**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Dados hiperespectrais de dossel e sua correlação com
nitrogênio aplicado a cultura da cana-de-açúcar**

Pedro Paulo da Silva Barros

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Pedro Paulo da Silva Barros
Engenheiro Agrônomo

**Dados hiperespectrais de dossel e sua correlação com nitrogênio
aplicado a cultura da cana-de-açúcar**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PETERSON RICARDO FIORIO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Barros, Pedro Paulo da Silva

Dados hiperespectrais de dossel e sua correlação com nitrogênio aplicado a cultura da cana-de-açúcar / Pedro Paulo da Silva Barros. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.

132 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Adubação nitrogenada 2. *Saccharum* spp. 3. Sensoriamento remoto 4. Reflectância hiperespectral I. Título

CDD 633.61
B277d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a **Deus**, por não deixar que eu me abrandasse nas horas difíceis.

Agradeço a minha família que sempre me apoiou em todos os momentos e decisões, que sem ela não sou um quarto do homem que sou hoje e nem teria essa oportunidade de aperfeiçoamento dos meus conhecimentos. Pois com o exemplo que tive de união, respeito, educação, caráter e amor também fez parte desses 9 anos de Esalq (MBA, Mestrado e Doutorado). Em especial a minha mãe **Damiana**, minha madrinha e também mãe **Amália**, minha tia **Maria** e meu primo **Matheus**.

E também agradeço o amor, apoio e a força da mulher da minha vida **Fernanda Menegotto**.

À Universidade de São Paulo e Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e a todos os professores do curso de Pós-graduação em Engenharia de Biossistemas, pelas condições de aprendizagem, oferecidas durante o transcorrer do curso.

Gostaria de expressar minha gratidão a meu orientador **Peterson Ricardo Fiorio**, pelo seu suporte, orientação, amizade e por me apresentar esta linha de pesquisa.

Aos professores em especial **Rubens Ângulo Filho**, **Carlo A. Vettorazzi**, **Sérgio N. Duarte**, **José A. M. Demattê** em que tive ótimas aulas, conselhos, sugestões e conversas informais que propiciaram sem dúvida, grande evolução na minha longa jornada em busca do conhecimento.

Aos funcionários do departamento de Engenharia de Biossistemas, pela cordialidade e suporte sempre que necessitei, em especial **Gilmar, Beatriz, Davilmar e Lúcia.**

À **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)**, por fomentar o projeto de pesquisa nº 2013/22435-9 ao qual este trabalho se insere.

À **Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP)**, que por meio do projeto PROSENSAP, possibilitou a aquisição do radiômetro utilizado neste trabalho.

Ao Pesquisador **Heitor Cantarella, Pós-doc Zaqueu Montezano** e sua equipe de pesquisa do **Instituto Agronômico de Campinas**, que por meio de parcerias possibilitou o desenvolvimento deste trabalho junto a áreas experimentais referente ao projeto temático BIOEN/FAPESP 2008/56147-1.

Gostaria de agradecer também as amizades que cultivei nos anos em que estive na instituição, em especial **Juliano A. Martins, Érica S. Nakai, Magda M. Z. Bonilla, Raoni W. D. Bosquilia, Ana Carolina do Nascimento, Ana P. Barbosa, Taila F. Strabeli, Mauricio Martello, Tiago R. Tavares, Cristiane Calaboni, Isaac de M. Ponciano e Rodrigo Muniz.**

Ao grupo TOPOGEO pela imensa ajuda e apoio nos trabalhos externos e internos, que sem eles não chegaria aos resultados que obtive. Grandes amizades surgiram nos trabalhos de campo em especial **Hugo T. Seixas, Marcela Bruscatin, Bruna Polez.**

EPÍGRAFE

*“Conhecimento não é aquilo que você sabe,
mas o que você faz com aquilo que você sabe.”*

Aldous Huxley

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO.....	21
Referências	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Origem da cana-de-açúcar	25
2.1.1 Introdução da cana-de-açúcar na América e no Brasil	25
2.2 Aspectos gerais	29
2.3 A cana-de-açúcar e a necessidade de nitrogênio.....	33
2.4 Sensoriamento remoto.....	37
2.5 Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação	38
2.6 Utilização de sensores remotos no monitoramento do nitrogênio.....	39
Referências	42
3 ANÁLISE DE DADOS HIPERESPECTRAIS PARA DIFERENCIAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO APLICADO EM CANA-DE-AÇÚCAR	51
Resumo	51
Abstract	51
3.1 Introdução.....	52
3.2 Material e métodos	54
3.2.1 Área de estudo	54
3.2.2 Marcação das parcelas e obtenção das leituras espectrais.....	55
3.2.3 Análise do teor foliar de nitrogênio	58
3.2.4 Análise estatística	60
3.3 Resultados e discussão	61

3.3.1	Análise discriminante de Jaú.....	61
3.3.2	Análise discriminante de Piracicaba.....	64
3.3.3	Análise discriminante de Santa Maria da Serra	67
3.3.4	Análise discriminante das áreas em conjunto com 145 DAC de média	71
3.3.5	Comprimentos de ondas significantes para discriminar doses de nitrogênio .	73
3.4	Conclusão	76
	Referências.....	76
4	ANÁLISE TEMPORAL DE DADOS ESPECTRAIS DE DOSSEL DE CANA-DE-AÇÚCAR E SUA CORRELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DE BIOMASSA	80
	Resumo	80
	Abstract.....	80
4.1	Introdução	81
4.2	Material e métodos.....	83
4.2.1	Área de estudo	83
4.2.2	Marcação das parcelas e obtenção das leituras espectrais	85
4.2.3	Obtenção dos dados de biomassa	87
4.2.4	Análise estatística	88
4.3	Resultados e discussão	90
4.3.1	Análise estatística descritiva dos dados de ponteiro	90
4.3.2	Avaliação das correlações dos meses estudados.....	92
4.3.3	Avaliação dos comprimentos de ondas com correlação significativa	93
4.4	Conclusão	97
	Referências.....	97
5	ESTIMATIVA DO TEOR FOLIAR DE NITROGÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE DADOS HIPERESPECTRAIS DE DOSSEL	102
	Resumo	102
	Abstract.....	102
5.1	Introdução	103

5.2	Material e métodos	106
5.2.1	Área de estudo	106
5.2.2	Marcação das parcelas e obtenção das leituras espectrais.....	110
5.2.3	Análise do teor foliar de nitrogênio	113
5.2.4	Análise estatística	114
5.3	Resultados e discussões	117
5.3.1	Resultados para a análise foliar de nitrogênio e distribuição mensal das precipitações para as áreas experimentais	117
5.3.2	Seleção de variáveis preditoras pelo método sPLS.....	121
5.3.3	Calibração de modelos de regressão linear múltipla por stepwise (SMLR) ..	123
5.3.4	Validação dos modelos de regressão múltipla por stepwise.....	124
5.4	Conclusão.....	127
	Referências	127

RESUMO

Dados hiperespectrais de dossel e sua correlação com nitrogênio aplicado a cultura da cana-de-açúcar

A utilização de dados provenientes do sensoriamento remoto é alternativa para otimizar a utilização de insumos, dentre eles o nitrogênio. O presente trabalho teve como objetivo verificar a possibilidade de uso de um sensor hiperespectral em dossel na cultura da cana-de-açúcar, verificando sua capacidade em discriminar a resposta da cultura as diferentes doses de nitrogênio e estimar o teor foliar de nitrogênio, em três áreas experimentais. O trabalho foi dividido em três capítulos: O primeiro capítulo utiliza os dados hiperespectrais somente da variedade SP 81-3250, única comum em todas as áreas, de todas as datas de coleta das três áreas experimentais para verificar o potencial dos dados em diferenciar as doses de nitrogênio aplicado (0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹) e qual melhor época. Os dados espectrais foram avaliados pela estatística multivariada da análise discriminante, em que os centroides das diferentes doses foram submetidos a análise de variância. Os resultados obtidos foram que os meses de dezembro, janeiro e fevereiro discriminou todas as doses nas três áreas, o mesmo não ocorreu no mês de agosto. As bandas que apresentaram maiores significância foram na região do verde, *red-edge* e infravermelho próximo. No segundo capítulo foi avaliado a sensibilidade dos dados hiperespectrais em estimar a biomassa do ponteiro da cana-de-açúcar. Para isso foi utilizado somente os dados de Piracicaba. A análise espectral foi realizada aos 137, 169 e 193 Dias Após o Corte (DAC) e a avaliação biométrica foi realizada aos 345 DAC. Durante o corte de dois metros de linha, realizado manualmente. A biomassa do ponteiro foi submetida ao teste de Shapiro-Wilk, análise de variância pelo Teste F e as médias quando significativas, comparadas pelo Teste de Tukey. Posteriormente foi realizada a análise de correlação de Pearson da biomassa do ponteiro e cada comprimento de onda. Análise mostrou que existe correlação positiva entre a biomassa do ponteiro e a reflectância do dossel aos 137 DAC e 169 DAC, porém aos 193 DAC não houve nenhum comprimento de onda com correlação significativa. O comprimento de onda de 685 nm aos 137 DAC obteve a maior correlação, de 0,33. No terceiro capítulo teve por objetivo selecionar variáveis a partir de dados hiperespectrais de dossel da cana-de-açúcar para geração de modelos para predição do Teor Foliar de Nitrogênio. Para isso foi utilizado os dados das três áreas experimentais, que receberam doses de 0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹ de nitrogênio. Para redução da dimensionalidade dos dados foi utilizada a metodologia sparse Partial Least Square (sPLS), posteriormente foi feito a combinação linear das variáveis selecionadas, por meio de Regressão Linear Múltipla por Stepwise (SMLR). O modelo geral teve valores de R² ajustado e RMSE respectivamente de 0,50 e 1,67 g kg⁻¹. Os modelos gerados para Piracicaba, Jaú e Santa Maria obtiveram R² ajustado, respectivamente, de 0,31, 0,53 e 0,54. Sensores hiperespectrais de dossel podem ser utilizados para predição do TFN e monitoramento de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Adubação nitrogenada; *Saccharum* spp.; Sensoriamento remoto; Reflectância hiperespectral

ABSTRACT

Hyperspectral data of canopy and it nitrogen applied in sugarcane crop

The use of data from remote sensing is an alternative to optimize the use of agricultural inputs, including nitrogen. The present study aimed to verify the possibility of using a hyperspectral sensor in sugarcane canopy, verifying its ability to discriminate crop response to different rates of nitrogen and estimating leaf nitrogen content in three experimental areas. The work is divided in three chapters: The first chapter uses hyperspectral data of the variety SP 81-3250, which is the only one present in all the areas for all dates of collection in three of experimental areas, to check the potential of the data and the best time to differentiate between rates of nitrogen (0, 50, 100 and 150 kg.ha⁻¹). Spectral data were evaluated by multivariate discriminant analysis, wherein the centroids of the rates were submitted to an Analysis of Variance. The results showed that the all doses in three areas of study were discriminated for the months of December, January and February, but the same thing hasn't happened in the month of August. The bands that showed statistically significant power difference were found in the green, red, and near-infrared edge spectral regions. In the second chapter, the sensitivity of hyperspectral data was evaluated to estimate the sugarcane biomass (pointes) for the data from Piracicaba. Spectral analysis was performed at 137, 169 and 193 Days After Harvest (DAH) and evaluation of sugarcane yield was performed 345 DAH. Biomass was analyzed using The Shapiro-Wilk test of normality, F test (analysis of variance), respectively, and when significant, compared by the Tukey test. Biomass (pointer) and each wavelength were analyzed by Pearson's correlation analysis. The results showed that there is a positive correlation between biomass (pointer) and the canopy reflectance to 137 DAH and 169 DAH, however there was no wavelength with a significant correlation to 193 DAH. The best power relationship was obtained at 685 nm, at 137 days. The third chapter aimed to select variables from hyperspectral data of sugarcane canopy to generate models for prediction of Foliar Nitrogen Content, for three experimental areas that received nitrogen rates (0, 50, 100 and 150 kg.ha⁻¹). Sparse Partial Least Square (sPLS) was used to reduce the dimensionality of the data. Subsequently, the linear combination of selected variables was done through Stepwise Multiple Linear Regression (SMLR). The RMSE and adjusted R-squared statistics were 0.50 and 1.67 g.kg⁻¹, respectively. The models to Piracicaba, Jaú and Santa Maria presented adjusted R-squared 0.31, 0.53, and 0.54, respectively. Hyperspectral sensors for canopy can be used for prediction of the TFN and monitoring of nitrogen application in sugarcane.

Keywords: Nitrogen fertilization; *Saccharum* spp.; Remote sensing; Hyperspectral reflectance

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Curva de fator de reflectância típica de uma folha verde.....	38
Figura 3-1 - Demarcação de plantas das áreas experimentais: (A) Escolha e marcação das plantas com fita (B) Plantas marcadas em estágio fenológico avançado.....	56
Figura 3-2 - Esquema de uma subparcela e plano de avaliação.....	56
Figura 3-3 - Aquisição dos dados espectrais em campo: (A) Obtenção da resposta espectral de dossel em campo em estágio fenológico intermediário com utilização de escada; (B) FieldSpec acoplado à uma base para proporcionar leituras em estágio fenológico avançado; (C) Fibra óptica acoplada a base (D) Base “escada” utilizada em estágio fenológico avançado como apoio ao aparelho.....	58
Figura 3-4 - Localização das plantas coletadas.	59
Figura 3-5 - Passos para coleta de amostras: (A) Localização da folha diagnóstico +1; (B) Amostragem de 10 folhas por subparcela; (C) Acondicionamento das folhas coletadas em sacos plásticos numerados; (D) Transporte das folhas coletadas do campo para o laboratório.....	59
Figura 3-6 - Análise discriminante de Jaú aos 114 DAC.	62
Figura 3-7 - Análise discriminante de Jaú aos 148 DAC.	62
Figura 3-8 - Análise discriminante de Jaú aos 357 DAC.	63
Figura 3-9 - Análise discriminante de Piracicaba aos 137 DAC.	64
Figura 3-10 - Análise discriminante de Piracicaba aos 169 DAC.	65
Figura 3-11 - Análise discriminante de Piracicaba aos 193 DAC.	66
Figura 3-12 - Análise discriminante de Piracicaba aos 340 DAC.	66
Figura 3-13 - Análise discriminante de Santa Maria aos 81 DAC.....	68
Figura 3-14 - Análise discriminante de Santa Maria aos 115 DAC.....	68
Figura 3-15 - Análise discriminante de Santa Maria aos 146 DAC.....	69
Figura 3-16 - Análise discriminante de Santa Maria aos 167 DAC.....	70
Figura 3-17 - Análise discriminante de Santa Maria aos 311 DAC.....	70
Figura 3-18 - Boxplot da análise de nitrogênio das três áreas para o mês de janeiro/2014.	72
Figura 3-19 - Análise discriminante das 3 áreas para o mês de janeiro/2014.	73

Figura 3-20 - Principais comprimentos de onda para diferenciação do nitrogênio. ..	74
Figura 4-1 - Área de estudo.	84
Figura 4-2 - Precipitação acumulada mensal e normal durante o período do experimento.	84
Figura 4-3 - Demarcação de plantas das áreas experimentais: (A) Escolha e marcação das plantas com fita plástica zebrada (B) Plantas marcadas em estágio fenológico avançado.	85
Figura 4-4 - Esquema da subparcela e plano de avaliação.	86
Figura 4-5 - Obtenção da resposta espectral de dossel em campo em estágio fenológico intermediário com utilização de escada multifuncional: (A) Localização do ponto demarcado; (B) Leitura espectral; (C) Leitura espectral vista de cima.	87
Figura 4-6 - Metodologia de obtenção dos dados de biomassa: (A) Marcação de 2 metros de linha; (B) Colheita; (C) Retirada; (D) Separação; (E) Catalogação do material por número da subparcela e (D) Pesagem.	88
Figura 4-7 - Procedimento de obtenção da curva espectral média da subparcela. ..	89
Figura 4-8 - Teste de tukey a 5% de probabilidade para verificar entre quais doses ocorrem diferenças significativas para ponteiro.	90
Figura 4-9 - Coeficientes de correlação de Pearson entre cada comprimento de onda da curva espectral da cana-de-açúcar e a biomassa do ponteiro dos três meses avaliados. Linhas contínuas indicam correlação significativa, de acordo com o teste t ($p \leq 0,1$).	92
Figura 4-10 - Curvas espectrais (650 a 700 nm) de janeiro (137 DAC) para diferentes valores de ponteiro.	94
Figura 4-11 - Curvas espectrais (720 a 1440 nm) de fevereiro (169 DAC) para diferentes valores de ponteiro.	95
Figura 4-12 - Curvas espectrais (1440 a 1790 nm) de janeiro (137 DAC) para diferentes valores de ponteiro.	96
Figura 5-1 - Localização da Área 1, conduzida em Jaú-SP.	107
Figura 5-2 - Localização da Área 2, conduzida em Piracicaba-SP.	108
Figura 5-3 - Localização da Área 3, conduzida em Santa Maria da Serra-SP.	109
Figura 5-4 - Demarcação de plantas das áreas experimentais: (A) Escolha e marcação das plantas com fita plástica zebrada; (B) Plantas marcadas em estágio fenológico avançado.	110

Figura 5-5 - Esquema de uma subparcela e plano de avaliação.....	111
continue conforme correção acima/corrigido	
Figura 5-6 - Aquisição dos dados espectrais em campo: (A) Obtenção da resposta espectral de dossel em campo em estágio fenológico intermediário com utilização de escada; (B) FieldSpec acoplado à uma base para proporcionar leituras em estágio fenológico avançado; (C) Fibra óptica acoplada a base (D) Escada multifuncional utilizada em estágio fenológico avançado como apoio ao aparelho.....	113
Figura 5-7 - Localização das plantas coletadas.	114
Figura 5-8 - Procedimento de obtenção da curva espectral média da subparcela. .	115
Figura 5-9 - Boxplot para os resultados do teor foliar de nitrogênio (g.kg^{-1}) para geral, Jaú (148 DAC), Piracicaba (169 DAC) e Santa Maria da Serra (146 DAC).	118
Figura 5-10 - Precipitação acumulada mensal para as Áreas de Jaú e Santa Maria da Serra (Dados do INMET – A741 de Barra Bonita, SP).	120
Figura 5-11 - Precipitação acumulada mensal para a Área 2 de Piracicaba	121
Figura 5-12 - Resultados para os coeficientes (sPLS), para redução de dimensão e seleção de variáveis para predição do nitrogênio em cana-de-açúcar, para dados de reflectância das três áreas experimentais.	122
Figura 5-13 - Resultados da fase de validação dos modelos de Regressão Múltipla por Stepwise para estimativa do teor foliar de nitrogênio em cana-de-açúcar.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Extração e Exportação de potássio (K), nitrogênio (N), cálcio (Ca), magnésio (Ca) e fósforo (P) para a variedade de cana-de-açúcar SP81–3250 conduzidas sob manejo de irrigação plena.....	35
Tabela 3-1 - Localização e descrição das áreas experimentais.....	54
Tabela 3-2 - Descrição das datas de coletas.	57
Tabela 4-1 - Descrição das datas de coletas	86
Tabela 4-2 - Estatística descritiva da biomassa do ponteiro (kg) por diferentes doses de nitrogênio.	91
Tabela 4-3 - Estatística descritiva das correlações entre os comprimentos de onda e ponteiro em janeiro.....	92
Tabela 4-4 - Estatística descritiva das correlações entre os comprimentos de onda e ponteiro em fevereiro.	93
Tabela 5-1 - Descrição das variedades e doses de nitrogênio nas áreas experimentais.....	110
Tabela 5-2 - Descrição das datas de coletas.	112
Tabela 5-3 - Calibração de modelos de Regressão Linear Múltipla por Stepwise para predição do Teor Foliar Nitrogênio em cana-de-açúcar por área experimental e combinando os dados de todas as áreas para os dados de reflectância. Nas equações, a letra B representa o comprimento de onda utilizado no modelo.	123

1 INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é um dos mais avançados sistemas de matérias-primas para bioenergia (LONG et al., 2015). O sistema de produção da cana tem balanço energético positivo e benefícios como baixa emissão de gases, mitigando assim os impactos ambientais, como o aumento do efeito estufa (SOUZA et al., 2012).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área plantada de 9,0 milhões de hectares na safra 2014/2015. Houve um crescimento de 2% em relação à safra anterior, com colheita de cerca de 634,7 milhões de toneladas na safra 2014/2015, o que reflete consequentemente, no país maior produtor mundial de açúcar e álcool (CONAB, 2015). Sua produção está concentrada nos estados do Centro-Sul e Nordeste, com destaque ao estado de São Paulo. Ele é responsável por cerca de 60% da produção nacional de cana de açúcar, etanol e açúcar (RUDORFF et al., 2010).

A adubação nitrogenada se constitui como um dos principais fatores abióticos determinantes para a produtividade da cana-de-açúcar, uma vez que o nitrogênio é um dos nutrientes mais absorvidos pela cultura (FRANCO et al., 2011). Mas apenas 20% ou menos do adubo nitrogenado aplicado é usado pela cana-de-açúcar, o que aumenta a preocupação com o meio ambiente e saúde pública, devido a contaminação do lençol freático, bem como fatores econômicos (VIEIRA-MEGDA et al., 2015; MARIANO et al., 2016).

Embora constitua cerca de 1% da matéria seca total da cana-de-açúcar, o nitrogênio está diretamente envolvido na síntese de aminoácidos, na composição da molécula de clorofila e na produção de carboidratos. Portanto, o nitrogênio desempenha função determinante no crescimento e desenvolvimento da cultura, contribuindo positivamente para o crescimento e a qualidade dos colmos no processo de moagem, bem como para o vigor da planta. Dessa forma, o manejo inadequado da adubação nitrogenada nos canaviais pode acarretar diminuição da produtividade e da longevidade da cultura, reduzindo, o número de colheitas ou cortes entre as reformas (MARIANO et al., 2016).

A deficiência de nitrogênio pode prejudicar o desenvolvimento da cultura, mas em excesso também pode ser prejudicial, causando diminuição nos níveis de açúcar e aumentando o tempo para o amadurecimento (VITTI et al., 2008). Portanto, um monitoramento e gestão eficaz do teor de nitrogênio são essenciais, mas para sua

estimativa em laboratório é necessário retirar as amostras, pré-tratar, transportar, realizar a análise e comunicar o resultado, tornando-se um processo dispendioso e moroso.

As técnicas de sensoriamento remoto, por outro lado, não são destrutivas e tem uma resposta mais rápida, sendo necessário estudos que possibilitem seu uso como ferramenta de monitoramento e diagnóstico para estimativa do teor de nitrogênio na cultura.

A principal motivação do estudo da vegetação envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, fundamenta-se na compreensão da “aparência” que uma dada cobertura vegetal assume em um determinado produto, a qual é fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais. Há de se considerar que um dossel é constituído por muitos elementos da própria vegetação, como folhas, galhos, frutos, flores, etc. De todos os elementos constituintes da vegetação, a folha é o principal quando se considera o processo de interação descrito.

A folha, segundo Del'arcosanches; Anderson; Rojas (2003), é o principal órgão absorvedor da radiação eletromagnética da vegetação. A medição dessa energia absorvida, como também da transmitida e refletida podem ser obtidas por sensores em laboratório, campo, aerotransportados ou orbitais. O comportamento espectral de uma folha se dá em função de sua composição, morfologia e estrutura interna.

Na análise do comportamento espectral, Colwell (1974) afirma que as folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado por sensores, influenciada principalmente pela morfologia interna (distribuição, quantidade de tecidos e espaços intercelulares), tipo e quantidade de pigmentos fotossintetizantes, característicos de cada espécie.

Procurando entender melhor estes processos, vários trabalhos buscam utilizar o sensoriamento remoto, com sensores ativos ou passivos, em nível terrestre (JAIN et al., 2007; ABDEL-RAHMAN; AHMED; VAN DEN BERG, 2010; MIPHOKASAP et al., 2012) e orbital (SMITH et al., 2003; ABDEL-RAHMAN; AHMED; ISMAIL, 2013), sendo que alguns trabalhos já estão sendo desenvolvidos com cana-de-açúcar no Brasil (MOLIN, 2010; AMARAL et al., 2015; ROSA et al., 2015). No entanto, estas pesquisas realizadas nas condições brasileiras até o presente momento adotaram tecnologias previamente desenvolvidas em outras

regiões do globo e para outras culturas, que trabalham com comprimentos de onda e índices de vegetação pré-definidos, o que pode não ser ideal para as condições brasileiras e principalmente para as características fisiológicas da cana-de-açúcar.

Neste sentido, seria então possível com a utilização de sensores hiperespectrais selecionar comprimentos de onda mais correlacionados com a estimativa do teor de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar? A partir desta questão, surge o objetivo do presente trabalho, que visa selecionar os comprimentos de onda com maior correlação com a variação do teor foliar de nitrogênio e desenvolver um modelo espectral específico a partir do dossel da cultura da cana-de-açúcar.

Referências

- ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; ISMAIL, R. Random forest regression and spectral band selection for estimating sugarcane leaf nitrogen concentration using EO-1 Hyperion hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 34, n. 2, p. 712-728, 2013.
- ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; VAN DEN BERG, M. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 12, Supplement 1, p. S52-S57, 2010.
- AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F.B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2015.
- COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 3, n. 3, p. 175-183, 1974.
- CONAB. **Acompanhamento de safra 2013/2014**. Brasília, 2015. 19p.
- DEL'ARCOSANCHES, I.; ANDERSON, L.O.; ROJAS, E.H.M. Influência do tempo após a coleta de folhas na reflectância e transmitância. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003. Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte, 2003. p.2605-2612.
- FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; ALMEIDA DE OLIVEIRA, E.C.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 29-41, 2011.
- JAIN, N.; RAY, S.S.; SINGH, J.P.; PANIGRAHY, S. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 8, n. 4-5, p. 225-239, 2007.

LONG, S.P.; KARP, A.; BUCKERIDGE, M.S.; MURPHY, D.J.; ONWONA-AGYEMANG, S.; VONSHAKH, A. Feedstocks for Biofuels and Bioenergy. In: SOUZA, G. M.; VICTORIA, R.L.; JOLY, C.A.; VERDADE, L. M. (Ed.). **Bioenergy and Sustainability: Bridging the Gaps** Paris: Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 2015. cap. 10, p. 302-347.

MARIANO, E. Biomass and Nutrient Content by Sugarcane as Affected by Fertilizer Nitrogen Sources. **Crop Science**, Madison, v. 56, n. 3, p. 1234-1244, 2016.

MIPHOKASAP, P.; HONDA, K.; VAIPHASA, C.; SOURIS, M.; NAGAI, M. Estimating Canopy Nitrogen Concentration in Sugarcane Using Field Imaging Spectroscopy. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 12, p. 1651-1670, 2012.

MOLIN, J.P. Use of active optical sensors for crops in Brazil. **Better Crops**, Peachtree Corners, v. 94, n. 3, p. 18-20, 2010.

ROSA, H.J.A.; AMARAL, L.R.D.; MOLIN, J.P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 9, p. 840-848, 2015.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SMITH, M.-L. MARTIN, M.E.; PLOURDE, L.; OLLINGER, S. V. Analysis of hyperspectral data for estimation of temperate forest canopy nitrogen concentration: comparison between an airborne (AVIRIS) and a spaceborne (Hyperion) sensor. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, New York, v. 41, n. 6, p. 1332-1337, 2003.

SOUZA, A.P. LEITE, D.C.C.; PATTATHIL, S.; HAHN, M.G.; BUCKERIDGE, M.S. Composition and Structure of Sugarcane Cell Wall Polysaccharides: Implications for Second-Generation Bioethanol Production. **BioEnergy Research**, New York, v. 6, n. 2, p. 564-579, 2012.

VIEIRA-MEGDA, M.X.; MARIANO, E.; LEITE, J.M.; FRANCO, H.C.J.; VITTI, A.C.; MEGDA, M.M.; KHAN, S.A.; MULVANEY, R.L.; TRIVELIN, P.C.O. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 101, n. 2, p. 241-257, 2015.

VITTI, A.C.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; ROSSETO, R. Nitrogênio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 239-269.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Origem da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence ao gênero *Saccharum*, família Poaceae e foi descrita taxonomicamente, pela primeira vez, por Linnaeus, em 1753, no livro “Species Plantarum” (HITCHCOCK, 1923).

Segundo Amalraj e Balasundaram (2006), a taxonomia e a nomenclatura do gênero têm sido um desafio. O gênero é conhecido por dois sinônimos, *Saccharophorum* e *Saccharifera*. Quando foi inicialmente descrito, o gênero consistia apenas de cinco a dez espécies originárias do Velho Mundo. O gênero *Saccharum*, atualmente, compreende todas as espécies que foram descritas anteriormente como pertencentes ao gênero *Erianthus* (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011).

A organização taxonômica mais utilizada, e aceita, é a proposta por Daniels e Roach (1987), que descrevem a cana-de-açúcar como membro da família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Andropogoneae, subtribo Saccharinae, grupo Saccharastrae e gênero *Saccharum*.

As atuais cultivares de cana-de-açúcar são híbridos originados de cruzamentos interespecíficos realizados no início do século XX, envolvendo, principalmente, plantas de *S. officinarum* e *S. spontaneum* e retrocruzamento com *S. officinarum*. Estes híbridos são citados como *Saccharum* spp. (LANDELL; BRESSIANI, 2008; CARNEIRO; JUNIOR; HOFFMANN, 2015).

O centro de origem ainda é muito discutido, porém, alguns pesquisadores consideram que a cana-de-açúcar seja nativa do Arquipélago da Polinésia (CESNIK; MIOCQUE, 2004). Porém, provavelmente, o surgimento do gênero *Saccharum* é anterior à atual divisão dos continentes, o que torna difícil determinar a origem da mesma. O que se sabe é que há dois centros de diversidade, o Velho Mundo (Ásia e África) e o Novo Mundo (América do Norte, Central e do Sul) (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011).

2.1.1 Introdução da cana-de-açúcar na América e no Brasil

A introdução da cultura no continente americano ocorreu em 1493, na segunda viagem de Cristóvão Colombo, o qual levou colmos de cana-de-açúcar da Ilha da Madeira para a conhecida, atualmente, República Dominicana. No entanto,

segundo historiadores essa introdução perdeu-se, e apenas em 1509 realizou-se uma nova inserção pela colonização espanhola (STEVENSON, 1965).

A agroindústria de cana-de-açúcar no Brasil, teve um início difícil e com frustradas tentativas em várias regiões, devido a problemas com povos indígenas e invasores. Mas encontrando características edafoclimáticas favoráveis expandiu-se rapidamente (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; LANDELL, 2008).

Os grandes polos açucareiros na colônia foram Pernambuco e Bahia, devido a fatores climáticos, geográficos, políticos e econômicos. As duas capitanias encontravam-se em região costeira, com solo de boa fertilidade e um adequado regime de chuvas. Estavam localizadas mais próximas dos centros importadores europeus e dos principais portos brasileiros, Salvador e Recife, facilitando o escoamento da produção (FAUSTO, 2012).

Os comerciantes tinham papel fundamental no financiamento dos senhores de engenho. As contas eram acertadas no fim da safra, e muitas vezes os comerciantes aceitavam receber açúcar em pagamento das dívidas, mas abaixo do valor de mercado. Os grandes centros importadores eram Amsterdam, Londres, Hamburgo e Genova, além da Metrópole portuguesa (FAUSTO, 2012)

Em razão do aumento da demanda na Europa e da ausência de concorrência, houve uma conjuntura de expansão da produção açucareira entre 1570 e 1620. Por sua vez, três fatores influenciaram negativamente a produção de cana-de-açúcar no século XVII: o início da Guerra dos Trinta Anos na Europa (1618), as invasões holandesas na Bahia (1624-1625) e Pernambuco (1630-1637), e a concorrência das Antilhas na década de 1630 (FAUSTO, 2001).

Apesar desses fatores, o açúcar sempre foi o principal produto de exportação no período colonial. Mesmo no auge do ciclo do ouro, em 1760, o açúcar representava 50% das exportações e o ouro 46%. No século XIX, o açúcar perdeu espaço para o café, que se tornou o principal produto de exportação do Brasil, e deslocou o polo dinâmico do país para o Centro-Sul.

A história da cana-de-açúcar no Brasil é de momentos de apogeu e declínio que tornavam a repetir-se de forma marcante, a partir de meados do século XIX, por vários fatores, nos quais se destacam: intensificação da produção do açúcar de beterraba nos países europeus, o aparecimento da gomose nos canaviais brasileiros e o florescimento da cultura do café (MELONI, 2004).

O fato marcante gerado pelo bloqueio continental da Europa, em 1806, impedindo ao grupo de Napoleão e seus aliados de receber açúcar e outros produtos de suas colônias, levou a promoção do grande concorrente do açúcar produzido da cana, a fabricação do açúcar de beterraba. Esse fato foi possível devido a utilização da técnica do químico prussiano Andrés Marggraff, em 1747. Assim, a matéria-prima da beterraba cultivada na Europa, passou a fazer frente a da cana produzida primeiramente na França e depois em todos os outros países, tornando-se assim um sério problema de concorrência frente a indústria açucareira proveniente da cana (DE CARLI, 1938; MAGALHÃES, 1953).

Apesar de perder o posto de principal produto da economia brasileira, o açúcar começa a se tornar um produto relevante na economia da Província de São Paulo (SZMRECSANYI, 1979). Com a vinda da família real e a independência econômica em 1808, quando a abertura dos portos foi decretada, a agricultura brasileira começou a receber incentivos para o seu desenvolvimento. Datam desse período a criação do Jardim Botânico do Rio de Janeiro (1812), do Curso de Agronomia da Imperial Escola Agrícola da Bahia, primeiro curso da área de ciências agrárias do Brasil, em 1877, e da Imperial Estação Agrônômica de Campinas (1887), originando posteriormente o Instituto Agrônômico de Campinas (IAC) em 1892 (FAUSTO, 2012).

Em 1857, Dom Pedro II elaborou um programa de modernização da produção de açúcar, tornando possível a criação dos Engenhos Centrais. Em 1877 foi instalado o primeiro engenho central na Província de São Paulo, iniciando-se um período de desenvolvimento da agroindústria paulista, que recebiam incentivos do governo imperial, como a garantia de juros sobre o capital investido. Esse período de desenvolvimento durou até 1890, quando se encerraram os incentivos com a Proclamação da República, e tem-se o surgimento das usinas (PEDROSO JUNIOR, 2008).

Para manter o ritmo de crescimento, o Governo Federal desenvolveu diversos programas de investimentos para incentivar à agroindústria canavieira: Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (Planalsucar) em 1971; Programa de Racionalização da Indústria Açucareira em 1971; e Programa de Apoio à Indústria Açucareira em 1973, que substituiu o segundo programa de 1971 (SZMRECSÁNYI; MOREIRA, 1991).

Na década de 1970, a dependência do País em relação ao petróleo (79% era importado) causou um desajuste na balança comercial. A principal medida do Governo foi a elevação da produção de álcool em substituição à gasolina, que deu origem ao Programa Nacional do Álcool (Proálcool) (PEDROSO JUNIOR, 2008).

O Proálcool foi criado pelo governo brasileiro em 1975, como uma tentativa de solucionar o problema energético causado pela crise do petróleo. A justificativa oficial para o aumento da produção de álcool era a necessidade de encontrar um combustível viável para substituir a gasolina automotiva, com o objetivo de aliviar as pressões sobre a balança comercial ocasionadas pela elevação dos preços internacionais do petróleo, então ainda preponderantemente importado (SZMRECSÁNYI; MOREIRA, 1991).

Em menos de cinco anos a produção de pouco mais de 300 milhões de litros ultrapassou a cifra de 11 bilhões de litros, caracterizando o Proálcool como o maior programa de energia renovável já estabelecido em termos mundiais. O desenvolvimento da engenharia nacional, após o segundo choque do petróleo, em 1979, permitiu o surgimento de motores especialmente desenvolvidos para funcionar com álcool hidratado. Em 1984, os carros a etanol passaram a responder por 94,4% da produção das montadoras instaladas no Brasil (DIAS et al., 1999).

Desde 1986, a redução do impacto da crise do petróleo e os planos econômicos internos para combater a inflação estimularam o aumento na produção de carros a etanol e a oferta de etanol não pôde acompanhar o crescimento descompassado da demanda, com as vendas de carro a etanol, que resultou numa crise de abastecimento no ano de 1989. Após este período, o setor entrou em profunda decadência, como as baixas produtividades das áreas cultivadas, mesmo após a revalorização da cultura (SANTANA, 2012).

A queda da demanda do álcool hidratado foi compensada pelo maior uso do anidro (sem água) misturado à gasolina, o que acompanhou o crescimento da frota brasileira de veículos leves. Em março de 2003, foi lançado o carro biocombustível, movido a etanol e gasolina ou com qualquer mistura entre os dois, iniciando uma nova onda de crescimento do setor (SANTANA, 2012).

Embora o objetivo principal do programa fosse substituir as importações de gasolina, este foi muito além e, até o final dos anos 80, tornou-se o maior programa comercial de uso de biomassa para fins energéticos. Atualmente, com a preocupação ambiental do planeta, com o petróleo em alta e com sua boa aceitação

no mercado, o álcool é o combustível do momento, ao lado do biodiesel, e o Brasil, o país com maior potencial para produzir e exportar etanol (BRAGION, 2007).

2.2 Aspectos gerais

O ciclo evolutivo para o cultivo agrícola da cultura pode ser de 12 meses (cana de ano) e 18 meses (cana de ano e meio) em cana-planta. Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses, denominado de cana-soca. Os fatores ambientais que afetam de maneira significativa a produção da cana-de-açúcar são temperatura, irradiância solar, disponibilidade de água e nutrientes no solo (ALFONSI et al., 1987)

O Brasil, por sua grande extensão territorial, apresenta condições climáticas variadas, sendo possivelmente o único país do mundo com dois períodos de safra distintos. A região norte-nordeste colhe sua safra no período de novembro a abril, enquanto a região centro-sul realiza essa atividade de abril a novembro. Assim, o país desfruta não apenas de interessante diversificação geográfica, mas também de maior equilíbrio na safra (ALFONSI et al., 1987).

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical do tipo C4 que se caracteriza por elevada taxa fotossintética e alta produtividade biológica, sendo uma das culturas mais eficientes e produtivas (IRVINE, 1975).

O sistema radicular da cana-de-açúcar é muito amplo e bem desenvolvido, do tipo fasciculado (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007). Existe uma estreita correlação entre o desempenho do sistema radicular e a adaptabilidade da cana para desenvolver-se em diferentes condições hídricas, bióticas ou de textura do solo (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008). Os conhecimentos sobre a distribuição das raízes no solo podem orientar a adubação, a irrigação e as intervenções de cultivo. As características do sistema radicular de cana-de-açúcar têm um papel essencial para a regeneração das soqueiras após a colheita (ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000), principalmente porque é ela que serve de reserva de nutrientes para a rebrota das socas (SAMPAIO; SALCEDO; CAVALCANTI, 1987).

De acordo com Segato et al. (2006), 85% da massa de raízes total encontram-se nos primeiros 50 cm de profundidade, e 60% dessa massa encontra-se na camada de 20 a 30 cm. Outros estudos referentes à distribuição vertical de raízes de cana-de-açúcar no perfil do solo, como por exemplo de Alvarez et al. (2000) e Faroni (2004), que indicaram cerca de 60 a 70 % da quantidade de raízes

concentrando-se nos primeiros 20 cm de profundidade. A quantidade e a distribuição de raízes de cana-de-açúcar mudam ao longo do tempo, devido às alterações naturais no clima e no solo e à ação antrópica (VASCONCELOS, 2002).

Nos primeiros 30 a 40 cm do perfil do solo concentram-se as raízes superficiais ou fibrosas, que são bem ramificadas e extremamente absorventes. As raízes de fixação atingem profundidades maiores, ultrapassando facilmente 50 cm de profundidade. Ao contrário do que sugere o nome, a função das raízes de fixação não se restringe exclusivamente à fixação, pois podem perfeitamente absorver água e nutrientes apesar de com menor eficiência do que as raízes superficiais. Finalmente, atingindo profundidades frequentemente maiores do que 5 metros, estão as raízes-cordão, as quais são muito importantes na absorção de água, e justificam a exigência de solos profundos para o cultivo da cana-de-açúcar (VAN DILLEWIJN, 1952).

Após o corte da cana, o sistema radicular mantém-se em atividade por determinado tempo, sendo depois substituído progressivamente pelos sistemas radiculares dos perfilhos da soqueira (LUCCHESI, 2001). Segundo Van Dillewijn (1952), as raízes das soqueiras são mais superficiais que as da cana planta. Assim, quanto maior o número de cortes, mais superficial fica o sistema radicular das soqueiras.

Segundo Alvarez et al. (2000), isso se deve ao ciclo mais curto da cana soca, à brotação mais próxima à superfície do solo, e à maior susceptibilidade das raízes de cana soca a condições adversas do solo causadas pelo tráfego. De acordo com Beauclair e Scarpari (2007), esse fato pode ser um fator determinante na decisão de reforma de um canavial, e pode ser afetado pelos métodos de preparo nos diferentes tipos de solo.

Um trabalho realizado por Alvarez et al. (2000), em Morro Agudo, com a cultivar de cana-de-açúcar SP 70-1143, tinha como objetivo comparar o crescimento de raízes de cana-de-açúcar colhida crua, mecanizada e após queima colhida manualmente; além de analisar o comportamento do crescimento de raízes de cana crua e cana queimada nos dois primeiros anos de rebrota. Foi observado que as raízes apareciam em maior quantidade em todas camadas do solo em cana crua do que em cana queimada no primeiro ano, e no segundo ano aparecem maiores em cana queimada. As quantidades de raízes foram maiores no primeiro ano que no segundo ano, tanto para cana crua como para cana queimada. As raízes de cana

crua distribuíram-se mais superficialmente no primeiro ano, com 75% nos primeiros 40 cm, do que no 2º ano, com 70%. Em cana queimada a porcentagem de raízes até 40 cm foi de 72%, no primeiro ano e no segundo ano de 68%.

Os colmos apresentam muitas formas, cores e aparências, típicas de cada variedade e muito úteis nas descrições e identificações de cada uma (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008). Os colmos possuem o formato cilíndrico e são compostos por nós e entrenós, podendo comumente ser definido como a parte superior da superfície do solo que sustentam as folhas (DINARDO-MIRANDA et al., 2008).

Na região do nó ocorre a inserção da bainha da folha, a zona radicular em que está inserido uma gema e vários primórdios radiculares; o anel de crescimento que possibilita que ocorra o alongamento do entrenó e também ocorre a zona cerosa (MARTIN, 1961). Quando as folhas mais velhas caem, deixam uma cicatriz, conhecida como cicatriz foliar. Acima dela, na região da inserção da gema, encontra-se a zona radicular, que contém os primórdios radiculares que darão origem ao sistema radicular no plantio das novas mudas (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008).

As folhas são alternadas, opostas (dependendo da variedade) e presas aos nós dos colmos, podendo ser divididas em duas partes: lâmina (parte superior) e bainha (parte inferior). A lâmina é uma estrutura alongada, relativamente plana, de comprimento variável na fase adulta entre 0,5 a 1,5 m, com largura de 2,5 a 10 cm, dependendo da variedade. É sustentada por uma nervura central que se estende por todo comprimento da lâmina da folha. As folhas podem apresentar bordos serrilhados e algumas variedades apresentam pelos finos chamados de joçal, no dorso das bainhas podem dificultar o manuseio (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008).

Com o desenvolvimento da planta, surgem folhas novas e ocorre a senescência das folhas velhas com mobilização dos nutrientes para os órgãos em desenvolvimento. O tamanho das folhas e sua longevidade dependem da variedade e das condições ambientais que a planta está submetida, como teor de nutrientes, clima, ocorrência de déficit hídrico. Segundo Benvenuti (2005) citado por Van Dillewijn (1952), em observações que foram realizadas no Havaí mostraram que as folhas têm vida média de 60 a 75 dias.

O número de folhas por colmo é afetado, principalmente, pelas condições climáticas. O número de folhas verdes é pequeno em plantas jovens e aumenta na medida em que os colmos crescem, promovendo o fechamento gradual do dossel. Dependendo das condições do crescimento e da variedade, o número máximo de

folhas pode variar de 10 a 15 folhas, o que caracteriza uma superfície de interceptação da massa foliar considerável (HUMBERT; GALLARDO, 1974). Silva et al. (2012), estudando a biometria da cana-de-açúcar soca no Vale do São Francisco com a variedade RB 92579 obteve em média 8 a 9 folhas completamente expandida por colmo aos 230 dias após a colheita.

Segundo Farias et al. (2008), em um estudo realizado no município de Capim (PE), com o intuito de se avaliar o comportamento da variedade de cana-de-açúcar SP 79 1011 submetidas a diferentes lâminas de irrigação e variação na adubação com zinco, obteve o índice de área foliar (IAF) máximo com cinco meses de idade, sendo $6,8 \text{ dm}^2.\text{dm}^{-2}$, este parâmetro é importante por se referir a função principal da folha que é a capacidade fotossintética.

As características inerentes a cada genótipo definem o número de colmos por planta, assim como a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento e a largura das folhas e a arquitetura da parte aérea, sendo a expressão destes caracteres muito influenciada pelo clima, pelo manejo e pelas práticas culturais utilizadas. As características das variedades influenciam a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar, além das variações climáticas que prevalecem durante todo o desenvolvimento (RODRIGUES, 1995).

Segundo Ribeiro (2012), a quantidade de estudos envolvendo a cana-de-açúcar não é proporcional à importância desta espécie na agricultura, em termos de fonte alimentar e de energia. Por isso, muitos desafios devem ser superados quanto à fisiologia da cana em busca da melhoria do manejo e aproximação do máximo potencial produtivo das cultivares.

Segundo Barbieri e Villa Nova (1977), as culturas destinadas à produção do açúcar são mais exigentes quanto às condições climáticas. Como há necessidade de alta produção de sacarose, a planta precisa encontrar condições de temperatura e umidade adequadas para seu pleno desenvolvimento na fase vegetativa, seguidas de certa restrição hídrica e/ou térmica para forçar o repouso e o enriquecimento em sacarose na época do corte. O ambiente ideal é aquele onde a precipitação é bem distribuída durante o período de crescimento da planta, seguido por um período relativamente seco antes da colheita, com bastante luminosidade durante toda a estação, pois, segundo os autores, há correlação entre a incidência luminosa e a produção de açúcar.

A qualidade da cana-de-açúcar, enquanto matéria-prima industrial, pode ser definida por uma série de características próprias da planta, alteradas pelo manejo agrícola e industrial, definindo seu potencial para a produção de açúcar e/ou álcool (etanol) (FERNANDES, 2011). Considerado como a principal fonte de matéria-prima para fabricação de açúcar e álcool, o colmo da cana-de-açúcar é a parte da planta de maior importância econômica atualmente, sendo constituído basicamente de: fibra (10 a 12%), composta por celulose, hemicelulose e lignina, e o caldo (82 a 90%), este apresentando 75 a 82% de água e 18 a 25% de sólidos solúveis. Dos sólidos solúveis, 1 a 2% são não-açúcares (sais inorgânicos e orgânicos) e o restante os açúcares redutores totais, sendo 14 a 24% sacarose, 0,2 a 1,0% glicose e 0,0 a 0,5% frutose (LAVANHOLI, 2008).

Atualmente, a produção/acúmulo de biomassa pela planta está se transformando em uma importante característica da cultura, despertando interesse econômico devido ao seu potencial energético, podendo ser utilizada para geração de energia elétrica (bioeletricidade) e, num contexto de futuro, o etanol de segunda geração (etanol celulósico) (MASCHIO, 2011).

2.3 A cana-de-açúcar e a necessidade de nitrogênio

Os macronutrientes primários são constituídos pelo Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K); e o nitrogênio é um nutriente extraído em grandes quantidades para o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, geralmente perdendo apenas para o potássio. Tem importância por ser constituinte de proteínas e ácidos nucléicos e por participar diretamente ou indiretamente de processos bioquímicos e enzimáticos (MALAVOLTA; CESAR VITTI, 1997)

O manejo da adubação nitrogenada tem sido uma das práticas agrícolas mais estudadas (CANTARELLA et al., 2008), tendo em vista que o nitrogênio é um dos nutrientes mais demandado pela maioria das culturas. Isto se deve ao fato de que, boa parte do nitrogênio no solo encontra-se em combinações orgânicas, implicando no uso de adubação nitrogenada para complementar a quantidade fornecida pelo solo, visando à obtenção do aumento de produtividade (OKUMURA; MARIANO, 2012).

A grande importância do nitrogênio para a cana-de-açúcar diz respeito ao fato de ela ser uma planta de metabolismo de carbono do tipo C4, caracterizado por altas taxas de fotossíntese líquida e eficiência na utilização do nitrogênio e da energia

solar, sendo altamente eficiente na produção de fotoassimilados. Como o nitrogênio é parte constituinte de todos os aminoácidos, proteínas e ácidos nucléicos, participando direta ou indiretamente de vários processos bioquímicos, a sua carência promoverá a diminuição na síntese de clorofila, e aminoácidos essenciais, e também da energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (MALAVOLTA; VITTI, 1997)

A exigência em nitrogênio pela cultura da cana-de-açúcar atinge $2,4 \text{ kg Mg}^{-1}$ de colmo (CANTARELLA; ROSSETTO, 2010), extraíndo em média 150 kg ha^{-1} de N (OLIVEIRA et al., 2010; FRANCO et al., 2011). A maior parte encontra-se nos colmos. Resultados obtidos por Franco et al. (2011) mostraram que cerca de 50 % do nitrogênio foi alocado nos colmos, 22 % nas folhas secas, 20 % nos ponteiros e 8 % nas raízes. Ainda segundo esse autor, a distribuição do nitrogênio proveniente dos fertilizantes não variou conforme a dose de nitrogênio empregada. Apesar disso, as doses de nitrogênio influenciaram significativamente a produtividade, sendo as altas produtividades frequentemente associadas à altas doses de nitrogênio (ROY et al., 2006)

Na deficiência deste nutriente, ocorre clorose nas folhas mais velhas, devido a ocorrência da translocação do nutriente para folhas em crescimento na planta, e também pode vir a ocorrer a diminuição da atividade meristemática da parte aérea, resultando em menores perfilhamentos, área foliar e longevidade das folhas (MALAVOLTA et al., 1997)

O acúmulo de nitrogênio varia com a cultivar, número de cortes, ciclo da cultura, disponibilidade dos elementos na solução do solo, entre outros, e depende também dos fatores edafoclimáticos. Assim conhecer a necessidade nutricional para o desenvolvimento da cana-de-açúcar é essencial (COLETI et al., 2006). No entanto, a quantidade de nutrientes que deve ser fornecido para as culturas variam de acordo com a exigência de cada variedade.

Oliveira et al. (2010) realizou um estudo no município de Carpina (PE) e avaliou a extração e exportação de nutrientes em algumas variedades. Foi analisado que para a variedade SP81-3250, a extração ocorreu em ordem decrescente na seguinte sequência: $K > N > Ca > Mg > P$ onde pode ser observado na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Extração e Exportação de potássio (K), nitrogênio (N), cálcio (Ca), magnésio (Ca) e fósforo (P) para a variedade de cana-de-açúcar SP81–3250 conduzidas sob manejo de irrigação plena.

	Extração	Exportação	Extração
	kg/ha		kg/ton
K	404	235	1,74
N	241	168	1,04
Ca	225	168	0,97
Mg	99	75	0,43
P	28	15	0,12

Fonte: Oliveira et al. (2010)

A mesma resposta de extração obtida por Oliveira et al. (2010) tinha sido observada por Franco et al. (2007), em estudo realizado em Latossolo vermelho com o acúmulo de nutrientes na parte aérea da variedade SP81–3250.

Os fertilizantes nitrogenados aplicados no solo passam por uma série de transformações químicas e microbianas, que podem resultar em perdas. Por isso, considerando o custo dos adubos nitrogenados, é essencial adotar manejos adequados de adubação nitrogenada, que visem o melhor aproveitamento de N pela cultura da cana-de-açúcar (VITTI et al., 2007).

A cana-de-açúcar é uma planta eficiente para aproveitar o N contido no solo, devido ao longo ciclo e a abundância do sistema radicular. Estudos realizados com fertilizantes marcados com ^{15}N mostraram que a maior parte do N absorvido pela planta é proveniente do solo, assim a contribuição dos fertilizantes nitrogenados em relação ao N total absorvido varia de 10% a 16% (GAVA et al., 2007).

Orlando Filho et al. (1999) observaram que o uso de adubação nitrogenada refletiu em maior vigor das soqueiras proporcionando aumento da produção nos cortes realizados subsequentes entre a cana-de-açúcar que foi realizada a adubação em relação a que não recebeu adubação nitrogenada.

Segundo Vitti et al. (2007), o uso da fertilização nitrogenada em doses crescentes até 175 kg ha^{-1} resultou em um aumento linear na produtividade de colmos para a próxima safra, que nesse trabalho foi para a 2ª soca, e o mesmo efeito ocorreu para a 3ª soca. Em torno de 40% de amônio, da fonte do nutriente nitrato de amônio, permanece no sistema solo-planta-palha (raízes e rizomas) como

efeito residual para a próxima safra, independentemente da dose de nitrogênio aplicada na cultura. Para colheita mecanizada é essencial que seja realizada a adubação com maior quantidade de nitrogênio, visando suprir a demanda ocorrida pela alta relação C/N da palhada da cana-de-açúcar, que permanece na superfície do solo após a colheita.

Otto et al. (2009) estudando a fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar em relação a adubação nitrogenada de plantio em dois solos diferentes, verificaram que com a realização da adubação nitrogenada de plantio ocorreu aumento no crescimento de raízes e da parte aérea da cana-plana no Latossolo vermelho amarelo eutrófico, mas no Latossolo vermelho distrófico, que possuía grande quantidade de N na forma orgânica incorporada ao solo através dos resíduos, não surtiu nenhum efeito em relação aos parâmetros citados anteriormente.

Em relação às necessidades nutricionais da cana-de-açúcar, segundo Silva et al. (2009), até o quinto mês de idade a absorção de nutrientes pela cultura é pequena, aumentando intensamente após este período, chegando ao nono mês contendo 50% de potássio, cálcio e magnésio e um pouco mais de 30% de nitrogênio, fósforo e enxofre do total que será absorvido durante todo o ciclo vegetativo; do nono ao décimo segundo mês, a absorção de nitrogênio aumenta se tornando mais intensa, acumulando 90% do total extraído pela planta.

Raij e Cantarella (1997) recomendam para o Estado de São Paulo, em cana colhida com queima da palha doses que variam de 60 a 120 kg ha⁻¹ dependendo da produtividade esperada. Contudo, a crescente adoção de colheita sem queima traz implicações quanto ao manejo da adubação com nitrogênio.

Na cultura da cana-de-açúcar, muitos estudos têm investigado as melhores doses e momentos de aplicação de nitrogênio (AMBROSANO et al., 2005; VITTI et al., 2008; AMBROSANO et al., 2011), no entanto os estudos voltados a detecção da variação espacial deste nutriente nas culturas ainda são escassos. Por essas indagações, a adubação nitrogenada destaca-se como uma das práticas culturais de maior demanda de pesquisa para essa cultura, pois os estudos sobre nitrogênio apresentam resultados muito variáveis, muitas vezes até contraditórios, sendo que os mecanismos de resposta ao nitrogênio pela cana-de-açúcar não estão ainda suficientemente elucidados (KORNDÖRFER; PEREIRA; CAMARGO, 2004)

2.4 Sensoriamento remoto

A definição de sensoriamento remoto mais difundida atualmente é como sendo a forma de obter informações de um objeto ou alvo, sem que haja contato físico com o mesmo. Sendo utilizada por diversos pesquisadores e cientistas, mas essa definição é muito ampla, existindo assim diversos pontos de divergência. Elachi e Van Zyl (2006) definem o sensoriamento remoto como obtenção de informação a partir da detecção e mensuração das mudanças que um determinado objeto impõe aos campos de força que o circundam, sejam estes campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais.

Novo (2010) considera essa definição ainda ampla e pondera como aspecto chave o uso de sensores de radiação eletromagnética para inferir propriedades de objetos da superfície terrestre. Sendo então o conceito da utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície terrestre a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que os compõem em suas mais diversas manifestações.

A radiação eletromagnética (REM) é o meio pela qual a informação é transferida do objeto ao sensor. A REM pode ser definida como uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir da sua interação com a matéria (NOVO, 2010). A REM é gerada por fontes naturais como o Sol ou a Terra, ou por fontes artificiais como, por exemplo, o Radar. Assim a energia proveniente da interação entre a REM e a superfície terrestre é captada e registrada pelo sensor (ROSA, 2009).

As interações entre as ondas eletromagnéticas e as superfícies naturais ou a atmosfera dependem fortemente das frequências das ondas. As ondas das diferentes bandas espectrais resultam em diferentes interações (LIU, 2015). O espectro eletromagnético representa essa distribuição, por regiões, segundo o comprimento de onda e a frequência. Ele abrange desde curtos comprimentos de onda, como os raios cósmicos e os raios gama, de alta frequência, até longos comprimentos de onda, como as ondas de rádio e TV, de baixa frequência (FLORENZANO, 2011).

Os objetos da superfície terrestre, como a vegetação, a água e o solo, refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que

variam com o comprimento de onda, de acordo com suas características biofísicas e químicas (FLORENZANO, 2011). Cada objeto tem sua curva singular de energia no espectro eletromagnético, que é conhecida como assinatura espectral do objeto. Esse caráter pode ser aplicado para identificar os objetos com suas assinaturas espectrais singulares. Geralmente, um conjunto de valores de energia em certas bandas-chave em determinado objeto detectado pelos sensores de satélite é usado para identifica-lo e separá-lo de outros objetos (LIU, 2015).

2.5 Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação

Quando a radiação solar incide sobre uma folha da planta, sua energia sofre três alterações: reflexão, absorção e transmissão. Dependendo da estrutura da folha e da espécie de planta, as energias refletidas, absorvidas e transmitidas são diferentes (LIU, 2015). O estudo da interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação trata principalmente da reflectância (Figura 2-1), que é a propriedade de um determinado objeto refletir a radiação sobre ele incidente (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Figura 2-1 - Curva de fator de reflectância típica de uma folha verde (Adaptado de Novo, 2010)

Na região do visível a vegetação apresenta baixa reflectância, decorrente da forte absorção dos pigmentos do grupo da clorofila (NOVO, 2010). Esses pigmentos,

geralmente encontrados nos cloroplastos, são: clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%). Os valores percentuais desses pigmentos existentes nas folhas podem variar intensamente de espécie para espécie (PONZONI et al., 2012).

Existem duas bandas de absorção, centradas aproximadamente em 480 nm devido a presença de carotenos, e 680 nm, relacionada ao processo de fotossíntese. Destaca-se ainda um pico de reflectância em torno de 550 nm, correspondente a região do verde do espectro visível, o que explica a coloração verde das plantas (ROSA, 2009). Os pigmentos fotossintéticos (clorofilas a, b e total e carotenoides) são essenciais para o desenvolvimento das plantas, pois são responsáveis pela captura da energia solar usada na fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Na faixa do infravermelho próximo, compreendido entre 700 nm e 1300 nm, a reflectância passa para valores próximos a 40%. Este aumento de reflectância está relacionado a estrutura interna celular da folha. Em geral, os mesófilos esponjosos são responsáveis pelo espalhamento da radiação de infravermelho próximo. Quando aumenta o número de espaços vagos, aumenta a reflectância de infravermelho próximo (LIU, 2015).

Entre 1300 nm e 2500 nm, que abrange a região do infravermelho médio, a reflectância da vegetação é dominada pelo conteúdo de água na folha. A água absorve consideravelmente a radiação incidente, sendo os picos centrados nas bandas do 1450 nm, 1950 nm e 2700 nm, que correspondem também as bandas de absorção atmosférica, por essa influência que os sensores são desenvolvidos para faixas espectrais menos sujeitas a atenuação atmosférica (NOVO, 2010; PONZONI et al., 2012).

2.6 Utilização de sensores remotos no monitoramento do nitrogênio

Normalmente, a dose de nitrogênio ainda tem sido estabelecida por meio de curvas de resposta obtidas no campo, ao contrário dos demais macronutrientes, cuja limitação pode ser prevista pela análise do solo (COELHO; FONTES, 2005). A análise foliar feita em laboratório é um método bastante utilizado para medir o teor de nitrogênio (ROTH; FOX; MARSHALL, 1989). No entanto, esse método requer grande quantidade de amostras para representar a área cultivada, assim se tornando trabalhoso, dispendioso e destrutivo.

Em contraste, a utilização do sensoriamento remoto pode prover soluções rápidas e de baixo custo para diagnosticar a variabilidade espacial do nitrogênio na

cultura. Diversos trabalhos têm buscado compreender a influência do nitrogênio no comportamento espectral ou determinar modelos específicos em diferentes culturas (OSBORNE et al., 2002; SMITH et al., 2003; ZHAO et al., 2005; JAIN et al., 2007; TIAN et al., 2011; VIGNEAU et al., 2011; ABDEL-RAHMAN; AHMED; ISMAIL, 2013).

Os resultados do trabalho de LI et al. (2010), mostram que para a cultura do trigo o desenvolvimento de um novo índice dedicado ao monitoramento do nitrogênio foliar demonstrou melhores resultados se comparado com diferentes índices de vegetação já propostos na literatura, sendo o mesmo foi observado por Ryu; Suguri; Umeda (2009) estudando a cultura arroz.

Nigon et al. (2015) avaliaram a capacidade do sensoriamento remoto hiperespectral no monitoramento do estresse por N em batatas e concluíram, com base em índices espectrais, que a aplicação do índice de vegetação MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI) foi a técnica mais promissora para a determinação de estresse por N na cultura, devido a uma combinação de valores relativamente elevados de R^2 e RMSE baixos que sugerem alta precisão na avaliação.

Mahajan et al. (2014), analisaram a relação quantitativa entre a reflectância hiperespectral de folha e dossel e o estado nutricional envolvendo taxas de aplicação de nutrientes variáveis ao longo de dois anos consecutivos, cujos resultados do experimento demonstraram que as medições radiométricas podem ser utilizadas no monitoramento de N, P, S e K na cultura de trigo.

Filella et al. (1995) estudando o potencial de dados espectrais em discriminar diferentes doses de nitrogênio na cultura do trigo (0, 50, 100, 150 e 200 kg.ha⁻¹) em diferentes fases fenológicas, obteve como resultado que a combinação dos comprimentos de onda de 550 nm, 680 nm e todo o *red-edge* estima melhor que o NDVI.

Read et al. (2002) encontrou alta correlação entre o nitrogênio na folha do algodão e a reflectância como razão simples entre os comprimentos de onda 700 e 710 nm. Além disso, Kruse; Christians; Chaplin (2006) indicaram que a razão de reflectância entre 706 e 760 nm foi o melhor para prever a concentração de nitrogênio em grama. Em trabalho desenvolvido por Zhao et al. (2005) para estudar a relação da concentração de nitrogênio na folha com a cultura sorgo relatou que a primeira derivada da reflectância no *red edge*, centrado em 730 nm produziu um R^2 de 0,73.

Em trabalho desenvolvido por Jain et al. (2007), usando dados hiperespectrais de espectroradiômetro portátil, para diferenciar doses de nitrogênio (0, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 kg.ha⁻¹) na cultura da batata selecionaram quatro comprimentos de onda mais significantes (nm): 560, 650, 730 e 760.

No entanto para cana-de-açúcar estes estudos ainda foram pouco explorados, existindo poucas pesquisas sobre o status do nutriente na cultura tanto em nível foliar ou dossel (ABDEL-RAHMAN; AHMED; VAN DEN BERG, 2010; ABDEL-RAHMAN et al., 2010; BEGUE et al., 2010; MOKHELE; AHMED, 2010; JOHNSON; RICHARD, 2011). Porém, estes poucos trabalhos, têm mostrado resultados promissores, gerando modelos com boa exatidão no diagnóstico da condição nutricional da cultura em relação ao nitrogênio.

Amaral et al. (2015) comparando diferentes sensores comerciais ativos em dossel em áreas com cana-de-açúcar para detectar a variabilidade de biomassa e teor foliar de nitrogênio obteve altas correlações. Estes sensores utilizam comprimentos de ondas fixos, na região do visível e infravermelho próximo, provendo como resultado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Regiões que o sensor utilizado nesse trabalho também foi sensível a variação da biomassa do ponteiro.

Rosa et al. (2015) utilizando sensor de dossel para estimar nitrogênio, com doses que variaram de 0 a 240 kg.ha⁻¹, em cana-de-açúcar com quatro áreas de estudo. Duas das quatro áreas não apresentou resposta significativa as doses de nitrogênio, então os autores indicaram dois possíveis fatores: a idade da cultura, que estava no quarto ciclo produtivo e por essas áreas estar situadas em campos comerciais por muitos anos, o que pode ter outras fontes de nitrogênio disponível para a cultura.

Avaliando dados orbitais do sensor SPOT para estimar a produtividade da cana-de-açúcar, Fernandes; Rocha; Lamparelli (2011) utilizou valores extraídos do NDVI entre os meses de dezembro e janeiro que permitiu classificar em três classes: abaixo da média, média e acima da média. Sendo os resultados mais efetivos para as classes “média” e “acima da média”, com acertos de 86,5% e 66,7%, respectivamente.

Molin et al. (2010) avaliando a capacidade de sensor ótico em quantificar na cana-de-açúcar a variação do nitrogênio, com doses de 0, 50, 100, 150 e 200 kg.ha⁻¹, aos 30, 60 e 90 dias após o corte (DAC). Os autores obtiveram resposta somente

aos 90 DAC, provavelmente devido à baixa demanda de nitrogênio pela cultura e consequentemente pouco tempo hábil para que as plantas apresentassem diferença entre os tratamentos.

Referências

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; ISMAIL, R. Random forest regression and spectral band selection for estimating sugarcane leaf nitrogen concentration using EO-1 Hyperion hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 34, n. 2, p. 712-728, 2013.

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; VAN DEN BERG, M. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 12, Supplement 1, p. S52-S57, 2010.

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; VAN DEN BERG, M.; WAY, M.J. Potential of spectroscopic data sets for sugarcane thrips (*Fulmekiola serrata* Kobus) damage detection. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 31, n. 15, p. 4199-4216, 2010.

ALFONSI, R.R.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V.; PARANHOS, S.B. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**, Campinas, v. 1, p. 42-55, 1987.

ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.D.C.E.; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p. 653-659, 2000.

AMALRAJ, V.A.; BALASUNDARAM, N. On the taxonomy of the members of 'Saccharum complex'. **Genetic Resources and Crop Evolution**, Dordrecht, v. 53, n. 1, p. 35-41, 2006.

AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F.B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2015.

AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS, E.A.; GUIRADO, N.; ROSSI, F.; MENDES, P.C.D.; MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 6, p. 534-542, 2005.

AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS, E.A.; MURAOKA, T.; ROSSI, F. ¹⁵N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 361-368, 2011.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. In: PLANALSUCAR. (Ed.). Araras:Coordenadoria Regional Sul. COSUL, 1977. p. 1-22.

BEAUCLAIR, E.G.F.; SCARPARI, M.S. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C. C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y (Ed.). **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Livrocere, 2007. p. 65-73.

BEGUE, A. LEBOURGEOIS, V.; BAPPEL, E.; TODOROFF, P.; PELLEGRINO, A.; BAILLARIN, F.; SIEGMUND, B. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 31, n. 20, p. 5391-5407, 2010.

BENVENUTI, F.A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. 2005. 103p. (Mestrado em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2005

BRAGION, L.O Proálcool renasce. **Revista ComCiência**, Campinas, v. 86, p. 19-24, 2007.

CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. Fertilizers for sugar cane. In: CORTEZ, L.A.B. (Ed.). **Sugarcane bioethanol**. São Paulo: Blucher, 2010. p. 405-422.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; CONTIN, T.L.M.; DIAS, F.L.F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R.B.; QUAGGIO, J.A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 397-401, 2008.

CARNEIRO, M.S.; JUNIOR, G.R.M.; HOFFMANN, H.P. Sugarcane - Basic information on the plant. In: LAM, E.; CARRER, H. SILVA, J.A.; KOLE, C (Ed.). **Compendium of bioenergy plants – Sugarcane**:1: CRC Press, 2015. p. 1-15.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil. **Revista ComCiência**, Campinas, v 79, n 2, p 14-19, 2004.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A. DE ABREU, H.M.C.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BURNQUIST, W.L.; CRESTE, S.; DI CIERO, L.; FERRO, J.A.; DE OLIVEIRA FIGUEIRA, A.V.; DE SOUSA FILGUEIRAS, T. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, New York, v. 4, n. 1, p. 62-89, 2011.

COELHO, E.L.; FONTES, P.C.R. Índices agronômicos do meloeiro associados à dose adequada de nitrogênio, em ambiente protegido e no campo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 974-979, 2005.

COLETI, J.T. CASAGRANDE, J.C.; STUPIELLO, J.J.; RIBEIRO, L.D.; OLIVEIRA, G.R. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca em Argissolos, variedades RB 835486 e SP 813250. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 24, n. 5, p. 32-36, 2006.

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution. In: HEIN, D.J. (Ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier Press, 1987. p. 7-84.

DE CARLI, G. **Geografia economica e social da cana-de-açúcar no Brasil**. Rio de Janeiro: Edição de Brasil Açucareiro 1938. 136p.

DIAS, F.L.F.; MAZZA, J.A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R.F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 627-634, 1999.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 882p.

ELACHI, C.; VAN ZYL, J.J. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**. John Wiley 2006. 560p. ISBN 0471783382.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; NETO, J.D. 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, n. 4, p. 356-362, 2008.

FARONI, C.E. **Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 68p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FAUSTO, B. **História concisa do Brasil**. 2 ed. São Paulo: Edusp, 2001. 324p. ISBN 8531405920.

_____. **História do Brasil**. 14 ed. Editora da Universidade de São Paulo, 2012. 688p. ISBN 8531413524.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2011. 416p.

FERNANDES, J.L.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, p. 139-146, 2011.

FILELLA, I.; SERRANO, L.; SERRA, J.; PENUELAS, J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. **Crop Science**, Madison, v. 35, n. 5, p. 1400-1405, 1995.

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128p. ISBN 8579750644.

FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 669-674, 2007.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; ALMEIDA DE OLIVEIRA, E. C.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 29-41, 2011.

GAVA, C.; FRANCO, H.C.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 491-498, 2007.

HITCHCOCK, A.S. Type species of the first 100 genera of Linnaeus' Species plantarum. **American Journal of Botany**, Lancaster, v. 10, n. 9, p. 510-514, 1923.

HUMBERT, R.P.; GALLARDO, A.G. **El cultivo de la caña de azúcar**. San José: Continental, 1974. 441p.

IRVINE, J.E. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugarcane yield. **Crop Science**, Madison, v. 15, n. 5, p. 671-676, 1975.

JAIN, N.; RAY, S.S.; SINGH, J.P.; PANIGRAHY, S. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 8, n. 4/5, p. 225-239, 2007.

JOHNSON, R.M.; RICHARD, E.P. Prediction of sugarcane sucrose content with high resolution, hyperspectral leaf reflectance measurements. **International Sugar Journal**, Glamorgan, v. 113, n. 1345, p. 48-55, 2011.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia, 2004. 23p.

KRUSE, J.K.; CHRISTIANS, N.E.; CHAPLIN, M.H. Remote Sensing of Nitrogen Stress in Creeping Bentgrass This journal paper of the Iowa Agric. and Home Econ. Exp. Stn., Ames, IA, Project no. 3601, was supported by Hatch Act and State of Iowa funds. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 6, p. 1640-1645, 2006.

LANDELL, M.G.A.; BRESSIANI, J.A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2008. p. 101-155.

LAVANHOLI, M.G.D.P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas, 2008. p. 697-722.

LI, F.; MIAO, Y.; HENNIG, S.; GNYP, M.; CHEN, X.; JIA, L.; BARETH, G. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 11, n. 4, p. 335-357, 2010.

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2 ed. Campo Grande: Oficina de Textos, 2015. 908p. ISBN 8579751772.

LUCCHESI, A.A. Cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: CASTRO, P.R.C. ; KLUGE, R.A. (Ed.). **Ecofisiologia de culturas extrativas**: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. p. 13-45.

MAGALHÃES, B.D. **O açúcar nos primórdios do Brasil colonial**. Rio de Janeiro, 1953. 204p.

MAHAJAN, G.R.; SAHOO, R.N.; PANDEY, R.N.; GUPTA, V.K.; KUMAR, D. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 15, n. 5, p. 499-522, 2014.

MALAVOLTA, E.; CESAR VITTI, G.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MARTIN, J.P. The anatomy of the sugar cane plant. In: MARTIN, J.P.; ABBOT, E. V.; HUGHES, C.G. (Ed.). **Sugarcane Diseases of the World**. Amsterdam: Elsevier v.1, 1961. p. 3-52.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011

MELONI, R.A. **Ciência e produção agrícola**: a imperial estação agrônômica de Campinas 1887-1897. São Paulo: FFLCH/USP, 2004. 165p. ISBN 8575060791.

MOKHELE, T.A.; AHMED, F.B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, Berlim, v. 4, n. 1, p. 43560-043560-18, 2010.

MOLIN, J.P.; FRASSON, F.R.; AMARAL, L.R.; POVH, F.P.; SALVI, J.V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1345-1349, 2010.

NIGON, T.J.; MULLA, D.J.; ROSEN, C.J.; COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; KNIGHT, J.; RUD, R. Hyperspectral aerial imagery for detecting nitrogen stress in two potato cultivars. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 112, p. 36-46, 3/2015.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 387p. ISBN 9788521205401.

OKUMURA, R.S.; MARIANO, D.D.C. Aspectos agronômicos da ureia tratada com inibidor de urease **Ambiencía**, Guarapuava, v. 8, n. 2, p. 403-414, 2012.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R.I.; FREIRE, M.B.G.S.; SIMÕES NETO, D.E.; SILVA, S.A.M.Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, 2010.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A.; BELTRAME, J.A.; LAVORENTI, N.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 4,p. 39-41 1999.

OSBORNE, S.L.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; SCHLEMMER, M.R. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 6, p. 1215-1221, 2002.

OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 398-405, 2009.

PEDROSO JUNIOR, R. **Arranjos institucionais na agricultura brasileira: um estudo sobre o uso de contratos no sistema agroindustrial sucroalcooleiro da região centro-sul**. 2008. 209p. Mestrado (Mestre em Administração) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 160p. ISBN 8560507027.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. V.;CANTARELLA, H.; QUAGGIO, A.J.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. Campinas: IAC, v.100, 1997. p. 8-13.

READ, J.J.; TARPLEY, L.; MCKINION, J.M.; REDDY, K.R. Narrow-Waveband Reflectance Ratios for Remote Estimation of Nitrogen Status in Cotton. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, n. 5, p. 1442-1452, 2002.

RIBEIRO, M.S. **Efeitos da aplicação diferencial de água no substrato sobre a capacidade fotossintética, relações hídricas e crescimento inicial em cana-de-açúcar**. 2012. 153p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu:Unesp, 1995. 99p.

ROSA, H.J.A.; AMARAL, L.R.D.; MOLIN, J.P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 9, p. 840-848, 2015.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 7 ed. Uberlândia: EDUFU, 2009. 264p. ISBN 9788570781246.

ROTH, G.W.; FOX, R.H.; MARSHALL, H.G. Plant tissue tests for predicting nitrogen fertilizer requirements of winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 3, p. 502-507, 1989.

ROY, R.N.; FINCK, A.; BLAIR, G.J.; TANDON, H.L.S. **Plant nutrition for food security**. A guide for integrated nutrient management. Roma:FAO, 2006. 368p.

RYU, C.; SUGURI, M.; UMEDA, M. Model for predicting the nitrogen content of rice at panicle initiation stage using data from airborne hyperspectral remote sensing. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 104, n. 4, p. 465-475, 2009.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III. Conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 425-431, 1987.

SANTANA, P.B. **Desempenho agrônomo e tecnológico de variedades de cana-de-açúcar submetidas a diferentes lâminas de irrigação no Norte de Minas Gerais**. 2012. 108p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 2012.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, v.1, 2008. p. 47-56.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.D.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M.D. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006. 415p.

SILVA, T.G.F.D.; MOURA, M.S.B.D.; ZOLNIER, S.; CARMO, J.F.A.D.; SOUZA, L.S.B.D. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 500-509 2012.

SMITH, M.L.; MARTIN, M.E.; PLOURDE, L.; OLLINGER, S. V. Analysis of hyperspectral data for estimation of temperate forest canopy nitrogen concentration: comparison between an airborne (AVIRIS) and a spaceborne (Hyperion) sensor. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, New York, v. 41, n. 6, p. 1332-1337, 2003.

STEVENSON, G.C. **Genetics and breeding of sugar cane**. London: Longman, 1965. 284p.

SZMRECSANYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil, 1930-1975**. Campinas: Hucitec/Unicamp, 1979. 540p.

SZMRECSÁNYI, T.; MOREIRA, E.P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira do Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 5, n. 11, p. 57-79, 1991.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848p. ISBN 8480216018.

TIAN, Y.C.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W.X.; HANNAWAY, D.B.; ZHU, Y. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground-and space-based hyperspectral reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 2, p. 299-310, 2011.

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

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: Crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140p. Tese (Doutorado em Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2002.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A. Fisiologia do sistema radicular. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 79-97.

VIGNEAU, N.; ECARNOT, M.; RABATEL, G.; ROUMET, P. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 25-31, 2011.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; OTTO, R.; TRIVELIN, M.O.; TOVAJAR, J.G. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2757-2762, 2008.

VITTI, A. C; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

ZHAO, D.; REDDY, K.R.; KAKANI, V.G.; REDDY, V.R. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 22, n. 4, p. 391-403, 2005.

3 ANÁLISE DE DADOS HIPERESPECTRAIS PARA DIFERENCIAÇÃO DA DOSE DE NITROGÊNIO APLICADO EM CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

Deficiência de nitrogênio pode reduzir a produtividade e retornos econômicos, assim a utilização do sensoriamento remoto vem ganhando destaque no acompanhamento e monitoramento das lavouras. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade de sensores hiperespectrais em discriminar diferentes doses de nitrogênio na cana-de-açúcar. As áreas de estudo se localizam nos municípios de Piracicaba, Jaú e Santa Maria da Serra, todos no estado São Paulo. Cada experimento foi alocado em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições, e receberam doses de 0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹ de nitrogênio. A análise espectral foi realizada na safra 2013/2014. Posteriormente os dados espectrais foram avaliados utilizando estatística multivariada com análise discriminante, em que os centroides das diferentes doses foram submetidos a análise de variância. A adubação nitrogenada promoveu alterações significativas na reflectância espectral da cana-de-açúcar e o sensor foi sensível em captar essa variação. Os melhores resultados obtidos foram para os meses de janeiro, dezembro e fevereiro, respectivamente os quais proporcionaram uma melhor discriminação das doses em cada uma das áreas, o mesmo não ocorreu no mês de agosto. Assim analisando todas as áreas para o mês de janeiro, com o intuito de avaliar o potencial dos dados hiperespectrais e sua sensibilidade na variação do nitrogênio dos 66 cruzamentos realizados apenas 4 não apresentaram diferença estatística na diferenciação entre doses. A área de Santa Maria, com Neossolo Quartzarênico, se discriminou das duas outras áreas em todas as doses. Para as áreas de Jaú e Piracicaba apenas as doses 0 kg.ha⁻¹ e 100 kg.ha⁻¹ não se diferenciaram estatisticamente das doses 0 kg.ha⁻¹ e 50 kg.ha⁻¹ relacionados aos 4 cruzamentos que não apresentaram diferença estatística. As bandas que apresentaram maiores significância na distinção das doses de nitrogênio foram na região do verde (525-570 nm), *red-edge* (620-710 nm) e infravermelho próximo (790-815 nm). A utilização do sensor hiperespectral em conjunto com a análise discriminante se mostrou como uma ferramenta sensível na diferenciação do nitrogênio aplicado na cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Análise discriminante; Sensor hiperespectral; Adubação nitrogenada; *Saccharum* spp.

Abstract

Nitrogen deficiency can reduce productivity and economic returns, so the use of remote sensing is gaining prominence in the tracking and monitoring of crops. In this context, this study aimed to assess the potential of hyperspectral sensors to discriminate different doses of nitrogen on sugarcane. Study areas are located in the cities of Piracicaba, Jaú and Santa Maria da Serra, in São Paulo State all. Each experiment was allocated at random blocks with sub-divided plots and four replications, and received doses of 0, 50, 100 and 150 kg ha⁻¹ of nitrogen. The spectral analysis was held in 2013/2014. The spectral data were evaluated using multivariate discriminant analysis, in which the different doses centroids were subjected to analysis of variance. The spectral data were evaluated using multivariate discriminant analysis, in which the different doses centroids were subjected to analysis of variance. The nitrogen fertilization promoted significant changes in spectral reflectance of sugarcane and the sensor's sensitive in picking up

this variation. The best results were for the months of January, December and February respectively which provided a better discrimination of doses in each of the areas, the same did not occur in the month of August. So analyzing all areas for the month of January, in order to assess the potential of hyperspectral data and your sensitivity in nitrogen variation of 66 crossings made only 4 showed no statistical difference in the differentiation between doses. The Santa Maria area, with Quartzarenic Neosol, if the other two areas in discriminated against all doses. For areas to Jaú and Piracicaba only the doses 0 kg. ha⁻¹ and 100 kg ha⁻¹ not differed statistically the doses 0 kg. ha⁻¹ and 50 kg.ha⁻¹ related to the 4 crosses that showed no statistical difference. The bands who have major significance in the distinction of the nitrogen doses were in the green region (525-570 nm), red-edge (620-710 nm) and near infrared (790-815 nm). The use of hyperspectral sensor in conjunction with discriminant analysis showed a sensitive tool in the differentiation of nitrogen applied on sugar cane.

Keywords: Remote sensing; Discriminant analysis; Hyperspectral sensor; Nitrogen fertilization; *Saccharum spp*

3.1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área plantada na safra 2014/2015 de 9,0 milhões de hectares, um crescimento de 2% em relação à safra passada. Com cerca de 634,7 milhões de toneladas colhidas na safra 2014/2015, o que reflete consequentemente, no maior produtor mundial de açúcar e álcool (CONAB, 2015).

Tendo em vista tal produtividade, temos que os nutrientes são uma das variáveis mais importantes para o bom desenvolvimento das plantas, sendo o nitrogênio um dos elementos mais restritivos. Embora um adequado fornecimento de nitrogênio para as culturas é fundamental para otimizar o resultado, a má gestão do nutriente, tais como aplicação excessiva, provoca diversos problemas e também resulta na contaminação da água subterrânea (JAYNES et al., 2001).

O nitrogênio (N) segundo Malavolta e Cesar Vitti (1997) é de grande importância para a cultura da cana-de-açúcar pelo fato de ser uma planta de metabolismo de carbono do tipo C₄, caracterizado por altas taxas de fotossíntese líquida e eficiência na utilização do nitrogênio e da energia solar, sendo altamente eficiente na produção de fotoassimilados. Esse nutriente é parte constituinte de todos os aminoácidos, proteínas e ácidos nucléicos, com participação direta ou indiretamente de vários processos bioquímicos.

A carência de nitrogênio promove a diminuição na síntese de clorofila, e aminoácidos essenciais, e também da energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (MALAVOLTA et al., 1997). Portanto, o monitoramento eficiente e manejo adequado do N na planta são essenciais para equilibrar o aumento do custo de N fertilizantes, a demanda pela cultura, e da necessidade de minimizar os danos ambientais, especialmente qualidade da água (JAYNES et al., 2001).

A gestão da aplicação das necessidades de nitrogênio das culturas foi em função de otimizar a demanda, diminuindo assim os custos e problemas ambientais, especialmente a qualidade da água, sendo que o sensoriamento remoto poderia ajudar nesse processo.

O sensoriamento remoto pode ser definido como uma técnica de se obter informações sobre um determinado objeto, área ou fenômeno, através de dados coletados por um equipamento, que não entra em contato direto com o objeto, área ou fenômeno estudado (LANDGREBE, 1978; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

O sensoriamento remoto parte do princípio de que cada objeto tem uma característica única de reflexão e emissão de energia eletromagnética. Com isso, pode-se identificar e entender o objeto ou condições ambientais através dessa unicidade de comportamento. Portanto, dois objetos diferentes irão interagir distintamente com a energia eletromagnética, pelo menos em alguns comprimentos de onda, permitindo assim sua identificação e diferenciação (NOVO, 2010).

O comportamento espectral da vegetação consiste na medida dos valores de reflectância ao longo do espectro eletromagnético. Segundo Gates et al. (1965), três são os principais mecanismos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas: os pigmentos existentes, os espaços ocupados pela água e ar, e as estruturas celulares internas das folhas. Além disso, o estágio fenológico, os aspectos sanitários e as condições climáticas também são fatores que influenciam na energia eletromagnética refletida.

Estimativa do conteúdo de nitrogênio da planta em laboratório é trabalhoso, dispendioso e consome muito tempo, assim tornando-se difícil de gerir as necessidades de nitrogênio da cultura durante o seu período de crescimento.

Blackmer et al. (1994) indicou que o teor de N de culturas em campo pode ser avaliado usando a reflectância espectral de folha ou dossel.

Para a análise de dados espectrais exige uma abordagem estatística mais sofisticada, o uso da estatística multivariada torna-se a melhor ferramenta para interpretação do comportamento espectral da vegetação, possibilitando obter informações e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada.

Alguns estudos têm aplicado técnicas multivariadas para avaliação da dose de nitrogênio por respostas hiperespectrais em diversas culturas e tem encontrado resultados satisfatórios (FILELLA et al., 1995; STRACHAN; PATTEY; BOISVERT, 2002; MIN; LEE, 2005; JAIN et al., 2007; MOKHELE; AHMED, 2010).

O objetivo foi avaliar o comportamento espectral da cana-de-açúcar em função das diferentes doses aplicadas de nitrogênio, e definir quais comprimentos de onda ou regiões do espectro que apresentam potencial no estudo da identificação desse manejo.

É possível o uso conjunto destas técnicas poderia auxiliar na tomada de decisão no uso e manejo adequado do nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar, tendo por base dados hiperespectrais.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área de estudo

Este estudo foi conduzido em áreas experimentais da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) e em área comercial (Tabela 3-1), em parceria com a equipe de pesquisa do IAC coordenada pelo Pesquisador Heitor Cantarella. O clima da região segundo a classificação de Koppen é denominado subtropical úmido (Cwa), com pluviosidade média anual inferior a 1400 mm, sendo o verão chuvoso e inverno seco.

Tabela 3-1 - Localização e descrição das áreas experimentais

	Área 1	Área 2	Área 3
Localização	Jaú	Piracicaba	Santa Maria da Serra

Descrição	Polo Centro-Oeste (APTA)	Polo Centro-Sul (APTA)	Fazenda Itaúna - Raizen
Coordenadas	22°15'08"S; 48°34'04"O	22°41'05"S; 47°38'54"O	22°33'26"S; 48°16'42"O
Classificação do solo	Latossolo Vermelho (LV)	Argissolo Vermelho (PV)	Neossolo Quartzarênico (RQ)
Textura do solo	Médio Arenosa (0-20 cm), Médio argilosa (20-40 cm)	Argilosa (0-20 cm) Muito Argilosa (20-40 cm)	Arenosa (0-40 cm)

Os experimentos foram instalados em 2010 no delineamento experimental em blocos ao acaso (DBC), com parcelas subdivididas, sendo as parcelas diferenciadas pelas variedades e as subparcelas por doses de Nitrogênio. Este trabalho foi realizado na safra 2013/2014, onde as áreas estavam no quarto ciclo produtivo.

A correção inicial do pH do solo e adubação de base (plantio) na cana-planta e adubação de cana-soca foi realizada de acordo com a necessidade da cultura após análise de rotina para a fertilidade do solo. As doses de N propostas no presente trabalho foram aplicadas utilizando o nitrato de amônio, aplicado manualmente sobre a palhada logo após o corte da cana-de-açúcar. Os tratos culturais seguiram o padrão adotado pelo sistema produtivo da cana-de-açúcar para a região.

As áreas são compostas por três variedades e 4 doses de nitrogênio (0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹), sendo a variedade SP 81-3250 comum em todas. Tal fato teve como objetivo possibilitar a comparação do efeito do ambiente sobre o mesmo material genético, por esse motivo foi selecionado somente os dados referente a essa variedade. A SP 81-3250 apresenta como características seu elevado teor de sacarose; ótima produtividade; alta brotação de soqueira; baixa exigência em solos; baixo florescimento; e alto teor de fibra.

3.2.2 Marcação das parcelas e obtenção das leituras espectrais

De modo a padronizar as coletas de dados ao longo do experimento, plantas foram marcadas no terço inferior do colmo com fitas plásticas em cada subparcela das áreas em estudo (Figura 3-1).

Figura 3-1 - Demarcação de plantas das áreas experimentais: (A) Escolha e marcação das plantas com fita (B) Plantas marcadas em estágio fenológico avançado

Cada subparcela é composta por cinco linhas de cana-de-açúcar, sendo considerada como área útil somente as três fileiras centrais. As plantas foram selecionadas de modo aleatório dentro das três fileiras, duas na segunda e quarta fileira e uma na terceira fileira (Figura 3-2).

Figura 3-2 - Esquema de uma subparcela e plano de avaliação

Os dados espectrais do dossel foram coletados em diferentes datas de desenvolvimento da cultura (Tabela 3-2), utilizando o sensor hiperespectral

FieldSpec Spectroradiometer (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA), que opera no intervalo espectral de 350 a 2500 nm, com resolução espectral de 1,4 nm de 350 a 1050 nm e 2 nm de 1050 a 2500 nm. Vale ressaltar que por se tratar de um sensor passivo, algumas das avaliações ocorreram em períodos superiores a 30 dias, devido as condições climáticas desfavoráveis a realização da radiometria de campo.

Tabela 3-2 - Descrição das datas de coletas

Área	Meses de coleta (DAC)
Jaú - SP	Dezembro/2013 (114)
	Janeiro/2014 (148)
	Agosto/2014 (357)
	Janeiro/2014 (137)
Piracicaba - SP	Fevereiro/2014 (169)
	Março/2014 (193)
	Agosto/2014 (340)
	Dezembro/2013 (81)
Santa Maria da Serra - SP	Janeiro/2014 (115)
	Fevereiro/2014 (146)
	Março/2014 (167)
	Agosto/2014 (311)

As avaliações de dossel foram sempre realizadas em dias ensolarados, entre 10:00 e 14:00 horas, com o sensor posicionado a um metro da altura média da haste da cultura e com campo de visada de 25°, o que proporciona uma leitura circular de aproximadamente 0,25 m² de área. Primeiramente, para cada bloco foi realizada a calibração, utilizando a placa padrão que acompanha o aparelho; posteriormente as leituras foram realizadas em cada subparcela, nos cinco pontos representativos previamente demarcados.

Para obtenção dos dados espectrais na colheita o aparelho foi acoplado a uma escada multifuncional equipada com quatro barras de aço, de 2 metros cada uma, para que fosse possível ser feito a leitura e manter a altura em relação a cultura que estava em estado fenológico avançado conforme Figura 3-3.

Figura 3-3 - Aquisição dos dados espectrais em campo: (A) Obtenção da resposta espectral de dossel em campo em estágio fenológico intermediário com utilização de escada; (B) FieldSpec acoplado à uma base para proporcionar leituras em estágio fenológico avançado; (C) Fibra óptica acoplada a base (D) Base “escada” utilizada em estágio fenológico avançado como apoio ao aparelho

3.2.3 Análise do teor foliar de nitrogênio

Para as análises do teor foliar de nitrogênio, foram coletadas dez folhas por subparcela, sendo duas de cada lado das cinco plantas demarcadas (Figura 3-4). A coleta de folhas na cultura foi próxima a fase de máximo desenvolvimento vegetativo, no mês de janeiro.

Figura 3-4 - Localização das plantas coletadas

As folhas coletadas são descritas como folha “+1”, bem aceita na literatura como folha diagnóstico para a cana-de-açúcar. Ela é a primeira folha com o ponto de separação entra a lâmina foliar e a bainha, visível, de acordo com o sistema Kuijper's. As folhas +1 destacadas foram separadas por parcela e enviadas para o laboratório (Figura 3-5).

Figura 3-5 - Passos para coleta de amostras: (A) Localização da folha diagnóstico +1; (B) Amostragem de 10 folhas por subparcela; (C) Acondicionamento das folhas coletadas em sacos plásticos numerados; (D) Transporte das folhas coletadas do campo para o laboratório

No laboratório as folhas foram primeiramente lavadas em água corrente, seguida de água destilada com detergente e posteriormente, com apenas água destilada. Após a lavagem foram alocadas em saco de papel para secar em estufa com ventilação forçada, a 65°C, até atingir peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas para a determinação dos teores de nitrogênio. As análises químicas são determinadas nos extratos obtidos pela digestão sulfúrica por meio do método semi-micro Kjeldahl (MALAVOLTA; VITTI, 1997).

3.2.4 Análise estatística

3.2.4.1 Pré-processamento dos dados

A etapa de pré-processamento dos dados é fundamental para o sucesso da análise multivariada. Os principais objetivos da aplicação das técnicas de pré-processamento são eliminar informações não relevantes e tornar a matriz de dados melhor condicionada para a análise, possibilitando a subsequente análise exploratória do conjunto de dados com eficiência.

Os dados foram exportados do formato asd para txt utilizando o programa ViewSpec Pro para as análises. As regiões espectrais entre 350-399, 1355–1420 nm, 1800–2500 nm que são conhecidas como regiões de ruídos devido a interferência da umidade no ambiente (CURRAN, 1994; ZHAO et al., 2007; ABDEL-RAHMAN; AHMED; ISMAIL, 2013) foram removidas das curvas espectrais e excluídas das análises.

3.2.4.2 Análise discriminante

Na diferenciação das doses, realizou-se a análise discriminante, para determinar o comportamento espectral da cana-de-açúcar a partir de seus dados espectrais. Segundo Hair et al. (2009) é uma técnica da estatística multivariada que busca obter uma combinação linear de características observadas. Para Pestana e Gageiro (2005), a análise discriminante tem por objetivo escolher as variáveis que distinguem determinados grupos, de modo que conhecendo as características de um novo caso, possa se prever a que grupo pertencem.

Esta combinação linear é conhecida como função discriminante e procura maximizar a variância interespecífica e minimizar a variância intraespecífica, assumindo que as classes possuem distribuição normal.

Assim cada curva espectral é condensada em somente um ponto com seu valor discriminante. Calculando a média dos valores discriminantes para todos as curvas espectrais em um grupo, tem-se a média do grupo, chamada de centróide. Os centróides indicam o local mais típico de qualquer indivíduo de um grupo particular, sendo que uma comparação com os centróides de grupos mostra o quão afastado estão ao longo da dimensão testada. A verificação da significância da função discriminante consiste em uma medida generalizada da distância entre os centróides dos grupos. Assim, se a distribuição dos escores discriminantes de cada grupo apresentar uma sobreposição pequena, a função discriminante separa bem os grupos (HAIR et al., 2009). Os centróides foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e as médias quando significativas, comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A técnica multivariada foi implementada utilizando o ambiente R (versão 3.2.2). O R é uma linguagem de programação (DALGAARD, 2008) que permite manipular dados, fazer cálculos e construir gráficos estatísticos (MURRELL, 2011).

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Análise discriminante de Jaú

Na área de Jaú foram avaliados os dados coletados aos 114, 148 e 357 DAC através da análise discriminante, sendo posteriormente feito uma análise de variância. Avaliando a discriminante para os dados aos 114 DAC (Figura 3-6), onde cada ponto representa uma curva espectral obtida das plantas demarcadas nas subparcelas, a primeira função explica 62,2% da variabilidade dos dados e a segunda função 25,4%. Avaliando visualmente o gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 foi possível analisar claramente a diferenciação da dose 0 kg.ha⁻¹ em relação as outras doses.

Figura 3-6 - Análise discriminante de Jaú aos 114 DAC

Avaliando a discriminante para os dados aos 148 DAC (Figura 3-7), a primeira função explica 74,8% da variabilidade dos dados e a segunda função 14,7%. Avaliando visualmente o gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 foi possível analisar a continuidade da diferenciação da dose 0 kg.ha⁻¹ em relação as outras doses, que formam um subgrupo mas se discriminam entre as mesmas.

Figura 3-7 - Análise discriminante de Jaú aos 148 DAC

Avaliando a discriminante para os dados aos 357 DAC (Figura 3-8), ocorre uma diminuição no poder de discriminação da primeira função, que explica 57,8% da

variabilidade dos dados e a segunda função 25,3%. Avaliando visualmente o gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 foi possível analisar a mudança dos agrupamentos da dose 0 kg.ha⁻¹ e 50 kg.ha⁻¹, as maiores doses aumenta a dispersão dos seus dados.

Figura 3-8 - Análise discriminante de Jaú aos 357 DAC

Mas como a análise visual dos gráficos depende da escala dos eixos e da interpretação do pesquisador, uma análise estatística mais detalhada faz-se necessária, pois ela define se ocorrem ou não diferenças significativas na análise discriminante entre as diferentes doses aplicadas de nitrogênio.

Assim analisando estatisticamente os centroides das doses de nitrogênio através da análise de variância (ANOVA) houve diferença significativa das doses entre as médias dos seis cruzamentos realizados aos 114 DAC e 148 DAC.

No entanto aos 357 DAC não houve diferença significativa das doses entre as médias em pelo menos um cruzamento dos seis cruzamentos realizados. Pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, observou-se nos cruzamentos realizados que a dose 0 kg.ha⁻¹ não apresentou diferença significativa em relação a dose 50 kg.ha⁻¹.

O incremento da biomassa influenciado pelas doses aplicadas de nitrogênio determinou uma maior separação dos tratamentos, produzindo assim diferentes reflectância de dossel. Dados espectrais de dossel segundo Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich (2012) são influenciados por diversos fatores, entre eles, os componentes da vegetação, idade da planta, arquitetura do dossel, distribuição angular das folhas,

reflectância aditiva entre outros. O decréscimo da capacidade da análise discriminante em explicar a variabilidade dos dados ao longo dos meses se deve principalmente ao fato das doses de nitrogênio influenciarem diretamente no crescimento vegetativo e produção de fitomassa.

Segundo Daughtry et al. (1984) mudanças na quantidade de fitomassa são manifestados na refletância do dossel. Como essas mudanças são gradativas com o tempo, resultam em mudança gradativa na refletância espectral da vegetação (FONTANA; BERLATO, 1998).

3.3.2 Análise discriminante de Piracicaba

Na área de Piracicaba foram avaliados os dados coletados de 137, 169, 193 e 340 DAC através da análise discriminante, sendo posteriormente feito uma análise de variância. Avaliando a discriminante para os dados aos 137 DAC (Figura 3-9), onde cada ponto representa a curva espectral obtida das plantas demarcadas nas subparcelas, a primeira função explica 48,5% da variabilidade dos dados e a segunda função 31,8%. O gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 apresenta o agrupamento das doses 0 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹. O que não ocorre com as doses 50 kg.ha⁻¹ e 100 kg.ha⁻¹, que se diferenciam bem entre si e do grupo formado pelas 0 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹.

Figura 3-9 - Análise discriminante de Piracicaba aos 137 DAC

Avaliando a discriminante para os dados aos 169 DAC (Figura 3-10), onde cada ponto representa a curva espectral obtida das plantas demarcadas nas subparcelas, a primeira função aumenta seu poder de discriminar os dados pois explica 56,6% da variabilidade dos dados e a segunda função 29,7%. O gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 apresenta bem esse aumento de discriminação entre as doses de nitrogênio onde o agrupamento das doses 0 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹ que ocorreu aos 137 DAC não existe mais e a dose 100 kg.ha⁻¹ se diferencia bem das outras doses.

Figura 3-10 - Análise discriminante de Piracicaba aos 169 DAC

Avaliando a discriminante para os dados aos 193 DAC (Figura 3-11), onde cada ponto representa a curva espectral obtida das plantas demarcadas nas subparcelas, a primeira função diminui seu poder de discriminar os dados em relação aos 169 DAC pois explica 41,5% da variabilidade dos dados e a segunda função explica 33%. O gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 apresenta bem essa diminuição de discriminação entre as doses de nitrogênio onde o agrupamento das doses 0 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹ que ocorreu aos 137 DAC e não existia mais aos 169 DAC volta a existir.

Figura 3-11 - Análise discriminante de Piracicaba aos 193 DAC

A análise discriminante realizada para os 340 DAC (Figura 3-12) da área de Piracicaba apresenta uma dispersão maior das curvas espectrais de cada planta demarcada, representadas em forma de pontos. A primeira função discrimina 47,6% a variabilidade dos dados e a segunda função explica 33,1%. Próximo do fim da safra ocorre um agrupamento das doses 100 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹, provavelmente devido a maior quantidade de biomassa produzida devido a nenhuma restrição de nitrogênio por esses tratamentos.

Figura 3-12 - Análise discriminante de Piracicaba aos 340 DAC

Analisando estatisticamente os centroides das doses de nitrogênio de Piracicaba através da análise de variância (ANOVA) houve diferença significativa das doses entre as médias dos seis cruzamentos realizados aos 137 DAC, 169 DAC e 193 DAC.

Resultados semelhantes encontrado por Filella et al. (1995) em que estudando diferentes doses de nitrogênio na cultura do trigo utilizando a análise discriminante em dados hiperespectrais, entre os comprimentos de onda 390 nm e 1100 nm, claramente separou em três grupos: muito limitante (0 kg ha^{-1}), limitante (50 kg ha^{-1}) e bem fertilizado ($100, 150 \text{ e } 200 \text{ kg ha}^{-1}$).

No entanto aos 340 DAC não houve diferença significativa das doses entre as médias em pelo menos um cruzamento dos seis realizados. Pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, observou-se nos cruzamentos realizados que a dose 100 kg ha^{-1} não apresentou diferença significativa em relação a dose 150 kg ha^{-1} .

Desta forma, pode-se inferir que, em virtude das funções do nitrogênio na nutrição da planta em promover aumento do crescimento, pode ter levado à diluição de seu teor nos tecidos foliares, não sendo possível perceber diferenças significativas no teor desse macronutriente. Na literatura, é amplamente relatado o efeito da “diluição” dos nutrientes, ou seja, a concentração dos nutrientes é diluída com o maior crescimento da planta (JARRELL; BEVERLY, 1981; LEMAIRE; VAN OOSTEROM; et al., 2008).

3.3.3 Análise discriminante de Santa Maria da Serra

Na área de Santa Maria da Serra foram avaliados os dados coletados aos 81, 115, 146, 167 e 311 DAC através da análise discriminante, sendo posteriormente feito uma análise de variância. Avaliando a discriminante para os dados aos 81 DAC (Figura 3-13), onde cada ponto representa uma curva espectral obtida das plantas demarcadas nas subparcelas, a primeira função explica 42,2% da variabilidade dos dados e a segunda função 31,6%, totalizando 73,8%. Avaliando visualmente o gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 foi possível observar claramente a diferenciação de todas as doses de nitrogênio, mesmo com a alta dispersão dos dados.

Figura 3-13 - Análise discriminante de Santa Maria aos 81 DAC.

A análise discriminante realizada para os 115 DAC (Figura 3-14) apresenta a mesma tendência dos 81 DAC, mas com aumento do poder de discriminação da função 1 de 42,2% para 53,3% e a segunda função explicou 29,7% da variabilidade dos dados. O gráfico apresenta os grupos que representa as doses de nitrogênio se distinguindo, mesmo com alguns pontos da dose 150 kg.ha⁻¹ e 50 kg.ha⁻¹ se misturando.

Figura 3-14. Análise discriminante de Santa Maria aos 115 DAC

Avaliando a discriminante para os dados aos 146 DAC (Figura 3-15), a primeira função explica 52% da variabilidade dos dados, uma ligeira queda em relação aos 115 DAC, e a segunda função 29,2%, totalizando 81,2%. Avaliando visualmente o gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 ocorre o agrupamento das doses 100 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹, não observado anteriormente.

Figura 3-15 - Análise discriminante de Santa Maria aos 146 DAC

A análise discriminante para os dados aos 167 DAC (Figura 3-16) seguem a mesma observação feita para os dados dos 146 DAC, mesmo com o aumento do poder discriminar da função 1 de 52% para 53,7%. A função 2 explicou 25,4% onde antes era 29,2%, isso fez o somatório cair das duas funções de 81,2% para 79,1%. Essa diminuição da discriminação pode ter ocorrido devido ao aumento da confusão e agrupamento das doses 100 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹, iniciado aos 146 DAC.

Figura 3-16 - Análise discriminante de Santa Maria aos 167 DAC

Avaliando a discriminante para os dados de 311 DAC (Figura 3-17), a primeira função explica 42% da variabilidade dos dados, uma queda em relação aos 167 DAC, e a segunda função 34,8%, totalizando 76,8%. Avaliando visualmente o gráfico gerado pelo cruzamento das funções 1 e 2 ocorre o agrupamento das doses 50 kg.ha^{-1} e 100 kg.ha^{-1} , não observado anteriormente, pois ocorria anteriormente o agrupamento das doses 100 kg.ha^{-1} e 150 kg.ha^{-1} .

Figura 3-17 - Análise discriminante de Santa Maria aos 311 DAC

Analisando estatisticamente os centroides através da análise de variância (ANOVA) houve diferença significativa das doses entre as médias pelo menos um cruzamento dos seis realizados em cada mês. Pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, observou-se nos cruzamentos realizados que a dose 0 kg.ha⁻¹ apresentou diferença significativa em relação as outras doses de nitrogênio em todos os meses.

O mês de março não apresenta diferença significativa entre as doses 100 kg.ha⁻¹ e 150 kg.ha⁻¹, em agosto ocorre que as maiores doses se diferenciam da dose 0 kg.ha⁻¹ e não se distinguem entre si.

Os resultados apresentaram que não existe uma época específica para diferenciar o nitrogênio aplicado, mas um intervalo que compreende, no geral, de dezembro a março. Janeiro se destacou como a melhor época em discriminar as doses de nitrogênio para todas as áreas: Piracicaba com 137 DAC, Santa Maria com 115 DAC e Jaú com 148 DAC.

Gava et al. (2001) estudando o crescimento e acúmulo de nitrogênio na cana-de-açúcar observou que o período de máximo acúmulo de nitrogênio foi até 169 DAC e foi acompanhado também pelo acúmulo de matéria seca.

Apesar de vários estudos descobriram que as medições não destrutivas de folhas ou reflectância do dossel pode ser usado como um indicador do estado de nitrogênio na planta (FILELLA et al., 1995; ZHAO et al., 2003), as relações funcionais entre a resposta espectral e crescimento das plantas ou variáveis fisiológicas foram estabelecidos em apenas alguns estudos.

3.3.4 Análise discriminante das áreas em conjunto com 145 DAC de média

Com o intuito de avaliar a habilidade dos dados hiperespectrais em diferenciar não só as doses de nitrogênio em uma certa localização, mas da cultura em diferentes ambientes de produção foram agrupados os dados de janeiro das três áreas (Jaú com 148 DAC, Piracicaba com 137 DAC e Santa Maria com 115 DAC), feito uma nova análise discriminante e avaliado o comportamento dos dados. Para entender melhor o comportamento do nitrogênio foi feito a análise da folha +1 em laboratório e os dados foram apresentados na forma de boxplot e valores de média inseridos em cada dose acima da linha da mediana (Figura 3-18).

Figura 3-18 - Boxplot da análise de nitrogênio das três áreas para o mês de janeiro/2014

Os teores médios das folhas +1 foram de 20,66 g.kg⁻¹, 19,19 g.kg⁻¹, 20,98 g.kg⁻¹ e 21,81 g.kg⁻¹, respectivamente, para geral, Jau, Piracicaba e Santa Maria estão na faixa adequada (18-25 g.kg⁻¹) segundo Raij e Cantarella (1997). Ao analisar particularmente a dose 150 kg.ha⁻¹ nas três áreas, apresenta valores médios sempre abaixo ou próximos de 50 e 100 kg.ha⁻¹. Essa tendência foi observada por outros autores (FRANCO et al., 2011; AMARAL et al., 2015) caracterizado como efeito de diluição, em que a concentração do nutriente é diluída conforme o crescimento da planta. Assim plantas sem restrição de nitrogênio apresenta maior biomassa e, conseqüentemente, menor concentração de nitrogênio nos tecidos foliares (JARRELL; BEVERLY, 1981; LEMAIRE; JEUFFROY; GASTAL, 2008).

A análise discriminante explicou a variabilidade dos dados, 79,3%, nas duas primeiras funções (Figura 3-19). A primeira função apresentou 45,4% e a segunda função 33,9%. Foi formado três grupos onde visualmente não é possível distinguir visualmente as doses que se agruparam. Assim foi avaliado os centroides de cada dose para saber se estatisticamente seria possível de discriminar. Foi realizado a análise de variância (ANOVA) com os 66 cruzamentos possíveis entre as áreas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, observou-se nos cruzamentos realizados que a área de Santa Maria se diferenciou de todas as outras áreas. E que somente as doses 0 e 100 kg.ha⁻¹ da área de Jaú não se diferenciou estatisticamente das doses 0 e 50 kg.ha⁻¹ de Piracicaba.

Figura 3-19 - Análise discriminante das 3 áreas para o mês de janeiro/2014

Os resultados mostraram que é possível discriminar diferentes doses de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar usando dados hiperespectrais. Segundo Peñuelas e Filella (1998) a reflectância espectral fornece uma variedade de meios de detecção da composição química e biomassa da planta e, portanto, o estado fisiológico sendo assim importante na gestão da cultura.

3.3.5 Comprimentos de ondas significantes para discriminar doses de nitrogênio

De todas as análises realizadas, os comprimentos de onda (Figura 3-20) que apresentaram maior poder na discriminação (destacado na figura em vermelho) das doses de nitrogênio em cana de açúcar foram: região do visível (525 a 570, 620 a 710 nm) e do infravermelho próximo (790 a 815 nm). Trabalhos desenvolvidos para obter concentração de nitrogênio também por outros níveis de sensores (aéreo e orbital) afirmaram que consideráveis informações estão contidas no visível que está associado ao conteúdo de clorofila e no infravermelho médio que está relacionado com a estrutura celular (FILELLA et al., 1995; KUMAR et al., 2001; ABDEL-RAHMAN et al., 2013).

Figura 3-20 Principais comprimentos de onda para diferenciação do nitrogênio

A região que abrange os comprimentos de onda de 525 a 570 nm é denominada como visível, caracterizada por baixa reflectância espectral. Os pigmentos existentes nos cloroplastos (clorofila, carotenos e xantofilas) são os principais agentes da intensidade de reflectância nessa região. A região do visível é sensível a alterações na concentração de pigmentos na folha, sendo a clorofila, a mais abundante em plantas verdes (XUE; YANG, 2009).

Folhas saudáveis apresentam uma feição de reflectância típica, centrada em 550 nm (região do verde), uma vez que a luz verde é absorvida em menores quantidades quando comparadas com a luz azul e vermelha, sendo a luz verde predominante em relação energia refletida e transmitida para esta faixa do espectro, sendo esse o motivo pelas plantas apresentarem a cor verde (KUMAR et al., 2001; PONZONI et al., 2012). No entanto, esta absorção é significativa e aumenta com o incremento da concentração de clorofila na folha, que por sua vez é diretamente sensível a captação de nitrogênio pela planta (TERASHIMA et al., 2009).

Em trabalho desenvolvido por Jain et al. (2007), também usando dados hiperespectrais de espectroradiômetro portátil, para diferenciar doses de nitrogênio (0, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 kg.ha⁻¹) na cultura da batata selecionou quatro comprimentos de onda mais significantes: 560 nm, 650 nm, 730 nm e 760 nm.

Resultados que corroboram esse trabalho, em que os comprimentos de onda de 560 nm e 650 nm também foram significativos para diferenciar as diferentes doses de nitrogênio na cana-de-açúcar.

O *red-edge*, descrito pela primeira vez por Collins (1978), é uma das principais características da resposta espectral da vegetação. Situada entre a baixa reflectância do vermelho, influenciada pelos pigmentos, e alta reflectância do infravermelho próximo que é associada a estrutura interna da folha e conteúdo de água. A reflectância neste ponto é bastante relatado para teor de clorofila e consequentemente para nitrogênio. A declividade dessa região é um forte indicador da saúde da cultura. Estes resultados corroboram com trabalhos de muitos autores que tem descrito o *red-edge* como um ótimo indicador de concentração de nitrogênio na planta (ABDEL-RAHMAN; AHMED; VAN DEN BERG, 2010; TIAN et al., 2011).

Filella et al. (1995) estudando o potencial de dados espectrais em discriminar diferentes doses de nitrogênio na cultura do trigo (0, 50, 100, 150 e 200 kg.ha⁻¹) em diferentes fases fenológicas, obteve como resultado que a combinação dos comprimentos de onda de 550 nm, 680 nm e todo o *red-edge* estima melhor que o NDVI.

De acordo com Gates et al. (1965), a reflectância na região do infravermelho próximo resulta da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Segundo Ponzoni et al. (2012), quanto mais lacunosa for a estrutura interna da folha, maior será o espalhamento interno da radiação e assim maiores serão os valores do fator de reflectância.

Os pigmentos da folha são praticamente “transparentes” a radiação eletromagnética na região do infravermelho próximo, sendo que o comportamento espectral desta região sofre grande influência do arranjo estrutural das células do mesófilo esponjoso (KNIPLING, 1970). No entanto, apesar de grande parte do nitrogênio na planta ser alocado na composição dos cloroplastos, uma parte considerável deste elemento, encontra-se como constituinte de aminoácidos livres na planta, proteínas ou na estrutura de outros componentes nitrogenados, como as bases nitrogenadas (purinas e pirimidinas) e ácidos nucleicos (DNA e RNA), que são responsáveis por 10% do nitrogênio total da planta. Outras formas amino solúveis pode representar até 5% do nitrogênio na planta (MENGEL; KIRKBY, 1987; CONN et al., 2009).

Estando o nitrogênio relacionado com os mais importantes processos fisiológicos que ocorrem nas plantas, estresses causados por este nutriente podem afetar a estrutura celular, e conseqüentemente a reflectância no infravermelho próximo.

3.4 Conclusão

Para cada área separadamente estudada foi possível diferenciar as doses de nitrogênio pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade sendo o melhor resultado obtido para o mês de janeiro para Piracicaba, Santa Maria e Jaú.

Independente da área quando agrupadas, para o mês de janeiro, também foi possível discriminar as doses de nitrogênio. A área de Santa Maria, com textura arenosa, se separou na análise discriminante das demais áreas com texturas média-argilosa (Jaú) e argilosa (Piracicaba).

Os principais intervalos de comprimentos de ondas que possibilitaram na análise discriminante a diferenciação das doses de nitrogênio estão localizados na região do verde (525-570nm), red-edge (620-710nm) e infravermelho próximo (790-815nm). Esses resultados independem das áreas quando analisadas individualmente ou agrupadas.

Referências

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; ISMAIL, R. Random forest regression and spectral band selection for estimating sugarcane leaf nitrogen concentration using EO-1 Hyperion hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 34, n. 2, p. 712-728, 2013.

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; VAN DEN BERG, M. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 12, Supplement 1, p. S52-S57, 2010.

AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P; PORTZ, G.; FINAZZI, F.B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2015

COLLINS, W. Remote sensing of crop type and maturity. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 44, p. 43-55, 1978.

CONAB. **Acompanhamento de safra 2013/2014**. Brasília, 2015. 19p.

CONN, E.; STUMPF, P.; BRUENING, G.; DOI, R. H. **Outlines of biochemistry**. New York: John Wiley , 2009. p. ISBN 8126509309.

CURRAN, P.J. Imaging Spectrometry – Its Present and Future Role in Environmental Research. In: HILL, J. ; MÉGIER, J. (Ed.). **Imaging Spectrometry — a Tool for Environmental Observations**: Springer Netherlands, v.4, 1994. cap. 1, p. 1-23. (Eurocourses: Remote Sensing). ISBN 978-0-7923-2965-7.

DALGAARD, P. **Introductory statistics with R**. Springer Science & Business Media, 2008. p. ISBN 0387790543.

DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; BIEHL, L.L.; BLAD, B.L.; NORMAN, J.M.; GARDNER, B.R.; KANEMASU, E.T.; ASRAR, G. Spectral estimates of agronomic characteristics of crops. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 10., 1984. West Lafayette. **Anais...** West Lafayette, 1984. p.348-356.

FILELLA, I.; SERRANO, L.; SERRA, J.; PENUELAS, J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. **Crop Science**, Madison, v. 35, n. 5, p. 1400-1405, 1995.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. **Modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa do rendimento de soja no Rio Grande do Sul**: um estudo preliminar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998. Santos. **Anais...** Santos, 1998. 17-24p.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; ALMEIDA DE OLIVEIRA, E. C.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 29-41, 2011.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, New York, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GAVA, G.J.D.C.; TRIVELIN, P.C.O.; DE OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.

HAIR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. Bookman, 2009. 688p. ISBN 8577805344.

JAIN, N.; RAY, S.S.; SINGH, J.P.; PANIGRAHY, S. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 8, n. 4/5, p. 225-239, 2007.

JARRELL, W.; BEVERLY, R. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 34, n. 1, p. 197-224, 1981.

JAYNES, D.B.; COLVIN, T.S.; KARLEN, D.L.; CAMBARDELLA, C.A.; MEEK, D.W. Nitrate Loss in Subsurface Drainage as Affected by Nitrogen Fertilizer Rate. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 30, n. 4, p. 1305-1314 2001.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 1, n. 3, p. 155-159, 1970.

KUMAR, L.; SCHMIDT, K.; DURY, S.; SKIDMORE, A. Imaging Spectrometry and Vegetation Science. In: MEER, F.D.D.V. ; JONG, S.M.D. (Ed.). **Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. p. 111-155. ISBN 978-0-306-47578-8.

LANDGREBE, D.A. The quantitative approach: concept and rationale. In: SWAIN, P. H. ; DAVIS, S.M. (Ed.). **Remote Sensing: The Quantitative Approach**. New York: McGraw-Hill International , 1978. cap. 1, p. 3-20.

LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M.-H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 28, n. 4, p. 614-624, 2008.

LEMAIRE, G. VAN OOSTEROM, E.; JEUFFROY, M.H.; GASTAL, F.; MASSIGNAM, A. Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 105, n. 3, p. 253-265, 2008.

LILLESAND, T.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and image interpretation**. 7th ed. London: John Wiley, 2015. 768p. ISBN 111834328X.

MALAVOLTA, E.; CESAR VITTI, G.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. (Ed.). Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 4th ed. Switzerland: International Potash Institute, 1987. 687p. ISBN 3906535037.

MIN, M.; LEE, W.S. Determination of significant wavelengths and prediction of nitrogen content for citrus. **Trans ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 2, p. 455-461, 2005.

MOKHELE, T.A.; AHMED, F.B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, Berlin, v. 4, n. 1, p. 043560-043560-18, 2010.

MURRELL, P. **R graphics**. London: CRC Press, 2011. 301p. ISBN 1439831777.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 387p. ISBN 9788521205401.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 3, n. 4, p. 151-156, 1998.

PESTANA, M.H.; GAGEIRO, J.N. **Análise de dados para ciências sociais: a complementaridade do SPSS**. 4 ed. Lisboa: Silabo, 2005. 690p.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 160p. ISBN 8560507027.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, A.J.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. Campinas: IAC, v.100, 1997. p. 8-13.

STRACHAN, I.B.; PATTEY, E.; BOISVERT, J.B. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 80, n. 2, p. 213-224, 2002.

TERASHIMA, I.; FUJITA, T.; INOUE, T.; CHOW, W.S.; OGUCHI, R. Green Light Drives Leaf Photosynthesis More Efficiently than Red Light in Strong White Light: Revisiting the Enigmatic Question of Why Leaves are Green. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 50, n. 4, p. 684-697, April 1, 2009.

TIAN, Y.C.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W.X.; HANNAWAY, D.B.; ZHU, Y. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground-and space-based hyperspectral reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 2, p. 299-310, 2011.

XUE, L.; YANG, L. Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 97-106, 2009.

ZHAO, D.; RAJA REDDY, K.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; CARTER, G.A. Corn (*Zea mays* L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. **Plant and Soil**, The Hague, v. 257, n. 1, p. 205-218, 2003.

ZHAO, D.; REDDY, K.R.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; KOTI, S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 335-344, 2007.

4 ANÁLISE TEMPORAL DE DADOS ESPECTRAIS DE DOSSEL DE CANA-DE-AÇÚCAR E SUA CORRELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DE BIOMASSA

Resumo

Novas tecnologias de produção tem surgido em função da demanda de melhoria da produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Como a produtividade de cana-de-açúcar está muitas vezes associado à biomassa mensurada ao longo de seu ciclo, a avaliação de canaviais com sensores hiperespectrais, assim como amostragem de biomassa, podem possibilitar o mapeamento da produtividade. Assim o presente trabalho teve como objetivo identificar quais são os comprimentos de onda e época que apresentam maior correlação com a biomassa (ponteiro) produzida na colheita da cana-de-açúcar. Foi utilizado dados da área experimental localizado no município de Piracicaba em três diferentes datas. O experimento foi alocado em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições; e receberam doses de 0, 50, 100 e 150 kg de nitrogênio por hectare. A análise espectral foi realizada aos 137, 169 e 193 Dias Após o Corte (DAC) e a avaliação biométrica foi realizada aos 345 DAC. Durante o corte de dois metros de linha, realizado manualmente. A biomassa do ponteiro foi submetida ao teste de Shapiro-Wilk, análise de variância pelo Teste F e as médias quando significativas, comparadas pelo Teste de Tukey. Posteriormente foi realizada a análise de correlação de Pearson da biomassa do ponteiro e cada comprimento de onda. As significâncias das correlações foram avaliadas utilizando o teste t ($p \leq 0,1$). Análise mostrou que existe uma correlação significativa e consistente entre a biomassa do ponteiro e a reflectância do dossel aos 137 DAC e 169 DAC, porém aos 193 DAC não houve nenhum comprimento de onda com correlação significativa. As maiores correlações entre o ponteiro e os comprimentos de onda ocorreram aos 137 DAC, na região do vermelho e infravermelho médio, sendo o maior valor observado de correlação 0,33 para 685 nm (vermelho). Aos 169 DAC houve correlação significativa do comprimento de onda de 723 nm a 1437 nm, abrangendo todo o infravermelho próximo e o início do infravermelho médio. Concluiu-se que a tecnologia apresenta potencial de aplicação para estimativa de biomassa da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Sensores hiperespectrais; Análise de correlação

Abstract

New production technologies have arisen to improve the quality and productivity of sugarcane cultivation. As the sugarcane yield is often associated with the biomass measurement throughout its cycle, the assessment of plantations using hyperspectral sensors, as well as biomass sampling, can enable yield mapping on sugarcane. The present aimed to identify the wavelengths and time that presents greater correlation with biomass (pointer) on sugarcane crop. We used data from the experimental area located in the city of Piracicaba in three different dates. The experimental delineation used was randomized blocks with treatments in subdivided parcels, with four repetitions; receiving doses of 0, 50, 100 and 150 kg of nitrogen per hectare. Spectral analysis was held at 137, 169 and 193 Days After Harvest (DAH) and evaluation of sugarcane yield was held at 345 DAH. Biomass was analyzed using Shapiro-Wilk test of normality, F test (analysis of variance), respectively, and when significant,

compared by the Tukey test. Biomass (pointer) and each wavelength were analyzed by Pearson's correlation analysis. Correlations were evaluated using the t-test ($p \leq 0.1$). The results showed that there is a positive correlation between biomass (pointer) and the canopy reflectance to 137 DAH and 169 DAH, however there was no wavelength with a significant correlation to 193 DAH. The best power relationship (0.33) was obtained at 685 nm to 137 DAH between biomass (pointer) and the canopy reflectance, in the the red and mid-infrared regions. There was significant correlation of 723 nm to 1437 nm wavelengths, 169 DAH, spanning from the near-infrared to the mid infrared regions. It was concluded that the technology offers potential for application to estimation of biomass from sugarcane.

Keywords: *Saccharum* spp.; Hyperspectral sensors; Correlation analysis

4.1 Introdução

No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar está instalada em uma área superior a cinco milhões de hectares, produzindo mais de 634,7 milhões de toneladas na safra 2014/2015 (CONAB, 2015). Diante disso, consequentemente o país desponta como líder mundial em exportações de açúcar, além de ser líder mundial na utilização desta planta como fonte de energia renovável.

Com o aumento da área cultivada, cresce também a demanda por novas tecnologias de produção. Nesse sentido, é fundamental que se busquem alternativas que reduzam os impactos e promovam os ganhos de produtividade, sem comprometer o balanço energético da cultura. A análise do crescimento da cultura é tida como método padrão para se estimar a produtividade de uma cultura (MAGALHÃES, 1979). Outro modo de obter informações da área cultivada e produtividade média é por meio de sistema de estimativa de safras.

A partir da década de 70, os dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados para a estimativa de área plantada, gerando resultados bastante condizentes com a realidade. Já a produtividade é uma variável muito complexa para ser estimada, uma vez que depende de diversos fatores culturais e ambientais (XAVIER et al., 2005).

Segundo Rudorff et al. (2010), por causa dessa complexidade ainda não existe uma metodologia operacional para estimar a produtividade de culturas agrícolas fundamentada em dados coletados por sensores remotos. Diferentes modelos foram desenvolvidos para estimar a produtividade de culturas agrícolas, entretanto, a grande maioria desses modelos não utiliza variáveis provenientes do sensoriamento remoto. Deste modo, acredita-se que a utilização de dados espectrais das culturas pode melhorar os resultados dos modelos de produtividade.

Como a produtividade de cana-de-açúcar está muitas vezes associado à biomassa mensurada ao longo de seu ciclo (OLIVEIRA, R. A. et al., 2007), a avaliação de canaviais com sensores hiperespectrais, assim como amostragem de biomassa, podem possibilitar o mapeamento da produtividade.

Franco et al. (2011) avaliando a contribuição do fertilizante ^{15}N no total de nitrogênio acumulado na biomassa acima do solo durante dois ciclos de cana-de-açúcar. Observaram que o fertilizante nitrogenado desempenha um papel importante na condição nutricional da cultura, sendo responsável por 70% do nitrogênio absorvido pela cana-de-açúcar.

Outro fator positivo de estimar a biomassa é que a realização da colheita sem queima pode deixar na superfície do solo quantidade considerável de resíduos vegetais, que segundo Vitti et al. (2007) pode chegar a 30 Mg ha^{-1} de massa de matéria seca.

Em regiões canavieiras do Brasil e do mundo, onde a precipitação pluvial é pequena ou irregular, a presença da palhada sobre o solo também tem contribuído para elevar a produtividade da cana-de-açúcar, principalmente por aumentar a infiltração da água no solo e diminuir a evaporação edáfica (BALL-COELHO et al., 1993).

Essa matéria seca é constituída por ponteiros, folhas secas e pedaços de colmos que irá provocar segundo Vitti (2003) mudanças significativas no manejo da cultura, com influência direta nas práticas de adubação nas soqueiras.

Pois a incorporação dessa matéria no solo vai atuar, subsequentemente, como uma das principais fontes de nitrogênio para a cana-de-açúcar (SAMPAIO; SALCEDO; BETTANY, 1984). Oliveira et al. (2011) consideraram que diferentes acúmulos ocorrem de acordo com a variedade, variando de 15 a 42%.

Oliveira et al. (2007) estudando a área foliar de três variedades de cana-de-açúcar e sua correlação com a biomassa obteve como resultado elevados valores de índice de área foliar (IAF), observados dos 231 aos 428 dias após o plantio (DAP) para a cultivar RB 855113. E que no final do ciclo, a cultivar RB 72454, que teve a maior produção de massa seca de folhas e IAF, também apresentou o maior rendimento em produtividade.

Alguns autores estudaram o processo de mineralização dos resíduos orgânicos em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar, visando maior aproveitamento dos resíduos em campo, que historicamente eram queimados antes da colheita

(VITTI et al., 2008). O aproveitamento do nitrogênio pela soqueira pode representar cerca de 8% do nitrogênio proveniente da palhada do ano anterior (GAVA et al., 2003) e os acúmulos ocorrem no final do ciclo da cultura da cana-de-açúcar (VITTI et al., 2011).

Alguns trabalhos foram feitos para estimar biomassa a partir de dados hiperespectrais, por exemplo, Thenkabail et al. (2004) trabalhando com dados de dossel e orbital para estimar biomassa em algodão, batata, soja, milho e girassol. E conclui que para obter melhores informações são necessárias somente 30 ou menos comprimentos de onda.

Hansen e Schjoerring (2003) estimando biomassa, índice de área foliar e teor de nitrogênio na cultura do trigo com sensor hiperespectral que trabalha entre os comprimentos de onda do 400 nm a 900 nm e índices de vegetação. Conclui que a região do red-edge (680 a 750 nm) representa 87% dos índices selecionados relacionados a biomassa.

Partindo desta premissa, este trabalho, tem por objetivo identificar quais são os comprimentos de onda e qual época que apresenta maior correlação com a biomassa (ponteiro) da cana-de-açúcar.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Área de estudo

Na Figura 4-1 observa-se a área, localizada na cidade de Piracicaba-SP, no Polo Centro-Oeste (APTA) em parceria com a equipe de pesquisa do IAC coordenada pelo Pesquisador Heitor Cantarella, nas coordenadas geográficas 22°41'05" de latitude sul e 47°38'54" de longitude oeste. Seu solo está classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), com textura argilosa (0-20 cm) e muito argilosa (20-40 cm). O clima da região segundo a classificação de Koppen é denominado subtropical úmido (CWA), com pluviosidade média anual inferior a 1400 mm, sendo o verão chuvoso e inverno seco. Para elaboração da precipitação acumulada mensal e normal foram utilizados dados pluviométricos da estação meteorológica da Esalq (dados de 1913 a 2014), que está instalada próxima a área experimental, e posteriormente foram calculados mediante o uso de planilhas eletrônicas (Figura 4-2).

Figura 4-1 - Área de estudo

Figura 4-2 - Precipitação acumulada mensal e normal durante o período do experimento

Fonte: Estação meteorológica da ESALQ

O experimento foi instalado em 2010 no delineamento experimental em blocos ao acaso (DBC), com parcelas subdivididas, sendo as parcelas diferenciadas pelas doses de Nitrogênio (0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹) e as subparcelas por diferentes variedades. Na safra 2013/2014 as áreas estavam no quarto ciclo de soqueira.

A correção inicial do pH do solo e adubação de base anual foi realizada de acordo com a necessidade da cultura após análise de rotina para a fertilidade do solo. As doses de N propostas no presente trabalho foram aplicadas utilizando o nitrato de amônio, aplicado manualmente sobre a palhada logo após o corte da cana-de-açúcar. Os tratos culturais seguiram o padrão adotado pelo sistema produtivo da cana-de-açúcar para a região.

4.2.2 Marcação das parcelas e obtenção das leituras espectrais

De modo a padronizar as coletas de dados ao longo do experimento, plantas foram marcadas no terço inferior do colmo com fitas plásticas em cada subparcela da área em estudo (Figura 4-3)

Figura 4-3 - Demarcação de plantas das áreas experimentais: (A) Escolha e marcação das plantas com fita plástica zebrada (B) Plantas marcadas em estágio fenológico avançado

Cada subparcela é composta por cinco linhas de cana-de-açúcar, sendo considerada como área útil somente as três fileiras centrais. As plantas foram selecionadas de modo aleatório dentro das três fileiras, duas na segunda e quarta fileira e uma na terceira fileira (Figura 4-4).

Figura 4-4 - Esquema da subparcela e plano de avaliação

Os dados espectrais do dossel foram coletados em diferentes dias após o corte (DAC) (Tabela 4-1), utilizando o sensor hiperespectral FieldSpec Spectroradiometer (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA), que opera no intervalo espectral de 350 a 2500 nm, com resolução espectral de 1,4 nm de 350 a 1050 nm e 2 nm de 1050 a 2500 nm. Vale ressaltar que por se tratar de um sensor passivo, algumas das avaliações ocorreram em períodos superiores a 30 dias, devido as condições climáticas desfavoráveis a realização da radiometria de campo.

Tabela 4-1 - Descrição das datas de coletas

Área	Datas de coleta (DAC)
Piracicaba - SP	20/01/2014 (137)
	21/02/2014 (169)
	17/03/2014 (193)

As avaliações de dossel (Figura 4-5) foram sempre realizadas em dias ensolarados, entre 10:00 e 14:00 horas, com o sensor posicionado a um metro da altura média da haste da cultura e com campo de visada de 25°, o que proporciona uma leitura circular de aproximadamente 0,25 m² de área. Primeiramente, para cada bloco foi realizada a calibração, utilizando a placa padrão que acompanha o aparelho; posteriormente as leituras foram realizadas em cada subparcela, nos cinco pontos representativos previamente demarcados.

Figura 4-5 - Obtenção da resposta espectral de dossel em campo em estágio fenológico intermediário com utilização de escada multifuncional: (A) Localização do ponto demarcado; (B) Leitura espectral; (C) Leitura espectral vista de cima

4.2.3 Obtenção dos dados de biomassa

A avaliação biométrica para obtenção dos dados de produtividade foi realizada 345 DAC (Dias Após o Corte). Durante o corte de dois metros de linha, realizado manualmente, a parte aérea foi separada em colmo, folhas secas e ponteiro (folhas verdes). A pesagem do material fresco foi realizada, imediatamente,

após o corte conforme Figura 4-6 (TRIVELIN et al., 1994; CALDAS, 1998). Nesse trabalho somente a variável ponteiro foi analisada.

Figura 4-6. Metodologia de obtenção dos dados de biomassa: (A) Marcação de 2 metros de linha; (B) Colheita; (C) Retirada; (D) Separação; (E) Catalogação do material por número da subparcela e (D) Pesagem.

4.2.4 Análise estatística

4.2.4.1 Pré-processamento dos dados

Foram coletados os dados espectrais das 48 subparcelas, onde de cada subparcela foram obtidas 5 curvas espectrais, sendo 1 curva pertencente a cada uma das 5 plantas marcadas, num total de 240. Os dados espectrais foram

exportados do formato asd para txt utilizando o software ViewSpec Pro para as análises.

Para realizar a análise de correlação foi necessário anteriormente verificar dentro de cada subparcela o comportamento das cinco curvas espectrais, verificando se a média poderia representar a subparcela. Foi feito então a verificação de *outliers* através do teste de normalidade e análise de variância, conforme Figura 4-7. Assim foi possível realizar as análises em função das médias das subparcelas, total de 48, e não mais em função das curvas individuais das plantas.

Figura 4-7 - Procedimento de obtenção da curva espectral média da subparcela

As regiões espectrais entre 350-399, 1355–1420 nm, 1800–2500 nm que são conhecidas como regiões de ruídos devido a interferência da umidade no ambiente (CURRAN, 1994; ZHAO et al., 2007; ABDEL-RAHMAN; AHMED; ISMAIL, 2013) foram removidas das curvas espectrais e excluídas das análises (Figura 4-7).

4.2.4.2 Análise de correlação de Pearson

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em equivalência, caso a distribuição seja log-normal a medida

mais adequada será a mediana. Assim para testar a hipótese da normalidade foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 5%. Nele, a estatística W testa a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal.

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e as médias quando significativas, comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. Posteriormente foi realizada a análise de correlação de Pearson da biomassa do ponteiro e cada comprimento de onda. As significâncias das correlações foram avaliadas utilizando o teste t ($p \leq 0,1$).

Os testes estatísticos foram realizados com auxílio do software R (versão 3.2.2). O R é uma linguagem de programação (DALGAARD, 2008) que permite manipular dados, fazer cálculos e construir gráficos estatísticos (MURRELL, 2011).

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Análise estatística descritiva dos dados de ponteiro

Os dados de ponteiro apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, com valores do teste de Shapiro e Wilk (1965) de 0,012. Nos tratamentos, independentemente da quantidade de nitrogênio aplicada, não houve diferença significativa com relação a biomassa quando aplicado o teste de Tukey a 5% de probabilidade (Figura 4-8).

Figura 4-8 - Teste de tukey a 5% de probabilidade para verificar entre quais doses ocorrem diferenças significativas para ponteiro

Os resultados da biomassa do ponteiro (Tabela 4-2) para as diferentes doses de nitrogênio aplicado mostra que a dose 0 kg.ha⁻¹ apresenta a maior média, com 3,43 kg, em relação aos tratamentos com fertilização, seguida pela dose 150 kg.ha⁻¹ (3,35 kg), 50 kg.ha⁻¹ (3,16 kg) e 100 kg.ha⁻¹ (3,08 kg). Esse comportamento indica ausência de resposta a adubação nitrogenada quanto ao acúmulo de biomassa do ponteiro.

Tabela 4-2 - Estatística descritiva da biomassa do ponteiro (kg) por diferentes doses de nitrogênio

Níveis de adubação (kg.ha ⁻¹)		1)						
		Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de Variação
0		2.25	3.43	3.58	4.15	0.56	0.32	0.41
50		2.20	3.16	2.98	4.30	0.62	0.38	0.43
100		0.90	3.08	3.08	6.00	1.21	1.48	0.78
150		2.35	3.35	3.50	4.10	0.58	0.33	0.41

Níveis de adubação (kg.ha ⁻¹)	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de Variação	Amplitude
0	2.25	3.43	3.58	4.15	0.56	0.32	0.164	1.90
50	2.20	3.16	2.98	4.30	0.62	0.38	0.196	2.10
100	0.90	3.08	3.08	6.00	1.21	1.48	0.395	5.10
150	2.35	3.35	3.50	4.10	0.58	0.33	0.173	1.75

Um dos motivos desse baixo rendimento em produção de biomassa pode estar associado a deficiência hídrica ocorrida na safra 2013/2014 conforme visto na Figura 4-2 em que mostra uma distribuição das chuvas de novembro de 2013 a fevereiro de 2014 abaixo do esperado, sendo observado um aumento para o mês de março de 2014.

Segundo Smit e Singels (2006) o estresse hídrico causa acentuada senescência foliar e restrição de novas folhas, e o grau dessas alterações é decorrente da intensidade do estresse. Inman-Bamber e Smith (2005) estudando a reposta da cana-de-açúcar ao déficit hídrico observou que a planta acelera a senescência das folhas velhas e restringe a emissão de folhas novas, assim reduz a área foliar e conseqüentemente o conteúdo de água utilizado pela cultura durante o estresse.

4.3.2 Avaliação das correlações dos meses estudados

Os resultados observados dos coeficientes de correlação de Pearson entre cada comprimento de onda e o ponteiro são apresentados na Figura 4-9. Esta análise mostra que existe uma correlação significativa e consistente entre a biomassa do ponteiro e a reflectância do dossel em janeiro (137 DAC) e fevereiro (169 DAC). Porém para o mês de março (193 DAC) não houve nenhum comprimento de onda com correlação significativa.

Figura 4-9 - Coeficientes de correlação de Pearson entre cada comprimento de onda da curva espectral da cana-de-açúcar e a biomassa do ponteiro dos três meses avaliados. Linhas contínuas indicam correlação significativa, de acordo com o teste t ($p \leq 0,1$).

Em janeiro (137 DAC) as maiores correlações entre o ponteiro e comprimento de onda foi na região do vermelho (612 nm a 717 nm) e infravermelho médio (1444 nm a 1787 nm). Os coeficientes de correlação de Pearson variaram de 0,24 a 0,33 e média de 0,29 (Tabela 4-3). O maior valor de correlação encontrado foi para o comprimento de onda de 685 nm com 0,33. Rosa (2009) descreve que existe banda de absorção, centrada aproximadamente em 680 nm, relacionada ao processo de fotossíntese.

Tabela 4-3 - Estatística descritiva das correlações entre os comprimentos de onda e ponteiro em janeiro

	Comprimentos de onda (nm)	
	Vermelho 612 a 717	Infravermelho próximo 1444 a 1787
Média	0.2943	0.2767

Mediana	0.2940	0.2636
Desvio padrão	0.0271	0.0262
Variância da amostra	0.0007	0.0007
Intervalo	0.0885	0.0846
Mínimo	0.2429	0.2424
Máximo	0.3314	0.3269

Em fevereiro (169 DAC) houve correlação significativa do comprimento de onda de 723 nm a 1437 nm, abrangendo todo o infravermelho próximo (720 nm a 1100 nm) e o início do infravermelho médio (1100 nm a 3200 nm). A análise estatística descritiva (Tabela 4-4) apresentou valor médio de correlação de 0.31, sendo o mínimo de 0.28 para o comprimento de onda 1795 nm do infravermelho médio e o máximo de 0.33 para o comprimento de onda 934 nm do infravermelho próximo.

Tabela 4-4 - Estatística descritiva das correlações entre os comprimentos de onda e ponteiro em fevereiro

	Infravermelho médio 723 a 1437 nm
Média	0.3155
Mediana	0.3175
Desvio padrão	0.0121
Variância da amostra	0.0001
Intervalo	0.0546
Mínimo	0.2846
Máximo	0.3292

4.3.3 Avaliação dos comprimentos de ondas com correlação significativa

Analisando a curva espectral na região do visível entre 650 nm e 700 nm obtidos de subparcelas com valores de ponteiro de 0,9 kg e 4,3 kg, Figura 4-10, percebe-se como essa região do espectro é sensível em diferir a produção de biomassa. O ponteiro que tem maior peso (4,3 kg) apresenta menor reflectância e o ponteiro que tem menor peso (0,9 kg) apresenta a relação inversa, maior reflectância sendo essa diferença de um pouco mais de 12% no comprimento de onda de 685 nm.

Figura 4-10 - Curvas espectrais (650 a 700 nm) de janeiro (137 DAC) para diferentes valores de ponteiro

A região de transição entre a luz visível e o infravermelho, caracterizada pelo rápido aumento da reflectância, observada na curva espectral da vegetação e descrita na literatura como *red-edge* (TIAN et al., 2011) que fica entre 680 nm e 730 nm, também apresentou correlação consistente e significativa com a biomassa do ponteiro, estando estes valores médio de 0,25 de correlação no comprimento de onda de 710 nm. Alguns trabalhos vêm observando que a região espectral do vermelho e do red-edge vem se mostrando sensíveis a variação de pigmentos em plantas, especialmente a clorofila, portanto índices e modelos espectrais têm sido desenvolvidos utilizando estas regiões espectrais (MOKHELE; AHMED, 2010; YAO et al., 2015).

Estudos anteriores, indicam que as medições em alta resolução espectral da região red-edge (700 nm a 795 nm) podem ser usadas para detectar mudanças muito pequenas de vegetação (ELVIDGE; CHEN; GROENEVELD, 1993). Em trabalho desenvolvido por Hansen e Schjoerring (2003) para estimar biomassa a partir de dados hiperespectrais obteve o resultado de que 87% dos índices selecionados utilizam essa região do espectro.

A região do infravermelho próximo (720 nm a 1100 nm) e o início do infravermelho médio (1100 nm a 3200 nm) teve correlações significativas no mês de fevereiro (169 DAC). Avaliando essa região da curva espectral de ponteiros com pesos distintos (Figura 4-11), o maior valor de correlação se encontra em 934 nm

com 0,32. Visualmente as curvas se distinguem em intensidade ao longo de toda a região, chegando à diferença de reflectância em 934 nm de 11%.

Figura 4-11 - Curvas espectrais (720 a 1440 nm) de feveireiro (169 DAC) para diferentes valores de ponteiro

Gates et al. (1965) concluíram que a reflectância espectral na região do infravermelho próximo é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, e assim, alterar quantitativamente a reflectância de uma folha nessa região.

Outra região que apresentou correlações significativas foi a região do infravermelho médio (Figura 4-12), mais especificamente entre 1440 nm e 1790 nm. Essa região se encontra entre dois pontos de queda na reflectância influenciada pelo conteúdo de água na folha. É perceptível a diferença da curva espectral do ponteiro com 0,9 kg e 4,3 kg, diferença essa não de feijão, mas de intensidade, onde o ponteiro que tem menor peso apresenta maior reflectância em relação ao ponteiro com maior peso.

Figura 4-12 - Curvas espectrais (1440 a 1790 nm) de janeiro (137 DAC) para diferentes valores de ponteiro

Miocque (1999) avaliando mensalmente, num período de 10 anos (1987/1997), o crescimento da cana, pela determinação da matéria verde, observou que o máximo crescimento se manifestou nos meses de dezembro e janeiro. E conclui que esse período pode ser utilizado como ponto de partida para previsão de safra, corroborando assim os resultados desse trabalho em que o melhor mês com correlação foi janeiro.

De acordo com Machado et al. (1982) após cem dias de ciclo, a massa seca de folhas representa 70% de toda a massa seca da planta; depois desta fase ocorre diminuição progressiva até que, ao redor de 400 dias após o plantio (DAP), a quantidade de massa seca das folhas representa apenas 9% de toda massa seca acumulada pela planta.

Amaral et al. (2015) comparando diferentes sensores comerciais ativos em dossel em áreas com cana-de-açúcar para detectar a variabilidade de biomassa e concentração do nitrogênio obteve altas correlações. Estes sensores utilizam comprimentos de ondas fixos, na região do visível e infravermelho próximo, provendo como resultado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

Regiões que o sensor utilizado nesse trabalho também foi sensível a variação da biomassa do ponteiro.

Avaliando dados orbitais do sensor SPOT para estimar a produtividade da cana-de-açúcar, Fernandes; Rocha; Lamparelli (2011) utilizou valores extraídos do NDVI entre os meses de dezembro e janeiro que permitiu classificar em três classes: abaixo da média, média e acima da média. Sendo os resultados mais efetivos para as classes “média” e “acima da média”, com acertos de 86,5% e 66,7%, respectivamente.

4.4 Conclusão

Os resultados demonstraram que dados hiperespectrais de dossel são sensíveis a variação da biomassa do ponteiro para cana-de-açúcar.

Aos 137 DAC e 169 DAC apresentaram correlações com o ponteiro em regiões distintas do espectro eletromagnético, enquanto que dados de 193 DAC não apresentaram comprimentos de onda significantes.

As regiões do visível e do infravermelho próximo contém as maiores correlações com o ponteiro comparando com outras partes do espectro eletromagnético.

Os melhores resultados de correlação foram o comprimento de onda de 685 nm aos 137 DAC com correlação de 0,33 e 934 nm aos 169 DAC com correlação de 0,32.

Referências

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; ISMAIL, R. Random forest regression and spectral band selection for estimating sugarcane leaf nitrogen concentration using EO-1 Hyperion hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 34, n. 2, p. 712-728, 2013.

ABDEL-RAHMAN, E.M.; MUTANGA, O.; ODINDI, J.; ADAM, E.; ODINDO, A.; ISMAIL, R. A comparison of partial least squares (PLS) and sparse PLS regressions for predicting yield of Swiss chard grown under different irrigation water sources using hyperspectral data. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 106, p. 11-19, 2014.

AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F.B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2015.

BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Residue Management Effects on Sugarcane Yield and Soil Properties in Northeastern Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 5, p. 1004-1008, 1993.

CALDAS, C. **Manual de análises selecionadas para indústrias sucroalcooleiras**. Maceió: Sindicato da Indústria e do Alcool do Estado de Alagoas, 1998. 422p.

CONAB. **Acompanhamento de safra 2013/2014**. Brasília, 2015. 19p.

CURRAN, P.J. Imaging Spectrometry – Its Present and Future Role in Environmental Research. In: HILL, J. ; MÉGIER, J. (Ed.). **Imaging Spectrometry — a Tool for Environmental Observations**: Springer Netherlands, v.4, 1994. cap. 1, p. 1-23. (Eurocourses: Remote Sensing). ISBN 978-0-7923-2965-7.

DALGAARD, P. **Introductory statistics with R** Springer Science & Business Media, 2008. p. ISBN 0387790543.

ELVIDGE, C.D.; CHEN, Z.; GROENEVELD, D.P. Airbone Imaging Spectrometry Detection of trace quantities of green vegetation in 1990 AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 44, n. 2, p. 271-279, 1993.

FERNANDES, J.L.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, p. 139-146, 2011.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; ALMEIDA DE OLIVEIRA, E. C.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 29-41, 2011.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, New York, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Recuperação do nitrogênio (15N) da uréia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 621-630, 2003.

HANSEN, P.M.; SCHJOERRING, J.K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 86, n. 4, p. 542-553, 2003.

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.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, H.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.

MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M.G. (Ed.). **Fisiologia vegetal**. São Paulo: Edusp, v.1, 1979. p. 331-349.

MIOCQUE, J. Avaliação de crescimento e de produtividade de matéria verde da cana-de-açúcar na região de Araraquara-SP. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 1, p. 45-47, 1999.

MOKHELE, T.A.; AHMED, F.B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, Berlim, v. 4, n. 1, p. 043560-043560-18, 2010.

MURRELL, P. **R graphics**. London: CRC Press, 2011. 301p. ISBN 1439831777.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; DA SILVA, D.K.T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.

OLIVEIRA, R.C.A.; FREIRE, R.J.; OLIVEIRA, R.I.; OLIVEIRA, A.C.; FREIRE, M.B.G.S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 3, p. 579-588, 2011.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 7 ed. Uberlândia: EDUFU, 2009. 264p. ISBN 9788570781246.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SAMPAIO, E.; SALCEDO, I.; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência na utilização de uréia (15N) em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 8, p. 943-949, 1984.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

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.

THENKABAIL, P.S.; ENCLONA, E.A.; ASHTON, M.S.; VAN DER MEER, B. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 91, n. 3/4, p. 354-376, 2004.

TIAN, Y.C.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W.X.; HANNAWAY, D.B.; ZHU, Y. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground-and space-based hyperspectral reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 2, p. 299-310, 2011.

TRIVELIN, P.C.O.; LARA CABEZAS, W.A.R.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Evaluation of a 15N plot design for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugar cane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, p. 226-234, 1994.

VITTI, A.C. **Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: manejo e efeito na produtividade**. 2003. 114p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

VITTI, A.C.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Balanço de massa e de nutrientes da palhada e da rebrota de cana-de-açúcar dessecada com glifosato. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 25, n. 3, p. 30-33, 2007.

VITTI, A.C.; FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FERREIRA, D.A.; OTTO, R.; FORTES, C.; FARONI, C.E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 287-293, 2011.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; OTTO, R.; TRIVELIN, M.O.; TOVAJAR, J.G. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2757-2762, 2008.

XAVIER, A.C.; ALVARENGA, B.S.; MOREIRA, M.A.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, J.G.D.; SALOMON, M.V.; EPIPHANIO, J.C.N.; FONSECA, L.M.G. Avaliação de dados de sensoriamento remoto de diferentes períodos na estimativa da produtividade e altura final do trigo (*Triticum aestivum*, L.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005. Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2005. p.329-336.

YAO, X.; HUANG, Y.; SHANG, G.; ZHOU, C.; CHENG, T.; TIAN, Y.; CAO, W.; ZHU, Y. Evaluation of Six Algorithms to Monitor Wheat Leaf Nitrogen Concentration. **Remote Sensing**, Basel, v. 7, n. 11, p. 14939-14966, 2015.

ZHAO, D.; REDDY, K.R.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; KOTI, S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 335-344, 2007.

5 ESTIMATIVA DO TEOR FOLIAR DE NITROGÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE DADOS HIPERESPECTRAIS DE DOSSEL

Resumo

A cana-de-açúcar se destaca como uma das fontes de energia renovável frente as estratégias para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa. Vários macros e micronutrientes são essenciais para o seu metabolismo e o nitrogênio é um dos macronutrientes mais significativos devido ao seu impacto sobre o crescimento de folhas e colmos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura. Portanto, o monitoramento eficiente e gestão adequada do nitrogênio aplicado é essencial e o sensoriamento remoto se apresenta como uma das alternativas para a melhoria do gerenciamento dessa adubação. O presente trabalho teve por objetivo selecionar variáveis a partir de dados hiperespectrais de dossel da cana-de-açúcar para geração de modelos na predição do Teor Foliar de Nitrogênio (TFN). O estudo foi desenvolvido nos municípios de Piracicaba, Jaú e Santa Maria da Serra, todos no estado São Paulo. Cada experimento foi alocado em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições, e receberam doses de 0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹ de nitrogênio. As leituras espectrais de dossel e análises foliares de laboratório do nitrogênio foram realizadas para a safra 2013/2014. Na seleção dos comprimentos de ondas que melhor se correlacionam com o TFN foi utilizada a metodologia sparse Partial Least Square (sPLS). Posteriormente foi feito a combinação linear das variáveis selecionadas pela metodologia sPLS, por meio de Regressão Linear Múltipla por Stepwise (SMLR). O modelo geral de predição de TFN teve valores de R² ajustado foi de 0,50 considerado confiável e o RMSE de 1,67 g.kg⁻¹. Os modelos gerados para Piracicaba, Jaú e Santa Maria obtiveram R² ajustados e RMSE, respectivamente, de 0,31 considerado não confiável (1,30 g.kg⁻¹), 0,53 (1,96 g.kg⁻¹) e 0,54 (1,46 g.kg⁻¹). Sensores hiperespectrais de dossel podem ser utilizados para predição do TFN e monitoramento de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; *Saccharum* spp.; Adubação nitrogenada; Reflectância, sPLS; Modelo de regressão

Abstract

The sugarcane stands out as one of the sources of renewable energy on strategies to reduce the emission of greenhouse gases. Several macros and micronutrients are essential to the metabolism of these plants and nitrogen is one of the most important macronutrients due to its impact on the growth of leaf and stalk, reflecting directly on the development and crop yield. Therefore, the efficient monitoring and proper management of fertilizer application are essential; and the remote sensing is presented as one of the alternatives for improving the cultural management, which includes nitrogen fertilization. This study aimed to select variables from sugarcane canopies using hyperspectral data to generate prediction models of Foliar Nitrogen Content (FNC). The study was carried out in the cities of Piracicaba, Jaú and Santa Maria da Serra, in São Paulo State, Brazil. The experimental delineation used was randomized blocks with treatments in subdivided parcels, with four repetitions; receiving doses of 0, 50, 100 and 150 kg of nitrogen per hectare, for all areas studied. Spectral analysis of canopy and foliar analysis of

nitrogen was held during the 2013/2014 season. In the selection of wavelengths that best correlate with the TFN was used the sparse Partial Least Square methodology (sPLS). Subsequently, the linear combination of selected variables was done through Stepwise Multiple Linear Regression (SMLR). The general model of prediction of FNC presented adjusted R^2 and RMSE values of 0.50 considered reliable and 1.67 g.kg^{-1} , respectively. The models to Piracicaba, Jaú and Santa Maria presented adjusted R^2 and RMSE values, respectively, of 0,31 considered unreliable ($1,30 \text{ g.kg}^{-1}$), 0,53 ($1,96 \text{ g.kg}^{-1}$) e 0,54 ($1,46 \text{ g.kg}^{-1}$). Hyperspectral sensors of canopy can be used for prediction of the FNC and monitoring of nitrogen application in sugarcane.

Keywords: Remote sensing; *Saccharum* spp.; nitrogen fertilization; reflectance, sPLS; regression model

Keywords: Remote sensing; *Saccharum* spp.; Nitrogen fertilization; Reflectance, sPLS; Regression model

5.1 Introdução

O Brasil, maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tem desenvolvido iniciativas de sucesso na busca por fontes de energia renovável. As reservas finitas e os efeitos adversos ao meio ambiente e saúde humana pela utilização de fontes não renováveis de energia explicam o interesse mundial cada vez maior por fontes renováveis, como o bioetanol, derivados de culturas energéticas. O bioetanol brasileiro, proveniente da cana-de-açúcar, apresenta menor custo de produção quando comparado ao do milho, nos EUA, ou trigo e beterraba açucareira na Alemanha (GOLDEMBERG, 2008).

O uso de fontes de energia renovável e com baixo teor de carbono é uma das estratégias para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa que têm provocado o aquecimento do planeta. A cana-de-açúcar é uma das melhores opções de fonte de energia renovável do mundo (ABDEL-RAHMAN; AHMED, 2008).

A cana-de-açúcar segundo Trivelin (2000) é uma das culturas agrícolas que mais produzem matéria verde por unidade de área, entretanto, as maiores limitações do meio à produtividade da cultura estão relacionadas a disponibilidade adequada de nutrientes minerais e água no solo.

Vários macros e micronutrientes são essenciais para o metabolismo da planta e sua deficiência pode limitar severamente o rendimento da colheita. O nitrogênio é um dos macronutrientes mais significativos associados com o rendimento da cana devido ao seu impacto sobre o crescimento de folhas e colmos (FAGERIA, 2009).

A grande importância do nitrogênio para a cana-de-açúcar, diz respeito ao fato deste nutriente contribuir com 1%, em média, da matéria seca da cana-de-açúcar, seu papel é tão importante quanto à do carbono, hidrogênio e oxigênio que constituem juntos, mais de 90% da matéria seca. Ele desempenha um importante papel nos processos de crescimento como divisão celular, produção e síntese enzimática de proteínas. A sua carência promoverá a diminuição na síntese de clorofila, e aminoácidos, assim como também da energia necessária à produção de carboidratos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Segundo Korndörfer et al. (1997) a adubação nitrogenada destaca-se como uma das práticas culturais de maior demanda de pesquisas para a cana-de-açúcar, pois os estudos sobre nitrogênio apresentam resultados muito variáveis, muitas vezes até contraditórios, sendo que os mecanismos de resposta ao nitrogênio pela cana-de-açúcar não estão ainda suficientemente elucidados.

O uso de nitrogênio na agricultura provoca segundo Franco et al. (2011) preocupações com o meio ambiente e a saúde pública, bem como os fatores econômicos porque, em geral, apenas 20% ou menos do fertilizante nitrogenado aplicado é usado pela cana sendo que o aproveitamento dos fertilizantes nitrogenados pela cultura da cana-de-açúcar varia em função das condições ambientais e do manejo.

Segundo Ali et al. (2016), a medição da concentração do nutriente na planta é fundamental para estudos agronômicos, incrementando a qualidade e produtividade das culturas. Portanto, o monitoramento eficiente e gestão adequada do fertilizante aplicado são essenciais para equilibrar o custo crescente dos fertilizantes, a demanda pela cultura e a necessidade de minimizar os danos ambientais, especialmente a qualidade da água (JAYNES et al., 2001).

Existe duas técnicas comumente usadas para o cálculo da concentração do nutriente: destrutivo e não-destrutivo. O nitrogênio na planta pode ser estimado com precisão usando técnica destrutiva, em que as amostras foliares são analisadas utilizando procedimentos laboratoriais. Esta técnica é geralmente trabalhosa, demorada e cara (ROTH; FOX; MARSHALL, 1989).

Em contraste, os métodos não destrutivos segundo Smith et al. (2003) são rápidos e menos dispendiosos, e existem alguns métodos não destrutivos, que

variam em complexidade e otimização (THENKABAIL et al., 2004; MOKHELE; AHMED, 2010; ZHAO, C. et al., 2012; MAHAJAN et al., 2014).

Entre os métodos não destrutivos o sensoriamento remoto tem sido usado nas últimas décadas para estimar o teor de nitrogênio em diversas culturas usando comprimento de onda único ou combinação de comprimentos de onda (TAKEBE et al., 1990; LAMB et al., 2002; STRACHAN; PATTEY; BOISVERT, 2002; HANSEN; SCHJOERRING, 2003; SMITH et al., 2003; MIN; LEE, 2005; SUI et al., 2005; JAIN et al., 2007; CAMMARANO et al., 2014; MARTINEZ; RAMOS, 2015).

Em trabalho realizado por Vigneau et al. (2011) com o objetivo de estimar nitrogênio em trigo com sensor hiperespectral imageador, que trabalha entre os comprimentos de onda do 400 nm a 1000 nm, obteve R^2 de 0,889, 0,881 e 0,875 em casa de vegetação, campo e os dois dados em conjunto, respectivamente, e concluindo que é uma tecnologia promissora no monitoramento de nitrogênio.

Cammarano et al. (2014) comparando diferentes índices de vegetação para estimar nitrogênio em dossel de trigo, com duas áreas de estudo em continentes diferentes, observou que as melhores relações foram obtidas com índices de vegetação que utilizavam os comprimentos de ondas situados no *red-edge*, o qual se mostrou mais estável.

No estudo do nitrogênio em cana-de-açúcar podemos observar na literatura poucos trabalhos, sendo os mesmos desenvolvidos em sua maioria com sensores passivos que trabalham com poucas bandas (sensores multiespectrais) ou que geram índices de vegetação (ABDEL-RAHMAN; AHMED; VAN DEN BERG, 2010; MIPHOKASAP et al., 2012; AMARAL et al., 2015; ROSA et al., 2015).

Para melhor compreender a dinâmica do nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar, trabalhos com maior ênfase na determinação dos melhores comprimentos de onda que podem ser correlacionados com os teores de nitrogênio vêm sendo estudados com sensores hiperespectrais. Os sensores hiperespectrais apresentam uma significativa melhora na resolução espectral favorecendo assim vantajosamente a identificação e modelagem de parâmetros físico-químicos quando comparados com sensores multiespectrais (KUMAR et al., 2001), tal fato corrobora a necessidade de maiores pesquisas na área.

No entanto, a análise de grande número de bandas de sensores hiperespectrais é uma tarefa complexa e demorada (RAY et al., 2006), sendo necessário a utilização de algoritmos especiais para selecionar um conjunto de

bandas que seja sensível ao teor de nitrogênio. Um dos procedimentos estatísticos mais utilizados atualmente para diminuir a dimensão dos dados sem perder informações importantes é a análise multivariada (ABDEL-RAHMAN et al., 2014).

Tais estudos vêm obtendo resultados interessantes, porém a complexidade da dinâmica do nitrogênio no solo e na cultura dificulta a tarefa de estabelecer correlações confiáveis entre dados hiperespectrais e o teor foliar de nitrogênio (TFN), sendo ainda necessários estudos de base para melhor compreensão das informações fornecidas pela resposta espectral da cana-de-açúcar. Assim os dados hiperespectrais podem auxiliar no entendimento ou desenvolvimento de sensores específicos para determinação do nitrogênio.

O objetivo deste estudo foi identificar quais os comprimentos de onda que apresentam uma maior correlação com o TFN e desenvolver modelos espectrais para sua predição.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Área de estudo

Este estudo foi conduzido em áreas experimentais da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) e em área comercial, em parceria com a equipe de pesquisa do IAC coordenada pelo Pesquisador Heitor Cantarella. O clima da região segundo a classificação de Koppen é denominado subtropical úmido (Cwa), com pluviosidade média anual inferior a 1400 mm, sendo o verão chuvoso e inverno seco.

A Área 1 do experimento foi conduzida no município de Jaú-SP, no Polo Centro-Oeste (Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios - APTA), cujas coordenadas geográficas são 22°15'08" de latitude sul e 48°34'04" de longitude oeste (Figura 5-1). O solo desta área é um Latossolo Vermelho (LV), com textura médio arenosa (0-20 cm) e médio argilosa (20-40 cm).

Figura 5-2 - Localização da Área 2, conduzida em Piracicaba-SP

A Área 3 foi conduzida na Fazenda Itaúna (Raízen), que está localizada no município de Santa Maria da Serra-SP, nas coordenadas 22°33'26" de latitude sul e 48°16'42" de longitude oeste. O solo nesta área é um Neossolo Quartzarênico (RQ), com textura arenosa (0-40 cm) (Figura 5-3).

Figura 5-3 - Localização da Área 3, conduzida em Santa Maria da Serra-SP

Os experimentos foram instalados em 2010 no delineamento experimental em blocos ao acaso (DBC), com parcelas subdivididas, sendo as parcelas diferenciadas pelas variedades e as subparcelas por diferentes doses de nitrogênio. Na safra 2013/2014 as áreas estavam no quarto ciclo produtivo. Para cada área foram estabelecidas 3 variedades, sendo a variedade SP 81-3250 a única em comum para todas as áreas experimentais, e 4 doses de nitrogênio (0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹) (Tabela 5-1).

Tabela 5-1 - Descrição das variedades e doses de nitrogênio nas áreas experimentais

Área	Variedades	Doses de nitrogênio
Área 1 (Jaú - SP)	SP 81-3250	0, 50, 100 e 150 kg.ha ⁻¹
	IAC 95-5000	
	RB 85-5536	
Área 2 (Piracicaba - SP)	SP 81-3250	0, 50, 100 e 150 kg.ha ⁻¹
	IAC 87-3396	
	CTC 14	
Área 3 (Santa Maria da Serra - SP)	SP 81-3250	0, 50, 100 e 150 kg.ha ⁻¹
	RB 92579	
	RB 86-7515	

A correção inicial do pH do solo e adubação de base anual foi realizada de acordo com a necessidade da cultura após análise de rotina para a fertilidade do solo. As doses de N propostas no presente trabalho foram aplicadas utilizando o nitrato de amônio, aplicado manualmente sobre a palhada logo após o corte da cana-de-açúcar. Os tratos culturais seguiram o padrão adotado pelo sistema produtivo da cana-de-açúcar para a região.

5.2.2 Marcação das parcelas e obtenção das leituras espectrais

De modo a padronizar as coletas de dados ao longo do experimento, plantas foram marcadas no terço inferior do colmo com fitas plásticas em cada subparcela das áreas em estudo conforme Figura 5-4.

Figura 5-4 - Demarcação de plantas das áreas experimentais: (A) Escolha e marcação das plantas com fita plástica zebra; (B) Plantas marcadas em estágio fenológico avançado

Cada subparcela é composta por cinco linhas de cana-de-açúcar, sendo considerada como área útil somente as três fileiras centrais. As plantas foram selecionadas de modo aleatório dentro das três fileiras, duas na segunda e quarta fileira e uma na terceira fileira (Figura 5-5).

Figura 5-5 - Esquema de uma subparcela e plano de avaliação

Os dados espectrais do dossel foram coletados, utilizando o sensor hiperespectral FieldSpec Spectroradiometer (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA), que opera no intervalo espectral de 350 a 2500 nm, com resolução espectral de 1,4 nm de 350 a 1050 nm e 2 nm de 1050 a 2500 nm. Vale ressaltar que por se tratar de um sensor passivo, algumas das avaliações ocorreram em períodos superiores a 30 dias, devido as condições climáticas desfavoráveis a realização da radiometria de campo.

As avaliações de dossel se iniciaram 4 meses após o corte quando a cultura já apresentava dossel mais fechado (Tabela 5-2). A causa das diferentes quantidades de dados e datas de coleta foi por motivos de segurança para o operador. Pois no momento em que o aparelho não pudesse mais ser elevado a ponto de manter a altura de um metro, foi então suspensa a coleta de dados.

Tabela 5-2 - Descrição das datas de coletas

Área	Meses de coleta (DAC)
Jaú - SP	Janeiro/2014 (148)
	Agosto/2014 (357)
Piracicaba - SP	Janeiro/2014 (137)
	Fevereiro/2014 (169)
	Março/2014 (193)
	Agosto/2014 (340)
Santa Maria da Serra - SP	Janeiro/2014 (115)
	Fevereiro/2014 (146)
	Março/2014 (167)
	Agosto/2014 (311)

As coletas foram sempre realizadas em dias ensolarados, entre 10:00 e 14:00 horas, com o sensor posicionado a um metro acima da altura média da haste da cultura e com campo de visada de 25°, o que proporciona uma leitura circular de aproximadamente 0,25 m² de área (Figura 5-6). Primeiramente, para cada bloco foi realizada a calibração, utilizando a placa padrão que acompanha o aparelho; posteriormente as leituras foram realizadas em cada subparcela, nos cinco pontos previamente demarcados. O processo foi repetido para todos os blocos da área.

Para obtenção dos dados espectrais na colheita o aparelho foi acoplado a uma escada multifuncional equipada com quatro barras de aço, de 2 metros cada uma, para que fosse possível ser feito a leitura e manter a altura em relação a cultura que estava em estado fenológico avançado conforme Figura 5-6.

Figura 5-6 - Aquisição dos dados espectrais em campo: (A) Obtenção da resposta espectral de dossel em campo em estágio fenológico intermediário com utilização de escada; (B) FieldSpec acoplado à uma base para proporcionar leituras em estágio fenológico avançado; (C) Fibra óptica acoplada a base (D) Escada multifuncional utilizada em estágio fenológico avançado como apoio ao aparelho

5.2.3 Análise do teor foliar de nitrogênio

Para todas as datas onde foram obtidos dados espectrais de dossel, foram também coletadas folhas para determinação do teor foliar de nitrogênio (TFN). Assim para cada sub-parcela foram coletadas 10 folhas +1, sempre duas folhas de cada lado das 5 plantas marcadas (Figura 5-7). Sua denominação de +1 se refere a primeira folha completamente expandida a partir do ápice da cultura, bem aceita na literatura como folha diagnóstico para a cana-de-açúcar. As folhas +1 destacadas foram separadas por parcela e enviadas para o laboratório.

Figura 5-7 - Localização das plantas coletadas

No laboratório as folhas foram primeiramente lavadas em água corrente, seguida de água destilada com detergente e posteriormente, com apenas água destilada. Após a lavagem foram alocadas em saco de papel para secar em estufa com ventilação forçada, a 65°C, até atingir peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas para a determinação dos teores de nitrogênio. As análises químicas são determinadas nos extratos obtidos pela digestão sulfúrica por meio do método semi-micro Kjeldahl (MALAVOLTA et al., 1997).

5.2.4 Análise estatística

5.2.4.1 Pré-processamento dos dados

A etapa de pré-processamento dos dados é fundamental para o sucesso da análise multivariada. Os principais objetivos da aplicação das técnicas de pré-processamento são eliminar informações não relevantes e tornar a matriz de dados melhor condicionada para a análise, possibilitando a subsequente análise exploratória do conjunto de dados com eficiência.

Os resultados do teor foliar de nitrogênio foram, inicialmente, submetidos à análise exploratória por meio da estatística descritiva objetivando extrair informações preliminares indicativas sobre o comportamento geral dessa variável.

A normalidade da distribuição de frequência dos dados de nitrogênio foi analisada aplicando-se o teste de Shapiro e Wilk (1965). O teste baseia-se nos valores amostrais ordenados elevados ao quadrado e tem sido o teste de normalidade mais utilizado.

Foram coletados os dados espectrais das 48 subparcelas, onde de cada subparcela foram obtidas 5 curvas espectrais, sendo 1 curva pertencente a cada uma das 5 plantas marcadas, num total de 240 por área/mês. Os dados espectrais foram convertidos do formato asd para txt e exportados utilizando o software ViewSpec Pro para início as análises.

Para realizar a análise multivariada foi necessário anteriormente verificar dentro de cada subparcela o comportamento das curvas espectrais coletadas para cada ponto demarcado, verificando se a média representava a subparcela. Foi feito então a verificação de outliers através do teste de normalidade e análise de variância, conforme Figura 5-8. Assim foi possível realizar as análises posteriores em função das curvas médias das subparcelas (total de 48 por área experimental), e não mais em função das curvas individuais das plantas.

Figura 5-8 - Procedimento de obtenção da curva espectral média da subparcela

As regiões espectrais entre 350-399, 1355–1420 nm, 1800–2500 nm que são conhecidas como regiões de ruídos devido a interferência da umidade no ambiente (ZHAO, D. et al., 2007; ABDEL-RAHMAN; AHMED; ISMAIL, 2013) foram removidas das curvas espectrais e excluídas das análises (Figura 5-8).

As curvas espectrais de reflectância média por subparcela foram submetidas a dois procedimentos, primeiramente aplicou-se o filtro de mediana para suavização

dos ruídos e posteriormente a correção do espalhamento multiplicativo (MSC – Multiplicative Scatter Correction). A correção de espalhamento multiplicativo é um método de transformação utilizado para compensar os efeitos aditivos e/ou multiplicativos em dados espectrais. Essa fase das análises estatísticas foi realizada no software Parles versão 3.1 (VISCARRA ROSSEL, 2008).

Posteriormente foi realizada a análise de correlação de Pearson entre o TFN e cada comprimento de onda para todas as áreas com o objetivo de avaliar qual época apresenta maior significância. As significâncias das correlações foram avaliadas utilizando o teste t ($p \leq 0,05$).

5.2.4.2 Redução de dimensão e seleção de variáveis

Um dos grandes problemas práticos ao se trabalhar com dados multivariados, onde o número de observações é maior que o número de variáveis preditoras, ou mesmo quando estas são altamente correlacionadas entre si. A metodologia “*sparse partial least square*” (sPLS), tem como princípio central a imposição de dispersão (“*sparsity*”) nas variáveis preditoras, por meio dos princípios dos mínimos quadrados parciais, permitindo eficiente redução e seleção de variáveis (CHUN; KELES, 2010). Esta metodologia foi implementada utilizando o pacote de análises “sPLS”, desenvolvido para o software estatístico R (CHUNG; CHUN, 2012).

Os resultados desta fase foram calculados utilizando todo o conjunto dos dados de calibração e gerou coeficientes que representam a importância de cada variável preditora (comprimentos de onda) para predição do TFN, sendo que foram selecionados os 15 comprimentos de onda mais importantes, uma vez que a inserção de mais variáveis no modelo inicial, não melhorou estatisticamente os parâmetros dos modelos finais de Regressão Linear Múltipla por Stepwise gerados posteriormente.

5.2.4.3 Regressão Linear Múltipla por Stepwise (SMLR)

SMLR foi utilizado para a geração de modelos para estimativa do TFN em cana-de-açúcar. Os modelos de predição foram gerados para os dados de reflectância com as curvas espectrais obtidas a partir de 2/3 dos dados de cada área e posteriormente os modelos foram validados com a outra parte, com o 1/3 restante.

A metodologia SMLR inicia-se com um modelo sem variáveis preditoras (comprimentos de onda), a cada etapa, é adicionada a variável estatisticamente mais significativa (maior p-valor) (DARVISHZADEH et al., 2008). O melhor modelo foi selecionado com base no menor valor para o *Akaike Information Criterion* (AIC), que leva em consideração, qual e penalização dos parâmetros estatísticos do modelo de regressão em relação a inserção de mais uma variável preditora (ESTES et al., 2008).

5.2.4.4 Avaliação da precisão dos modelos gerados

Esta metodologia não diz respeito diretamente a qualidade do modelo final, mas permite escolher o melhor modelo entre uma série de combinações de variáveis possíveis. Por esta razão, a precisão dos melhores modelos gerados, foi medida com base nos resultados do coeficiente de determinação (R^2) e a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), este último calculado pela equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

Em que P_i e O_i são os valores previstos e observados para o TFN respectivamente e n é o número de observações utilizadas para geração ou validação do modelo.

5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Resultados para a análise foliar de nitrogênio e distribuição mensal das precipitações para as áreas experimentais

O manejo inadequado de um canavial, especialmente da adubação nitrogenada, pode resultar tanto em redução da produtividade da cultura quanto em sua longevidade, reduzindo, por conseguinte, o número de colheitas ou cortes entre as reformas Vitti et al. (2007). Orlando Filho et al. (1999) constataram a importância da adubação nitrogenada no maior vigor das soqueiras, aumentando a produção nos cortes subsequentes, entre a cana-de-açúcar com e sem adubação nitrogenada.

Os resultados da análise de nitrogênio mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal, segundo o teste de Shapiro Wilk ($W = 0,9856$; $p\text{-valor} = 0,00542$). A Figura 5-9 mostra em forma de gráfico boxplot o teor foliar de nitrogênio para as diferentes doses aplicadas nas três áreas experimentais e geral. Foi observado nas três áreas uma resposta linear para o nitrogênio aplicado, estando a dose 0 kg.ha^{-1} com os menores valores, seguido pela dose 50 kg.ha^{-1} e 100 kg.ha^{-1} , sendo a 150 kg.ha^{-1} muito próxima ou abaixo da dose 100 kg.ha^{-1} . Essa tendência foi observada por outros autores caracterizado como efeito de diluição, em que a concentração do nutriente é diluída conforme o crescimento da planta. Assim plantas sem restrição de nitrogênio apresentam maior biomassa e, conseqüentemente, menor concentração de nitrogênio nos tecidos foliares (LEMAIRE; JEUFFROY; GASTAL, 2008; OLIVEIRA et al., 2013).

Figura 5-9 - Boxplot para os resultados do teor foliar de nitrogênio (g.kg^{-1}) para geral, Jaú (148 DAC), Piracicaba (169 DAC) e Santa Maria da Serra (146 DAC)

Segundo Raij e Cantarella (1997) os valores normais de nitrogênio na folha de cana-de-açúcar estão entre 18 e 25 g.kg^{-1} , portanto os resultados observados no presente estudo evidenciam que a cultura estava submetida a determinado nível de estresse em relação ao estado nutricional de nitrogênio.

Na área de Jaú (Figura 5-9) foram observados que os valores mínimos do TFN variaram de 10,4 g.kg⁻¹ para a dose 0 kg.ha⁻¹ a 15,5 g.kg⁻¹ para a dose 150 kg.ha⁻¹. Os valores máximos do TFN variaram de 20,1 g.kg⁻¹ para a dose 0 kg.ha⁻¹ a 22,0 g.kg⁻¹, para a dose 100 kg.ha⁻¹.

Santa Maria da Serra apresentou a maior variação do TFN entre os valores de mínimo e máximo (Figura 5-9), sendo os valores mínimos entre 14,4 g.kg⁻¹ para a dose 0 kg.ha⁻¹ a 18,2 g.kg⁻¹ para a dose 150 kg.ha⁻¹. Os valores máximos do TFN variaram de 20,1 g.kg⁻¹ para a dose 0 kg.ha⁻¹ a 24,8 g.kg⁻¹ para a dose 100 kg.ha⁻¹.

Para a área de Piracicaba apresentou os menores valores do TFN das três áreas estudadas (Figura 5-9), os valores de mínimos variaram de 14,1 g.kg⁻¹ para dose 0 kg.ha⁻¹ a 17,1 g.kg⁻¹ para dose 100 kg.ha⁻¹. Os valores máximos do TFN variaram de 17,9 g.kg⁻¹ para a dose 0 kg.ha⁻¹ a 21,8 g.kg⁻¹ para dose 150 kg.ha⁻¹. Sendo um dos possíveis motivos dos baixos valores TFN a precipitação ocorrida na safra 2013/2014 que foi considerada abaixo das necessidades hídricas da cultura.

A mudança climática é um fato cada vez se torna mais discutido, porém suas consequências ainda não foram claramente dimensionadas, indícios deste fenômeno estão podendo ser observados nos últimos anos, apresentando um sério risco ao equilíbrio da vida no planeta Terra (GOUVÊA et al., 2009).

As intensificações dos eventos extremos podem ser sentidas na região sudeste do Brasil, na qual se tem notado períodos cada vez maiores e mais intensos de estiagem, o qual marcou explicitamente o ano de 2014, apresentando precipitação de vários meses abaixo da média histórica registrada (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014). Esse fato pode ser observado na Figura 5-10, as quais apresentam a precipitação mensal acumulada (coluna azul) e a precipitação mensal acumulada normal (linha vermelha, considerada como a média histórica registrada) para as áreas de Jaú e Santa Maria da Serra.

Figura 5-10 - Precipitação acumulada mensal para as Áreas de Jaú e Santa Maria da Serra (Dados do INMET – A741 de Barra Bonita, SP)

Foi possível observar que para os meses de novembro e dezembro de 2013 e fevereiro e março de 2014 a média de chuvas acumuladas foi muito inferior à precipitação normal histórica desses meses.

Os dados de precipitação de Piracicaba, a (Figura 5-11) mostram a distribuição das chuvas de novembro de 2013 a fevereiro de 2014 foi abaixo do esperado, sendo observada um pequeno aumento para o mês de março de 2014.

Figura 5-11 - Precipitação acumulada mensal para a Área 2 de Piracicaba

Fonte: Dados da estação meteorológica ESALQ/USP

O déficit hídrico afeta diretamente no crescimento e no desenvolvimento da cultura provocando alterações morfofisiológicas, tais como enrolamento da folha, alteração do ângulo da folha e redução da área foliar (FLEXAS et al., 2006; CHAVES; FLEXAS; PINHEIRO, 2009), isso dependendo do seu genótipo em questão, da duração da severidade e do estágio de desenvolvimento da planta (SANTOS; CARLESSO, 1998).

5.3.2 Seleção de variáveis preditoras pelo método sPLS

Foram selecionadas as seguintes épocas para cada área para continuidade das análises: Jaú (148 DAC), Piracicaba (169 DAC) e Santa Maria da Serra (146 DAC) por apresentarem as melhores correlações com TFN. Resultados que corroboram com trabalhos desenvolvidos por Oliveira et al. (2013) que estudando diferentes fases fenológica da cana-de-açúcar com máximo de absorção de nitrogênio.

Os resultados dos coeficientes obtidos pela aplicação da metodologia sPLS, para curvas de reflectância, são apresentados na Figura 5-12. Embora na fase calibração tenham sido gerados modelos por área experimental e um modelo geral,

na fase de seleção de variáveis pelo método sPLS foi utilizado o conjunto de dados completo para a safra 2013/14.

Figura 5-12 - Resultados para os coeficientes (sPLS), para redução de dimensão e seleção de variáveis para predição do nitrogênio em cana-de-açúcar, para dados de reflectância das três áreas experimentais

Esta ação visou selecionar comprimentos de onda com relação global com as variações do nitrogênio, uma vez que, por mais que uma variedade/ambiente apresente correlações com comprimentos de ondas específicos para uma determinada safra, do ponto de vista prático é possível o desenvolvimento de um sensor que possua algumas bandas, com algoritmos que permitam migrar entre diferentes combinações destas, já o desenvolvimento de sensores para condições específicas não se mostra viável.

Esses coeficientes indicam a contribuição de cada comprimento de onda, estando os mais importantes estão distribuídos pelo espectro eletromagnético, não existindo uma região principal que descreva isoladamente a variação do nitrogênio na cana-de-açúcar.

Comprimentos de onda com valores zero não apresentam significância para a previsão de nitrogênio restando apenas 116 comprimentos com significâncias positivas ou negativas, assim indicando uma redução da dimensionalidade dos dados hiperespectrais em mais de 91%. Desses foram selecionados os 15 comprimentos de onda mais significantes para geração dos modelos. O número

máximo de comprimentos de onda selecionados foi fixado em 15 para evitar um problema de montagem do modelo.

Min e Lee (2005) avaliando cinco diferentes métodos de seleção de comprimentos de onda para determinação do teor de nitrogênio em citrus, chegaram a números parecidos, afirmando que o número de variáveis muito maior que o número de amostras resulta em alta colinearidade que pode fazer o modelo de regressão ficar instável. Dos 15 comprimentos de onda, 5 estão localizados na região do visível (700, 705, 710, 715 e 720 nm), 4 no infravermelho próximo (725, 925, 955 e 980 nm) e 6 no infravermelho médio (1355, 1420, 1595, 1600, 1605 e 1610 nm).

5.3.3 Calibração de modelos de regressão linear múltipla por stepwise (SMLR)

Na fase de calibração os resultados obtidos para os modelos gerados com os dados de reflectância apresentaram desempenho muito parecidos, com valor de R^2 ajustado médio de 0,41 quando analisadas áreas individuais e 0,39 para o modelo que incorpora todo o conjunto de dados (Tabela 5-3).

Observa-se que os modelos calibrados por área possuem algumas variações em relação as bandas utilizadas sendo comum o comprimento de onda 715 ou 720 nm nos quatro modelos (região do *red-edge*). Foram necessárias de duas a três bandas para a calibração do melhor modelo. Já o modelo geral, que incorpora dados das três áreas experimentais, necessitou de um número menor de bandas (apenas duas).

Tabela 5-3 - Calibração de modelos de Regressão Linear Múltipla por Stepwise para predição do Teor Foliar Nitrogênio em cana-de-açúcar por área experimental e combinando os dados de todas as áreas para os dados de reflectância. Nas equações, a letra B representa o comprimento de onda utilizado no modelo

Área	Equação	$R^2_{aj.}$	RMSE (g kg ⁻¹)
Jaú	$Y = 38,26 - 107,08 * B715 - 44,67 * B1420 + 1583,08 * B1600 - 1549,21 * B1605$	0,39	1,64
Piracicaba	$Y = 100,83 - 40,53 * B715 - 186,57 * B980 + 8,38 * B1355$	0,30	1,32
Santa Maria da Serra	$Y = 53,32 + 227,09 * B710 - 350,54 * B720$	0,55	1,38
Geral	$Y = 40,16 - 99,03 * B720 - 36,03 * B1420$	0,39	1,72

Observou-se que os comprimentos de onda mais sensíveis a variação no nitrogênio se encontram na região do *red-edge* e infravermelho próximo, sendo a primeira bastante citadas na literatura como sensíveis a alterações na concentração de pigmentos na folha, sendo a clorofila, a mais abundante em plantas verdes.

A região espectral do *red-edge*, se refere à região do espectro eletromagnético de rápida modificação na reflectância, na interface entre os comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo (LIU, 2015). Esta região do espectro, tem sido citada constantemente como sensíveis a variação de pigmentos em plantas, especialmente a clorofila, existindo um número expressivo de estudos voltados exclusivamente a utilização de informações desta região no monitoramento da eficiência fotossintética da vegetação e o estado nutricional de nitrogênio.

Em pesquisa desenvolvida por Miphokasap et al. (2012) para desenvolver um modelo que explique a variação do nitrogênio na cana-de-açúcar também teve como resultados a seleção dos comprimentos de onda 720 nm, mais o 410nm, 426 nm, 754 nm e 1216 nm.

5.3.4 Validação dos modelos de regressão múltipla por stepwise

A validação dos modelos gerados por área e com a combinação dos dados de todas as áreas foi realizada utilizando dados independentes, separados aleatoriamente do conjunto de dados inicial (Figura 5-13). Os modelos espectrais por áreas individuais mostraram desempenhos satisfatórios, principalmente para as áreas de Jaú e Santa Maria. Em Piracicaba, obteve os valores de R^2 ajustado e RMSE foram de, respectivamente, 0,31 e 1,30 g kg⁻¹, sendo considerado não confiável segundo Malley; Martin; Ben-Dor (2004). Esses resultados são abaixo quando comparados com os resultados obtidos por Miphokasap et al. (2012) que estudando a cultura da cana-de-açúcar na Tailândia teve R^2 de 0,73, um dos poucos trabalhos empregando dados hiperespectrais para monitoramento do nitrogênio na cultura.

O modelo geral mostrou uma pequena elevação na precisão da estimativa quando comparados aos resultados observados na fase de calibração, com valores de R^2 ajustado e RMSE respectivamente de 0,50 e 1,67 g kg⁻¹ (Figura 5-13).

Figura 5-13 - Resultados da fase de validação dos modelos de Regressão Múltipla por Stepwise para estimativa do teor foliar de nitrogênio em cana-de-açúcar

Os teores de clorofila em plantas segundo Gausman (1974) é a característica mais importante que influencia a reflectância da folha em certas partes do espectro. Kumar et al. (2001) afirma que é o pigmento que governa as características espectrais na região do visível e do *red-edge*, sendo que clorofila e nitrogênio tendem a ser correlacionadas uma com a outra.

Read et al. (2002) encontrou alta correlação entre o nitrogênio na folha do algodão e a reflectância como razão simples entre os comprimentos de onda 700 e 710 nm. Além disso, Kruse; Christians; Chaplin (2006) indicaram que a razão de

reflectância entre 706 e 760 nm foi o melhor para prever a concentração de nitrogênio em grama. Em trabalho desenvolvido por Zhao et al. (2005) para estudar a relação da concentração de nitrogênio na folha com a cultura do sorgo relatou que a primeira derivada da reflectância no *red edge*, centrado em 730 nm produziu um R^2 de 0,73.

Nos comprimentos de onda da região do infravermelho médio (1300 a 2500 nm) são conhecidas características de absorção de nitrogênio devido a conotação de absorções vibracionais (Kumar et al., 2001). Em estudo realizado por Abdel-Rahman et al. (2010) para estimativa da concentração de nitrogênio em cana-de-açúcar foram criados índices de vegetação de razão simples baseados em comprimentos de onda do infravermelho próximo e infravermelho médio com R^2 em torno de 0,75.

As bandas selecionadas pelos modelos (1355, 1420, 1600 e 1605 nm) estão em desacordo com resultados relatados por Wenjiang et al. (2004) que encontraram na região de 1200 a 1300 nm uma relação com o teor foliar de nitrogênio para a cultura do trigo. Nota-se que o déficit hídrico na safra 2013/2014 foi severo, sendo que na época de coleta dos dados de Piracicaba, que foi aos 231 DAC, a precipitação mensal acumulada do mês de fevereiro (Figura 5-11) foi de apenas 31% do esperado considerando a média histórica.

Trivelin; Victoria; Rodrigues (1995) levantaram a hipótese que a cana-de-açúcar na época de estiagem transloca o nitrogênio da parte aérea para o sistema radicular. Situação observada também por Gava et al. (2001) que estudando o crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto por palha relatou que a translocação ocorreu no período de 204 a 237 DAC, pois assim houve emissão de novas raízes proporcionando maior exploração de volume de solo.

Esse déficit pode ser um dos motivos do menor R^2 ajustado apresentado pela área, que segundo Rosa et al. (2015) reflexo diretamente da presença de diferentes variedades que podem responder de formas distintas ao clima, solo e condições de manejo, assim resultando em diversas condições de vigor da cultura e volume de dossel no mesmo campo.

No entanto, outro fator pode alterar este relacionamento, como por exemplo, níveis elevados de nitrogênio no solo devido a mineralização da matéria orgânica da

safra anterior, prejudicando assim, a relação entre o nitrogênio foliar e biomassa (Vitti et al., 2007) e consequentemente as leituras espectrais.

Em termos gerais a metodologia aplicada se mostrou eficiente para seleção de variáveis e geração de modelos para predição do TFN a partir de dados hiperespectrais de dossel. Os resultados de calibração e validação dos modelos evidenciam a potencialidade do uso de informações de reflectância para o monitoramento da variação do nitrogênio em cana-de-açúcar

5.4 Conclusão

Na safra 2013/2014 foi observado um déficit hídrico considerado severo, que pode ter influenciado nos resultados de nitrogênio

O presente trabalho pode ajudar na estratégia de monitoramento e aplicação do nitrogênio na cultura.

Os dados hiperespectrais de dossel podem ser empregados para o monitoramento do teor foliar de nitrogênio da cana-de-açúcar.

Segundo a metodologia do sPLS as regiões do visível (700 a 705 nm) e do *red-edge* (710 a 720 nm), infravermelho próximo (725, 925, 955 e 980 nm) e infravermelho médio (1355, 1420, 1595, 1600, 1605 e 1610 nm) contém as maiores correlações com o teor foliar de nitrogênio.

O modelo gerado para Piracicaba foi considerado não confiável por apresentar R^2 ajustado de 0,31 apesar do RMSE ser o menor entre as áreas, de 1,30 g.kg⁻¹. Jaú e Santa Maria obtiveram R^2 ajustados confiáveis e RMSE, respectivamente, 0,53 (1,96 g.kg⁻¹) e 0,54 (1,46 g.kg⁻¹).

Quando considerado todas as áreas o modelo geral de regressão múltipla por stepwise para predição de TFN por dados hiperespectrais obteve R^2 ajustados de 0,50, considerado confiável e RMSE de 1,67 g.kg⁻¹.

Referências

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; ISMAIL, R. Random forest regression and spectral band selection for estimating sugarcane leaf nitrogen concentration using EO-1 Hyperion hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 34, n. 2, p. 712-728, 2013.

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; VAN DEN BERG, M. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 12, Supplement 1, p. S52-S57, 2010.

ABDEL-RAHMAN, E.M.; MUTANGA, O.; ODINDI, J.; ADAM, E.; ODINDO, A.; ISMAIL, R. A comparison of partial least squares (PLS) and sparse PLS regressions for predicting yield of Swiss chard grown under different irrigation water sources using hyperspectral data. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 106, p. 11-19, 2014.

ABDEL-RAHMAN, E.; AHMED, F. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) production: a review of the literature. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 29, n. 13, p. 3753-3767, 2008.

ALI, M.M.; AL-ANI, A.; EAMUS, D.; TAN, D.K.Y. Leaf Nitrogen Determination Using Non-Destructive Techniques – A Review. **Journal of Plant Nutrition**, New York, p. 00-00, 2016.

AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P; PORTZ, G.; FINAZZI, F.B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2015.

CAMMARANO, D.; FITZGERALD, G.; CASA, R.; BASSO, B. Assessing the Robustness of Vegetation Indices to Estimate Wheat N in Mediterranean Environments. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, n. 4, p. 2827-2844, 2014.

CHAVES, M.M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, n. 4, p. 551-560, 2009.

FAGERIA, N.K. **The use of nutrients in crop plants**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 448p. ISBN 9781420075106.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBÓ, M.; BOTA, J.; GALMÉS, J.; HENKLE, M.; MARTÍNEZ-CAÑELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. **New Phytologist**, Cambridge, v. 172, n. 1, p. 73-82, 2006.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; ALMEIDA DE OLIVEIRA, E. C.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 29-41, 2011.

GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering**, Falls Church, v. 40, n. 2, p. 183-191, 1974.

- GAVA, G.J.D.C.; TRIVELIN, P.C.O.; DE OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.
- GOLDEMBERG, J. The Brazilian biofuels industry. **Biotechnology for Biofuels**, London, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2008.
- GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 593-605, 2009.
- HANSEN, P.M.; SCHJOERRING, J.K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 86, n. 4, p. 542-553, 2003.
- JAIN, N.; RAY, S.S.; SINGH, J.P.; PANIGRAHY, S. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 8, n. 4-5, p. 225-239, 2007.
- JAYNES, D.B.; COLVIN, T. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A.; MEEK, D. W. Nitrate Loss in Subsurface Drainage as Affected by Nitrogen Fertilizer Rate. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 30, n. 4, p. 1305-1314, 2001.
- KORNDÖRFER, G.H.; VALLE, M.R.; MARTINS, M.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio da uréia pela cana-planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 23-26, 1997.
- KRUSE, J.K.; CHRISTIANS, N.E.; CHAPLIN, M.H. Remote Sensing of Nitrogen Stress in Creeping Bentgrass This journal paper of the Iowa Agric. and Home Econ. Exp. Stn., Ames, IA, Project no. 3601, was supported by Hatch Act and State of Iowa funds. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 6, p. 1640-1645, 2006.
- KUMAR, L.; SCHMIDT, K.; DURY, S.; SKIDMORE, A. Imaging Spectrometry and Vegetation Science. In: MEER, F.D.D.V. ; JONG, S.M.D. (Ed.). **Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. p. 111-155. ISBN 978-0-306-47578-8.
- LAMB, D.W.; STEYN-ROSS, M.; SCHAARE, P.; HANNA, M. M.; SILVESTER, W.; STEYN-ROSS, A. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: theoretical modelling and experimental observations. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 23, n. 18, p. 3619-3648, 2002.
- LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M.-H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 28, n. 4, p. 614-624, 2008.

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2 ed. Campo Grande: Oficina de Textos, 2015. 908p. ISBN 8579751772.

MAHAJAN, G.R.; SAHOO, R. N.; PANDEY, R.N.; GUPTA, V.K.; KUMAR, D. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 15, n. 5, p. 499-522, 2014.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319p.

MALLEY, D.F.; MARTIN, P.D.; BEN-DOR, E. Application in analysis of soils. In: ROBERTS, C.A.; WORKMAN JR., J.W.; REEVES III, J.B. (Ed.). **Near-infrared spectroscopy in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 2004. p. 729-784.

MARTINEZ, M.; RAMOS, A. Estimation of chlorophyll concentration in maize using spectral reflectance. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Berlín. v.50, n.7/W3 7 p., 2015.

MIN, M.; LEE, W.S. Determination of significant wavelengths and prediction of nitrogen content for citrus. **Trans ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 2, p. 455-461, 2005.

MIPHOKASAP, P.; HONDA, K.; VAIPHASA, C.; SOURIS, M.; NAGAI, M. Estimating Canopy Nitrogen Concentration in Sugarcane Using Field Imaging Spectroscopy. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 12, p. 1651-1670, 2012.

MOKHELE, T.A.; AHMED, F.B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, Berlín, v. 4, n. 1, p. 043560-043560-18, 2010.

MONTEIRO, L.; SENTELHAS, P. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 3, p. 264-276, 2014.

OLIVEIRA, E.C.A.; GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 176, n. 5, p. 712-723, 2013.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A.; BELTRAME, J.A.; LAVORENTI, N.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 4, p. 39-41, 1999.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, A.J.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. Campinas: IAC, v.100, 1997. p. 8-13.

RAY, S.S.; DAS, G.; SINGH, J.P.; PANIGRAHY, S. Evaluation of hyperspectral indices for LAI estimation and discrimination of potato crop under different irrigation treatments. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 27, n. 24, p. 5373-5387, 2006.

READ, J.J.; TARPLEY, L.; MCKINION, J.M.; REDDY, K.R. Narrow-Waveband Reflectance Ratios for Remote Estimation of Nitrogen Status in Cotton. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, n. 5, p. 1442-1452, 2002.

ROSA, H.J.A.; AMARAL, L.R.D.; MOLIN, J.P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 9, p. 840-848, 2015.

ROTH, G.W.; FOX, R.H.; MARSHALL, H.G. Plant tissue tests for predicting nitrogen fertilizer requirements of winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 3, p. 502-507, 1989.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SMITH, M.-L.; MARTIN, M.E.; PLOURDE, L.; OLLINGER, S.V. Analysis of hyperspectral data for estimation of temperate forest canopy nitrogen concentration: comparison between an airborne (AVIRIS) and a spaceborne (Hyperion) sensor. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, New York, v. 41, n. 6, p. 1332-1337, 2003.

STRACHAN, I.B.; PATTEY, E.; BOISVERT, J.B. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 80, n. 2, p. 213-224, 2002.

SUI, R.; WILKERSON, J.; HART, W.; WILHELM, L.; HOWARD, D. Multi-spectral sensor for detection of nitrogen status in cotton. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 2, p. 167-172, 2005.

TAKEBE, M.; YONEYAMA, T.; INADA, K.; MURAKAMI, T. Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status. **Plant and Soil**, The Hague, v. 122, n. 2, p. 295-297, 1990.

THENKABAIL, P.S.; ENCLONA, E.A.; ASHTON, M.S.; VAN DER MEER, B. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 91, n. 3/4, p. 354-376, 2004.

TRIVELIN, P.C.O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com uso do traçador 15N.** . 2000. 143p. Livre Docência (Livre Docente em Energia Nuclear na Agricultura) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000

TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIGUES, J.C.S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 12, p. 1375-1385, 1995.

VIGNEAU, N.; ECARNOT, M.; RABATEL, G.; ROUMET, P. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 25-31, 2011.

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.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

WENJIANG, H.; JIHUA, W.; ZHIJIE, W.; JIANG, Z.; LIANGYUN, L.; JINDI, W. Inversion of foliar biochemical parameters at various physiological stages and grain quality indicators of winter wheat with canopy reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 25, n. 12, p. 2409-2419, 2004.

ZHAO, C.; WANG, Z.; WANG, J.; HUANG, W. Relationships of leaf nitrogen concentration and canopy nitrogen density with spectral features parameters and narrow-band spectral indices calculated from field winter wheat (*Triticum aestivum* L.) spectra. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 33, n. 11, p. 3472-3491, 2012.

ZHAO, D.; REDDY, K.R.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; KOTI, S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 335-344, 2007.

ZHAO, D.; REDDY, K.R.; KAKANI, V.G.; REDDY, V.R. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 22, n. 4, p. 391-403, 2005.