

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE FOLHAS DA CANA-DE-AÇÚCAR NA PRESENÇA DE DÉFICIT HÍDRICO

**PETERSON RICARDO FIORIO¹; RUBENS DUARTE COELHO²; PEDRO PAULO
DA SILVA BARROS³; MAGDA MARIA ZULETA BONILLA⁴ E ANA PAULA
BARBOSA GADY⁵**

¹Prof. Dr., Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Av. Pádua Dias, 11 – CEP: 13418-900, Cx. Postal 9 - Piracicaba – SP, Brasil, email: ffiorio@usp.br

²Prof. Dr., Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Av. Pádua Dias, 11 - CEP: 13418-900, Cx. Postal 9 - Piracicaba – SP, Brasil, email: rdcoelho@usp.br

³Pós Doutorado, Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Av. Pádua Dias, 11 - CEP: 13418-900, Cx. Postal 9 - Piracicaba – SP, Brasil, email: pedropaulo@usp.br

⁴Mestra, Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Av. Pádua Dias, 11 - Cx. Postal 9 - CEP: 13418-900, Piracicaba – SP, Brasil, email: magdazuleta@gmail.com

⁵Pós Doutora, Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Av. Pádua Dias, 11 - CEP: 13418-900, Cx. Postal 9 - Piracicaba – SP, Brasil, email: anap_barbosa@yahoo.com.br

1 RESUMO

O sensoriamento remoto é uma das ferramentas disponíveis atualmente aos agricultores que permite quantificar a variabilidade espacial do estado hídrico da vegetação de maneira rápida, uma vez que é uma técnica não destrutiva e de ampla abrangência para a quantificação de parâmetros biofísicos. Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi identificar o efeito do déficit hídrico no comportamento espectral de folhas de cana-de-açúcar. O estudo foi realizado em ambiente protegido (casa de vegetação), conduzido em delineamento em blocos ao acaso (DBC), sendo os tratamentos distribuídos em três blocos, totalizando, cinco tratamentos repetidos três vezes, para um total de 60 caixas. A irrigação de cada tratamento foi feita com base na evapotranspiração acumulada (ET_oAc) e a umidade do solo foi monitorada utilizando tensiometria e TDR (Time Domain Reflectometer). As leituras espectrais foram realizadas utilizando o espectrorradiômetro ASD FieldSpec 3, nas quais foram mensuradas quatro plantas por caixa. Com base nos dados analisados foi possível observar variações na intensidade da reflectância entre os tratamentos quando o déficit hídrico foi imposto. Concluiu-se que as curvas espectrais dos tratamentos com mais dias após o término da irrigação apresentam reflectância mais alta, principalmente na região do infravermelho próximo.

Palavras-chave: sensoriamento remoto hiperespectral; estresse hídrico; comportamento espectral; irrigação; *saccharum* spp.

**FIORIO, P. R.; COELHO, R. D.; BARROS, P. P. S.; BONILLA, M. M. Z.; GADY, A.
P. B.
SPECTRAL BEHAVIOR OF SUGARCANE'S LEAVES UNDER THE WATER
DEFICIT CONDITIONS**

2 ABSTRACT

The remote sensing nowadays is an available tool for farmers that allows they quantify space variability of water vegetation state, since it is a non-destructive technique and broad fullness for quantification of vegetation biophysical parameters. In this context, the aim of this study was identify the effect of water deficit in the spectral behavior of sugarcane's leaves. The study was realized inside of protected environment (greenhouse), managing randomized blocks design (RBD), the treatments were distributed on three blocks, totalizing five treatments repeated three times by 60 boxes. The irrigation of each treatment was performed based on the accumulated evapotranspiration (ETc) and the soil humidity was monitoring by tensiometers and TDR (Time Domain Reflectometer). Spectral data were collected using ASD FieldSpec 3 spectroradiometer, it was measured four plants in each box. Based on the analyzed data it was possible observe variations in the intensity of reflectance while the water deficit was imposed. In conclusion the spectral curves of treatments with more days after finished of irrigation show highest reflectance, mainly in near infrared region.

Keywords: hyperspectral remote sensing; water stress; spectral behavior; irrigation; *saccharum* spp.

3 INTRODUÇÃO

A expansão do setor sucroenergético vem sendo ameaçada no Brasil pelas restrições climáticas que têm afetado a cultura nos últimos anos, especificamente as altas temperaturas e elevada radiação solar, associadas à má distribuição de chuvas (COSTA, 2011). Isso provoca períodos prolongados de seca que geram um ambiente restritivo para a produção da cana-de-açúcar.

A resposta em produtividade da cana-de-açúcar irrigada depende da quantidade de água e fertilizantes aplicados (DANTAS NETO et al., 2006), do manejo da irrigação (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005), entre outros. Neste sentido, para que a planta atinja todo seu potencial produtivo, fatores como o planejamento do investimento em infraestrutura de irrigação deve ser considerado (COSTA, 2011).

A condição de estresse abiótico, particularmente a seca, é um dos fatores que atualmente reduzem a produtividade das culturas em nível mundial (ZHANG et al., 2012). Estudos focados na determinação do estado fisiológico da vegetação são usados

para detectar e estudar plantas estressadas, o que tem sido de grande importância para o desenvolvimento da agricultura. No entanto, a medição confiável do conteúdo de água na planta, especificamente na folha (Câmara de Scholander), é uma atividade que consome tempo, é destrutiva, além de cara e frequentemente sujeita a erros humanos (SMIT; SINGELS, 2006).

O sensoriamento remoto tem-se tornado uma das ferramentas mais utilizadas para a determinação do estado hídrico da vegetação, por ser uma técnica não destrutiva com rápida quantificação de parâmetros biofísicos da vegetação, particularmente do estado hídrico do vegetal (MIRZAIE et al., 2014, DAS; MAHAJAN; SINGH, 2018).

Devido ao alto conteúdo de água da vegetação, as características de absorção da água dominam a reflectância em várias regiões do espectro eletromagnético, principalmente no infravermelho próximo (CHENG; RIVARD; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2011; SIMS; GAMON, 2003; WANG; LI, 2012).

Segundo Palmer e Williams (1974), a absorção da radiação pela água na folha

nas regiões do infravermelho próximo e infravermelho médio acontece pela combinação e transição vibracional das moléculas de água. Quando são observadas mudanças na intensidade da curva espectral, isso pode ser reconhecido e quantificado como a variação no conteúdo de água da planta (YI et al., 2012). Entretanto, é válido ressaltar que este tipo de comportamento pode ser distinto entre as culturas, conforme observado no trabalho realizado por Zhang et al. (2012), onde as faixas de comprimento de ondas observadas no algodoeiro, foram distintas daquelas obtidas por outros autores.

As variações na forma da curva espectral na região do visível são explicadas pela ação e quantidade de pigmentos fotossintetizantes (HATFIELD et al., 2008). Quando a folha está sob condição de estresse hídrico, quimicamente ocorre uma degradação desses pigmentos, além de proteínas em função do aumento de temperatura da folha, reduzindo a capacidade das folhas em absorver radiação eletromagnética, o que provoca um aumento dos valores do fator de reflectância na região do visível, mencionam os autores.

A concentração de clorofila pode ser obtida usando-se a reflectância dos comprimentos de onda 550 nm e 675 nm, relacionados ao estado nutricional da planta, e nos 970 nm para plantas com estresse hídrico (PEÑUELAS; FILELLA, 1998). Segundo esses autores, o cálculo da reflectância associada a diferentes variáveis fisiológicas pode ser desenvolvido para auxiliar no diagnóstico de condições graves de estresse na planta.

Nesse contexto, técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral, em nível de campo e de laboratório, vêm sendo utilizadas para ajudar na interpretação da energia refletida ou absorvida pelas plantas (YI et al., 2012; YI et al., 2014a; ZHANG et al., 2012; ZYGIELBAUM et al., 2009), o que pode simplificar e agilizar o processo de estimativa do estado hídrico das culturas.

O objetivo do presente estudo foi verificar o efeito do déficit hídrico em folhas de cana-de-açúcar utilizando dados hiperespectrais, em condições de ambiente protegido (casa de vegetação).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em ambiente protegido (casa de vegetação, que apresentava uma cobertura de filme plástico de polietileno transparente, de 150 µm de espessura e laterais fechadas, com tela tipo sombrite, com 30% de interceptação), em Piracicaba, SP, Brasil (coordenadas geográficas 22°42'32" S e 47°37'45" W, considerando o Datum WGS84). Durante esse período, os valores de temperatura e umidade relativa (UR) apresentaram uma média de 19,99 °C e 77,33 %, respectivamente.

O plantio foi realizado no dia 12 de abril de 2013 utilizando a variedade de cana-de-açúcar RB93509. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso (DBC), sendo os tratamentos distribuídos em três blocos, totalizando, cinco tratamentos repetidos três vezes, para um total de 60 caixas. Em cada caixa foram utilizadas quatro mudas de cana-de-açúcar com aproximadamente 60 dias de idade, provenientes do processo de micropropagação.

O solo utilizado nas caixas foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), de textura franco-arenosa, segundo a classificação brasileira de solos da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA, 2013). As características químicas do solo foram determinadas por uma amostragem e são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado das análises químicas do solo utilizado no estudo

Blocos	pH	M.O.	P	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							%
1	5,3	7	27	11	1,0	20	8	16	29	45	64
2	5,4	5	28	8	1,2	20	8	18	29	47	62
3	5,4	5	28	14	1,2	19	8	18	28	46	61

Fonte: Scanavini (2014)

Sensores foram instalados no centro da casa de vegetação e acima do dossel da cultura, para garantir o monitoramento dos elementos meteorológicos ao longo do experimento, a saber temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), através de um sensor Vaissala (HMP45C-L12 - Campbell Sci.) e radiação solar global (MJ m⁻²), utilizando um piranômetro (LP02-L12 - Campbell Sci.).

Durante a condução do experimento as estratégias de irrigação foram seguidas com base na demanda hídrica e não apenas no número de dias, uma vez que para definir as datas de irrigação dos tratamentos ao longo do tempo, a Evapotranspiração acumulada (EToAc - mm) foi calculada, realizando-se as irrigações com base nos níveis de EToAc.

Para o cálculo da ETo diária, o fluxo diário de calor no solo (G) foi desprezado,

pois sua magnitude é relativamente pequena. Como a velocidade do vento no interior da estufa é muito baixa, esse valor foi fixado em 0,5 m s⁻¹, conforme sugerido no Boletim FAO 56 para ambientes desse tipo, melhorando a precisão da estimativa, nas condições de velocidade muito baixa do vento (ALLEN et al., 1998).

Na Tabela 2 pode-se observar os tratamentos que foram estabelecidos, em função da evapotranspiração acumulada (EToAc) teórica e real. No decorrer do experimento, não foi possível um controle para proceder às irrigações exatamente nos valores de EToAc pré-estabelecidos, por isso, estratégias de antecipação ou adiantamento da irrigação, para que o valor de EToAc real até a data da irrigação fosse o mais próximo do valor pré-estabelecido.

Tabela 2. Estratégias de irrigação considerando intervalos de EToAc pré-estabelecida e real

EToAc teórica (mm)	EToAc real(mm)	T1	T2	T3	T4	T5
-	0,00	M	L	L	L	
10	11,28	M				L
15	16,40	M	L			
30	29,41	M				
40	40,17	M				L
45	47,12	M	L			
55	55,96	M				
70	70,83	M				L
75	75,40	M	L			
95	94,53	M		L		
100	101,46	M				L
105	105,99	M	L			
130	129,23	M			L	L
135	135,49	M	L			
140	140,70	M				
160	160,30	M				L
165	167,18	M	L			
170	171,31	M				
175	176,22	M				
190	188,63	M		L		L
195	193,32	M	L			
200		M				
205		M				
210		M				

M: Manejo da irrigação, mantendo o solo na capacidade de campo; L: Lâmina de irrigação de 30 mm.

Fonte: Scanavini (2014).

A evapotranspiração de referência para o interior da estufa (ETo) foi estimada utilizando o método padrão proposto pela

FAO (ALLEN et al., 1998), conforme a equação (1).

$$ETo = \frac{0,108 \Delta (R_n G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (DPV)}{\Delta + \gamma (1+0,34 u_2)} \quad (1)$$

Em que:

ETo é evapotranspiração de referência, em mm dia⁻¹; Rn é o saldo de radiação na superfície, em MJ m⁻² dia⁻¹; G é o fluxo de calor no solo, em MJ m⁻² dia⁻¹; T é a temperatura média do ar a 2 m de altura, em °C; u₂ é a velocidade do vento a

2 m de altura, em m s⁻¹; DPV é o déficit de pressão de vapor, em kPa; Δ é a declividade da curva de pressão de vapor, em kPa °C⁻¹; e γ é a constante psicrométrica, em kPa °C⁻¹.

No início da irrigação, os primeiros quatro tratamentos (T1 a T4) receberam uma lâmina de 30 mm, enquanto no tratamento T5 não foi aplicada lâmina alguma, sendo as mudas transplantadas em solo seco. Como o tratamento T5 não recebeu irrigação inicial e teve intervalos maiores que 15 dias entre uma e outra irrigação, o que permitiu observar as possíveis mudanças na intensidade de reflectância durante o experimento.

Logo após o plantio das mudas, adotou-se a lâmina de irrigação de 30 mm, pois a maioria das usinas de cana-de-açúcar têm como principal equipamento para irrigação o carretel enrolador. Deste modo, é recomendada a utilização de uma lâmina de 30 mm, visto que grande parte da água é perdida por evaporação, caso a lâmina seja menor que este valor, podendo o volume de água não ser o suficiente para a umidade alcançar o sistema radicular das mudas.

No tratamento T1, o monitoramento da umidade do solo foi utilizado como base para manejar a irrigação, no qual os tensiômetros de punção foram instalados a 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm, de profundidade, cujas leituras foram realizadas em intervalo máximo de três dias, utilizando um tensiômetro digital. Entretanto, para os demais tratamentos o manejo da irrigação foi pré-estabelecido levando-se em conta o apresentado na Tabela 2 e que foi baseado nos intervalos definidos de ETo.

Nos tratamentos T2 até T5 foi instalado o sistema de TDR, utilizando o Reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific, Logan, Utah), onde foi alocada uma sonda no centro de cada unidade experimental, no intuito de definir a umidade do solo na camada de 0-25 cm, a qual posteriormente foi calibrada seguindo o método proposto por Miranda (2012), a qual posteriormente foi obtida a equação de umidade do solo.

O sensor utilizado foi o espectrorradiômetro ASD FieldSpec 3

(Analytical Spectral Device, Boulder, CO, EUA), com uma faixa espectral entre 350 nm e 2500 nm, com resolução espectral de 1,4 nm, na faixa de 350 nm a 1050 nm, e 2 nm na faixa de 1050 nm a 2500 nm. As leituras espectrais foram realizadas apontando o cabo de fibra óptica com 25° de campo de visada de posição nadir a 2 cm de distância da folha, obtendo assim uma área de 1,39 cm². As leituras espectrais foram realizadas para todos os tratamentos no início do estágio vegetativo, aos 12 dias após emergência (DAE), quando a maioria das plantas já apresentava perfilhamento.

As leituras espectrais, obtidas a partir da média de dez leituras realizadas pelo sensor, foram obtidas entre 10h e 11h30 da manhã para minimizar os efeitos de perturbações atmosféricas e distribuição da reflectância bi-direcional, usando o terço médio da folha +1, na face adaxial da superfície foliar (ZYGIELBAUM et al., 2009). Três leituras por semana foram realizadas em cada tratamento durante cinco meses, nas quais foram mensuradas quatro plantas por caixa, cuja calibração foi realizada a cada 4 leituras, utilizando uma placa branca de sulfato de bário (BaSO₄).

Após efetuadas as leituras espectrais, cada curva foi pré-processada no software ParLes 3.1, com a finalidade de reduzir possíveis efeitos aleatórios de ruídos e remover picos estreitos do espectro, além de melhorar a relação sinal-ruído e reduzir a não-linearidade (VISCARRA ROSSEL, 2008). A técnica, denominada de suavização, foi realizada sobre os dados de reflectância bruta.

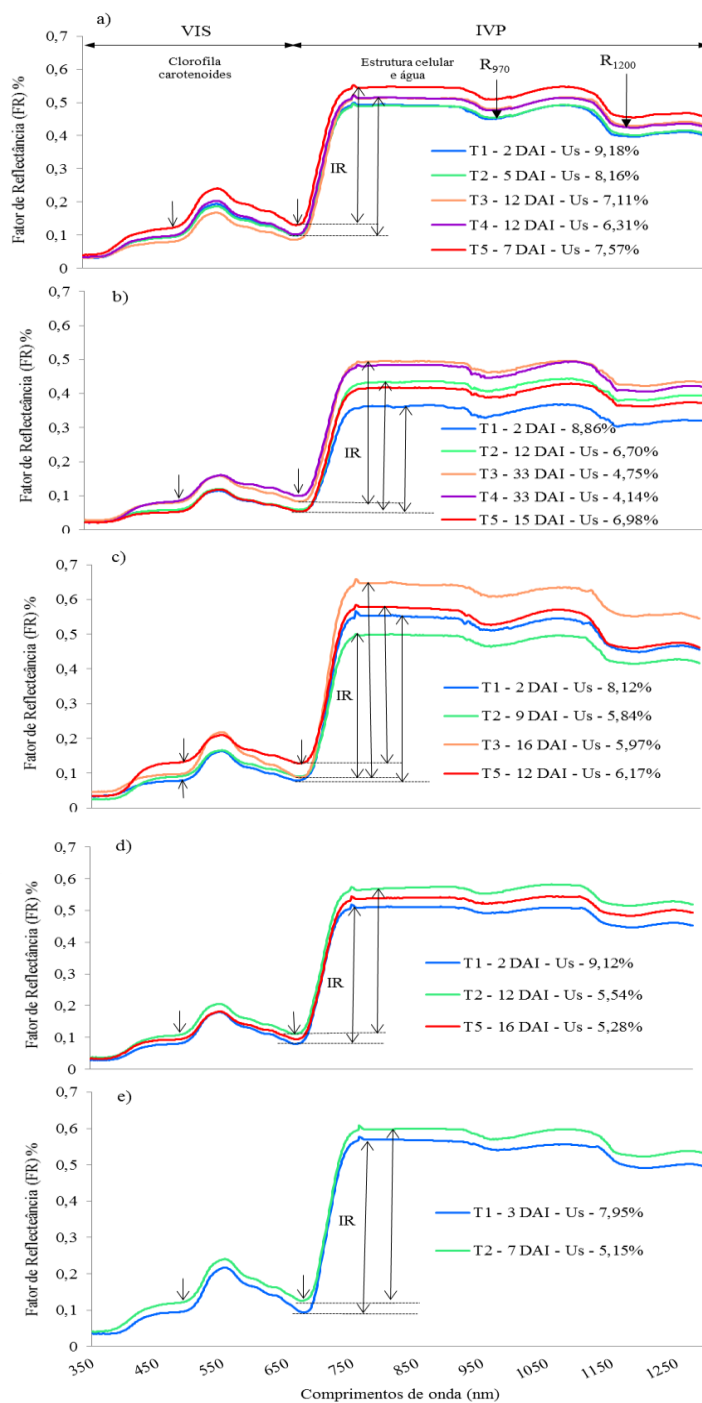
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas espectrais médias dos cinco tratamentos (T1 a T5) com diferentes intervalos de irrigação são expostas na Figura 1. Pode-se notar que o tratamento T5, cuja irrigação ocorreu 6 DAE, apresentou curva espectral com

intensidades de reflectância acima dos demais tratamentos (Figura 1a). Os tratamentos T1 e T2 apresentaram comportamentos espectrais similares, já que

ambos receberam cinco e duas irrigações, respectivamente, até o momento da leitura espectral.

Figura 1. Comportamento espectral dos cinco tratamentos irrigados com base nos intervalos de evapotranspiração acumulada (EToAc). (a) 12 DAE, (b) 33 DAE, (c) 68 DAE, (d) 96 DAE, (e) 115 DAE. (DAE: dias após emergência. DAI: dias após a irrigação. VIS: visível. IVP: infravermelho próximo. Us: umidade do solo. IR: intensidade de reflectância).



Para a região do visível (VIS), no T5, principalmente na região do vermelho, houve uma menor absorção de energia, que está relacionada com a fotossíntese da planta, em relação aos demais tratamentos (T1 a T4). Tal fato pode estar relacionado a uma degradação da clorofila, pois na curva observou-se uma maior reflectância nos comprimentos de onda do amarelo (565 a 590 nm) e do laranja (590 a 625 nm), o que está de acordo com Gitelson e Merzlyak (1997) e Hatfield et al. (2008)

Na região do infravermelho próximo (750 nm a 1300 nm), região influenciada pela estrutura interna da folha, observaram-se mudanças na intensidade de reflectância das curvas espectrais entre os cinco tratamentos, ocorrendo diminuições nas feições de absorção da energia eletromagnética localizadas em 970 nm e 1200 nm, comprimentos de onda associados ao conteúdo de água na folha (ZHANG et al., 2010) (Figura 1a).

Na avaliação dos 33 DAE (Figura 1b), foi observada uma variação da intensidade de reflectância na região do visível para os tratamentos T3 e T4, ou seja, uma diminuição na absorção dos pigmentos fotossintetizantes que dominam essa região (445 nm no azul e 670 nm no vermelho) (HATFIELD et al., 2008). Na região do infravermelho próximo as curvas espectrais desses tratamentos apresentaram um aumento na intensidade da reflectância comparado com os demais tratamentos.

A umidade do solo para os tratamentos T3 e T4 foi de 4,75% e 4,14%, respectivamente, valores que foram baixos, considerando que umidades de até 6% correspondem a solos no ponto de murcha permanente (PMP). Isso refletiu nas curvas espectrais (Figura 1b), ou seja, observou-se um aumento na intensidade de reflectância da curva espectral quando a umidade do solo foi baixa (< 6%). Já para os tratamentos T1, T2 e T5, onde as umidades do solo foram maiores que 6,7%, a intensidade de

reflectância da curva espectral diminuiu, sendo que estes tratamentos receberam várias irrigações.

É possível que a falta de irrigação tenha afetado a estrutura da folha. Segundo Elsayed, Mistele e Schmidhalter (2011), fatores como a disponibilidade de água alteram a estrutura do mesófilo, aumentando o espalhamento da radiação incidente e, conseqüentemente, os valores de reflectância.

Para 68 DAE, a intensidade de reflectância da curva espectral aumentou em todos os tratamentos (Figura 1c). No visível, observou-se uma diminuição nas feições de absorção pelos pigmentos, principalmente do tratamento T5, enquanto que, no infravermelho próximo, o incremento na intensidade de reflectância foi observado entre o tratamento T3 e os demais, causado, possivelmente, pelo déficit hídrico. As feições de absorção da água diminuíram, principalmente no comprimento de onda 970 nm.

Aos 96 DAE observou-se um aumento na intensidade da reflectância nos tratamentos T1, T2 e T5 (Figura 1d). No visível, não se observaram variações na intensidade das curvas espectrais para os três tratamentos. No entanto, no infravermelho próximo foram observadas variações na intensidade das curvas espectrais entre os tratamentos. O tratamento T1 apresentou menores valores de reflectância quando os valores de umidade do solo foram maiores.

No caso dos tratamentos T2 e T5, observaram-se aumentos nos valores de reflectância, quando os valores de umidade do solo dos respectivos tratamentos foram menores (Figura 1d). As feições de absorção da água, em 970 nm e 1200 nm foram pouco acentuadas. Leituras espectrais dos tratamentos T3 e T4 não foram realizadas, devido à ausência da folha +1 pois houve redução simultânea da taxa de emissão de folhas novas e aumento da

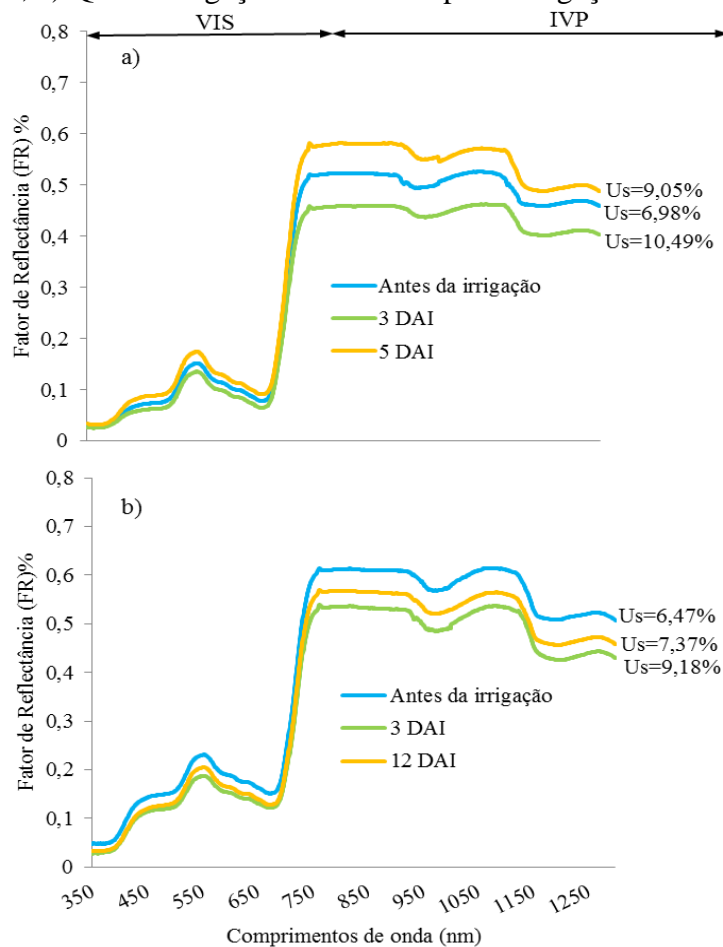
taxa de senescência, no que resulta em um número reduzido de folhas verdes. Inman-Bamber (2004) e Smit e Singels (2006) relataram uma diminuição na taxa de emissão das folhas, ocorrendo ao mesmo tempo uma aceleração da senescência das folhas mais velhas devido ao estresse hídrico.

Para 115 DAE (Figura 1e), observou-se um aumento na intensidade da reflectância dos tratamentos T1 e T2, tanto no visível quanto no infravermelho próximo, com uma pequena diferença entre eles, ou seja, quanto maior o valor da umidade do solo, menor o valor de reflectância observado. Após os 115 dias do plantio, só foi possível obter leituras espectrais nos tratamentos T1 e T2, devido

à ausência da folha +1 nos outros tratamentos.

Avaliando as curvas espectrais do T5 (Figuras 2a – 2b) nas diferentes épocas de avaliação apresentaram um comportamento espectral similar, ou seja, observaram-se variações na intensidade de reflectância relacionadas aos dias após a irrigação e à umidade do solo. Plantas com 15 dias sem irrigar apresentaram um fator de reflectância (FR) de 0,5 (Figura 2a). No entanto, após 3 DAI o valor de FR diminuiu a 0,45 com uma $U_s= 10,49\%$, indicando, possivelmente, um ganho de umidade da folha, ou seja, uma reidratação da mesma. Já, após 5 DAI, quando se observou uma queda da umidade do solo ($U_s=9,05\%$), a intensidade da reflectância aumentou ($FR=0,6$).

Figura 2. Resposta espectral do tratamento T5, antes e depois de uma irrigação. a) Terceira irrigação; b) Quarta irrigação. DAI: dias após a irrigação. U_s : umidade do solo



Após 23 dias sem irrigação, a intensidade da reflectância ficou acima de 0,6 (Figura 2b). Entretanto, após 3 DAI o valor de FR diminuiu até 0,53 e aumentou levemente após 12 DAI. Estes valores indicam não só a reidratação das plantas, mas também que, por meio das curvas espectrais, foi possível observar esse comportamento. É importante salientar que as variações na intensidade de reflectância foram observadas com maior intensidade, principalmente, na região do infravermelho próximo em ambas as situações, com leves variações na região do visível.

A partir dos 7 DAI as mudanças na intensidade da reflectância começaram a ser percebidas, principalmente no infravermelho próximo. Já para 33 DAI as mudanças no infravermelho foram mais marcantes. Na faixa de 950-970 nm observaram-se leves feições de absorção causadas pela água. Segundo Peñuelas et al. (1997), as feições nessa faixa tendem a desaparecer quando as plantas são submetidas a estresse hídrico. Feições de absorção em 975 nm e 1200 nm tornaram-se evidentes à medida que o conteúdo de água na folha aumentou (PU et al., 2003). Assim mesmo, Yi et al. (2014b) observaram fortes picos de absorção nas regiões do IVP e IVM quando o conteúdo de água das folhas aumentou.

Zhang, Li e Zhang (2012) observaram baixa reflectância na região de 700 nm a 1000 nm e alta reflectância na região de 400 nm a 700 nm, em folhas de *Epipremnum aureum* com alto teor de água. Próximo de 585 nm, de 670 nm (causado pela absorção da clorofila) e 986 nm, também foram observados baixos valores de reflectância, além disso, houve uma fraca absorção próximo de 970 nm. Os autores finalizam afirmando que o forte incremento da reflectância entre 680 nm a 780 nm mascarou completamente a informação de absorção da água em 760 nm.

Na região do visível, feições de absorção associadas aos pigmentos fotossintetizantes não mostraram mudanças para os diferentes tempos decorridos após a última irrigação e que pudessem ser associadas ao déficit hídrico (Figura 2b). Muitas culturas fotossintetizam ainda quando submetidas a um estresse hídrico inicial, fato que ocorre provavelmente porque os estômatos respondem mais lentamente à tensão do que à turgescência das células, responsável pela expansão das folhas (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Pela análise visual realizada, observou-se uma relação entre a umidade do solo e o comportamento espectral da folha de cana-de-açúcar, uma vez que, quanto maior a umidade do solo, menores foram os valores de reflectância dos tratamentos, onde foi observado em todas as datas avaliadas. Assim, novas pesquisas devem ser desenvolvidas, visando a comprovar quantitativamente tal relação, utilizando sensoriamento remoto hiperespectral.

6 CONCLUSÕES

Foi observado neste estudo que sensor hiperespectral detectou variações de déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar em estágio inicial.

Nas condições em que este estudo foi conduzido, o aumento na intensidade de resposta espectral das folhas de cana-de-açúcar tem relação com a diminuição na umidade do solo.

Portanto, com o emprego de dados hiperespectrais foi possível observar mudanças na intensidade de reflectância, principalmente na região do infravermelho próximo, conforme o déficit hídrico foi imposto nos tratamentos.

7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, D. **Crop evapotranspiration: guides for computing crop water requirements** Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- CHENG, T.; RIVARD, B.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, A. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 2, p. 659–670, 2011.
- COSTA, V. M. Irrigação em cana-de-açúcar: uma realidade ainda oculta no Brasil. **STAB Açúcar, Álcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 30, n. 3, p. 15-17, nov./dez. 2011.
- DAS, B.; MAHAJAN, G. R.; SINGH, R. Hyperspectral Remote Sensing: Use in Detecting Abiotic Stresses in Agriculture. In: BAL, S.; MUKHERJEE, J.; CHOUDHURY, B.; DHAWAN, A. (Ed.). **Advances in Crop Environment Interaction**. Singapura: Springer, 2018.
- ELSAYED, S.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Can changes in leaf water potential be assessed spectrally? **Functional Plant Biology**, Clayton South, v. 38, n. 6, p. 523-533, 2011.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **International Journal of Remote Sensing**, Oxfordshire, v. 18, n. 12, p. 2691-2697, 1997.
- HATFIELD, J. L.; GITELSON, A. A.; SCHEPERS, J. S.; WALTHALL, C. L. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. S117-S131, 2008. Suplemento 3.
- INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 185–202, 2005.
- MIRANDA, J. H. D. **Aplicação da refletometria no domínio do tempo (TDR) na estimativa da condutividade elétrica da solução do solo e concentração de nitrato, potássio, e cloreto em coluna de solo não saturado**. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- MIRZAIE, M.; DARVISHZADEH, R.; SHAKIBA, A.; MATKAN, A.A.; ATZBERGER, C.; SKIDMORE, A. Comparative analysis of different uni- and multi-variate methods for estimation of vegetation water content using hyper-spectral measurements. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 26, p. 1-11. 2014.

- DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L.; FARIAS, C. H.; AZEVEDO, H.; AZEVEDO, C. A. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 283–288, 2006.
- PALMER, K. F.; WILLIAMS, D. Optical properties of water in the near infrared. **Journal of the Optical Society of America**, Washington, v. 64, n. 8, p. 1107-1110, 1974.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 3, n. 4, p. 151-156, 1998.
- PEÑUELAS, J.; PIÑOL, J.; OGAYA, R.; FILELLA, I. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, Oxfordshire, v. 18, n. 13, p. 2869–2875, Sept. 1997.
- PU, R.; GE, S.; KELLY, N. M.; GONG, P. Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. **International Journal of Remote Sensing**, Oxfordshire, v. 24, n. 9, p. 1799–1810, 2003.
- SCANAVINI, J. G. **Estratégias de irrigação para viveiros de cana-de-açúcar com mudas provenientes de micropropagação (Biofábrica)**. 2014. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 84, n. 4, p. 526–537, 2003.
- SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, n. 2/3, p. 91-97, 2006.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. ParLeS: software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 72-83, 2008.
- WANG, Q.; LI, P. Identification of robust hyperspectral indices on forest leaf water content using PROSPECT simulated dataset and field reflectance measurements. **Hydrological Processes**, West Sussex, v. 26, n. 8, p. 1230-1241, 2012.
- YI, Q.; BAO, A.; WANG, Q.; ZHAO, J. Estimation of leaf water content in cotton by means of hyperspectral indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 90, p. 144–151, 2012.
- YI, Q.; JIAPAER, G.; CHEN, J.; BAO, A.; WANG, F. Different units of measurement of carotenoids estimation in cotton using hyperspectral indices and partial least square

regression. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 91, p. 72–84, 2014a.

YI, Q.; WANG, F.; BAO, A.; JIAPAER, G. Leaf and canopy water content estimation in cotton using hyperspectral indices and radiative transfer models. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 33, p. 67–75, 2014b.

ZHANG, J.; XU, Y.; YAO, F.; WANG, P.; GUO, W.; LI, L.; YANG, L. Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques. **Science China Technological Sciences**, Beijing, v. 53, n. 5, p. 1159-1167, 2010.

ZHANG, L.; ZHOU, Z.; ZHANG, G.; MENG, Y.; CHEN, B.; WANG, Y. Monitoring the leaf water content and specific leaf weight of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in saline soil using leaf spectral reflectance. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 41, p. 103–117, 2012.

ZHANG, Q.; LI, Q.; ZHANG, G. Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection. **Journal of Spectroscopy**, New York, v. 27, n. 2, p. 93–105, 2012.

ZYGIELBAUM, A. I. GITELSON, A. A.; ARKEBAUER, T. J.; RUNDQUIST, D. C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize. **Geophysical Research Letters**, New Jersey, v. 36, n. 12, p. L12403, June 2009.