

CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR VARIAM DE ACORDO COM A CULTIVAR E O REGIME HÍDRICO

MARCELO DE ALMEIDA SILVA¹; MARCEL TOMÁS ARANTES²; ANDRESSA FREITAS DE LIMA RHEIN²; RENATA PASSOS PINCELLI²; CLAUDIANA MOURA DOS SANTOS² E PAULA CAROLINE SILVA MOURA²

¹Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal - Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu (SP). marcelosilva@fca.unesp.br

²Programa de Pós-graduação em Agricultura - Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu, SP. marcel_agro@yahoo.com.br; andressa_rhein@yahoo.com.br; renats_9@yahoo.com.br; claudianamourabio@yahoo.com.br; paulacarol4@yahoo.com.br

1 RESUMO

Estudos sobre variáveis morfológicas e fisiológicas são importantes para auxiliar na caracterização e entendimento dos mecanismos de tolerância ao estresse e na escolha de cultivares de melhor desempenho em ambientes contrastantes como o irrigado e o de sequeiro. O presente trabalho teve como objetivo diferenciar cultivares de cana-de-açúcar sob ambiente irrigado e sequeiro, por meio de variáveis morfológicas e fisiológicas e a suas respostas em relação à produtividade. O experimento foi realizado em Jaú-SP com as cultivares RB867515 e RB855536. As variáveis morfológicas analisadas foram comprimento de colmos, número de perfilhos, massa foliar específica (MFE) e índice de área foliar (IAF), e as variáveis fisiológicas foram máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m), condutância estomática (g_s), conteúdo relativo de água (CRA), índice SPAD e conteúdo de clorofila ($CC\ a+b$). As avaliações ocorreram aos 60, 120, 180, 240 dias após o corte (DAC) do terceiro ciclo e na última avaliação obteve-se a produtividade de colmos (TCH) e de açúcar (TPH). Os resultados demonstraram que a cultivar RB855536 possui maiores valores das variáveis morfológicas comprimento de colmos e número de perfilhos, e das fisiológicas g_s e $CC\ a+b$ e teve maior TPH sob regime hídrico adequado durante o ciclo de desenvolvimento. Enquanto a cultivar RB867515 produziu mais colmos e açúcar sob regime hídrico de sequeiro e manteve valores mais elevados das variáveis morfológicas número de perfilhos e MFE, e das fisiológicas F_v/F_m , g_s , $CC\ a+b$ e CRA. Portanto, cultivares de cana-de-açúcar com maiores valores de comprimento de colmos, número de perfilhos, condutância estomática e conteúdo de clorofila sob regime hídrico adequado durante o desenvolvimento são mais produtivas, enquanto as cultivares mais produtivas sob regime hídrico de sequeiro mantêm valores mais elevados de número de perfilhos, massa foliar específica, máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II, condutância estomática, conteúdo de clorofila e conteúdo relativo de água na folha.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., irrigação, variedades, deficiência hídrica, produção

SILVA, M.A.; ARANTES, M.T.; RHEIN, A.F.L.; PINCELLI, R.P.; SANTOS, C.M.;
MOURA, P.C.S.

MORPHOPHYSIOLOGICAL TRAITS AND YIELD OF SUGAR CANE VARY
ACCORDING TO THE CULTIVAR AND WATER REGIME

2 ABSTRACT

Studies on morphological and physiological variables are important to assist in the characterization and understanding of the stress tolerance mechanisms and the choice of cultivars with better performance in contrasting environments, such as, the irrigated and rainfed ones. The study aimed at differentiating cultivars of sugar cane in irrigated and rainfed environments through morphological and physiological variables, and their responses concerning productivity. The experiment was carried out in Jaú-SP using the RB867515 and RB855536 cultivars. The morphological variables were as follows: length of stems, number of tillers, specific leaf mass (SLM) and leaf area index (LAI), and physiological variables: photochemical efficiency of photosystem II (Fv/Fm), stomatal conductance (gs), relative water content (RWC), SPAD index and chlorophyll content (CC a+b). The evaluations were performed at 60, 120, 180, 240 days after cutting (DAC) in the third cycle, and at the last evaluation, stem (TCH) and sugar (TPH) yield were obtained. The results showed that the RB855536 cultivar has higher values of morphological variables, i.e., length of stems and number of tiller, and of physiological variables, i. e., stomatal conductance and chlorophyll content. Also, it had higher sugar yield under appropriate water regime during the development cycle. The RB867515 cultivar produced more stems and sugar under the rainfed water regime, and higher values of morphological variables such as number of tillers and specific leaf mass, and of physiological variables such as chlorophyll fluorescence (Fv/Fm), stomatal conductance, chlorophyll content and relative water content in the leaf.

Keywords: *Saccharum* spp., irrigation, cultivars, water stress, yield

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura com elevado valor agregado, cultivada principalmente para a extração de sacarose e como fonte sustentável ou renovável de combustíveis.

No Brasil, maior produtor mundial de cana, a região Centro-Sul se destaca por apresentar condições edafoclimáticas adequadas à produtividade (CONAB, 2014). A expansão da área de cana-de-açúcar é indiscutivelmente crescente, assim como a demanda por conhecimento que englobe a adaptabilidade e a produção desta cultura em novas áreas de cultivo. Tais fronteiras agrícolas apresentam, regularmente, condições climáticas específicas, principalmente escassez hídrica, que interfere no crescimento e desenvolvimento das plantas, em virtude das alterações bioquímicas, fisiológicas e morfológicas.

Segundo Arantes (2012), o déficit hídrico não é limitado apenas às regiões áridas e semi-áridas do mundo, uma vez que mesmo em regiões consideradas climaticamente úmidas, a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o crescimento. Embora adaptada às condições de elevada intensidade luminosa, altas temperaturas e relativa escassez de água, a cana-de-açúcar requer de grandes quantidades de água, já que, conforme Van Dillewijn (1952), somente 30% do peso constituem-se de massa seca e 70% de água, dependendo do estágio fenológico. Este autor ainda afirma que a cana-de-açúcar apresenta elevado consumo hídrico, necessitando de 250 partes de água para formar uma parte de matéria seca na planta.

Nilsen e Orcutt (1996) relataram que aspectos morfológicos, anatômicos e respostas metabólicas a um ambiente estressante são determinantes para o processo de microevolução,

em seleção natural e, portanto, são respostas adaptativas agronomicamente fundamentais. Diversos autores (FARIAS; DANTAS NETO; GHEIY, 2007; FARIAS et al., 2008; ATKINSON; URWIN, 2012; KRISHANIA et al., 2013) afirmaram que a deficiência hídrica altera inúmeros processos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos na cana-de-açúcar, e que a inadequação destas características culmina numa produtividade insatisfatória. Desta forma, a avaliação desses aspectos em plantas sob restrição hídrica deve auxiliar na tomada de decisões agrônomicas.

Benett et al. (2011) afirmaram que para a agricultura mundial e brasileira, a produtividade, a eficiência, a lucratividade e a sustentabilidade dos processos produtivos são os aspectos da maior relevância, o que ressalta a importância de se verificar o desempenho das cultivares através de diferentes aspectos.

A hipótese deste estudo é que há desempenho morfológico e fisiológico diferenciado entre cultivares de cana-de-açúcar em resposta ao regime hídrico, o que irá refletir na produtividade. Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar e relacionar as respostas morfológicas e fisiológicas de duas cultivares de cana-de-açúcar com o desempenho produtivo, possibilitando a adequação de manejo para o máximo rendimento agrônomico da cultura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição geral da área do experimento

A instalação da área experimental foi realizada em setembro de 2006 na região de Jaú, Estado de São Paulo, localizada nas coordenadas geográficas latitude 22°15' S e longitude 48°34' W e numa altitude média de 580 m. O clima predominante da região é o Aw (Köppen), com clima seco definido, temperatura média anual de 21,6°C, umidade relativa média mensal de 70%, com extremos de 99% em fevereiro e 19% em agosto. A média pluviométrica anual é de 1.344 mm. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico – PVe. As parcelas constituíram-se de cinco sulcos de 8 m de comprimento, sendo utilizado o espaçamento em linha dupla de 0,4 m (plantio em “W” ou plantio em “abacaxi”) com espaçamento de 1,80 m entre os gotejadores em linhas duplas.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 2, constituído, portanto, por duas cultivares, RB867515 e RB855536, e dois regimes hídricos, irrigado e sequeiro, com quatro repetições.

4.2 Condução do experimento

O experimento foi conduzido durante o ciclo da quarta soqueira, no período compreendido entre setembro de 2009 a julho de 2010. As parcelas receberam no plantio uma dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples, 220 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio e 30 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia. O controle de plantas daninhas foi feito com a aplicação de 1,5 L ha⁻¹ de Diuron + 1,5 L ha⁻¹ de Tebutiuron. Neste ciclo de cultivo, a aplicação de nitrogênio e potássio foi realizada ao longo do crescimento da cultura, sendo aplicado 120 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia e 120 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio purificado.

Para irrigação, um tubo gotejador sub-superficial foi enterrado a 20 cm de profundidade da superfície do solo entre cada linha dupla. Os tubos gotejadores utilizados

foram o DRIPNET PC 22135 FL, espaçados a cada 0,5 m, possuindo uma vazão de 0,60 L h⁻¹.

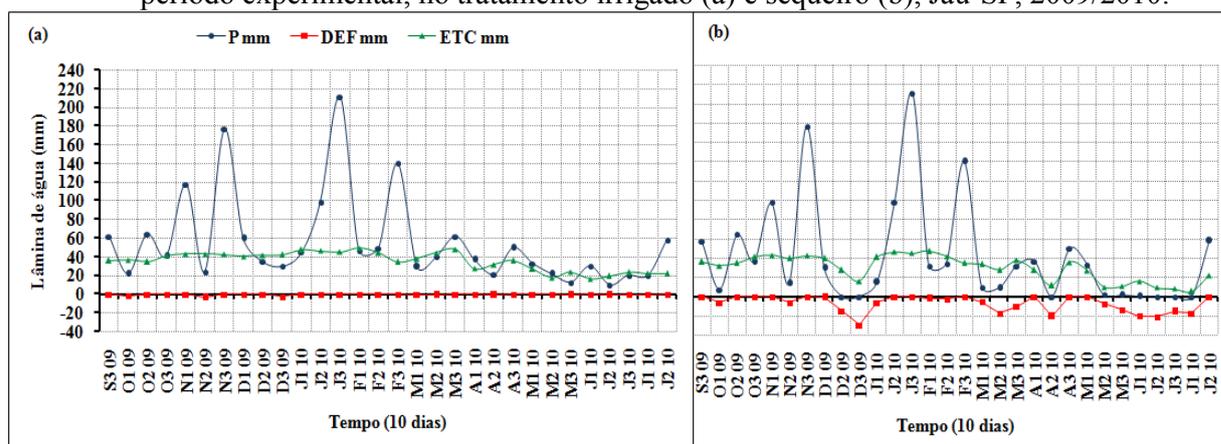
A irrigação foi controlada por um sistema automatizado, sendo que os dados sobre a condição hídrica do solo eram determinados por meio de tensiômetros dispostos na área experimental e enviados por sinais via rádio para uma central informatizada, cujos computadores calculavam a necessidade ou não de irrigação. O sistema foi programado para manter o solo na capacidade de campo, porém em lâminas diferentes. A frequência de irrigação foi realizada contabilizando o suprimento de água no solo, pela chuva (P) e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração da cana-de-açúcar (ETC), com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, assim foi elaborada estimativa de balaço hídrico descendial e calculada a deficiência hídrica (DEF) de acordo com a média de precipitação no município de Jaú (SP), cujo valor é de 1.344 mm, abaixo da necessidade hídrica de 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo da cana-de-açúcar (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Assim, houve fornecimento de 393 mm a mais de água no ciclo de oito meses, totalizando 1.682,9 mm no tratamento irrigado, e no tratamento sequeiro houve apenas a precipitação do período de 1.289,9 mm.

Toda informação sobre dados climáticos e de água por período (fase) foi armazenada automaticamente no sistema computacional para posterior utilização nos estudos do balanço hídrico local.

Os dados meteorológicos foram coletados da estação meteorológica da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), Pólo Regional Centro-Oeste, Jaú-SP. A precipitação pluvial e a lâmina de água aplicada foram coletadas diariamente e somadas a cada 10 dias para análise dos dados. A evapotranspiração de referência (ET₀) foi determinada pelo método de Penman-Monteith – FAO, conforme descrito por Allen, Pereira e Raes (1998), considerando o coeficiente da cultura (kc) descrito por Doorenbos e Kassam (1994).

No balanço hídrico do tratamento irrigado está contabilizado o total de água proveniente da chuva mais a água aplicada via fertirrigação (Figura 1a), enquanto no balanço hídrico do tratamento de sequeiro não houve irrigação (Figura 1b).

Figura 1. Precipitação pluvial, déficit hídrico no solo e evapotranspiração da cultura durante o período experimental, no tratamento irrigado (a) e sequeiro (b), Jaú-SP, 2009/2010.



4.3 Metodologia adotada

As variáveis morfológicas e fisiológicas foram determinadas por meio de coletas periódicas aos 60, 120, 180, 240 dias após a colheita (DAC) do terceiro ciclo, e foram constituídas de:

Comprimento de colmos: As medidas foram feitas em 10 perfilhos avaliados em cada amostragem. Utilizando-se uma fita graduada em centímetros, mediu-se o comprimento da base do colmo até a inserção da folha +1 (primeira aurícula visível) de acordo com o sistema de KUIJPER (VAN DILLEWIJN, 1952).

Número de perfilhos: A contagem foi realizada de maneira direta, em um metro linear, na linha central e no centro da parcela, em cada uma das repetições, no próprio campo.

Massa foliar específica: Dois discos foliares (0,69 cm² cada) por folha +1 foram amostrados por meio de um furador, entre a borda e a nervura central da folha. A relação massa do disco/área do disco foi determinada após a secagem dos discos foliares a 80°C por 48 h, para obtenção da massa constante.

Índice de área foliar (IAF): Esta variável foi determinada utilizando o equipamento Ceptômetro PAR-80 (Decagon, WA, EUA). O IAF foi obtido por meio de leituras da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), entre 10 e 14h, acima e abaixo do dossel foliar através da fórmula já embutida no equipamento.

Máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m): Determinada nas folhas +1 com um fluorômetro portátil (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, EUA). As folhas foram pré-escurecidas por 30 minutos, com auxílio de cliques específicos, antes das medidas de fluorescência. A variável F_v/F_m foi determinada seguindo os procedimentos de Maxwell e Johnson (2000), em que as leituras foram realizadas entre 10 e 14h.

Condutância estomática (g_s): Foi determinada por intermédio de um porômetro (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA), acompanhado da leitura do fluxo de radiação realizada por meio de um medidor de radiação (Apogee Instruments, Inc., Roseville, CA, EUA). As leituras foram tomadas na região mediana da folha +1, e determinadas pela manhã, entre as 10 e 14 horas da manhã.

Estimativa do conteúdo de clorofila via índice SPAD: Foi determinado usando um clorofilômetro SPAD-502 (Minolta Corp., Ramsey, NJ, EUA). A média da parcela foi considerada a de cinco leituras nas folhas +1. A leitura corresponde ao teor de pigmento na folha, e seu valor é equivalente à quantidade de luz transmitida pela folha em duas regiões de comprimento de onda, nas quais a absorção de clorofila é diferente (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Dessa maneira, o valor fornecido é proporcional à quantidade de clorofila existente na folha.

Conteúdo de clorofila via espectrofotômetro (CC a+b): Dois discos foliares (0,69 cm² cada) foram amostrados da lâmina foliar por meio de um furador, entre a borda e a nervura central da folha. O CC foi determinado segundo a metodologia de Porra et al. (1989), o método se baseia na utilização de 1 ml do extrato de clorofila obtido à partir da extração por solvente dimetil-formamida (DMF). A solução foi mantida protegida da luz durante 24 h para a completa extração. Logo após realizou-se a leitura de absorbância em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 647 e 664 nm; a leitura foi realizada em 1 mL de extrato de clorofila diluído em 1 mL de água deionizada.

Conteúdo relativo de água na folha (CRA): No laboratório, dois discos (0,69 cm² cada) foram extraídos da mesma folha +1 e determinou-se a massa do tecido fresco (W_f) dos discos em balança analítica (Tecnal Equip. Lab., Piracicaba, SP, Brasil). A massa do tecido túrgido (W_t) foi obtida depois da reidratação dos discos em água deionizada por 24 h. Para tanto, retirou-se o excesso de água com lenço de papel dos discos túrgidos para determinar a massa do tecido túrgido. A massa do tecido seco (W_d) foi obtida depois que os discos foram

secos por 48 h a 80°C em estufa de circulação de ar forçada. CRA foi calculado por intermédio de fórmula, conforme a metodologia apresentada por Jamaux, Steinmetz e Belhassen (1997).

A produtividade de colmos (t colmos ha⁻¹, TCH) foi determinada pela pesagem, por meio de uma balança tipo célula de carga (modelo MN 1t, Líder Balanças, Araçatuba, SP, Brasil), dos colmos colhidos manualmente de cada parcela. Posteriormente, foi estimada a TCH considerando-se o plantio de 5.556 metros lineares de cana-de-açúcar em 1 ha. A produtividade de açúcar (t pol ha⁻¹, TPH) foi obtida por meio do produto entre a TCH e o teor de sacarose nos colmos (pol%) correspondente de cada parcela, dividido por 1000. Para obtenção dos teores de sacarose, dez colmos foram retirados de cada parcela e encaminhados ao laboratório de análise tecnológica para determinação da polarização (Pol%) da cana pelo método de Tanimoto (1964).

Os resultados foram submetidos à análise de variância. Quando encontradas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Os dados de cada cultivar são representados por meio do desvio padrão da média para cada variável em cada época de avaliação.

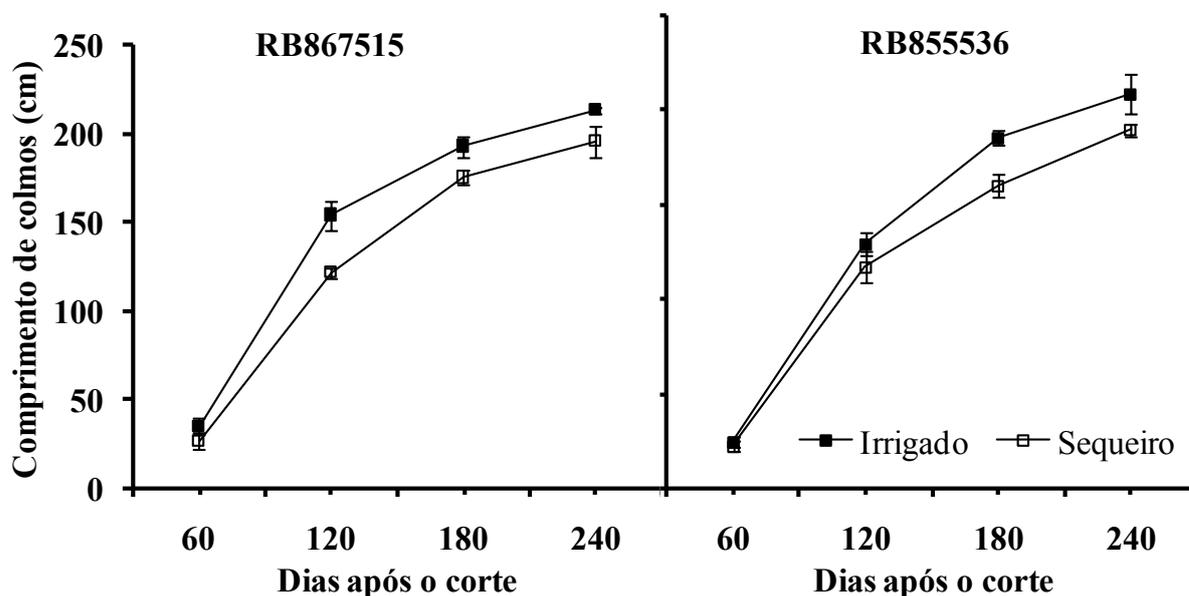
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O regime hídrico influenciou no desempenho de crescimento dos colmos entre as cultivares (Figura 2). Na cultivar RB867515, o comprimento dos colmos variou de 27,83 a 214,61 cm (Média = 147,99 cm) sob irrigação, e de 21,78 a 203,95 cm (Média = 129,70 cm) sob sequeiro ao longo das quatro épocas de avaliação (aos 60, 120, 180 e 240 DAC), com diferenças significativas entre os valores dos 120 aos 240 DAC (Figura 2A). Já na RB855536 sob irrigação, os valores de comprimento de colmos variaram de 22,02 a 219,70 cm (Média = 136,85 cm), e sem suplementação hídrica de 18,03 a 193,71 cm (Média = 122,24 cm), com diferenças significativas observadas apenas na terceira (180 DAC) e quarta (240 DAC) épocas de avaliação (Figura 2B). A acentuada diferença de comprimento de colmos observada na RB867515 aos 120 DAC provavelmente deve-se ao déficit hídrico ocorrido no final do mês de dezembro de 2009 (Figura 1). Constatou-se que a deficiência hídrica reduziu o comprimento final de colmos na RB867515 em aproximadamente 5%, enquanto na RB855536 essa redução foi de 11,8%.

Segundo Shigaki (2003), a disponibilidade de água no solo é o principal fator responsável pelo alongamento dos entrenós, o que corrobora com os dados obtidos, já que a menor disponibilidade hídrica resultou em comprimento de colmos inferior ao regime hídrico sem déficit. Ainda, constatou-se efeito de cultivar, em que a RB867515 teve melhor desempenho, ou seja, menor redução nesta variável sob deficiência hídrica.

Quanto ao número de perfilhos (Figura 3), observou-se que independente do regime hídrico, o máximo perfilhamento ocorreu aos (60 DAC) em ambas as cultivares, com sucessivo decréscimo no decorrer do desenvolvimento das plantas. Na cultivar RB867515 foram registrados valores de 57,0 a 17,0 perfilhos por metro (Média = 30,63) sob irrigação, e sem irrigação os valores variaram de 50,0 a 17,0 perfilhos por metro (Média = 28,23). Importante observar que não houve diferença estatística entre os regimes ao longo das épocas. Já na cultivar RB855536, os valores foram de 69,0 a 18,0 perfilhos por metro (Média = 32,63) com suplementação hídrica, e entre 60,0 e 14,0 perfilhos por metro (Média = 28,31) em regime de sequeiro, com diferenças estatísticas da segunda (120 DAC) à quarta (240 DAC) épocas de avaliação, com o tratamento irrigado superando o sequeiro.

Figura 2. Comprimento de colmos das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.

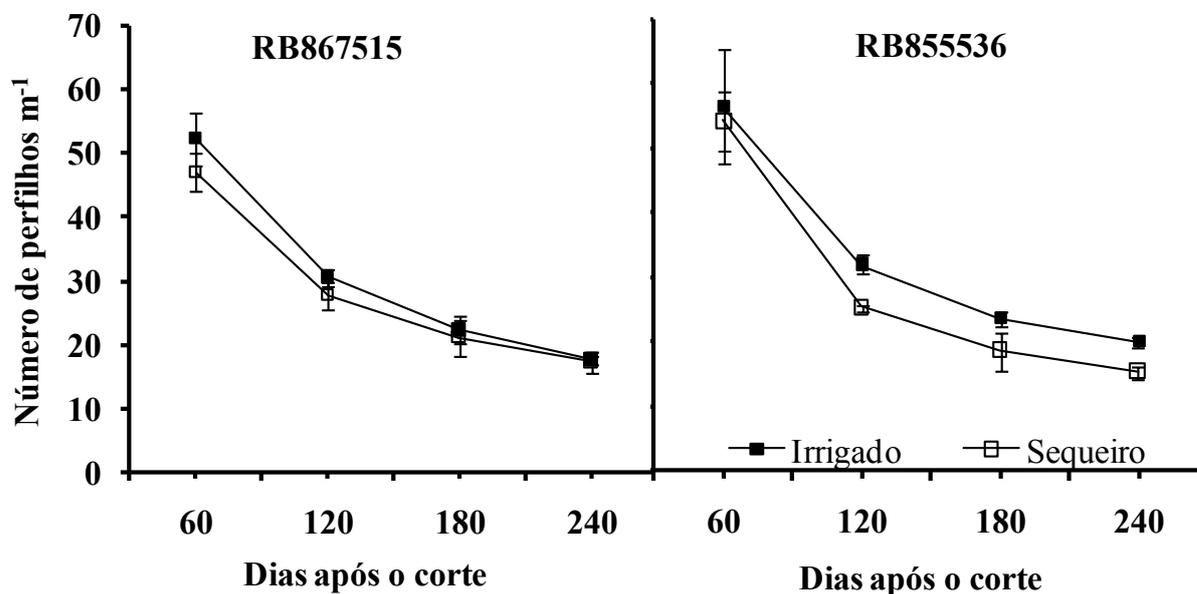


Oliveira et al. (2010) afirmaram que o perfilhamento na cana-de-açúcar é crescente até o sexto mês após o plantio/corte e a partir deste período se inicia uma redução, decorrente da competição, por luz, área, água e nutrientes, refletindo, assim, na diminuição e paralisação do processo, além da morte dos perfilhos mais jovens. A redução progressiva na população de perfilhos dos 60 para os 240 DAC contrasta com o crescimento dos colmos para ambas as cultivares. Segundo Santos et al. (2009), logo após o intenso período de perfilhamento (neste experimento observado até 60 DAC) e com a população já definida, iniciou-se a fase de alongamento do colmo.

Segundo Silva et al. (2014b), o perfilhamento é um dos componentes para a formação do potencial de produção da cana-de-açúcar em conjunto com o comprimento e o diâmetro de colmos e a irrigação capacita as cultivares responsivas para melhor manifestarem seu potencial genético. Por outro lado, cultivares que mantêm melhor desempenho dessas variáveis sob deficiência hídrica têm potencial de serem mais produtivas sob esse regime hídrico (SILVA et al., 2008a).

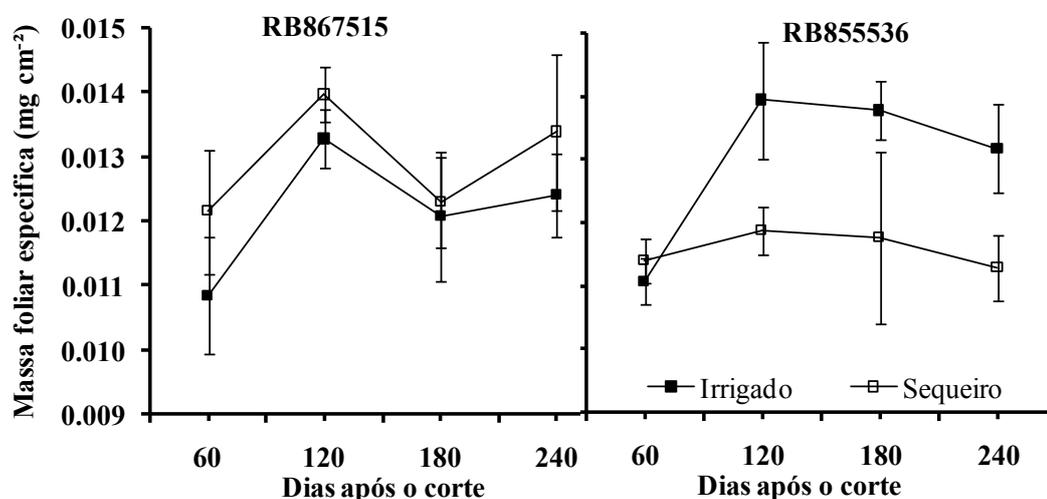
Em relação à massa foliar específica, os valores da RB867515 irrigada variaram entre 0,010 e 0,013 mg cm^{-1} (Média = 0,012 mg cm^{-1}) e sequeiro entre 0,010 e 0,014 (Média = 0,012 mg cm^{-1}), sem diferença estatística entre os tratamentos ao longo das épocas avaliadas (Figura 4). Por outro lado, a variedade RB855536 teve desempenho diferente ao RB867515, em que com valores entre 0,010 e 0,014 mg cm^{-1} (Média = 0,012 mg cm^{-1}) no regime irrigado e entre 0,010 e 0,013 mg cm^{-1} (Média = 0,011 mg cm^{-1}) no sequeiro, houve maior MFE em todas as épocas de avaliação, com diferença estatística a partir da segunda época.

Figura 3. Número de perfilhos das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.



Apesar de não diferir significativamente, o desempenho em MFE verificado para a RB867515 está de acordo com Pincelli (2010) que encontrou correlação inversa entre a MFE e o regime hídrico, bem como Björkman (1981), que afirma que sob condições de estresse por deficiência hídrica, há aumento na massa foliar específica, o que conduz a um maior volume interno para difusão de CO₂, para manter o status hídrico foliar e maior volume celular para abrigar o aparelho fotossintético. Tal constatação, no entanto, não foi válida para a RB855536, sinalizando sua incapacidade de tolerar a deficiência hídrica. As diferenças na MFE da RB855536 ocorreram em épocas que a cultivar havia encarado períodos de estresse (Figura 1).

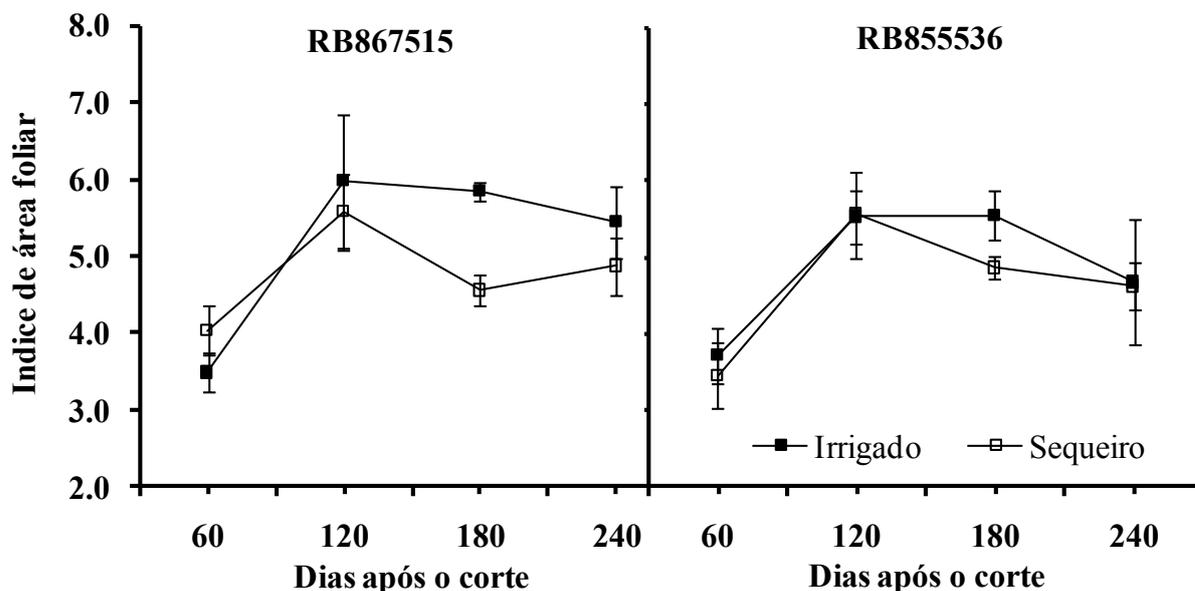
Figura 4. Massa foliar específica das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.



Os valores do índice de área foliar (IAF) da RB867515 variaram entre 6,26 e 3,24 (Média = 4,93) com irrigação e de 5,74 a 3,72 (Média = 4,75) sob regime sequeiro, com diferença estatísticas observadas aos 180 DAC (Figura 5). Na RB855536, esses valores variaram de 6,04 e 3,25 (Média = 4,86) para o irrigado e 6,07 e 2,86 (Média = 4,62) para o sequeiro, com diferença estatística também aos 180 DAC. A deficiência hídrica afetou similarmente o IAF das cultivares no período de encerramento da fase de grande crescimento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil (março), enquanto que no período de maior atividade fotossintética e maior crescimento (dezembro a março) as chuvas foram suficientes para atender a demanda hídrica.

Segundo Farias et al. (2008), existe uma grande associação entre a produtividade da cultura e a superfície total fotossinteticamente ativa, representada pelo IAF. Estes autores afirmam que a radiação solar pode ser absorvida ao ser interceptada pelo dossel foliar da cultura, transmitida e/ou refletida em proporções variáveis, dependendo do ângulo de incidência dos raios solares e das características estruturais das plantas. Já Yassen e Al-Omary (1994) relataram que a redução da área foliar devido ao estresse hídrico pode ser atribuída principalmente à redução do número de células e à redução do volume celular. O decréscimo de área foliar é altamente significativo, especialmente em condições de baixo potencial matricial do solo.

Figura 5. Índice de área foliar das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.

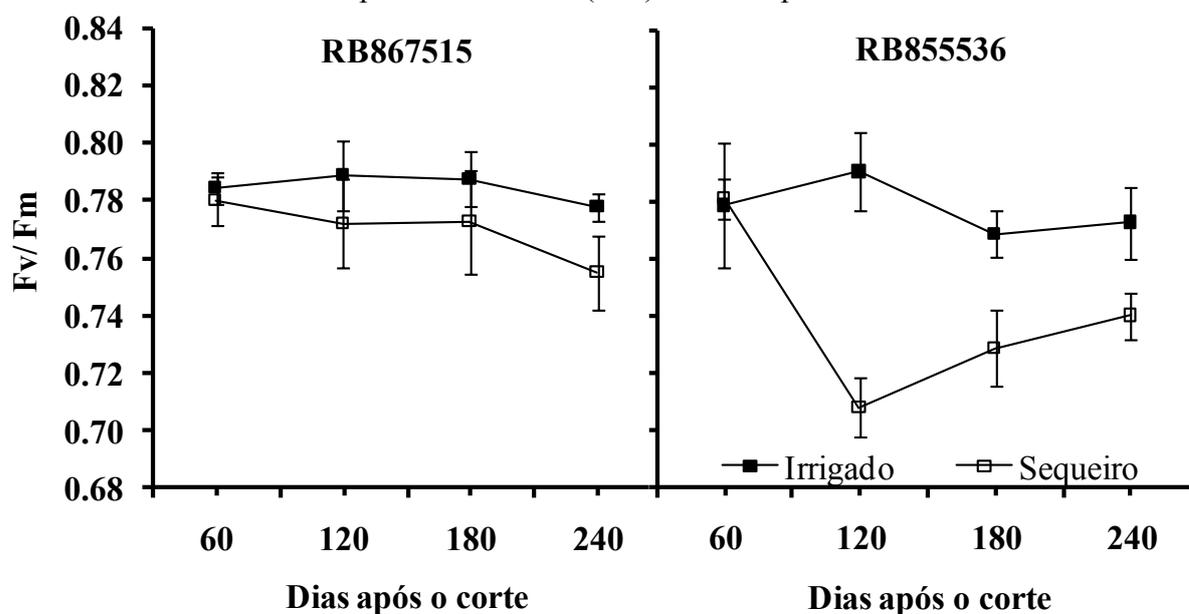


Os valores da relação F_v/F_m variaram para a RB867515 irrigada de 0,82 a 0,77 (Média = 0,79), e na não irrigada de 0,79 a 0,74 (Média = 0,77), com diferença significativa apenas aos 240 DAC, enquanto para a RB855536 irrigada e não irrigada, os valores variaram entre 0,83 e 0,74 (Média = 0,77) e de 0,78 a 0,71 (Média = 0,74), respectivamente, com diferença estatística observada na segunda (120 DAC), terceira (180 DAC) e quarta épocas (240 DAC) (Figura 6). O regime hídrico de déficit pouco afetou a relação F_v/F_m da RB867515, sugerindo maior capacidade em tolerar as condições fotoinibitórias ocasionadas pelo estresse. Já a RB855536 foi bem afetada pela restrição hídrica a partir dos 120 DAC.

De acordo com Maxwell e Johnson (2000), valores de Fv/Fm inferiores a 0,75 indicam que a planta está sob algum tipo de estresse e, portanto, há redução do seu potencial fotossintético. Tal fato pôde ser observado para ambas as cultivares no tratamento sequeiro, entretanto na RB867515 essa situação ocorreu apenas aos 240 DAC, isto é, no final do ciclo de desenvolvimento, enquanto na RB855536 a atividade fotossintética foi prejudicada desde 120 DAC. Segundo Silva et al. (2014a), a capacidade de manter alta razão Fv/Fm sob déficit hídrico pode indicar alta eficiência de uso da radiação pelas reações de assimilação de carbono, e ainda estar correlacionada com tolerância ao estresse e maior produtividade de colmos.

A condutância estomática (g_s) variou de 886,00 a 165,60 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Média = 357,65 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para a RB867515 irrigada, e de 862,80 a 89,10 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Média = 274,88 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sem suplementação hídrica, enquanto os valores para a RB855536 irrigada foram de 808,20 a 196,20 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Média = 371,18 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e de 511,10 a 63,40 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Média = 180,69 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) no regime de sequeiro (Figura 7).

Figura 6. Eficiência fotoquímica máxima do FII (Fv/Fm) das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.



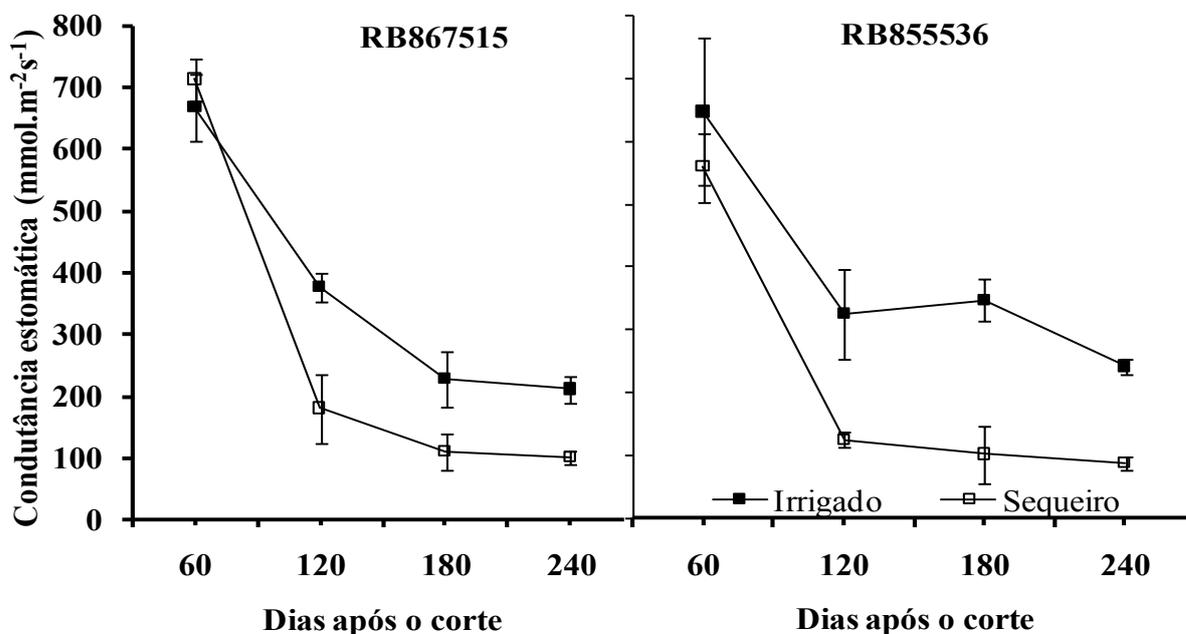
Foi observada diferença estatística em ambas as variedades aos 120, 180 e 240 DAC, entretanto as reduções proporcionadas pela deficiência hídrica foram maiores na RB855536. Lima et al. (2007) relataram que o efeito da deficiência hídrica reduz a condutância estomática e taxas de transpiração devido à redução do potencial da água na folha, que provoca o fechamento dos estômatos. Sem deficiência hídrica, a média da g_s na RB855536 foi superior a da RB867515, denotando que as trocas gasosas são mais intensas.

As medidas de trocas gasosas podem ser utilizadas como ferramentas para diagnosticar a integridade do aparato fotossintético frente às adversidades ambientais, tendo em vista que se trata de uma técnica rápida, precisa e não destrutiva de modo a contribuir significativamente com outras áreas do conhecimento (TORRES NETTO et al., 2005).

Em relação ao índice SPAD verificou-se valores entre 45,63 e 35,30 (Média = 39,63) para a RB867515 no regime irrigado e de 48,73 a 31,05 (Média = 37,13) sob sequeiro. Na

RB855536 esses valores variaram de 47,00 a 35,53 (Média = 39,85) no irrigado, e de 47,33 a 31,34 (Média = 37,61) no sequeiro. Houve diferença significativa entre os tratamentos tanto para a RB867515 quanto para a RB855536 aos 180 e 240 DAC (Figura 8).

Figura 7. Condutância estomática (g_s) das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.



O decréscimo do índice SPAD é natural à medida que a cana-de-açúcar inicia o processo de maturação e a senescência foliar. Segundo Pincelli (2010), a cana-de-açúcar sem suplementação hídrica apresenta menores teores de clorofila em seus tecidos foliares, entretanto respostas diferenciadas estão em função de cultivares. Como a atividade fotossintética é a fonte de energia para o crescimento, diferenciação e produção de sacarose em cana-de-açúcar, cultivares com maiores valores de índice SPAD poderão apresentar menores decréscimos na produtividade de colmos (SILVA et al., 2014a).

Em termos do conteúdo total de clorofila (CC $a+b$), os valores variaram entre 45,03 e 31,64 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (Média = 36,50 $\mu\text{g cm}^{-2}$) para a RB867515 irrigada, e entre 52,15 e 25,21 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (Média = 34,29 $\mu\text{g cm}^{-2}$) sob regime sequeiro, com diferença estatística apenas na última época de avaliação (240 DAC). Quanto a RB855536, os valores variaram entre 46,57 e 29,08 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (Média = 37,63 $\mu\text{g cm}^{-2}$) sob regime irrigado, e de 45,63 a 15,84 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (Média = 28,81 $\mu\text{g cm}^{-2}$) sob sequeiro, com diferenças estatísticas na terceira (180 DAC) e na quarta (240 DAC) época de avaliação (Figura 9).

A deficiência hídrica promoveu grandes reduções no CC $a+b$ da cultivar RB855536, o que sugere maior dano no aparato fotossintético (SILVA et al., 2014b). As clorofilas são responsáveis pela captação de luz para as reações fotoquímicas, dessa forma, cultivares que mantém maiores conteúdos de clorofila sob deficiência hídrica possuem maior habilidade de tolerar esse ambiente, devido à forte relação entre pigmentos fotossintéticos, fotossíntese e produtividade (O'NEILL; SHANAHAN; SCHEPERS, 2006).

Figura 8. Índice SPAD das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.

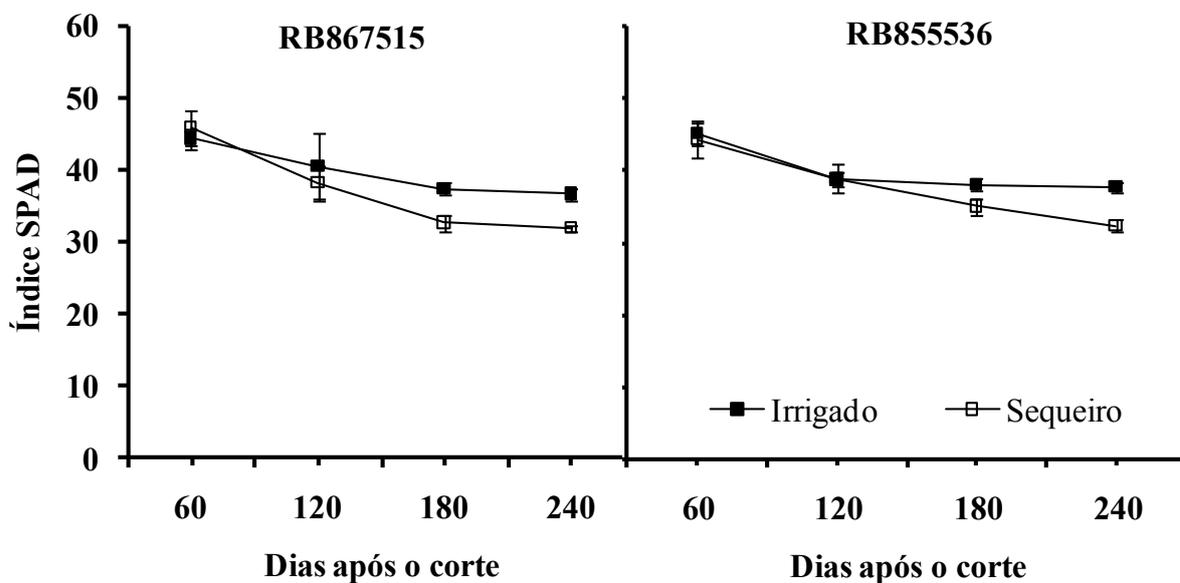
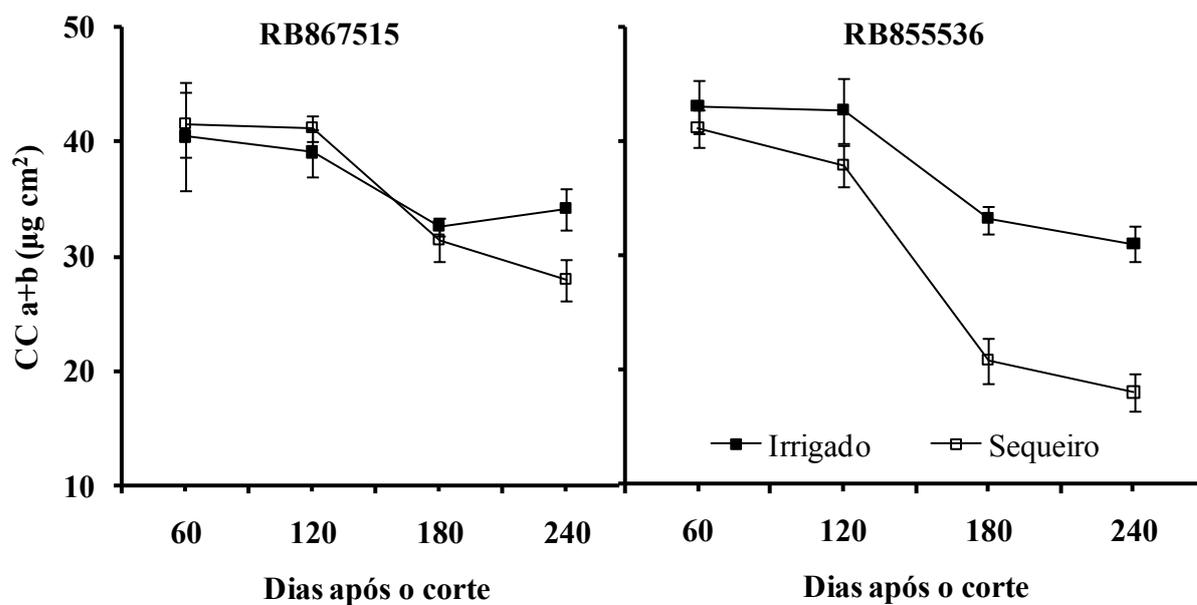


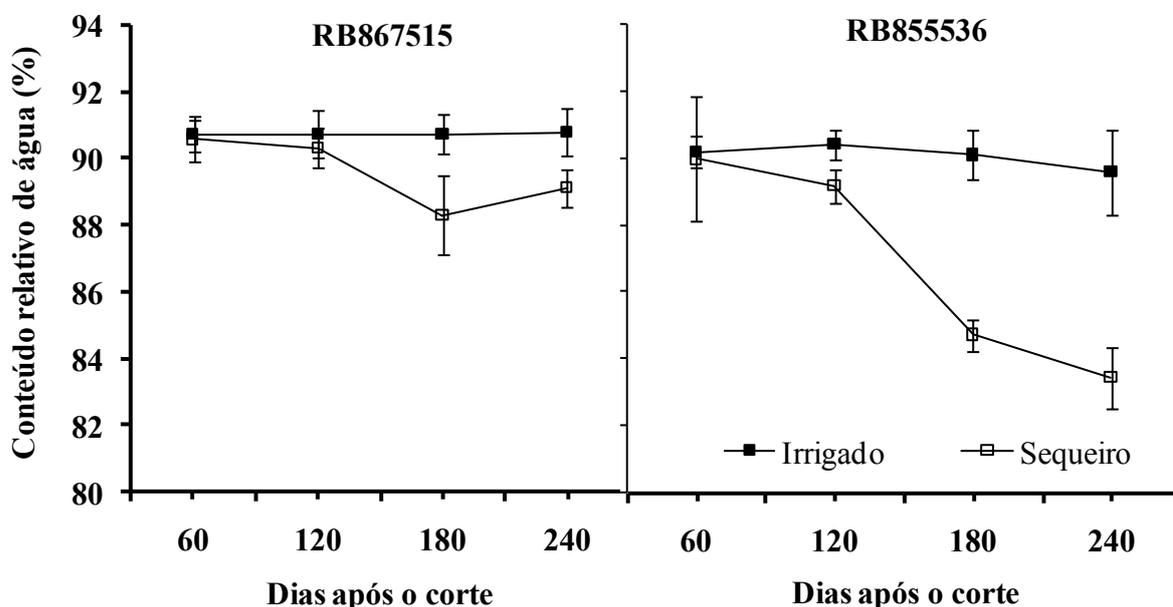
Figura 9. Conteúdo de clorofila $a+b$ (CC $a+b$) das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média ($n=4$) \pm desvio padrão.



Quanto ao conteúdo relativo de água na folha, os valores variaram entre 93,97 e 89,98% (Média = 91,31%) para a RB867515 irrigada e entre 92,80 e 89,05% (Média = 90,79%) para a não irrigada, com diferença estatística entre os dois regimes na terceira e quarta épocas de avaliação (Figura 10). Na RB855536 irrigada os valores oscilaram entre 92,78 e 88,78% (Média = 91,21) e para a não irrigada entre 91,69 e 82,32 (Média = 87,09%), com diferença significativa entre os regimes hídricos na segunda, terceira e quarta épocas de avaliação. O CRA permaneceu praticamente estável ao longo dos estádios de desenvolvimento nas duas cultivares sob irrigação. A cultivar RB855536 foi mais sensível ao regime hídrico estressante devido aos valores médios de CRA bem inferiores aos da RB867515, aos 120, 180 e 240 DAC.

Nilsen e Orcutt (1996) afirmaram que a redução de água no mesofilo foliar (com ou sem redução da pressão de turgor) afeta a atividade química e estrutura interna na célula, consequentemente altera a condição de hidratação de proteínas e enzimas (reduzem a eficácia em suas atividades) e há modificações nas posições nas organelas (dificulta a interação entre elas). Por estas e outras constatações, Graça (2009) afirmou que a condutância estomática, a taxa fotossintética, a eficiência do fotossistema II e o teor relativo de água são alguns dos parâmetros fisiológicos que têm apresentado grande utilidade na categorização de cultivares tolerantes à seca, além da capacidade de recuperação destas cultivares após serem submetidas ao déficit hídrico com o restabelecimento do suprimento hídrico.

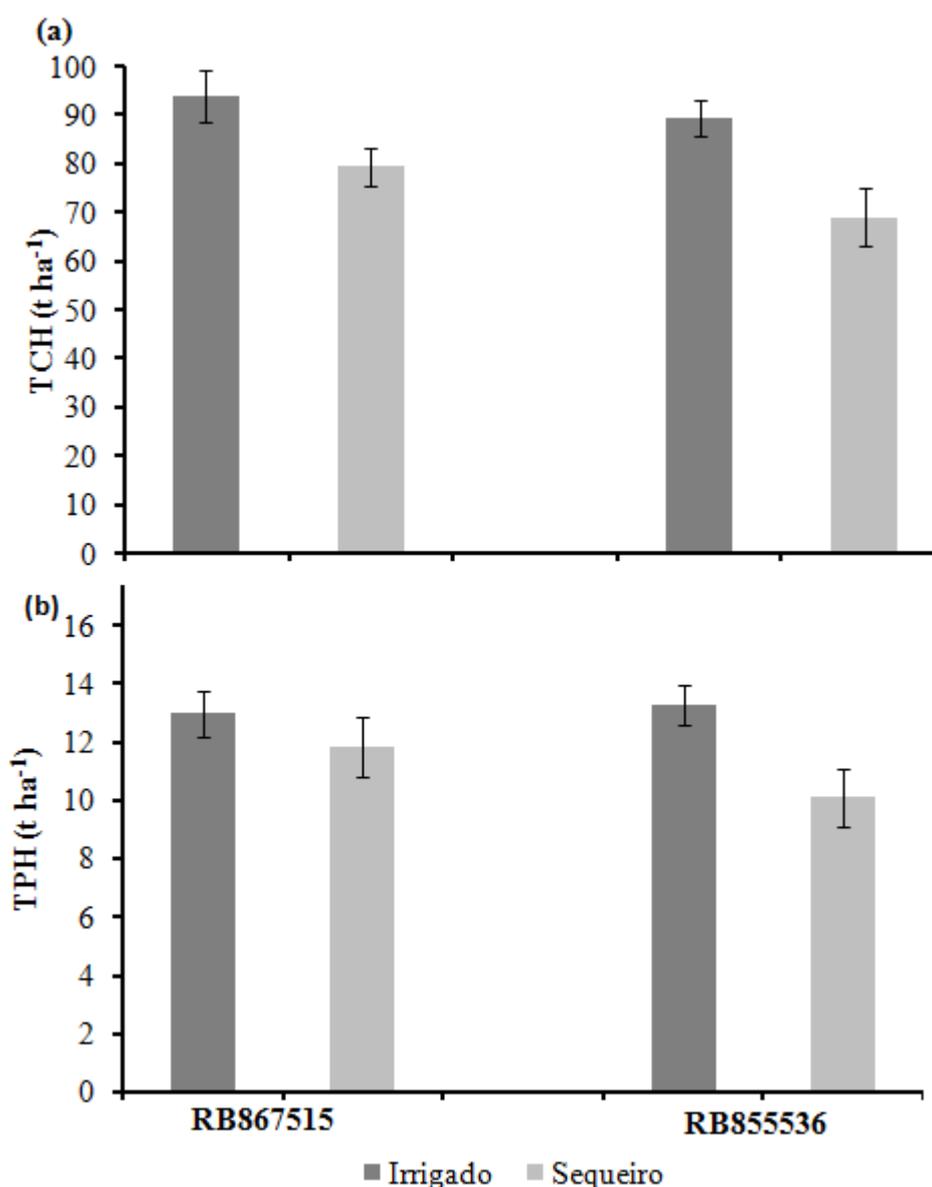
Figura 10. Conteúdo relativo de água (CRA) das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro em quatro épocas de avaliação. Cada símbolo representa a média (n=4) \pm desvio padrão.



Observou-se que as cultivares de cana-de-açúcar no ambiente com suplementação hídrica apresentaram valores superiores tanto de produtividade de colmos (TCH) quanto de açúcar (TPH) quando comparadas a condição de sequeiro (Figura 11). Em relação às cultivares, quanto a TCH, a RB867515 foi mais produtiva do que a RB855536 (Figura 11a) independente do tratamento. Por regime hídrico, observa-se que sua produtividade de colmos

foi de 93,9 t ha⁻¹ no irrigado e de 79,4 t ha⁻¹ no sequeiro, ou seja, redução de 15,5%, enquanto a da RB855536 foi de 89,5 t ha⁻¹ no irrigado e de 69,2 t ha⁻¹ no sequeiro, isto é, quebra de 22,7%. No entanto, ao observarmos a TPH, verificamos que sob irrigação a RB855536 foi superior à RB867515, com produtividade de 13,3 t de açúcar ha⁻¹ contra 13,0 t de açúcar ha⁻¹, respectivamente, (Figura 11b), entretanto, sem suplementação hídrica a RB867515 produziu 11,8 t de açúcar ha⁻¹, portanto sendo superior em 14,4% à RB855536 que produziu 10,1 t de açúcar ha⁻¹. Ainda, não foi verificada diferença significativa para TPH entre os regimes irrigado e sequeiro na cultivar RB867515.

Figura 11. Produtividade de colmos (toneladas de colmos por hectare, TCH) (a) e de açúcar (toneladas de açúcar por hectare, TPH) (b) das cultivares RB867515 e RB855536 sob os regimes irrigado e sequeiro. Cada símbolo representa a média (n=4) ± desvio padrão.



A produção de uma cultura é o resultado dos seus componentes de produção. O melhor desempenho em TPH da RB855536 no manejo irrigado deve-se à sua responsividade a ambientes favoráveis, comprovada pelos maiores valores obtidos em comprimento de colmos, número de perfilhos e condutância estomática durante todo o período das avaliações, bem como maior relação Fv/Fm aos 120 DAC e conteúdo de clorofila $a+b$ aos 120 e 180 DAC. Estas variáveis morfológicas e fisiológicas estão associadas a maior produção e acúmulo de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar (MELO et al., 2009; SILVA et al., 2011) por possibilitar elevada atividade do aparato fotossintético, adequado suprimento de CO_2 nas câmaras subestomáticas e estrutura física (colmos bem desenvolvidos) ideal ao estoque dos fotoassimilados convertidos a açúcares (DUTRA FILHO et al., 2012).

Por outro lado, sob restrição hídrica, a RB867515 teve melhor desempenho tanto em TCH quanto em TPH, apresentando, portanto, característica de rusticidade. As menores reduções nas produtividades estiveram relacionadas às menores reduções nas variáveis número de perfilhos, Fv/Fm , condutância estomática, conteúdo de clorofila conteúdo relativo de água na folha, além de um ligeiro aumento na massa foliar específica sob ambiente restritivo em água. De fato, em outros estudos foi constatado que a tolerância de cultivares de cana-de-açúcar à deficiência hídrica está relacionada à menor redução em variáveis morfológicas (SILVA et al., 2008a,b) e fisiológicas (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SMIT; SINGELS, 2006; SILVA et al., 2011, 2014a).

Oliveira et al. (2010) afirmaram que praticamente toda a cana produzida no Estado de São Paulo é cultivada em condições de sequeiro, justificada no paradigma de que a irrigação é economicamente inviável, entretanto, frente ao incremento em produtividade em cultivares responsivas de cana-de-açúcar com suplementação hídrica é de se questionar se tal prática não seria mais adequada e resultaria em maior lucratividade. Por outro lado, na impossibilidade do manejo de áreas com irrigação, o uso adequado de cultivares rústicas que possuam mecanismos morfológicos e fisiológicos de aclimação é recomendado para atingir produtividades satisfatórias.

6 CONCLUSÕES

1. Sob regime hídrico adequado, cultivares de cana-de-açúcar com maiores valores das variáveis morfológicas comprimento de colmos e número de perfilhos e das fisiológicas condutância estomática e conteúdo de clorofila são mais produtivas.

2. Cultivares de cana-de-açúcar mais produtivas sob regime hídrico de sequeiro mantém valores mais elevados das variáveis morfológicas número de perfilhos e massa foliar específica, e das fisiológicas máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II, condutância estomática, conteúdo de clorofila e conteúdo relativo de água na folha.

7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO, 1998. 297p (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARANTES, M. T. **Potencial produtivo de cultivares de cana-de-açúcar sob os manejos irrigado e sequeiro**. 2012. 36 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

ATKINSON, N. J.; URWIN, P. E. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, p. 3523-3543, 2012.

BENETT, C. G. S.; BUZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; MAESTRELO, P. R. Produtividade e desenvolvimento da cana planta e soca em função de doses e fontes de Manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1661-1668, 2011.

BJÖRKMAN, O. Responses to different quantum flux densities. In: LANGE, O. L.; NOBEL, P. A.; OSMOND, C. B.; ZIEGLER, H. (Eds.). **Physiological plant ecology I: responses to physical environment**. Berlin: Springer-Verlag, 1981. p. 57-107. (Encyclopedia of Plant Physiology, 12 A).

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-Açúcar: primeiro levantamento**. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_04_09_10_29_31_boletim_cana_portugues_abril_2013_1o_lev.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2014.

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

DUTRA FILHO, J. A.; BASTOS, G. Q.; MACHADO, P. R.; SILVA, L. J.; SIMÕES NETO, D. E.; CHAVES, A.; SILVA, F. S. G. Estimativa do ganho por seleção para produtividade em famílias de cana-de-açúcar. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 3, p. 35-40, 2012.

FARIAS, C. H. A.; DANTAS NETO, J.; GHEIY, H. R. Índice de área foliar em cana-de-açúcar sob diferentes níveis de irrigação e zinco na paraíba. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 45-55, 2007.

FARIAS, C. H. A. DE; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M. DE; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, p. 356-362, 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, 2009.

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

JAMAUX, I.; STEINMETZ, A.; BELHASSEN, E. Looking for molecular and physiological markers of osmotic adjustment in sunflower. **New Phytologist**, Oxford, v. 137, p. 117-127, 1997.

KRISHANIA, S.; DWIVEDI, P.; AGARWAL, K. Strategies of adaptation and injury exhibited by plants under a variety of external conditions: a short review. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 4, p. 103-110, 2013.

LIMA, C. J. G. S.; OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, M. K. T.; JÚNIOR, A. B. A. Resposta do feijão caupi a salinidade da água de irrigação. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 2, p. 79-86, 2007.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

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

MELO, L. J. O. T.; OLIVEIRA, F. J.; BASTOS, G. Q.; ANUNCIÇÃO FILHO, C. J.; REIS, O. V. Desempenho agroindustrial de cultivares de cana-de-açúcar na zona da mata litoral sul de Pernambuco. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 3, p. 684-691, 2009.

NILSEN, E. T.; ORCUTT, D. M. **The physiology of plants under stress: abiotic factors**. New York: John Wiley, 1996. 689 p.

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; LIRA JÚNIOR, M. A.; MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.

O'NEILL, P. M.; SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S. Use of chlorophyll fluorescence assessments to differentiate corn hybrid response to variable water conditions. **Crop Science**, Madison, v. 46, n. 2, p. 681-687, 2006.

PINCELLI, R. P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2010.

PORRA, R. J.; THOMPSON, W. A.; KRIEDEMANN, P. E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. **Biochimica et Biophysica Acta**, Amsterdam, v. 975, p. 384-394, 1989.

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

SHIGAKI, F. **Variedades de cana-de-açúcar para alimentação bovina cultivadas sob condições de déficit hídrico**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; SHARMA, V.; SILVA, J. A. G.; CAPUTO, M. M.; DAMAJ, M. B.; GUIMARÃES, E. R.; FERRO, M. I. T. Use of physiological parameters in screening drought tolerance in sugarcane genotypes. **Sugar Tech**, Nova Deli, v. 13, p. 191-197, 2011.

SILVA, M.A.; JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G. da; SANTOS, C.M. dos; SHARMA, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 152, p. 104-118, 2014a.

SILVA, M. A.; SANTOS, C. M.; VITORINO, H. S.; RHEIN, A. F. L. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 173-181, 2014b.

SILVA, M. A.; SILVA, J. A. G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 620-627, 2008a.

SILVA, M. A.; SOARES, R. A. B.; LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 655-661, 2008b.

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

TANIMOTO, T. The press method of cane analysis. **Hawaiian Planter's Record**, Honolulu, v. 57, p. 133-150, 1964.

TORRES NETTO, A.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J. G.; BRESSAN SMITH, R. E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 104, n. 199-209, 2005.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chonica Botanica, 1952. 371 p.

YASSEN, B. T; AL-OMARY, S. S. An analysis of the effect of water stress on leaf growth and yield three barley cultivar. **Irrigation Science**, Córdoba, v. 14, p. 157-162, 1994.