

Dados espectrais de dossel de cana-de-açúcar para predição do teor relativo de clorofila

Peterson Ricardo Fiorio¹
Juliano Araujo Martins²
Pedro Paulo da Silva Barros¹
José Paulo Molin¹
Lucas Rios do Amaral¹

¹ Universidade de São Paulo - USP/ESALQ
Avenida Pádua Dias 11, CEP - 13418-900 - Piracicaba - SP, Brasil
{fiorio, pedropaulo, jpmolin}@usp.br, lucasamaral@agronomo.eng.br

² Instituto Federal de Mato Grosso - IFMT
Avenida Tancredo Neves 543 - 78890-000 - Sorriso - MT, Brasil
julianoaraujo3@gmail.com

Abstract. In order to verify the possibility of in season nitrogen monitoring, using spectral canopy sensors in sugarcane fields, an randomized block design experiment with 4 treatment (N rates: 0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹) and 4 replications was installed in a sugarcane-production Field in the municipality of Pradópolis, São Paulo state, Brazil. The FieldSpec 4 device was used to evaluate the canopy spectral response in 5 points previously marked within each plot, when the crop was on average height of 0.7 m in the main stem. In these collection points were sampled relative chlorophyll content (RCC) with SPAD-502 portable chlorophyll meter, used as a reference for models development. The correlations of each band with N rates applied and the RCC were performed. The most significant spectral wavelength correlation to RCC were 550, 720 and 750 nm ($r = -0.50, -0.69$ and -0.77 , respectively). Data from green (550 nm) and Near Infrared (750 nm) spectral region were used to the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), showing a good correlation to RCC ($r = 0.68$). Linear combinations of selected bands and NDVI was performed by stepwise multiple linear regression, using 64 samples, where the equation parameters showed adjustment of $R^2 = 0.69$ and a standard error of 0.81 and in the validation phase the estimated and observed data, showed correlation of 0.80 with the trendline close to 1:1 line in the scatter plot. The results showed that the green (550 nm), red-edge (720 nm) and near infrared (750 nm) was the most significant spectral regions to estimate de RCC content in sugarcane.

Palavras-chave: Nitrogen, In-season evaluation, Reflectance.

1. Introdução

A utilização de clorofilômetros para o monitoramento do estado nutricional do nitrogênio em culturas, apesar de apresentar boa sensibilidade, possui grande limitação para utilização em agricultura de precisão, uma vez que no monitoramento de grandes áreas, grande número de amostras são requeridas para a geração de um mapa de variabilidade fidedigna a realidade de campo (MIAO *et al.*, 2008).

Neste caso, sensores de dossel acoplados em maquinário agrícola poderiam ser mais eficientes, devido a sua capacidade de gerar mapas com grande detalhamento espacial, onde, por meio da implementação de um algoritmo, permite a quantificação e aplicação de fertilizantes nitrogenados em tempo real.

Estas técnicas já vêm sendo estudadas em muitas áreas produtivas do globo, em diferentes culturas e sistemas produtivos, onde resultados promissores têm sido alcançados, tendo destaque trabalhos com milho, trigo (CHEN *et al.*, 2010), arroz (SONG *et al.*, 2011). No entanto estudos neste sentido na cultura da cana-de-açúcar ainda são escassos (MIPHOKASAP *et al.*, 2012; PORTZ *et al.*, 2011).

Tendo em vista que a cana-de-açúcar possui grande importância econômica, por se tratar de uma fonte renovável de energia, com altíssimo potencial produtivo e aliado a relativa carência de pesquisa sobre a aplicação do sensoriamento remoto na otimização da cadeia produtiva desta cultura, fica evidente a necessidade de investigações neste sentido, que possam vir a oferecer alternativas tecnológicas no auxílio do monitoramento desta cultura.

Neste sentido o presente trabalho visou desenvolver um modelo a partir de um sensor hiperespectral de campo para a estimativa do Teor Relativo de Clorofila (TRC) tendo como base, dados mensurados por um clorofilômetro portátil.

2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi desenvolvido em um canal comercial localizado no município de Pradópolis-SP, nas coordenadas 21°15'08" S e 48°06'56" O. O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho, cultivado com a variedade CTC2, em quarto corte. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de doses de N (0, 60, 120 e 180 kg N ha⁻¹), aplicados em parcelas com dimensões de 10 m por 5 linhas de plantio. A fonte N foi o Nitrato de Amônio.

Para aquisição dos dados espectrais foi utilizado o aparelho FieldSpec 4 spectroradiometer, com resolução espectral de 1 nm de 400 a 2500 nm (). O aparelho foi posicionado um metro acima do dossel, quando as plantas da área experimental possuíam em média 0,7 metro de altura de colmos, em cinco pontos previamente demarcados dentro da área útil da parcela (Figura 1). Todas as avaliações foram realizadas no dia 19/12/2012.

Devido a interação das moléculas de água presente na atmosfera com a energia eletromagnética, as curvas espectrais obtidas a campo, apresentam alto nível de ruído nos comprimentos de onda centrados em 1400 nm e 1900 nm, portanto estas regiões foram eliminadas do conjunto de dados.

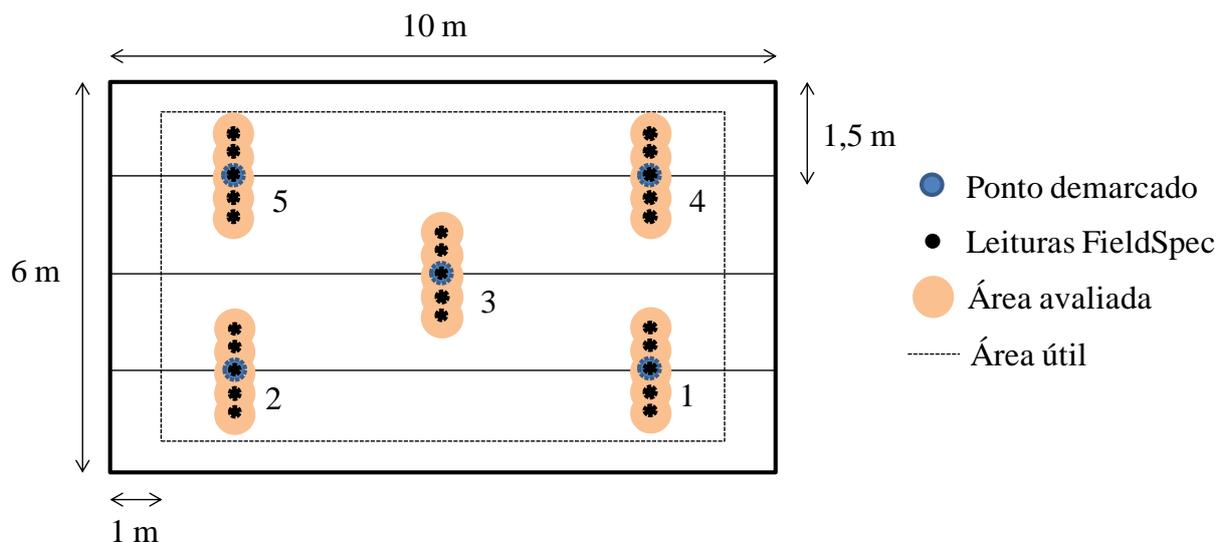


Figura 1. Esquema de uma subparcela da área experimental e plano de avaliação.

As medidas do TRC, foram realizadas utilizando o clorofilômetro SPAD-502 (Spectrum Technologies, Plainfield, IL, USA), em quatro folhas diagnóstico “+1”, para cada ponto amostrado pelo espectrorradiômetro. Tanto para os dados espectrais como para o TRC foram utilizados os valores médios de cada ponto para análise. O TRC não possui unidade definida, mas valores elevados estão diretamente relacionados com o teor absoluto de clorofila.

A partir das curvas espectrais, iniciou-se a seleção das bandas que melhor explicam as variações do TRC nos dados analisados. Primeiramente realizou-se a análise de correlação de cada comprimento de onda com os resultados do TRC. Para testar a significância da correlação, aplicou-se o teste t de student, sendo que nesta fase foram mantidos apenas os comprimentos de onda que apresentaram significância igual ou maior ao nível de 5% de probabilidade.

Posteriormente, partindo dos comprimentos de onda mais correlacionados com o TRC, foi realizada a correlação com as demais bandas, sendo que quando estas mostravam coeficientes de correlação maiores que 0,8, o comprimento de onda com menor correlação com a variável predita era eliminada. Este processo foi realizado de modo a selecionar as bandas com maiores correlações significativas com a variável predita e ao mesmo tempo eliminar as variáveis predictoras com alta intercorrelação, reduzindo assim os efeitos da multicolinearidade.

Utilizando dados da região do vermelho e do infravermelho próximo, foi calculado também o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), conforme proposto por Lichtenhaler et al. (1996), calculado pela equação 1.

$$\text{NDVI} = \frac{750 \text{ nm} - 550 \text{ nm}}{750 \text{ nm} + 550 \text{ nm}} \quad (1)$$

Com as variáveis selecionadas foi gerado um modelo de regressão linear múltipla por *stepwise* para predição do teor relativo de clorofila, onde dos 80 pontos amostrados na área experimental, foram utilizados dados de 64 pontos para geração do modelo e os 16 restantes foram separados aleatoriamente do conjunto inicial e utilizados posteriormente na fase de validação do modelo. A eficiência do modelo de validação, foi avaliado de acordo com o coeficiente de determinação, erro médio de predição e a proximidade da linha de tendência central da dispersão entre dados estimados e observados, em relação a linha 1:1.

3. Resultados e Discussão

O aumento das doses de nitrogênio ocasionou redução na reflectância das folhas (Figura 2, com redução mais acentuada na região do verde e do infravermelho próximo. Apesar da clorofila absorver menos energia eletromagnética na região do azul e vermelho, o aumento da concentração deste pigmento reduz a energia refletida em toda a região do visível (LAMB *et al.*, 2002), o tratamento que não recebeu aplicação de nitrogênio, mostrou maiores reflectância nesta região, mais evidente no verde e na transição entre verde e vermelho (520 a 650 nm), o que visualmente ocasiona uma coloração verde clara a amarelada uniforme, típica da deficiência de nitrogênio.

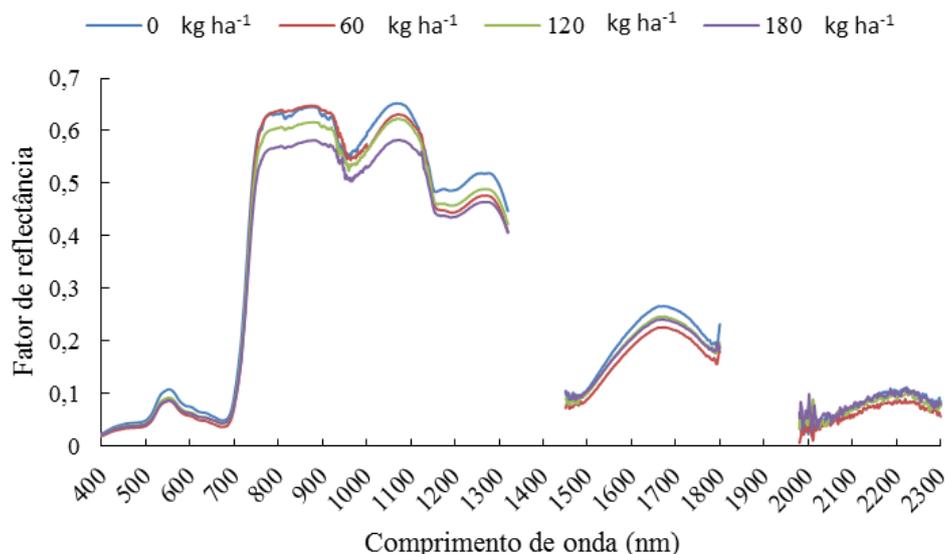


Figura 2. Curva espectral média do dossel da cultura da cana-de-açúcar, sob aplicação de diferentes doses de nitrogênio.

Para a região do infravermelho próximo as doses também tiveram ação inversa sobre a reflectância do dossel, ou seja, maiores doses ocasionaram menor reflectância nesta região espectral. Esta região é afetada principalmente pela estrutura celular da vegetação, diferença de refração entre o conteúdo de água e ar presente na folha, e a reflectância aditiva, diretamente ligada ao Índice de Área Foliar (DATT, 1999).

Para a faixa do espectro analisada, foi observada correlação significativa no intervalo entre 520-610 nm e 720 a 1070 nm, tanto para com as doses de nitrogênio como para o TRC. Nas demais regiões as correlações foram fracas, apresentando além disso, muitos ruídos aleatórios e, portanto, estes dados foram excluídos das análises posteriores (Figura 3). A maior parte dos modelos e índices disponíveis na literatura, apontam comprimentos de ondas similares como os mais significativos para a predição do nitrogênio na vegetação (RANJAN *et al.*, 2012).

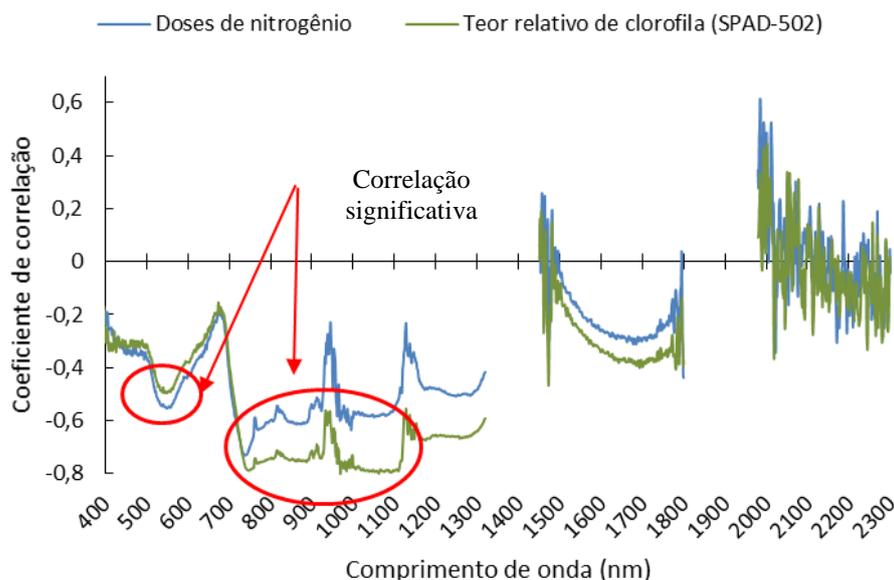


Figura 3. Correlação das doses de N aplicadas e teor relativo de clorofila medida pelo clorofilômetro SPAD-502 com cada banda do sensor FiledSpec.

Os comprimentos de onda mais significativos para a avaliação do TRC foram o 550 nm (verde), a região de transição entre o visível e o infravermelho próximo, conhecida como *red-edge* (725 nm) (Boochs *et al.*, 1990) e outra na região do infravermelho próximo (750 nm), com coeficientes de correlação de -0,50, -0,69 e -0,77 respectivamente (Tabela 1).

Os resultados obtidos pelo cálculo do NDVI, mostraram correlação significativa de 0,68 com o TRC (Tabela 1). Embora os resultados sejam inferiores aos observados para os valores de reflectância absoluta em diferentes comprimentos de onda, os índices tendem a ser mais estáveis quando avaliações em diferentes espécies, culturas, variedades e ambientes de cultivos, uma vez que a relação entre bandas são menos sensíveis a tais variações (LI *et al.*, 2010)

Tabela 1. Matriz de correlação entre o Teor Relativo de Clorofila (TRC) com as bandas selecionadas e o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI).

	Doses de N	TRC	B550	B725	B750	NDVI
Doses de N	1,00					
TRC	0,61	1,00				
B550	-0,57	-0,50	1,00			
B725	-0,71	-0,69	0,75	1,00		
B750	-0,72	-0,77	0,60	0,78	1,00	
NDVI	0,57	0,68	-0,19	-0,44	-0,90	1,00

A combinação linear das variáveis selecionadas por regressão linear múltipla por *stepwise* mostrou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,69 com os valores do TRC medidos pelos clorofilômetro SPAD-502, com erro médio de 0,81 TRC (valor do SPAD-502) (Tabela 2). O modelo combinado entre valores de reflectância das bandas e o NDVI, foi estatisticamente melhor que os modelos utilizando apenas as bandas ou o índice separadamente, por esta razão apenas os resultados para o modelo combinado será apresentado.

Tabela 2. Parâmetros descritivos da equação para determinação do teor relativo de clorofila por dados espectrais de dossel com as bandas selecionadas (550, 725 e 750 nm) e o NDVI.

R-Quadrado	0,77
R-quadrado ajustado	0,69
Erro padrão	0,81
Observações	64
Modelo	$Y = -54,94 + 1137,86*B550 - 189,74*B725 - 567,48*B750 - 594,06*NDVI$

A validação do modelo mostrou que a correlação entre os valores estimados pelo modelo espectral de dossel e os valores do TRC medidos pelo aparelho SPAD-502 foi eficiente, apresentando coeficiente de correlação significativo de 0,8, com a linha de tendência entre os valores estimados e observados muito próximos a linha 1:1 como exibido no gráfico de dispersão (Figura 4). Este comportamento já foi observado por outros autores, como apresentado por Miao et al. (2008), que porém obteve melhores resultados na fase de calibração e validação, estudando a cultura do milho em duas áreas no estado de Minnesota nos Estados Unidos.

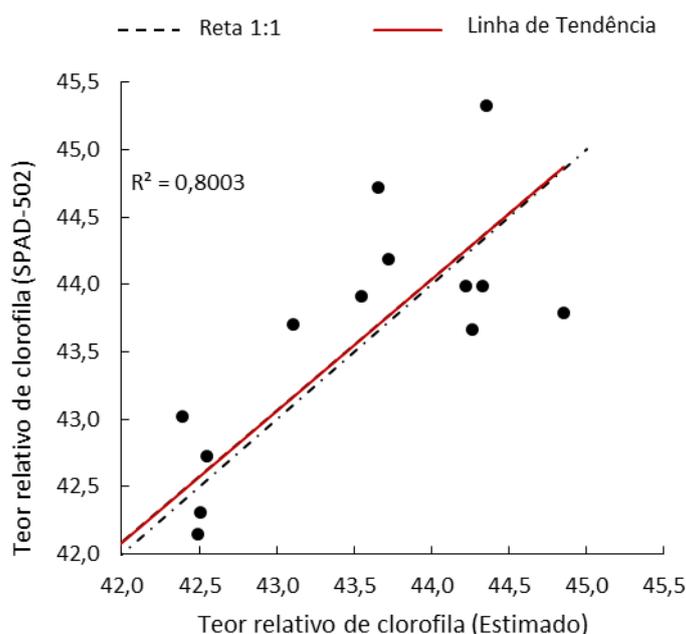


Figura 4. Validação do modelo espectral para predição do teor relativo de clorofila.

Apesar do pequeno universo amostral do presente trabalho, observa-se que a resposta espectral do dossel da cana-de-açúcar é sensível a variação de pigmentos da folha que por sua vez está diretamente ligado ao estado nutricional de nitrogênio na vegetação. Deste modo o conhecimento detalhado desta relação poderá auxiliar de forma significativa o monitoramento e gerenciamento da aplicação deste nutriente. Este conhecimento fornece subsídios para a realização de trabalhos mais robustos, que englobem mais variedades, ambientes de produção e condições mais extremas de estresse de nitrogênio na cultura.

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que existe boa correlação entre a resposta espectral do dossel e o teor de clorofila presente na cultura da cana-de-açúcar, sendo as regiões espectrais mais importantes o verde (550 nm), *red-edge* (720 nm) e infravermelho próximo (750 nm).

Agradecimentos

À agência de Financiamento de Estudos e Projetos (FINEP), pelo financiamento do projeto ao qual pertence a presente pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Boochs, F., Kupfer, G., Dockter, K., Kühbauch, W. Shape of the red-edge as vitality indicator for plants. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, p. 1741–1753, 1990.
- Chen, P., Haboudane, D., Tremblay, N., Wang, J., Vigneault, P., Li, B. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1987–1997, 2010.
- Datt, B. Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 14, p. 2741–2759, 1999.
- Lamb, D. W., Steyn-Ross, M., Schaare, P., Hanna, M. M. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium spp.*) pasture using the chlorophyll rededge Theoretical modeling and experimental observations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, p. 3619–3648, 2002.
- Li, F., Miao, Y., Hennig, S. D., Gnyp, M. L., Chen, X., Jia, L., Bareth, G. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 4, p. 335–357, 2010.
- Lichtenthaler, H. K., Lang, M., Sowinska, M., Heisel, F., Mieh, J. A. Detection of vegetation stress via a new high-resolution fluorescence imaging system. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, p. 599–612, 1996.
- Miao, Y., Mulla, D. J., Randall, G. W., Vetsch, J., Vintila, R. Combining chlorophyll meter readings and high spatial resolution remote sensing images for in-season site-specific nitrogen management of corn. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 45–62, 2008.
- Miphokasap, P., Honda, K., Vaiphasa, C., Souris, M., Nagai, M. Estimating Canopy Nitrogen Concentration in Sugarcane Using Field Imaging Spectroscopy. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, 1651–1670, 2012.
- Portz, G., Molin, J. P., Jasper, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 33–44.
- Ranjan, R., Chopra, U. K., Sahoo, R. N., Singh, A. K., Pradhan, S. Assessment of plant nitrogen stress in wheat (*Triticum aestivum L.*) through hyperspectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 20, 6342–6360, 2012.
- Song, S., Gong, W., Zhu, B., Huang, X. Wavelength selection and spectral discrimination for paddy rice, with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 5, p. 672–682 2011.