pd} igual a -0,18 MPa (menor disponibilidade de água) em todas as relações, sendo 39% superior em relação ao E/PAR, 45% superior em relação ao Gs/PAR, 40% superior em relação ao E/DPV e 46% superior em relação ao Gs/DPV. Comportamento semelhante foi observado para o dia

21/09/15, no qual a planta com maior disponibilidade de água ($\Psi_{pd} = -0,14$ MPa), em relação à planta com menor disponibilidade de água ($\Psi_{pd} = -0,17$ MPa), apresentou as maiores relações e, também diferiu estatisticamente, entre os dois potenciais hídricos, sendo a relação E/PAR 35% superior da planta com maior potencial hídrico em relação à planta com menor potencial hídrico. Ainda, 40% superior em relação ao Gs/PAR, 36% em relação ao E/DPV e 29% em relação ao Gs/DPV. Para o dia 19/10/15, destaca-se que os valores das relações Gs/PAR e Gs/DPV, das plantas com diferentes Ψ_{pd} , estatisticamente não apresentaram diferenças estatísticas entre os valores das relações, mesmo apresentando uma redução dos valores das relações com a redução do Ψ_{pd} . No entanto, observando as relações entre E/PAR e E/DPV, a planta com maior potencial hídrico ($\Psi_{pd} = -0,14$ MPa), diferiu estatisticamente em relação às plantas com menores valores do potencial hídrico ($\Psi_{pd} = -0,15$ e $\Psi_{pd} = -0,16$ MPa), respectivamente.

A Figura 3 representa um modelo simplificado diário utilizando as relações E_{total}/PAR_t , E_{total}/DPV_m , Gsm/PAR_t e Gsm/DPV_m em função do valor medido diário de Ψ_{pd} de cada planta. O modelo utilizando a relação E_{total}/PAR_t apresentou valor de r^2 de 0,77 e a relação E_{total}/DPV_m um valor r^2 de 0,86. O modelo simplificado diário para a condutância estomática resultou Gsm/PAR_t um valor de um r^2 de 0,91 e para a relação Gsm/DPV_m um valor de r^2 de 0,78. Os modelos que apresentaram melhor ajuste foram E_{total}/DPV_m e Gsm/PAR_t , mas todos os modelos mostraram a tendência decrescente exponencial dos valores E_{total}/PAR_t , E_{total}/DPV_m , Gsm/PAR_t e Gsm/DPV_m em relação aos valores medidos diários de Ψ_{pd} (Figura 3). Esses resultados são consistentes com todos os resultados das Figuras 1 e 2 e a Tabela 1, apresentando uma correlação entre o Ψ_{pd} e os valores de E_{total}/PAR_t ($\rho = 0,91$), E_{total}/DPV_m ($\rho = 0,84$), Gsm/PAR_t ($\rho = 0,96$) e Gsm/DPV_m ($\rho = 0,89$). Os modelos da Figura 3 apresentam a possibilidade de mudança de escala espacial e temporal dos resultados do experimento de campo para cana-de-açúcar. A utilização de cada modelo é função de disponibilidade de dados existentes em cada momento e local.

Figura 3. Relação entre E_{total}/PAR_t , E_{total}/DPV_m , G_{sm}/PAR_t e G_{sm}/DPV_m em diferentes potenciais hídricos antemanhã (Ψ_{pd}) para cana-de-açúcar. Cada ponto representa a média de no mínimo 6 dias de observações e as barras verticais o correspondente desvio-padrão.



6 DISCUSSÃO

De modo geral, as plantas com menores Ψ_{pd} apresentam menores taxas de trocas gasosas de E e G_s. Segundo Bergonci et al. (2000), o potencial de água na folha descreve o estado energético dela, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera, e embora haja variação ao longo do dia, mesmo em plantas irrigadas, esse parâmetro descreve o estado hídrico da planta. De acordo com resultados apresentados por Martínez-Alcántara et al. (2013), a redução do potencial hídrico em laranjeiras enxertadas causou redução na condutância estomática e isso promoveu redução nas trocas gasosas, o que pode afetar a produção de biomassa.

Os dados observados na Figura 1 e também na Tabela 1 apresentam que plantas com maiores restrições de água na folha apresentaram menores trocas gasosas. Esse comportamento também foi observado nos trabalhos realizados por Tonello e Teixeira Filho (2011, 2012), cujo trabalho foi desenvolvido no mesmo campo experimental, sendo que as plantas de eucalipto apresentaram maiores restrições hídricas e menores vapores de trocas gasosas. Semelhante aos dados obtidos por Silva et al. (2013), no qual avaliaram as trocas gasosas em função da restrição da água para a cultura do girassol, mostraram que a transpiração decresceu em função da maior restrição da quantidade de água.

O trabalho desenvolvido por Trentin et al. (2011) mostrou que sob valores máximos de radiação solar global e de déficit de saturação de pressão de vapor d'água no ar, a taxa de transpiração diária da cana-de-açúcar, em condições de estresse hídrico severo ($-1,5 < \Psi < -$

1,1 MPa), foi, aproximadamente, 73% inferior em relação às das plantas cultivadas sob plena disponibilidade de água. Infelizmente, nesse trabalho não foram atingidas condições de estresses hídricos mais elevados como apresentado por esses autores, mas é possível verificar a condição clara de redução transpiração diária em função da restrição de água.

Com os dados na Figura 1 pode observar que os maiores valores de E ocorreram no período da tarde, onde os valores de DPV também eram os mais elevados. Segundo Tonello e Teixeira Filho (2011), as variáveis fisiológicas das plantas acompanham a demanda evaporativa atmosférica. Fato observado no dia 21/09/2016, Figura 1, no qual ocorreu uma queda no valor de DPV entre 10:00 e 11:00 hs, o que provocou uma queda acentuada na E e na Gs. De acordo com Swaef et al. (2012) a demanda evaporativa da atmosfera é atendida pela planta por meio da transpiração, devido à resistência hidráulica entre o solo e a folha, a absorção de água da raiz fica atrás da transpiração no qual, este intervalo resulta em uma diminuição do potencial hídrico do caule a medida que a transpiração aumenta.

Segundo resultados obtidos por Rodrigues et al. (2011), que avaliaram o comportamento da condutância estomática em um ecossistema de manguezal, a condutância estomática varia (aumenta ou diminui) proporcionalmente ao DPV, pelo fato de não haver restrição de água no solo. Estes autores concluíram que o comportamento dos estômatos é influenciado primordialmente pelas condições atmosféricas. Dessa maneira, devido à maior restrição de água em algumas plantas houve redução da condutância estomática, corroborando com os dados apresentados nessa pesquisa.

Resultados apresentados por Rejšková et al. (2010) mostraram que para o capim-amarelo (*Phalaris arundinacea*), a E apresentou uma relação linear com o DPV, consistindo no fator externo mais importante nos resultados da transpiração.

Klein et al. (2013) compararam as relações entre a Gs e o uso eficiente da água entre espécie isohídrica, em que o potencial de água na planta permanece elevado e anisohídrica, em que diminui acentuadamente nas horas mais quentes do dia. Os autores mostraram que para ambas as espécies, pinheiro (isohídrico) e carvalho (anisohídrico), a Gs é reduzida em resposta ao aumento de DPV. No entanto, nesse trabalho, verificou-se que os maiores valores de Gs, ocorreram no instante em que os valores do DPV estavam elevados, principalmente no final da tarde.

Resultados obtidos por Tonello e Teixeira Filho (2012) mostraram que os valores extremos para os valores de DPV ocorreram entre as 13:00 e 14:00 e que, devido a esse comportamento, optaram pela avaliação do comportamento ecofisiológico separadamente nos períodos da manhã e da tarde, em virtude da maior demanda evaporativa da atmosfera no período da tarde. Esse comportamento também foi observado na Figura 2, já que, no início do dia, com o DPV mais baixo em relação ao período da tarde, assim, a relação Gs/DPV apresentou valores mais elevados no período da manhã do que no período da tarde.

Resultados obtido por Chen et al. (2015) mostraram que houve mudanças fisiológicas na folha de liana (*Woody climbers*), no qual os estômatos responderam rapidamente às mudanças de DPV, maximizando a obtenção de CO₂ e menor perda de água. A rápida regulação da condutância estomática permitiu que as plantas reduzissem o consumo de água, evitando a perda excessiva no período seco.

De acordo com Gao et al. (2015), os estômatos coordenam os fluxos de entrada de CO₂ e saída de água nas folhas. Assim, essa estrutura celular assume papel importante no equilíbrio hídrico do ecossistema florestal em respostas às variáveis meteorológicas, especialmente ao DPV. Segundo esses autores os valores elevados DPV produziram altas taxas de transpiração vegetal, mas os estômatos se fecham para evitar uma falha hidráulica causada pela diminuição do potencial hídrico foliar. Assim, percebe-se a atuação dos

estômatos na regulação da transpiração principalmente no período da tarde especialmente nas plantas que apresentavam maiores restrições de água, conforme observado nas Figuras 2 e 3. Segundo Pilau et al. (2007) e Nicolás et al. (2008), existe uma estreita relação entre abertura estomática e o DPV ao longo do dia. Tonello e Teixeira Filho (2012) afirmam que as perdas de água são reduzidas, mas não evitadas, pelo fechamento parcial dos estômatos à medida que o déficit hídrico se desenvolve, o qual pode atingir valores elevados. Ainda, como os estômatos permanecem parcialmente abertos, característico de planta com metabolismo C4, a assimilação de gás carbônico não cessa especialmente no período da manhã e no final da tarde, quando o déficit de saturação é baixo e a eficiência do uso da água é alta.

7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que para a cana-de-açúcar no período da manhã, os valores de E e Gs são influenciados principalmente pelo aumento dos valores da PAR e, no período da tarde, os valores de DPV ganham importância influência no comportamento ecofisiológico, em especial, na demanda evaporativa (E). Os valores observados ao longo do dia da E e Gs acompanham os valores do PAR e DPV. O DPV influenciou os valores de E e Gs em plantas de cana-de-açúcar sob condições de baixas taxas de estresse, representados com valores de Ψ_{pd} superiores a $-0,20\text{MPa}$. De certo modo, para a cana-de-açúcar existe, um controle estomático eficiente para evitar ainda mais a perda de água na planta mesmo para Ψ_{pd} baixos. Os modelos das relações entre $E_{total}/PART$, $E_{total}/DPVm$, $Gsm/PART$ e $Gsm/DPVm$ em função do Ψ_{pd} mostraram-se robusto, apesar de simples, para a determinação dos valores diários de E_{total} e Gsm para cana-de-açúcar. O conhecimento do comportamento ecofisiológico das variedades de cana-de-açúcar poderão auxiliar na tomada de decisão no estabelecimento da produção, manejo e previsão de safra para a cultura de cana-de-açúcar.

8 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento desse projeto (Processo: 2013/10109-0) e pela concessão da bolsa de estudo (Processo: 2012/05549-8).

9 REFERÊNCIAS

- ANDERSON, R. G.; WANG, D.; TIRADO-CORBALÁ, R.; ZHANG, H.; AYARS, J. E. Divergence of actual and reference evapotranspiration observations for irrigated sugarcane with windy tropical conditions. **Hydrology and Earth System Sciences**, Munique, v. 19, n. 1, p. 583-599, jan. 2015.
- BARON, D.; GRACIANO, D. D. S.; PORTELLA, R. D. O.; MANTOAN, L. P. B.; ALMEIDA, L. F. R.; BOARO, C. S. F.. The ecophysiological performance of *Vernonia polyanthes* Less. (Asteraceae) in conserved and degraded forests in the Brazilian Cerrado. **Acta Physiologiae Plantarum**, Cracóvia, v. 37, n. 1, p. 1-8, out. 2015.

- BEIS, A.; PATAKAS, A. Differential physiological and biochemical responses to drought in grapevines subjected to partial root drying and deficit irrigation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 62, p. 90-97, out. 2015.
- 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**, Brasília, DF, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, ago. 2000.
- CHEN, Y. J.; CAO, K. F.; SCHNITZER, S. A.; FAN, Z. X.; ZHANG, J. L.; BONGERS, F. Water-use advantage for lianas over trees in tropical seasonal forests. **New Phytologist**, Hoboken, v. 205, n. 1, p. 128-136, ago. 2015.
- GAO, J.; ZHAO, P.; SHEN, W.; NIU, J.; ZHU, L.; NI, G. Agricultural and Forest meteorology biophysical limits to responses of water flux to vapor pressure deficit in seven tree species with contrasting land use regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 200, p. 258-269, out. 2015
- GIRÓN, I. F.; CORELL, M.; GALINDO, A.; TORRECILLAS, E.; MORALES, D.; DELL'AMICO, J.; MORIANA, A. Changes in the physiological response between leaves and fruits during a moderate water stress in table olive trees. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 148, p. 280-286, nov. 2015.
- JACKSON, P.; BASNAYAKE, J.; INMAN-BAMBER, G.; LAKSHMANAN, P.; NATARAJAN, S.; STOKES, C. Genetic variation in transpiration efficiency and relationships between whole plant and leaf gas exchange measurements in *Saccharum* spp. and related germplasm. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 67, n. 3, p. 861-871, nov. 2015.
- KENZO, T.; INOUE, Y.; YOSHIMURA, M.; YAMASHITA, M.; TANAKA-ODA, A.; ICHIE, T. Height-related changes in leaf photosynthetic traits in diverse Bornean tropical rain forest trees. **Oecologia**, Berlin Heidelberg, v. 177, n. 1, p. 191-202, nov. 2015.
- KLEIN, T.; SHPRINGER, I.; FIKLER, B.; ELBAZ, G.; COHEN, S.; YAKIR, D. Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 302, p. 34-42, abr. 2013.
- KOOL, D.; AGAM, N.; LAZAROVITCH, N.; HEITMAN, J. L.; SAUER, T. J.; BEN-GAL, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 184, p. 56-70, out. 2014.
- MACRELLI, S.; MOGENSEN, J.; ZACCHI, G. Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process. **Biotechnology for Biofuels**, Londres, v. 5, n. 22, p. 1-18, 2012.
- MARIANO, A. P.; DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CUNHA, M. P.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Butanol production in a first-generation Brazilian sugarcane biorefinery: Technical aspects and economics of greenfield projects. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 135, p. 316-323, out. 2013.

MARTÍNEZ-ALCÁNTARA, B.; RODRIGUEZ-GAMIR, J.; MARTÍNEZ-CUENCA, M. R.; IGLESIAS, D. J.; PRIMO-MILLO, E.; FORNER-GINER, M. A. Relationship between hydraulic conductance and citrus dwarfing by the Flying Dragon rootstock (*Poncirus trifoliata* L. Raft var. *monstruosa*). **Trees**, New York, v. 27, n. 3, p. 629-638, 2013.

MATIMATI, I.; VERBOOM, G. A.; CRAMER, M. D. Nitrogen regulation of transpiration controls mass-flow acquisition of nutrients. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 65, n. 1, p. 159-168, nov. 2014.

NICOLÁS, E.; BARRADAS, V. L.; ORTUÑO, M. F.; NAVARRO, A.; TORRECILLAS, A.; ALARCÓN, J. J. Environmental and stomatal control of transpiration, canopy conductance and decoupling coefficient in young lemon trees under shading net. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 1, p. 200-206, nov. 2008.

PILAU, F. G.; BONNECARRÈRE, R. A. G.; DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L.; MARTIN, T. N.; PEREIRA, C. R.; MANFRON, P. A. Transpiração e condutância foliar à difusão de vapor de feijoeiro irrigado em função da temperatura da folhagem e variáveis ambientais, **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 127-131, 2007.

REJŠKOVÁ, A.; ČÍŽKOVÁ, H.; BROM, J.; POKORNÝ, J. Transpiration, evapotranspiration and energy fluxes in a temperate wetland dominated by *Phalaris arundinacea* under hot summer conditions. **Ecohydrology**, Hoboken, v. 5, n. 1 p. 19-27, nov. 2010.

RODRIGUES, H. J. B.; COSTA, R. F.; RIBEIRO, J. B. M.; SOUZA FILHO, J. D. C.; RUIVO, M. L. P.; SILVA JÚNIOR, J. A. Manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 189-196, 2011.

SALES, C. R. G.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, R. S.; FONTENELE, A. V.; MACHADO, E. C.; SILVEIRA, J. A. G.; RIBEIRO, R. V. Photosynthetic and antioxidant responses to drought during sugarcane ripening. **Photosynthetica**, New York, v. 53, n. 4, p. 547-554, 2015.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Hydrostatic Pressure and Osmotic Potential in Leaves of Mangroves and Some Other Plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, San Diego, v. 52, n. 1, p. 119-125, May 1965.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. F.; PEREIRA FILHO, J. V.; FREITAS, C. A. S. Trocas gasosas em plantas de girassol submetidas à deficiência hídrica em diferentes estádios fenológicos. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 86-93, 2013.

SIMÕES, W. L.; CALGARO, M.; COELHO, D. S.; SOUZA, M. A.; LIMA, J. A. Respostas de variáveis fisiológicas e tecnológicas da cana-de-açúcar a diferentes sistemas de irrigação. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 46, n. 1, p. 11-20, jan./mar. 2015.

SUN, Y.; GUO, H.; YUAN, L.; WEI, J., ZHANG, W.; GE, F. Plant stomatal closure improves aphid feeding under elevated CO₂. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 21, n. 7, p. 2739-2748, 2015.

SWAEF, T. D.; VERBIST, K.; CORNELIS, W.; STEPPE, K. Tomato sap flow, stem and fruit growth in relation to water availability in rockwool growing medium. **Plant and Soil**, New York, v. 350, n. 1, p. 237-252, jul. 2012.

TONELLO, K. C.; TEIXEIRA FILHO, J. Efeito das variáveis ambientais no comportamento ecofisiológico de dois clones de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*: Condições de campo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 419-431, dez. 2011.

TONELLO, K. C.; TEIXEIRA FILHO, J. Ecophysiology of Three Native Species From a Brazilianatlantic Forest With Different Water Regimes. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 1, p. 85-101, jan./mar. 2012.

TORRES-RUIZ, J. M.; PERULLI, G. D.; MANFRINI, L., ZIBORDI, M.; VELASCO, G. L.; ANCONELLI, S.; PIERPAOLI, E.; CORELLI-GRAPPADELLI, L.; MORANDIA, B. Time of irrigation affects vine water relations and the daily patterns of leaf gas exchanges and vascular flows to kiwifruit (*Actinidia deliciosa* Chev.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 166, p. 101-110, dez. 2016.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1085-1095, nov./dez. 2011.

VALENTINE, A. J.; RUZVIDZO, O.; KLEINERT, A.; BENEDITO, V. A. Infrared Gas Analysis Technique for the Study of the Regulation of Photosynthetic Responses. **Methods in Molecular Biology**, Clifton, v. 1016, p. 261-269, maio 2013.