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

**Sensor de refletância do dossel para direcionar a aplicação de nitrogênio
em taxas variáveis na cultura da cana-de-açúcar**

Lucas Rios do Amaral

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2014**

Lucas Rios do Amaral
Engenheiro Agrônomo

**Sensor de refletância do dossel para direcionar a aplicação de nitrogênio em taxas
variáveis na cultura da cana-de-açúcar**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2014

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

Amaral, Lucas Rios do

Sensor de refletância do dossel para direcionar a aplicação de nitrogênio em
taxas variáveis na cultura da cana-de-açúcar / Lucas Rios do Amaral. - -
Piracicaba, 2014.

125 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Agricultura de precisão 2. Sensoriamento remoto 3. Sensor óptico
4. Índices de vegetação 5. Algoritmo de fertilização 6. Saccharum spp. I. Título

CDD 633.61
A485s

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

OFEREÇO

À toda minha família,
que tanto me apoiou em todos esses anos.

DEDICO

À minha esposa SARAH e ao meu filho ENZO,
pelo amor diário e incondicional;
pelos dias e noites em que estive ausente;
pela paciência, compreensão, colaboração e estímulo.

“Amo vocês!”

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor José Paulo Molin, pelas oportunidades, confiança e ensinamentos nesses cinco anos de mestrado e doutorado.

À Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, por meio do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de estudos e pelo seu frequente apoio desde a graduação.

Ao pesquisador Jim Schepers, professor emérito da University of Nebraska (Lincoln, NE, EUA), o qual me recebeu, muito me ajudou e ensinou durante os quatro meses do programa de doutorado sanduíche.

À FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), projeto PROSENSAP, pelo subsídio financeiro ao projeto.

Aos parceiros deste e outros estudos, Máquinas Agrícolas S.A e Usina São Martinho.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), em especial ao Dr. Heitor Cantarella, por disponibilizar seus experimentos e estar sempre disposto a me auxiliar.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), pelo auxílio na condução e colheita de experimentos, assim como a troca de experiências.

A todos os colegas de graduação e pós-graduação, pelo aprendizado, parceria e momentos de descontração.

Ao Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão (gMAP), o qual tive o prazer de fazer parte por todo o período da pós-graduação.

Às demais pessoas e entidades, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
Referências	15
2 RELAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSOR DE DOSSEL COM PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	19
Resumo	19
Abstract	19
2.1 Introdução.....	20
2.2 Material e métodos	21
2.2.1 Sensor de dossel e índices de vegetação.....	21
2.2.2 Experimentos para avaliar a relação com parâmetros biométricos.....	22
2.2.3 Integração de dados.....	24
2.2.4 Experimentos para avaliar a relação com produtividade.....	25
2.3 Resultados.....	26
2.3.1 Relação com parâmetros biométricos, clorofila e nitrogênio foliar	26
2.3.2 Integração de dados para incrementar a eficiência em estimar biomassa	32
2.3.3 Relação entre índices de vegetação e produtividade da cana-de-açúcar	34
2.4 Discussão	39
2.5 Conclusões.....	43
Referências	43
3 RESPOSTA DE CANAVIAIS COMERCIAIS À APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO E EFICIÊNCIA DO SENSOR DE DOSSEL EM ESTIMAR A PRODUTIVIDADE.....	49
Resumo	49
Abstract	49
3.1 Introdução.....	50
3.2 Material e métodos	52
3.2.1 Áreas experimentais	52
3.2.2 Sensores de dossel.....	54
3.2.3 Avaliações.....	56
3.2.4 Análise de dados	58
3.3 Resultados.....	59

3.3.1 Resposta da cana-de-açúcar a aplicação de nitrogênio	59
3.3.2 Relação com a produção de colmos	66
3.4 Discussão	70
3.5 Conclusões	71
Referências	71
4 ALGORITMO AGRONÔMICO DE FERTILIZAÇÃO PARA DIRECIONAR A APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM TAXAS VARIÁVEIS NA CULTURA DA CANA- DE-AÇÚCAR A PARTIR DE LEITURAS COM UM SENSOR DE DOSSEL.....	77
Resumo.....	77
Abstract	77
4.1 Introdução	78
4.2 Material e métodos.....	79
4.2.1 Sensor de dossel	79
4.2.2 Avaliação de metodologias para direcionar a aplicação de N	80
4.2.2.1 Áreas experimentais e avaliação com o sensor de dossel.....	80
4.2.2.2 Análise dos dados.....	82
4.2.3 Definição de uma metodologia para direcionar a aplicação de N.....	82
4.3 Resultados.....	83
4.3.1 Variabilidade intrínseca das áreas <i>versus</i> doses de N	83
4.3.2 Faixa rica em N	85
4.3.3 Faixa virtual	87
4.3.4 Direcionamento do N pela estimativa de produtividade	88
4.3.4.1 Estimativa da produtividade	90
4.3.4.2 Definição da dose de N.....	92
4.3.4.3 Definição do algoritmo	93
4.4 Discussão	94
4.5 Conclusões.....	96
Referências	97
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
APÊNDICES	105
ANEXOS	111

RESUMO

Sensor de refletância do dossel para direcionar a aplicação de nitrogênio em taxas variáveis na cultura da cana-de-açúcar

A fertilização da cana-de-açúcar com nitrogênio (N), embora intensamente estudada, ainda representa desafio aos produtores e pesquisadores, principalmente devido à alta variabilidade de resposta dessa cultura ao N aplicado. Visando melhorar a eficiência das adubações, a aplicação de fertilizantes em doses variáveis é indispensável. Nesse contexto, sensores que mensuram a refletância do dossel apresentam-se como alternativa interessante. Bons resultados com essa tecnologia vêm sendo observado para as culturas de trigo e milho. Entretanto, apesar da efetividade desses sensores em identificar alguns parâmetros da cana-de-açúcar, ainda há várias incógnitas quanto a seu uso, principalmente em relação à forma de converter as leituras desse equipamento em uma dose de N a ser aplicada nos canaviais. Desse modo, o objetivo principal dessa tese foi definir uma metodologia capaz de direcionar a aplicação de N em taxas variáveis em cana-de-açúcar a partir de informações obtidas com um sensor de dossel. Para tanto, foi necessário: 1) estabelecer qual o índice de vegetação mais indicado para ser usado em cana, dentre aqueles possíveis de se obter com o sensor de dossel utilizado, e quais os parâmetros da cultura que influenciam nas leituras com o sensor; 2) avaliar a eficácia desse equipamento em identificar a resposta da cultura ao N e a sua relação com a produtividade de colmos; e 3) avaliar se alguma metodologia de recomendação de N estabelecida para outras culturas é viável para direcionar a aplicação de N em cana-de-açúcar. Foram conduzidos experimentos em de parcelas e em forma de faixas da cultura, com aplicação de diferentes doses de N. Todos os experimentos, além de algumas áreas comerciais, foram avaliados com o sensor Crop Circle, modelo ACS-430 (Holland Scientific, Lincoln, NE, EUA), quando a cultura apresentava altura de plantas entre 0,4 e 0,6 m. A cana-de-açúcar apresentou resposta variável ao N aplicado. Dentre os diferentes índices de vegetação, calculados com as refletâncias mensuradas pelo sensor, os que utilizam a banda situada na região espectral do red edge apresentaram os melhores resultados. O acúmulo de biomassa da parte aérea foi o que mais influenciou as leituras com o sensor de dossel. Devido a isso, o sensor também se mostrou eficiente em estimar a produtividade da cana-de-açúcar. A variabilidade intrínseca de cada área, causada por danos à soqueira e outros fatores limitantes ao desenvolvimento da cana, impede o uso das estratégias de aplicação apontadas na literatura. Contudo, por meio da capacidade do sensor em estimar a produtividade, foi proposto um algoritmo agrônomo de fertilização nitrogenada. Essa metodologia direciona maior quantidade de N em regiões com maior vigor da cultura, assumindo que, nessa situação, as plantas apresentam maior probabilidade de absorverem N proveniente do fertilizante.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Sensoriamento remoto; Sensor óptico; Índices de vegetação; Algoritmo de fertilização; *Saccharum* spp.

ABSTRACT

Crop canopy reflectance sensor for guiding the variable-rate nitrogen application in sugarcane

Sugarcane nitrogen fertilization (N), even being extensively studied, is still a challenge to producers and researchers, mainly due to the high N response variability showed by this crop. For this reason, variable-rate N application is essential. Sensors that measure the crop canopy reflectance are an interesting alternative. Good results with this technology have been found for wheat and corn. However, despite the suitability of these sensors in identifying some sugarcane parameters, there are still many gaps to be answered, especially related to how convert the sensor readings in an N rate to be applied in the fields. Thus, the main objective of this thesis was to develop a method to guide the variable-rate N application in sugarcane, based on canopy sensor readings. To achieve this goal, it was necessary the following studies: 1) establish which is the most appropriate vegetation index to be used in sugarcane fields, among those possible to be obtained from the canopy sensor used, as well as which crop aspects can influence the readings; 2) evaluate the effectiveness of this equipment to identify the crop N response and its relationship with the sugarcane stalk yield; and 3) test some methodologies available in the literature in order to guide the sugarcane N fertilization. Plot and strips experiments with N rates were performed. All the experiments and some producing fields were evaluated, when the crop stem height was between 0.4 and 0.6 m, with the Crop Circle sensor, model ACS-430 (Holland Scientific, Lincoln, NE, USA). The sugarcane showed variable response to the N applied. Among the different vegetation indices calculated from the reflectance obtained by the sensor, the red edge vegetation indices showed the best results. The aboveground biomass was the crop parameter that highest interfered in the canopy sensor readings, indicating that the sensor was effective in estimating the sugarcane yield either. The intrinsic variability of each field, caused by ratoon damage and other limiting factors, prevents the implementation of some strategies pointed out in the literature. However, due to canopy sensor ability for yield estimation, it was proposed an algorithm to guide higher N rates in areas with greater crop vigor, assuming that in this situation is more promising to the plants absorbing N from the fertilizers.

Keywords: Precision agriculture; Remote sensing; Optical sensor; Vegetation index; Fertilization algorithm; *Saccharum* spp.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma gramínea de porte alto, pertencente à família Poaceae, com metabolismo fotossintético C4 e comportamento semiperene, a qual possibilita várias colheitas (cortes) depois de cada reforma realizada no canavial; é uma cultura robusta e eficiente na produção de biomassa, cultivada para obtenção de colmos, os quais são, devido ao seu grande acúmulo de sacarose, utilizados para produção de açúcar e etanol (DINARDO-MIRANDA et al., 2010).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, além de ser líder na produção de açúcar e o segundo maior produtor de etanol. Para a safra 2013/14, foi estimada uma área cultivada de 8,8 milhões de hectares, com um crescimento de 3,8% em relação à safra anterior, representando um total de 659,8 milhões de toneladas de cana colhida (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013). Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2014), todo o aumento na área e na produção foi destinado à produção de etanol, ocasionado pela demanda mundial por fontes renováveis de energia.

Apesar da importância da cultura da cana-de-açúcar, muitas questões sobre seu cultivo e fisiologia ainda carecem de esclarecimentos. Dentre essas lacunas, a fertilização com N destaca-se como uma das práticas culturais mais estudadas na literatura. Isso decorre da frequente variabilidade na resposta da cana-de-açúcar ao N aplicado (CANTARELLA et al., 2007; FRANCO et al., 2011; KORNDORFER et al., 2002; LOFTON et al., 2012; ROSSETO et al., 2010), assim como a inexistência de um método de análise de solo que determine, de forma confiável e prática, a disponibilidade de N para a cultura (CATARELLA, 2007).

De acordo com Vitti e Mazza (2002), o N é o segundo nutriente com maior demanda pela cana-de-açúcar ($1,43 \text{ kg t}^{-1}$ de N), ficando atrás apenas do potássio ($1,74 \text{ kg t}^{-1}$ de K). O N representa cerca de 1% de toda a matéria seca acumulada pela planta, sendo que sua deficiência causa redução na síntese de clorofila e aminoácidos e reduz a energia disponível para a produção de carboidratos e cadeias carbônicas, influenciando diretamente o desenvolvimento e a produção de cana (MALAVOLTA et al., 1997).

Apesar disso, a fertilização rotineiramente apresenta baixa eficiência de uso do N (EUN) (CANTARELLA et al., 2007; FRANCO et al., 2011), ocasionado por fatores como mineralização desse nutriente pela matéria orgânica e fixação por microrganismos no solo (BODDEY et al., 2003; FRANCO et al., 2011; SCHULTZ et al., 2012). Ademais, o N em

excesso pode prejudicar a produtividade das lavouras (THORBURN et al., 2005), assim como reduzir o retorno econômico ao agricultor e prejudicar o ambiente (THORBURN et al., 2011).

Uma das formas de se incrementar a eficiência das fertilizações com esse elemento é a aplicação em doses variadas, conforme a demanda da cultura em determinada porção da lavoura, seguindo os preceitos da agricultura de precisão (SOLARI, 2006). Entretanto, como não são realizadas análises de solo para esse elemento, essa tarefa é dificultada. Nesse contexto, sensores embarcados maquinário agrícola e que mensuram a refletância do dossel da cultura vêm sendo apontados como uma das alternativas para possibilitar a aplicação de N em taxas variáveis e em tempo real.

A utilização desses sensores está embasada no fato de que as propriedades espectrais (refletância e transmitância) do dossel da cultura são afetadas pela disponibilidade de N, já que esse elemento apresenta efeito direto no desenvolvimento da cultura e no acúmulo de clorofila nas folhas (BLACMER et al., 1996; TARPLEY et al., 2000).

Diversos autores afirmam que o sensor de dossel é ferramenta útil para captar a variabilidade da cultura de trigo e estimar sua produtividade, permitindo a aplicação de N em taxas variáveis de acordo com a demanda da cultura (LUKINA et al., 2001; OSBORNE, 2007; RAUN et al., 2001). Solari et al. (2008), trabalhando com a cultura do milho, verificaram que a resposta destas culturas ao N pode ser eficientemente predita por sensores de dossel, possibilitando a recomendação de N com base na produtividade almejada. Berntsen et al. (2006), analisando diversas metodologias para recomendar N em trigo, verificaram que métodos que se baseiam em sensores de planta apresentam melhores resultados quando comparados aos que levam em consideração apenas atributos do solo.

Dessa forma, o uso de sensores de dossel para direcionar a aplicação de N vem sendo largamente estudada há anos. Exemplos desses trabalhos são os de Blackmer et al. (1996), Holland e Schepers (2010), Kitchen et al. (2010), Schmidt et al. (2011) e Teal et al. (2006) na cultura do milho; Grohs et al. (2009), Povh et al. (2008), Raun et al. (2005), Solie et al. (2012) e Wright et al. (2004) em trigo; Motomiya et al. (2009), Sui et al. (2005) e Vellidis et al. (2011) no algodão; Cao et al. (2013) e Xue et al. (2013) em arroz; entre outros.

Entretanto, pesquisas sobre esse assunto em cana-de-açúcar são ainda incipientes. No Brasil, Amaral e Molin (2011) e Molin et al. (2010), verificaram que os sensores de dossel avaliados são eficientes em diferenciar as doses de N aplicadas nessa cultura. Nos Estados Unidos, Lofton et al. (2012), verificaram boa eficiência de um sensor de dossel em mensurar a resposta da cana ao N. Já, Portz et al. (2011) verificaram boa relação entre as leituras obtidas com um sensor de dossel, a biomassa e o N extraído pela cultura. No entanto, nenhum estudo

propôs ou avaliou uma forma de utilizar as leituras provenientes de sensores de dossel para direcionar a aplicação de N em taxas variáveis para a cultura da cana-de-açúcar, sendo esse o objetivo principal da presente pesquisa.

Todavia, foi necessário primeiramente verificar: 1) quais os índices de vegetação, calculados a partir da refletância das diferentes bandas mensuradas pelo sensor de dossel, que são mais eficientes em identificar os parâmetros biométricos da cana-de-açúcar, assim como quais destes parâmetros mais influenciam nas leituras do sensor; 2) avaliar a eficácia do sensor em estimar a resposta da cana-de-açúcar a doses de N, em comparação a outras formas disponíveis para realizar tal estimativa (medidor portátil de clorofila e análise do teor de N foliar), além de verificar a eficiência dessas mensurações em se relacionarem com a produtividade final de colmos; e 3) avaliar a efetividade de metodologias já disponíveis na literatura para o direcionamento do N com base nas leituras com sensores de dossel, para o uso na cultura da cana-de-açúcar.

Referências

- AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 1, p. 1633–1642, 2011.
- BERNTSEN, J.; THOMSEN, A.; SCHELDE, K.; HANSEN, O.M.; KNUDSEN, L.; BROGE, N.; HOUGAARD, H.; HØRFARTER, R. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, n. 2, p. 65–83, 2006.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E.; WALTER-SHEA, E.A. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 1-5, 1996.
- BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; REIS, V. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil**, The Hague, v. 252, p. 139–149, 2003.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. p. 355-412.

CAO, Q.; MIAO, Y.; WANG, H.; HUANG, S.; CHENG, S.; KHOSLA, R.; JIANG, R. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 154, p. 133–144, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: cana-de-açúcar, safra 2013/2014, terceiro levantamento, dezembro de 2013. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>. Acesso em: 05 fev. 2014.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.A.G. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010. 882 p.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, E.C.A.; 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.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 101–112, 2009.

HOLLAND, K.H.; SCHEPERS, J.S. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 5, p. 1415–1424, 2010.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; SCHARF, P.C.; PALM, H.L.; ROBERTS, D.F.; VORIES, E.D. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 1, p. 71–84, 2010.

KORNDÖRFER, G.H.; COLOMBO, C.; CHIMELLO, M.A.; LEONE, P.L.C. Desempenho de variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem nitrogênio. **STAB - Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 20, p. 28–31, 2002.

LOFTON, J.; TUBANA, B.S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H. Predicting sugarcane response to nitrogen using a canopy reflectance-based response index value. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 1, p. 106–113, 2012.

LUKINA, E.; FREEMAN, K.; WYNN, K.; THOMASON, W.; MULLEN, R.; STONE, M.; SOLIE, J.; KLATT, A.; JOHNSON, G.; ELLIOTT, R.; RAUN, W. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 6, p. 885–898, 2001.

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

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.

MOTOMIYA, A.V.A.; MOLIN, J.P.; CHIAVEGATO, E.J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 137–145, 2009.

OSBORNE, S.L. Utilization of existing technology to evaluate spring wheat growth and nitrogen nutrition in South Dakota. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 38, n. 7/8, p. 949–958, 2007.

PORTZ, G.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 33–44, 2011.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1075–1083, 2008.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 131–138, 2001.

RAUN, W.; SOLIE, J.; STONE, M.; MARTIN, K.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.; JOHNSON, G. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 19/20, p. 2759–2781, 2005.

ROSSETO, R.; DIAS, F.L.F.; LANDELL, M.G.A.; CANTARELLA, H.; TAVARES, S.; VITTI, A.C.; DERECHIN, D. N and K fertilisation of sugarcane ratoons harvested without burning. In: INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 27., 2010, Veracruz. **Proceedings...** Veracruz: ISSCT, 2010. 1 CD-ROM.

SCHMIDT, J.; BEEGLE, D.; ZHU, Q.; SRIPADA, R. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 94–101, 2011.

SCHULTZ, N.; MORAIS, R.F. de; SILVA, J.A.; BAPTISTA, R.B.; OLIVEIRA, R.P.; LEITE, J.M.; PEREIRA, W.; CARNEIRO JÚNIOR, J.B.; ALVES, B.J.R.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; REIS, V.M. Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 261–268, 2012.

SOLARI, F. **Developing a crop based strategy for on the go n management in irrigated cornfields**. 2006. 157 p. Thesis (PhD) – Graduate College at the University of Nebraska, Lincoln, 2006.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 571–579, 2008.

SOLIE, J.B.; MONROE, A.D.; RAUN, W.R.; STONE, M.L. Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 2, p. 378–387, 2012.

SUI, R.; WILKERSON, J.B.; HART, W.E.; WILHELM, L.R.; HOWARD, D.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.

TARPLEY, L.; REDDY, K.R.; SASSENATH-COLE, G.F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, Madison, v. 1, n. 40, p. 1814-1819, 2000.

TEAL, R.K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, W.R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 6, p. 1488–1494, 2006.

THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; PROBERT, M.E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 337–351, 2005.

THORBURN, P.J.; BIGGS, J.S.; ATTARD, S.J.; KEMEI, J. Environmental impacts of irrigated sugarcane production: nitrogen lost through runoff and leaching. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 144, n. 1, p. 1–12, 2011.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor sucroenergético**. Disponível em: < <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=85>>. Acesso em: 05 fev. 2014.

VELLIDIS, G.; SAVELLE, H.; RITCHIE, R.G.; HARRIS, G.; HILL, R.; HENRY, H. NDVI response of cotton to nitrogen application rates in Georgia, USA. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 8., 2011, Praga. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2011. 1 CD-ROM.

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. Encarte técnico planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 19, p. 1–16, 2002.

WRIGHT, D.; RASMUSSEN, V.; RAMSEY, R.; BAKER, D.; ELLSWORTH, J. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience & Remote Sensing**, Columbia, v. 41, n. 4, p. 287–300, 2004.

XUE, L.; LI, G.; QIN, X.; YANG, L.; ZHANG, H. Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in south China. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 15, p. 95–110, 2013.

2 RELAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSOR DE DOSSEL COM PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DA CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

A otimização da fertilização com nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar ainda é um desafio, sendo que sensores que avaliam a refletância do dossel são uma alternativa para melhorar a eficiência de uso de N a partir de aplicações em taxas variáveis. Entretanto, estudos com esse tipo de equipamento em cana-de-açúcar ainda são incipientes. O presente trabalho teve como objetivo: 1) identificar quais parâmetros da cultura que influenciam os índices de vegetação (IVs) obtidos por um sensor de dossel; 2) avaliar a integração de parâmetros biométricos da cultura aos dados do sensor de dossel para melhorar sua predição no acúmulo de biomassa da parte aérea pela cana-de-açúcar; 3) verificar a relação dos IVs com a produtividade da cana-de-açúcar. Para tanto, quatro canaviais foram avaliados com um sensor de dossel (Crop Circle, modelo ACS-430), direcionando posteriores amostragens de planta. Os parâmetros mensurados foram altura e densidade de perfilhos, acúmulo de biomassa da parte aérea, teor de clorofila e N foliar. Ainda, dois experimentos com doses de N tiveram sua produtividade correlacionada com os diferentes IVs. A variação na biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar é o fator que mais influencia as leituras com os sensores de dossel, independentemente do IV utilizado. A densidade de perfilhos e altura de colmos não foram informações capazes de incrementar a eficiência do sensor de dossel em prever a biomassa da cultura. Os IVs que utilizaram as bandas espectrais do red edge (730 nm) e do infravermelho próximo (780 nm) apresentaram os resultados mais promissores, mostrando boa eficiência em estimar a produtividade e em se relacionar com a variabilidade no acúmulo de biomassa da parte aérea pela cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Índice de vegetação; Biomassa; Nitrogênio; Biometria

Abstract

The optimization of nitrogen fertilization (N) in sugarcane is still a challenge. Sensors that evaluate crop canopy reflectance are an alternative to improve the N use efficiency by variable-rate application. However, studies with this equipment in sugarcane are incipient. The present study aimed to: 1) identify which crop aspects can influence the vegetation indices (IVs) obtained by canopy sensors; 2) test the integration of sugarcane biometric data to the canopy sensor readings to improve the aboveground biomass estimation; and 3) evaluate the relationship of those IVs with stalks yield. Therefore, four sugarcane fields were measured by a canopy sensor (Crop Circle, model ACS-430), guiding plant samplings. The sugarcane parameters evaluated were plant height, number of stalks, aboveground biomass accumulation, chlorophyll content and leaf N concentration. Moreover, two experiments with N rates had the IVs correlated with stalks yield. The variation in sugarcane aboveground biomass was the aspect that most influenced the canopy sensor readings, regardless the IV used. The stalk height and the crop density did not improve the canopy sensor efficiency in predicting sugarcane aboveground biomass. The IVs using the spectral bands of the red edge (730 nm) and near infrared (780 nm) showed the most promising results, with good efficiency in yield estimation and sugarcane biomass variability identification.

Keywords: Remote sensing; Vegetation index; Biomass; Nitrogen; Biometrics

2.1 Introdução

A eficiência da adubação nitrogenada de culturas agrícolas ainda é um desafio a produtores e pesquisadores. Isso ocorre porque, nas condições edafoclimáticas brasileiras, a análise de solo não traz informações confiáveis sobre a disponibilidade de nitrogênio (N) para as culturas, em razão da dinâmica complexa desse elemento no solo (CANTARELLA, 2007). Em cana-de-açúcar, esse desafio é ainda maior, uma vez que essa cultura responde de forma variável as fertilizações com N (CANTARELLA et al., 2007).

Desse modo, sensores que mensuram a refletância do dossel das culturas vêm sendo apontados como uma ferramenta interessante para otimizar a fertilização com N a partir de aplicações em taxas variáveis, respeitando a variabilidade das lavouras. Diversos estudos vêm sendo conduzidos em culturas altamente domesticadas, como é o caso do milho (HOLLAND; SCHEPERS, 2010; KITCHEN et al., 2010; SOLARI et al., 2008; SOLIE et al., 2012; TEAL et al., 2006) e do trigo (BERNTSEN et al., 2006; GROHS et al., 2009; LUKINA et al., 2001; RAUN et al., 2002; SOLIE et al., 2012; WRIGHT et al., 2004). Ambos os casos mostram resultados promissores de aumento da eficiência do uso de N, redução da aplicação de fertilizantes e/ou aumento da produtividade.

No entanto, no caso específico da cana-de-açúcar, pesquisas sobre esse assunto são ainda incipientes. No Brasil, Amaral e Molin (2011) e Molin et al. (2010), verificaram que os sensores de dossel avaliados são eficientes em diferenciar as doses de N aplicadas na cana-de-açúcar, enquanto Portz et al. (2011) notaram boa relação entre as leituras obtidas com um sensor de dossel, a biomassa e o N extraído pela cultura. Já, nos Estados Unidos, Lofton et al. (2012b) observaram boa eficiência de um sensor de dossel em mensurar a resposta da cana-de-açúcar ao N.

Apesar de resultados promissores em cana, é preciso ter em mente que os sensores de dossel foram desenvolvidos para atuarem nas culturas de milho, nos Estados Unidos, e trigo, na Europa. Logo, são necessários mais estudos para apontar a efetividade dessa tecnologia na cana-de-açúcar.

Dentre os principais fatores que podem ocasionar essa variação na eficiência dos sensores, estão as bandas espectrais (BEs) utilizadas, ou seja, a faixa do espectro eletromagnético com a qual os sensores trabalham. Esse empecilho advém das diferenças de arquitetura do dossel, das propriedades químicas e fisiológicas das folhas e dos parâmetros

agronômicos da cana em relação às culturas de milho e trigo, o que pode ocasionar comportamento diferenciado da refletância em regiões específicas do espectro eletromagnético.

Desse modo, é essencial entender o que influencia nas leituras com o sensor de dossel, assim como avaliar a eficiência de diferentes IVs em identificar a variabilidade no desenvolvimento da cana-de-açúcar, uma vez que as metodologias para aplicação de N em taxas variáveis assumem tal capacidade. Portanto, é preciso identificar se esse tipo de equipamento é eficiente em identificar a variação na biomassa da cana-de-açúcar e na disponibilidade de N, a qual é representada pela variação de clorofila nas folhas e no dossel da cultura, o que, conseqüentemente, resulta em variação da produtividade.

Sendo assim, o presente trabalho objetivou identificar quais as propriedades da cultura da cana-de-açúcar que influenciam nas leituras de refletância obtidas por um sensor de dossel. Buscou-se determinar a relação existente entre diferentes IVs e alguns parâmetros biométricos da cultura, além de avaliar se algum desses parâmetros poderia auxiliar na determinação da biomassa da cana-de-açúcar pelo sensor de dossel.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Sensor de dossel e índices de vegetação

O sensor de dossel utilizado foi o Crop Circle, modelo ACS-430 (*Holland Scientific, Lincoln, NE, EUA*), o qual possui sua própria fonte de luz modulada, com frequência de emissão de 40.000 Hz, emitida a partir de um único LED (*light emitting diode*). A refletância do alvo é captada por três fotodetectores, sendo um na região do espectro eletromagnético centrada no vermelho (670 nm, visível), um na região de transição entre vermelho e infravermelho próximo, chamado de red edge (730 nm), e uma na região inicial do infravermelho próximo (IVP, 780 nm). Esses fotodetectores possuem variação na refletância medida de até ± 20 nm em relação ao comprimento de onda central, mensurando assim uma faixa estreita do espectro, podendo ser definidos como bandas espectrais (BEs).

O campo de visão do sensor é de 32 por 6 graus e coleta dados cinematicamente em apenas uma fileira de plantas de cana-de-açúcar por vez, sendo sua distância ideal em relação ao alvo (dossel da cultura) entre 0,8 e 1,2 m.

A refletância obtida em cada BE é coletada separadamente, o que possibilita o cálculo de vários índices de vegetação (IVs). Assim, utilizaram-se diferentes configurações de alguns

IVs que vêm sendo estudados na literatura especializada, os quais apresentam como principal objetivo determinar as condições da cultura em relação à nutrição por N (Tabela 2.1).

2.2.2 Experimentos para avaliar a relação com parâmetros biométricos

Quatro áreas comerciais cultivadas com cana-de-açúcar em final de safra foram selecionadas (Tabela 2.2) e tiveram todas as suas fileiras avaliadas pelo sensor de dossel. As mensurações foram realizadas quando as plantas apresentavam altura média de colmos de 0,5 m, seguindo recomendações de Amaral e Molin (2014) e Portz et al. (2012).

O sensor de dossel foi acoplado à barra de aplicação da máquina Uniport 3000 NPK (Máquinas Agrícolas Jacto S/A, Pompéia, SP, Brasil) e mantido a uma distância média de 1,0 m do dossel das plantas. A máquina se deslocava a uma velocidade de $4,5 \text{ m s}^{-1}$ (16 km h^{-1}), com o sensor conectado a um sistema de posicionamento por satélite (GNSS), registrando a localização e a mensuração das refletâncias a 1,0 Hz (1 dado s^{-1}).

Tabela 2.1 – Índices de vegetação utilizados (equações originalmente propostas) com suas respectivas fontes e as diferentes configurações de uso de bandas espectrais

Índices de vegetação	Comprimentos de onda utilizados (nm)	Equação original	Fonte
vNDVI	780 e 670	$\text{NDVI} = (\text{IVP} - \text{Vermelho}) / (\text{IVP} + \text{Vermelho})$	Rouse et al., 1974
reNDVI	780 e 730		
rrNDVI	730 e 670		
vCI	780 e 670	$\text{CI}^{(1)} = (\text{IVP} / \text{Verde}) - 1$	Gitelson et al., 2005
reCI	780 e 730		
rrCI	730 e 670		
vISR	780 e 670	$\text{ISR} = \text{Vermelho} / \text{IVP}$	Kitchen et al., 2010
reISR	780 e 730		
rrISR	730 e 670		
vYALSI	780 e 670	$\text{YALSI} = 100 (\ln(\text{IVP}) - \ln(\text{RedEdge}))$	Jasper et al., 2009
reYALSI	780 e 730		
rrYALSI	730 e 670		
CCCI	780, 730 e 670	$\text{CCCI} = \text{reNDVI} / \text{vNDVI}$	Barnes et al., 2000
MTCI	780, 730 e 670	$\text{MTCI} = (\text{IVP} - \text{RedEdge}) / (\text{RedEdge} - \text{Vermelho})$	Dash e Curran, 2004

⁽¹⁾ CI foi originalmente proposto utilizando-se a refletância na banda do verde, mas vários trabalhos vêm utilizando adaptações, como as realizadas no presente estudo, resultando em um melhor desempenho

Os dados da refletância das três BEs foram importados para um sistema de informação geográfica (SSToolBox®, SST Software, Stillwater, OK, EUA), o qual permitiu a criação de

30 pontos amostrais em cada área, alocados de acordo com a variabilidade identificada pelas refletâncias. Todas as leituras em um raio de 5,0 m do ponto amostral foram selecionadas e tiveram sua média calculada, representando o valor do respectivo ponto para cada refletância separadamente, calculando-se, posteriormente, os IVs.

No dia seguinte à leitura e ao processamento dos dados, foram realizadas amostragens de campo para determinar alguns parâmetros biométricos da cultura nos respectivos pontos amostrais (Apêndices A a D). Para tanto, navegou-se até os pontos com o auxílio de um GNSS portátil, realizando a delimitação de uma parcela virtual de 5,0 m por quatro fileiras de cana, seguindo metodologia proposta por Portz et al. (2011). Nesses 20,0 m lineares foi feita a contagem do número de perfilhos (número de colmos), estimando a densidade de perfilhos por metro, e a medição da altura média de plantas a partir da inserção da primeira folha completamente expandida (altura de colmos).

Dentro da área das parcelas virtuais foram selecionadas 1,5 m lineares de três fileiras de cana, totalizando 4,5 m, onde foi coletada toda a parte aérea da cana-de-açúcar. Esse material foi pesado em campo, com balança portátil (precisão de ± 50 g), resultando na biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar em cada ponto amostral. Esse valor foi posteriormente extrapolado para acúmulo de biomassa da parte aérea por hectare ($t\ ha^{-1}$).

Tabela 2.2 – Características das áreas experimentais

Área	Variedade	Solo ⁽¹⁾	Ambiente de Produção ⁽²⁾	Corte ⁽³⁾	Tamanho (ha)
ALV	SP80-1816	LV	A	Sétimo	6,2
APA	CTC2	LVA	C	Terceiro	4,9
ARE	CTC2	LVA	D	Quarto	6,7
AGL	CTC2	LV	B	Quarto	6,4

⁽¹⁾ Classificação de solos de acordo com EMBRAPA (2006)

⁽²⁾ Classificação de Ambientes de Produção para a cana-de-açúcar de acordo com Prado (2005)

⁽³⁾ Número de cortes realizados, contando a última colheita antes da leitura com o sensor

Adicionalmente aos parâmetros biométricos, foi avaliado também o teor de clorofila e de N foliar. Para tanto, dentro de cada parcela virtual foram selecionadas 30 plantas, as quais tiveram suas folhas +1 e +3 (respectivamente, primeira e terceira folhas completamente expandidas) avaliadas por um medidor portátil de clorofila (clorofilômetro), modelo SPAD-502 (*Konica Minolta Sensing, Inc.*, Sakai, Osaka, Japão). Foi coletada uma leitura com o clorofilômetro por folha, avaliando a porção central de um dos limbos foliares. Isso resultou em um valor médio de clorofila (índice SPAD) para cada posição de folha (folhas +1 e +3) em cada ponto amostral. Essas mesmas porções das folhas (terço médio, excluída as nervuras

centrais - RAIJ et al., 1997) foram enviadas para laboratório para a determinação do teor de N foliar a partir do método semi-micro Kjeldahl (SARRUGE; HAAG, 1974).

Foi avaliada a correlação entre as variáveis (IVs, parâmetros biométricos e teores de clorofila e N foliar) para cada área separadamente, tendo sua significância avaliada pelo teste t de *Student* com o auxílio do suplemento para análises estatísticas para Microsoft Excel, desenvolvido em plataforma R, denominado Action (EstatCamp, São Carlos, SP, Brasil).

Para permitir a análise conjunta dos resultados das diferentes áreas, os dados foram normalizados pelo maior valor de cada variável observado entre as quatro áreas. Para avaliar a sensibilidade dos IVs em prever os parâmetros biométricos mensurados nos pontos amostrais, os dados normalizados foram submetidos à análise de regressão linear e, a partir da inclinação da reta e da raiz quadrada do erro médio (RMSE), foi obtido o equivalente de sensibilidade (SEq, Eq. 2.1). Segundo Solari et al. (2008), maiores valores de SEq indicam maior sensibilidade do IV em prever a variável analisada. Viña e Gitelson (2005) afirmam que como o SEq incorpora a inclinação da reta e o erro da estimativa, esse índice é eficiente em identificar a diferença em sensibilidade dos diferentes IVs.

$$SEq = \frac{\text{inclinação}}{RMSE} \quad (2.1)$$

onde: *SEq* - é o equivalente de sensibilidade de cada IV; *inclinação* - indica o coeficiente de inclinação da reta da regressão linear entre IVs e parâmetros biométricos; *RMSE* - indica a raiz quadrada do erro médio da regressão.

Os coeficientes de determinação de cada regressão linear, entre IV e parâmetros biométricos em cada área, analisados em módulo, tiveram suas médias comparadas pelo teste t (LSD) a 5% de significância, utilizando-se o software estatístico SISVAR (Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil - FERREIRA, 2011).

2.2.3 Integração de dados

As variáveis da cultura que obtiveram correlação significativa com o acúmulo de biomassa da parte aérea foram integradas às leituras do sensor de dossel, buscando-se avaliar se algum desses dados melhoraria a predição da biomassa efetuada pelo sensor.

Para tanto, realizou-se a multiplicação do valor do IV pelo valor mensurado da variável da cultura, gerando diferentes índices compostos, como feito por Freeman et al. (2007). A

efetividade dos diferentes índices compostos em prever a biomassa foi avaliada por meio de regressões ($p < 0,05$), ajustando-se os modelos linear, exponencial e logarítmico através do software SigmaPlot® (SPSS Inc., Chicago, IL, EUA). Os melhores modelos foram selecionados de acordo com o coeficiente de determinação ajustado (R^2) e o erro padrão da estimativa (EPE), os quais tiveram seu R^2 e erros comparados ao resultado obtido com o sensor de dossel isoladamente.

2.2.4 Experimentos para avaliar a relação com produtividade

Com o intuito de avaliar a relação existente entre os IVs e a produtividade da cana-de-açúcar, dois experimentos com doses de N foram avaliados com o sensor de dossel quando a cultura apresentava altura média de colmos próxima a 0,5 m. Os experimentos foram planejados e conduzidos pela equipe do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), por meio do projeto temático BIOEN/FAPESP nº 2008/56147-1, tendo os tratamentos (doses de N) repetidos durante os anos.

As duas áreas, uma no município de Piracicaba e outra em Jaú, foram plantadas em abril de 2010, com três variedades de cana cada e tiveram os tratamentos instalados em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. As variedades foram locadas nas parcelas e as doses de N nas subparcelas, sendo essas últimas constituídas por 10,0 m de comprimento por 5 fileiras de cana. As três fileiras centrais foram avaliadas pelo sensor de dossel, conduzido manualmente, descontando-se 1,0 m linear de cada lado para efeito de bordadura.

A área de Piracicaba está situada em Argissolo vermelho amarelo, cultivada com as variedades SP81-3250, IAC87-3396 e CTC14, procedendo-se a avaliação com o sensor de dossel na safra 2011/2012, ou seja, em cana de segundo corte (primeira soca). A área de Jaú está situada em Latossolo vermelho, cultivada com as variedades SP81-3250, IACSP95-5000 e RB85-5536, com a avaliação sendo realizada na safra 2012/2013, ou seja, em cana de terceiro corte (segunda soca).

Os experimentos foram colhidos manualmente, sem queima, em outubro de 2012 e agosto de 2013, para as áreas de Piracicaba e Jaú, respectivamente. A cana oriunda de cada parcela foi pesada separadamente a partir de uma célula de carga instalada em carregadora de cana modificada.

Foi avaliada a correlação ente as variáveis (IVs e produtividade) para cada variedade separadamente e em conjunto, tendo sua significância avaliada pelo teste t de *Student*. Buscando testar a sensibilidade dos diferentes IVs em prever a produtividade, calculou-se também o SEq (Eq. 2.1) a partir dos dados normalizados, assim como descrito anteriormente.

2.3 Resultados

2.3.1 Relação com parâmetros biométricos, clorofila e nitrogênio foliar

Com exceção do MTCI e CCCI, todos IVs e BEs apresentaram, em geral, alta correlação com os parâmetros biométricos (altura de colmos, densidade de perfilhos e biomassa da parte aérea) (Anexos A a D). O CCCI apresentou correlação com esses parâmetros apenas em uma das áreas (ALV), enquanto o MTCI apresentou correlações variáveis, mas baixas.

Apenas na área APA não foi possível identificar relação entre os IVs/BEs com a densidade de perfilhos (Anexo B). Esse resultado pode ser atribuído a melhor brotação da cana (25,5 perfilhos m^{-1}), ocasionando inibição no desenvolvimento dos perfilhos, o que prejudica a relação com acúmulo de biomassa (Tabela 2.3). Simões et al. (2005), avaliando a relação entre parâmetros de crescimento da cultura e a produtividade da cana-de-açúcar, identificaram que a densidade de perfilhos interfere no acúmulo de biomassa apenas em estágios adiantados de desenvolvimento. É importante mencionar que esse efeito não afetou a capacidade do sensor em se relacionar com a biomassa acumulada pela cana.

Por outro lado, a maior correlação encontrada entre densidade de perfilhos e biomassa na área ALV pode estar relacionada à idade adiantada do canavial (sete cortes), o qual tem sua produção de biomassa diretamente ligada à densidade de plantas (média de 12 perfilhos m^{-1}). Isso significa que a quantidade de falhas de brotação existente na lavoura é fator determinante no acúmulo de biomassa. Simões et al. (2005) apontam que quanto maior é a idade do canavial, maior tende a ser o número de falhas de brotação causada por danos à soqueira, sendo que nessa situação, o número de perfilhos é fator determinante no estabelecimento da produtividade.

Tabela 2.3 – Coeficientes de correlação de Pearson entre biomassa da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) e os demais parâmetros avaliados (altura de plantas, densidade de perfilhos, leituras do clorofilômetro e o teor de N nas folhas +1 e +3) obtidos nas quatro áreas separadamente e de forma conjunta (geral)

Fatores	Altura	Densidade de perfilhos	Clorofilômetro		Teor de N	
			folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
ALV	0,810**	0,836**	0,067 ^{ns}	0,234 ^{ns}	- ⁽¹⁾	-
APA	0,512**	0,216 ^{ns}	-0,076 ^{ns}	0,175 ^{ns}	0,299 ^{ns}	0,173 ^{ns}
ARE	0,740**	0,693**	0,228 ^{ns}	0,580**	0,453**	-0,186 ^{ns}
AGL	0,879**	0,670**	-0,355 ^{ns}	0,364 ^{ns}	-0,332 ^{ns}	0,029 ^{ns}
Geral	0,720**	0,614**	0,305**	0,500**	0,347**	0,198 ^{ns}

Nota: ** indica correlação significativa a 1% de probabilidade pelo teste t; ^{ns} indica correlação não significativa a 5% de probabilidade

⁽¹⁾ Dado não coletado

Os IVs e BEs apresentaram baixa relação com as leituras do clorofilômetro, mas com melhores resultados na área ARE. Os IVs que utilizaram a banda espectral do red edge obtiveram maiores correlações com a clorofila na folha (Anexo C), assim como observado por Erdle et al. (2012) estudando a cultura do trigo. A correlação da refletância das BEs e dos IVs com o teor de clorofila no dossel é esperada, uma vez que a clorofila altera o comportamento da refletância das folhas ao absorver energia eletromagnética, em diferentes comprimentos de onda, a fim de realizar a fotossíntese. Entretanto, como o clorofilômetro avalia apenas uma pequena porção de determinada folha, enquanto o sensor avalia o dossel da cultura como um todo, nem sempre há boa relação entre esses equipamentos (SAMBORSKI et al., 2009).

Nessa mesma área (ARE) também foi verificada relação significativa do clorofilômetro com a biomassa da cultura (Tabela 2.3). Desse modo, a correlação entre IVs e clorofilômetros foi um efeito indireto do acúmulo de biomassa, já que as plantas mais bem desenvolvidas apresentavam maior nível de clorofila nas folhas.

Os IVs/BEs não apresentaram relação com a concentração de N nas folhas da cana-de-açúcar (Anexos A a D). Esse resultado já era esperado, uma vez que o teor de nutrientes nas folhas para fins de avaliação nutricional da cana apresentam eficiência duvidosa. Pesquisadores e agricultores que trabalham com fertilização da cana frequentemente não confiam nos resultados das análises foliares, uma vez que é rotineiro observar áreas produtivas que apresentam níveis baixos de determinado nutriente nas folhas, assim como

experimentos com altas doses de um nutriente que não correspondem à sua concentração foliar (VITTI, 2012¹).

Similarmente, o teor de clorofila presente, tanto na folha +1 como na folha +3, não foi útil para indicar o teor de N foliar (Figura 2.1). Isso mostra que a boa relação entre teor de clorofila e concentração de N foliar obtido em outras culturas (ARGENTA et al., 2001; BRITO et al., 2011; SAMBORSKI et al., 2009; VARVEL et al., 1997, 2007) não se aplica em cana-de-açúcar. É importante salientar que as relações significativas das leituras do clorofilômetro e do N foliar com a biomassa, quando analisadas todas as áreas em conjunto (Tabela 2.3), se trata de um artifício dos dados, pois isoladamente, cada área possui um intervalo de valor diferenciado.

Analisando o coeficiente de correlação médio obtido nas quatro áreas de estudo, comprovou-se que os IVs são pouco eficientes em identificar a variação de clorofila e N foliar e que os IVs CCCI e MTCI apresentaram as piores relações com os parâmetros biométricos da cultura (Tabela 2.4). Foi observada eficiência reduzida das BEs em se relacionar com os parâmetros biométricos, principalmente a do red edge. Isso ocorre porque as refletâncias das BEs estão sujeitas as variações na coloração das folhas e dos colmos da cultura, assim como do substrato (solo, palhada, etc.). Os IVs tem o objetivo de reduzir esse efeito e permitir maior gama de comparações entre situações distintas (TAUBINGER et al., 2012). Vale destacar que a correlação da banda do red edge (730 nm) com os parâmetros biométricos apresentou comportamento variável, hora sendo positiva, hora sendo negativa. Esse comportamento é causado pelo ponto de inflexão da curva espectral entre as regiões do visível e do IVP variar entre alvos com pigmentação e hidratação de folhas distintas. Por esse motivo, é essencial utilizar a BE do red edge no cálculo de IVs, os quais reduzem esse efeito.

¹ VITTI, André César. Informação transmitida durante o II Curso Teórico-Prático de Interpretação de Análise de Solo e Recomendação de Fertilizantes e Corretivos para a Cana-de-Açúcar, organizado pela Infobibos, Piracicaba-SP, 2012.

Figura 2.1 – Dispersão dos dados das leituras com clorofilômetro obtidas na mesma folha onde foi determinado o teor de N foliar ($p > 0,05$). As mensurações foram realizadas nas folhas +1 e +3 da cana, em três talhões distintos (APA, ARE e AGL)

Por meio da análise do equivalente de sensibilidade (SEq), verifica-se grande similaridade entre a maioria dos IVs em estimar a biomassa, excluindo-se o CCCI e o MTCI (Figura 2.2). Todas as configurações do ISR, assim como as configurações do NDVI e do YALSI que utilizam as BEs no vermelho e no red edge, apresentaram reduzida sensibilidade. Entretanto, as configurações do NDVI e do YALSI que utilizaram as BEs no red edge e IVP, apresentaram os melhores resultados (reNDVI e reYALSI). Ainda, as diferentes configurações do CI apresentaram boa relação com a biomassa, mas devido a alta dispersão dos dados (erro da estimativa), apresentaram desempenho geral inferior ao reNDVI e reYALSI.

Tabela 2.4 – Coeficientes de determinação médio das quatro áreas (R^2 em módulo) entre os índices de vegetação/bandas espectrais (IVs/BES) e os parâmetros biométricos (altura de plantas, densidade de perfilhos e acúmulo de biomassa da parte aérea), leituras do clorofilômetro e o teor de N nas folhas +1 e +3

IVs/BES	Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro		Teor de N	
				folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
670 nm	0,444bc	0,367d	0,572bc	0,019abc	0,110bcd	0,093a	0,013a
730 nm	0,352b	0,208bc	0,421b	0,066bc	0,057abc	0,065a	0,029a
780 nm	0,462bc	0,265cd	0,588bc	0,048abc	0,097bcd	0,074a	0,033a
vNDVI	0,492bc	0,346d	0,650c	0,021ab	0,108bcd	0,105a	0,023a
reNDVI	0,472bc	0,286cd	0,631c	0,038abc	0,126d	0,086a	0,033a
visNDVI	0,493bc	0,354d	0,639c	0,017a	0,092bcd	0,110a	0,026a
vCI	0,519c	0,331cd	0,663c	0,025abc	0,093bcd	0,120a	0,025a
reCI	0,478bc	0,285cd	0,638c	0,039abc	0,123cd	0,087a	0,033a
visCI	0,510c	0,342cd	0,642c	0,018a	0,083bcd	0,122a	0,029a
vISR	0,475bc	0,341cd	0,635c	0,019abc	0,108bcd	0,100a	0,023a
reISR	0,466bc	0,286cd	0,624c	0,037abc	0,126d	0,085a	0,032a
visISR	0,480bc	0,353d	0,630c	0,017a	0,095bcd	0,104a	0,025a
vYALSI	0,506c	0,343cd	0,661c	0,022ab	0,103bcd	0,111a	0,023a
reYALSI	0,473bc	0,286cd	0,633c	0,038abc	0,125cd	0,086a	0,033a
visYALSI	0,499bc	0,351d	0,642c	0,017a	0,090bcd	0,114a	0,027a
CCCI	0,093a	0,124b	0,077a	0,050abc	0,022a	0,055a	0,088a
MTCI	0,113a	0,028a	0,115a	0,068c	0,057ab	0,035a	0,072a

Nota: letras diferentes nas colunas indicam que houve diferença entre as médias pelo teste t (LSD) a 5% de probabilidade

Essa maior dispersão das leituras quando trabalhando com CI também foi observada por Solari et al. (2008), trabalhando com milho, e por Amaral e Molin (2011), na cultura da cana-de-açúcar. Nesses trabalhos, comparou-se a sensibilidade do CI e do NDVI em prever a produtividade dessas culturas e, concluiu-se que, devido a maior amplitude de dados apresentados pelo CI, este deveria ser preferido. Entretanto, nesses estudos foi utilizada a banda espectral na região do âmbar, o que pode ter melhorado o comportamento do CI ou prejudicado os resultados do NDVI.

Figura 2.2 – Coeficiente de determinação (R^2), inclinação da reta, raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade ($SEq = \text{inclinação} / \text{RMSE}$) das relações entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biomassa da cana-de-açúcar nas quatro áreas analisadas em conjunto por meio de normalização dos dados.

2.3.2 Integração de dados para incrementar a eficiência em estimar biomassa

Integrar dados de diferentes fontes e/ou equipamentos tem sido apontado como o futuro da agricultura de precisão ao permitir significativa melhora na qualidade dos diagnósticos (HEEGE, 2013). Para melhorar a eficácia de sensores de dossel, algumas opções de integração de dados têm sido propostas (SHAVER et al., 2011), principalmente a utilização de algum parâmetro da cultura. Dentre elas, a altura das plantas tem recebido destaque (FREEMAN et al., 2007; GIRMA et al., 2006; SHIRATSUCHI, 2011), uma vez que o sensor de dossel coletaria informações na horizontal, representando o IAF, enquanto a altura das plantas captaria informações na vertical, fornecendo estimativa da quantidade de camadas de vegetação, possibilitando assim, a estimativa de todo o volume do dossel.

Para tanto, o reNDVI foi selecionado como o melhor IV para predizer a biomassa, seguindo os resultados obtidos anteriormente, enquanto altura e densidade de perfilhos foram indicados como fatores determinantes no acúmulo de biomassa. Assim, analisando a integração da leitura do sensor, na forma de reNDVI, com a altura e a densidade de perfilhos, verificou-se que nenhum desses parâmetros melhorou significativamente a predição do acúmulo do teor de biomassa pela parte aérea da cana-de-açúcar (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Modelos de predição de biomassa ($t\ ha^{-1}$) a partir do índice de vegetação reNDVI e dos parâmetros biométricos, altura de colmos (m) e densidade de perfilhos (perfilhos m^{-1}) isoladamente e de forma integrada

Variável independente	Modelo	Equação	R ²	EPE ⁽¹⁾
reNDVI	Exponencial	$Y = 2,664e(8,841x)$	0,634	5,27
Altura	Linear	$Y = -3,620 + 40,119x$	0,470	6,35
Densidade de perfilhos	Linear	$Y = -13,067 + 8,235x - 0,432x^2$	0,492	6,21
Altura* Densidade de perfilhos	Exponencial	$Y = 37,732(1 - 0,805^x)$	0,574	5,69
reNDVI*Altura	Linear	$Y = 1,840 + 137,305x$	0,635	5,26
reNDVI* Densidade de perfilhos	Exponencial	$Y = 40,129(1 - 0,598^x)$	0,597	5,53
reNDVI*Altura* Densidade de perfilhos	Exponencial	$Y = 7,235 + 29,140(1 - 0,302^x)$	0,618	5,39

⁽¹⁾EPE: erro padrão da estimativa, em $t\ ha^{-1}$

Portz, Amaral e Molin (2012) afirmaram que devido à boa relação entre biomassa e altura de plantas, essa última poderia auxiliar os sensores de dossel em estimarem com maior exatidão a biomassa da cana-de-açúcar. No entanto, a hipótese desses autores não foi confirmada pela presente pesquisa, provavelmente devido à eficiência do sensor em avaliar o dossel como um todo. Assim, como a refletância da cana-de-açúcar é alterada pela altura das

plantas, IAF, perfilhamento e densidade de folhagem (SIMÕES et al., 2005), esta informação por si só já é capaz de estimar a biomassa com eficiência (Figura 2.3). Desse modo, a altura das plantas e a densidade de perfilhos não fornecem nenhuma informação adicional que possa auxiliar para tal estimativa.

Resultados semelhantes foram obtidos por Shaver et al. (2011), avaliando dois sensores de dossel, Crop Circle® (modelo ACS-210) e GreenSeeker®, trabalhando, respectivamente, com aNDVI (âmbar) e vNDVI. Esses autores verificaram que a altura de plantas de milho, assim como as leituras de um clorofilômetro, não auxiliaram os sensores de dossel a prever a produtividade dessa cultura. Esses autores verificaram ainda que, em algumas situações, o teor de N foliar e o teor de N no solo explicaram melhor a produtividade do que as leituras obtidas com o sensor de dossel.

Figura 2.3 – Regressão não-linear entre leitura do sensor de dossel (reNDVI) e biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) nas quatro áreas experimentais (ALV, APA, ARE e AGL)

A integração dos dados de altura e de densidade de perfilhos permitiu melhora na estimativa de biomassa quando utilizados em conjunto. Assim, na ausência dos sensores de dossel, pode-se utilizar de outros equipamentos capazes de estimar a altura e a densidade de

perfilhos, como sensores de ultrassom (PORTZ; AMARAL; MOLIN, 2012; SHIRATSUCHI, 2011) e de presença (CAVALCANTE, 2011). No entanto, ainda assim, as leituras do sensor de dossel apresentaram melhor eficiência em estimar a biomassa acumulada pela cana-de-açúcar.

2.3.3 Relação entre índices de vegetação e produtividade da cana-de-açúcar

A maioria das metodologias propostas na literatura para direcionar a aplicação de N por meio de sensores de dossel levam em conta a estimativa de produtividade de forma espacializada realizada por esse equipamento (GIRMA et al., 2006; GROHS et al., 2009; KITCHEN et al., 2010; LUKINA et al., 2001; RAUN et al., 2005, 2002; SOLIE et al., 2012; TEAL et al., 2006). Sendo assim, é fundamental que os IVs utilizados apresentem relação com a produtividade final de colmos. Um desafio para tal é que as leituras com o sensor precisam ser efetuadas muito antes da colheita da cana, cerca de 200 dias, quando a cultura apresenta de 0,4 a 0,7 m de altura (AMARAL; MOLIN, 2014; PORTZ et al., 2012).

Os resultados de duas áreas experimentais, cultivadas com três variedades de cana cada, mostram que, na maioria das situações, os IVs apresentam alta correlação com a produtividade final de colmos (Tabela 2.6). Contudo, certa variabilidade nessa correlação foi observada entre variedades e locais.

Uma explicação para tal variabilidade seria as diferenças de arquitetura foliar e hábito de crescimento entre as variedades. Galvão et al. (2005) identificaram que é possível diferenciar variedades de cana mediante seu comportamento espectral, possibilitado pelas variações na arquitetura do dossel. Lofton et al. (2012a), estudando a eficiência de um sensor de dossel em prever a produtividade de cana-de-açúcar, verificou que, quando as variedades são separadas em eretas e decumbentes, a relação produtividade *versus* sensor é mais bem ajustada. Ainda, esses autores identificaram que o modelo para prever a produtividade de variedades decumbentes foi mais sujeito a erros. No entanto, verificou-se que para a mesma variedade cultivada em ambas as áreas (SP81-3250), houve alta correlação na área de Piracicaba e baixa na área de Jaú. Desse modo, apenas a variação na arquitetura foliar e hábito de crescimento não é suficiente para explicar a variabilidade na eficiência do sensor em se relacionar com a produtividade de colmos.

Uma variável que também pode influenciar é o porte das plantas no momento da avaliação. Embora as leituras com o sensor de dossel tenham sido obtidas no mesmo dia dentro de cada área, foi verificada grande variação entre o porte das plantas das diferentes

variedades em razão de seu hábito de crescimento distinto em função da afinidade com as condições edafoclimáticas locais.

Ainda, outro fator que pode influenciar essa variação da correlação dos IVs com produtividade é o tempo entre as leituras com o sensor e a colheita da cana. Fatores climáticos podem ter impactado, positiva ou negativamente, de forma específica para cada variedade, a produção de colmos após a leitura com o sensor, o que prejudicou a estimativa feita no momento da avaliação. Simões et al. (2005) apontam que na fase inicial de desenvolvimento da cana, o índice de área foliar é o fator mais determinante no acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, da produtividade. Entretanto, esses autores afirmam também que avaliações do acúmulo de biomassa, realizadas em estádios mais avançados de desenvolvimento da cultura, resultam, invariavelmente, em maiores relações com a produtividade. Resultados semelhantes foram obtidos por Sandhu et al. (2012). Isso comprova a suscetibilidade do sensor a erros na predição da produtividade da cana quando as leituras são realizadas na fase inicial de desenvolvimento da cultura.

Independente da variabilidade entre as áreas e as variedades, quando estas foram analisadas em conjunto, observou-se alta correlação dos IVs com a produtividade de colmos (Tabela 2.6). Essa análise conjunta em termos de produtividade absoluta, dispensando a normalização dos dados, só foi possível porque as variedades possuíam o mesmo potencial produtivo dentro de cada área (Anexo E).

Tabela 2.6 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a produtividade de colmos para as diferentes variedades cultivadas nas duas áreas experimentais (A: SP81-3250; B: IAC87-3396; C: CTC14; D: SP81-3250; E: IACSP95-5000; F: RB85-5536)

	Variedades de cana - Piracicaba				Variedades de cana - Jaú			Geral ⁽²⁾	Duas áreas ⁽³⁾
	A	B	C	Geral ⁽¹⁾	D	E	F		
670 nm	-0,65**	-0,52*	-0,77**	-0,27 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,41 ^{ns}	-0,52*	-0,23 ^{ns}	-0,56**
730 nm	-0,63**	-0,61*	-0,79**	-0,57**	0,06 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	-0,58*	0,00 ^{ns}	-0,35**
780 nm	0,61*	0,57*	0,78**	0,59**	0,30 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,49 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,17 ^{ns}
vNDVI	0,65**	0,54*	0,79**	0,38**	0,50 ^{ns}	0,69**	0,14 ^{ns}	0,61**	0,66**
reNDVI	0,62**	0,60*	0,79**	0,58**	0,48 ^{ns}	0,81**	0,36 ^{ns}	0,62**	0,73**
rrNDVI	0,63**	0,44 ^{ns}	0,75**	0,17 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,52*	-0,12 ^{ns}	0,55**	0,58**
vCI	0,61*	0,44 ^{ns}	0,77**	0,34*	0,51*	0,73**	0,16 ^{ns}	0,62**	0,65**
reCI	0,61*	0,56*	0,78**	0,58**	0,48 ^{ns}	0,84**	0,37 ^{ns}	0,63**	0,73**
rrCI	0,61*	0,40 ^{ns}	0,74**	0,15 ^{ns}	0,51*	0,52*	-0,11 ^{ns}	0,55**	0,58**
vISR	-0,66**	-0,57*	-0,79**	-0,38**	-0,49 ^{ns}	-0,68**	-0,13 ^{ns}	-0,60**	-0,65**
reISR	-0,63**	-0,62*	-0,79**	-0,59**	-0,47 ^{ns}	-0,80**	-0,35 ^{ns}	-0,62**	-0,74**
rrISR	-0,64**	-0,47 ^{ns}	-0,75**	-0,18 ^{ns}	-0,49 ^{ns}	-0,53*	0,12 ^{ns}	-0,55**	-0,57**
vYALSI	0,64**	0,51 ^{ns}	0,79**	0,37*	0,50*	0,71**	0,15 ^{ns}	0,61**	0,66**
reYALSI	0,62**	0,59*	0,79**	0,58**	0,48 ^{ns}	0,82**	0,36 ^{ns}	0,63**	0,73**
rrYALSI	0,62**	0,43 ^{ns}	0,75**	0,17 ^{ns}	0,50*	0,52*	-0,12 ^{ns}	0,55**	0,58**
CCCI	0,40 ^{ns}	0,69**	0,49 ^{ns}	0,71**	0,38 ^{ns}	0,78**	0,55*	0,49**	0,72**
MTCI	0,51*	0,68**	0,67**	0,74**	0,42 ^{ns}	0,83**	0,50*	0,56**	0,77**

Nota: ^{ns} representa correlação não significativa a 5% de probabilidade pelo teste t; * e ** representam, respectivamente, correlação significativa a 5% e a 1% pelo teste t

⁽¹⁾ correlação com as três variedades da área de Piracicaba analisadas juntas

⁽²⁾ correlação com as três variedades da área de Jaú analisadas juntas

⁽³⁾ correlação com as seis variedades das duas áreas analisadas juntas

Tratando-se da sensibilidade dos IVs em prever a produtividade, nota-se que os IVs que utilizam as BEs na região do red edge e do IVP apresentaram melhores resultados (Figura 2.4). Tal comportamento já era esperado devido a maior sensibilidade desses IVs em estimar a variação na biomassa (Figura 2.2). Oliveira et al. (2004) e Sandhu et al. (2012) apontam que a biomassa acumulada ao longo do ciclo da cultura tende a resultar em produção de colmos. Isso comprova a eficiência do sensor em, além de identificar a variabilidade no acúmulo de biomassa, também possibilitar a identificação da variação na produtividade da cana-de-açúcar (o que será discutido nos Capítulos seguintes).

Figura 2.4 – Coeficiente de determinação (R^2), inclinação da reta, raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade ($SEq = \text{inclinação} / \text{RMSE}$) das relações entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a produtividade de colmos da cana-de-açúcar nas duas áreas e seis variedades analisadas em conjunto por meio da normalização dos dados

Fato que chama a atenção é que os IVs CCCI e MTCI, os quais apresentaram desempenho completamente inferior aos demais IVs ao se relacionar com a biomassa da parte aérea (Figura 2.2), obtiveram boa sensibilidade em se relacionar com a produtividade de colmos nessas duas áreas experimentais. Inclusive, o MTCI foi o IV que obteve os melhores resultados. Em estudo avaliando a eficiência de diferentes IVs em diferenciar doses de N e de se correlacionar com a produtividade do milho, Shiratsuchi et al. (2010) verificaram que o MTCI, assim como as configurações de NDVI e CI utilizando as bandas do red edge e IVP, obtiveram melhores resultados do que as configurações que utilizaram as BEs do vermelho ou do âmbar (590 nm). Isso indica que, embora no presente trabalho não tenha sido utilizada a banda espectral na região do âmbar, o red edge tende a mostrar melhores resultados.

Apesar da maior sensibilidade do MTCI, a relação desse IV com a produtividade foi semelhante à do reNDVI, mas apresentando menor dispersão dos dados, o que resultou em uma redução no erro da estimativa de apenas 6,7% ($0,59 \text{ t ha}^{-1}$) (Figuras 2.5 e 2.6).

Figura 2.5 – Regressão linear entre reNDVI e produtividade de colmos da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) nas duas áreas experimentais (Piracicaba e Jaú) e nas três variedades cultivadas em cada uma delas (A: SP81-3250; B: IAC87-3396; C: CTC14; D: SP81-3250; E: IACSP95-5000; F: RB85-5536)

Figura 2.6 – Regressão linear entre MTCI e produtividade de colmos da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) nas duas áreas experimentais (Piracicaba e Jaú) e nas três variedades cultivadas em cada uma delas (A: SP81-3250; B: IAC87-3396; C: CTC14; D: SP81-3250; E: IACSP95-5000; F: RB85-5536)

2.4 Discussão

No presente estudo objetivou-se avaliar diferentes configurações de alguns IVs utilizados pela literatura para direcionar a aplicação de N em taxas variáveis, focando aqueles possíveis de serem obtidos com o uso de sensores de refletância do dossel. Foi possível observar que as refletâncias isoladas de cada BE, mostraram eficiência reduzida em se relacionar com parâmetros biométricos da cana, quando em comparação ao seu uso para o cálculo de IVs. Isso ocorre devido à suscetibilidade das BEs à interferência causada pela variação de alguma propriedade do alvo, como coloração da vegetação, arquitetura foliar e alteração no substrato (solo, palha).

Quanto aos IVs, os melhores resultados foram obtidos, em geral, pelos índices que utilizam as BEs centradas na região do red edge e do IVP. Foi verificada alta correlação desses IVs com o acúmulo de biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar e com a

produtividade de colmos. Em algumas situações, foi possível notar também correlações medianas desses IVs com as leituras do clorofilômetro.

Samborski et al. (2009) afirmam que as leituras obtidas com sensores de dossel estão relacionadas ao IAF da cultura e sua cobertura do solo, o que está interligado ao perfilhamento em trigo e à taxa de crescimento do milho. Ainda, Simões et al. (2005) identificaram que a biomassa da cana-de-açúcar é uma relação entre IAF e densidade de perfilhos. Assim sendo, como as leituras com o sensor de dossel apresentam relação com o IAF e com a densidade de perfilhos da cana-de-açúcar, fica clara sua eficácia em determinar a variabilidade do acúmulo de biomassa pela parte aérea da cana-de-açúcar.

Contudo, alguma ressalva deve ser feita quando em estágios avançados de desenvolvimento da cultura, onde há grande quantidade de camadas de folhas. Essa intensa folhagem pode reduzir a sensibilidade do sensor em diferenciar a variação na refletância do dossel, o que é denominado saturação do sinal do sensor (CIGANDA et al., 2012). Tremblay et al. (2008), analisando dois sensores de dossel nas culturas de milho e trigo (N-Sensor® e GreenSeeker®), verificaram diferença na ocorrência de saturação do sinal entre os equipamentos quando em estágios avançados de desenvolvimento das culturas. No entanto, não foi verificado sinal de saturação das leituras com o sensor estudado (Crop Circle), ao menos enquanto é possível adentrar ao canavial com veículos agrícolas (Figura 2.3). Portanto, o efeito de saturação não é considerado um problema quando utilizado o sensor Crop Circle em cana-de-açúcar. Esses resultados são opostos aos obtidos por Portz et al. (2011), avaliando outro sensor de dossel (N-Sensor®) em cana-de-açúcar, o qual notou indícios de saturação do sinal quando as plantas apresentavam altura de colmos superior a 0,6 m.

Desse modo, o que mais influencia a refletância do dossel da cana-de-açúcar, medida por um sensor óptico em condições de canaviais comerciais, é a variação no acúmulo de biomassa da parte aérea. Ainda, ao contrário do que ocorre em outras culturas (CHEN et al., 2010; POVH et al., 2008; SOLARI et al., 2008), a quantidade de clorofila nas folhas não afetou significativamente as leituras com o sensor. Esses resultados corroboram o que PORTZ (2011) obteve ao avaliar outro sensor (N-Sensor®) em cana-de-açúcar.

No entanto, Chen et al. (2010) alertam que a influência da biomassa nas avaliações com sensores de dossel pode ser prejudicial, pois, em alguns casos, se quer avaliar também a variabilidade da quantidade de clorofila presente no dossel, o que indiretamente indica a nutrição por N. Assim sendo, algumas metodologias de aplicação de N demandam boa relação das leituras do sensor com a biomassa, a fim de estimar a produtividade, mas também exigem

boa capacidade desse equipamento em avaliar a resposta das culturas a doses de N, o que é conseguido a partir da avaliação da clorofila presente no dossel (RAUN et al., 2002).

Uma alternativa para tal seria a utilização de sensores de fluorescência da clorofila, o qual mostra menor interferência do acúmulo de biomassa. Esses sensores são embarcados em maquinário agrícola e podem possibilitar aplicações de N em tempo real, em função da variabilidade no teor de clorofila. Seu funcionamento é baseado no fato de que as plantas precisam liberar a energia absorvida em excesso. Essa liberação de radiação é efetuada pela fluorescência da clorofila, o qual quanto maior a quantidade e atividade das moléculas de clorofila, menor é a liberação de energia (HEEGE, 2013). No entanto, esse tipo de sensor ainda está em desenvolvimento e apresentam algumas limitações quanto à segurança e área mensurada.

É importante mencionar que os resultados utilizando o clorofilômetro foram inconstantes e não mostraram boa relação com os IVs, com os parâmetros biométricos da cana e nem mesmo com o teor de N nas folhas. Contudo, não há informações confiáveis que indiquem a eficiência desta ferramenta no diagnóstico dos níveis de clorofila no tecido vegetal de plantas de cana, assim como há para as culturas de milho, trigo e soja (SAMBORSKI et al., 2009). Logo, são necessários mais estudos sobre a metodologia de utilização do clorofilômetro em cana, assim como é preciso avaliar sua eficiência real em estimar o teor de clorofila nas folhas dessa cultura.

Nesse contexto, uma questão que precisa ser estudada é qual folha deve ser avaliada com o clorofilômetro, pois mesmo para a diagnose foliar ainda há dúvidas quanto a isso (CANTARUTTI et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2007; RAIJ et al., 1997). Na presente pesquisa, melhores resultados com o clorofilômetro foram encontrados com as avaliações realizadas na folha +3, enquanto para o teor de N foliar, melhores resultados apareceram ao utilizar a folha +1. Entretanto, independente disso, as leituras do medidor de clorofila, assim como o teor de N foliar, não foram parâmetros confiáveis de comparação para validar a eficácia dos sensores de dossel.

O IV MTCI apresentou as maiores correlações com a produtividade da cana. Entretanto, julga-se que tais resultados ocorreram devido ao intenso efeito dos tratamentos implantados nessas áreas (Anexo E), relativos a diferentes doses de N por vários ciclos da cultura e escolha rigorosa da área de estudo, buscando potencializar o efeito do N. Isso possibilitou alteração significativa, não só na biomassa, mas também no teor de clorofila no dossel das plantas, o que passou a influenciar intensamente a refletância do dossel. Com isso,

o MTCI, o qual tem como característica fundamental utilizar as três BEs com a finalidade de captar a variação na biomassa e no teor de clorofila (VIÑA et al., 2011), mostrou melhores resultados.

Entretanto, é preciso mencionar que essa intensa resposta ao N é difícil de ocorrer em condições de canaviais comerciais (*como será apresentado e discutido no capítulo seguinte*). Desse modo, vê-se com certa ressalva a utilização do MTCI para prever a produtividade, uma vez que sua eficiência em se relacionar com os parâmetros biométricos da cultura foi extremamente limitada.

Logo, julga-se adequado que para avaliações de canaviais almejando a aplicação de N em taxas variáveis, seja prudente utilizar os IVs que apresentaram os melhores resultados, tanto para prever a produtividade, quanto para se relacionar com os parâmetros biométricos da cultura (acúmulo de biomassa, densidade de perfilhos e altura de plantas). Nesse sentido, se destacaram de forma semelhante os IVs reNDVI, reYALSI e reCI. Assim, utilizando qualquer um desses IVs, é possível obter boas relações com a variação de biomassa e boa efetividade em prever a produtividade.

Dessa forma, qualquer que seja a metodologia utilizada para direcionar a aplicação de N, seja por meio de estimativa de produtividade (RAUN et al., 2005), seja por resposta a doses de N (SHAVER et al., 2011), ou ainda, pela estimativa de biomassa e extração de N pela cultura (PORTZ, 2011), esses índices tendem a apresentar resultados satisfatórios e consistentes.

Ainda, ficou claro que mesmo os IVs apresentando boa eficiência em se relacionar com a produtividade final de colmos, alguns fatores tendem a interferir nessa relação. Assim, mais estudos precisam ser conduzidos para avaliar a influência da variedade, seu hábito de crescimento e arquitetura foliar, fatores de solo e características do sistema produtivo que possam interferir na eficácia dos IVs em estimar, tanto a biomassa quanto a produtividade da cana-de-açúcar.

Foi possível observar também que, ao contrário do que vem apontando a literatura (FREEMAN et al., 2007; PORTZ; AMARAL; MOLIN, 2012; SHIRATSUCHI, 2011), a altura das plantas parece não representar ganho de informação na predição do acúmulo de biomassa pela cana-de-açúcar por meio de sensores de dossel. Esse fato se deve à leitura com esse tipo de equipamento estar altamente relacionada com a biomassa e, conseqüentemente, com altura e densidade de plantas de cana-de-açúcar. Entretanto, mais estudos precisam ser conduzidos para comprovar essa tese, uma vez que a avaliação da altura de plantas e da biomassa foram realizadas em parcelas virtuais alocadas no campo, o que pode limitar a

eficácia da integração de dados. A coleta desse tipo de informação vem sendo proposta através de sensores de ultrassom (PORTZ; AMARAL; MOLIN, 2012; SHIRATSUCHI, 2011), os quais coletam dados de altura de plantas em alta frequência, possibilitando maior detalhamento. Além disso, é preciso estudar também a integração de outros parâmetros de planta e solo (SHAVER et al., 2011), assim como equipamentos que façam essas avaliações de forma mais densa e precisa.

2.5 Conclusões

A variação no acúmulo de biomassa pela parte aérea da cana-de-açúcar é o fator que mais influencia as leituras de refletância obtidas por sensores de dossel, independentemente do índice de vegetação utilizado. Isso ocorre porque o sensor integra, em um mesmo sinal, informações de perfilhamento da cana, índice de área foliar e altura de plantas. Por esse mesmo motivo, a altura e a densidade de perfilhos não são informações capazes de incrementar a eficiência do sensor de dossel em predizer a biomassa da cultura.

Os índices de vegetação que utilizam as bandas espectrais do red edge (730 nm) e do infravermelho próximo (780 nm) devem ser preferidos na avaliação da cana-de-açúcar. Eles apresentam boa eficiência em estimar a produtividade e em se relacionar com a variabilidade no vigor da cultura. Ainda, tendem a apresentar relação com a variação no teor de clorofila presente no dossel, quando esta for relevante.

Referências

AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 1, p. 1633–1642, 2011.

_____. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, n. 1, p. 273–280, 2014.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 158–167, 2001.

BARNES, E.M.; CLARKE, T.R.; RICHARDS, S.E.; COLAIZZI, P.D.; HABERLAND, J.; KOSTRZEWSKI, M.; WALLER, P.; CHOI, C.; RILEY, E.; THOMPSON, T.; LASCANO, R.J.; LI, H.; MORAN, M.S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington, EUA.

Proceedings... Bloomington, EUA: ICPA, 2000. p. 1-15.

BERNTSEN, J.; THOMSEN, A.; SCHELDE, K.; HANSEN, O.M.; KNUDSEN, L.; BROGE, N.; HOUGAARD, H.; HØRFARTER, R. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, n. 2, p. 65–83, 2006.

BRITO, G.G.; SOFIATTI, V.; BRANDÃO, Z.N.; SILVA, V.B.; SILVA, F.M.; SILVA, D.A. Non-destructive analysis of photosynthetic pigments in cotton plants. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 33, n. 4, p. 671–678, 2011.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. p. 355-412.

CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F.; PRIETO, H.E.; NOVAIS, R.F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 769-850.

CAVALCANTE, D.S. **Estudo com sensores para a mensuração de falhas nas fileiras cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*)**. 2011. 74 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CHEN, P.; HABOUDANE, D.; TREMBLAY, N.; WANG, J.; VIGNEAULT, P.; LI, B. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 9, p. 1987–1997, 2010.

CIGANDA, V.S.; GITELSON, A.A.; SCHEPERS, J. How deep does a remote sensor sense? Expression of chlorophyll content in a maize canopy. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 126, p. 240–247, 2012.

DASH, J.; CURRAN, P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 25, p. 5403–5413, 2004.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

ERDLER, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianapolis. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2012. 1 CD-ROM.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FREEMAN, K.W.; GIRMA, K.; ARNALL, D.B.; MULLEN, R.W.; MARTIN, K.L.; TEAL, R.K.; RAUN, W.R. By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 2, p. 530–536, 2007.

GALVAO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties of southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, p. 523–534, 2005.

GIRMA, K.; MARTIN, K.L.; ANDERSON, R.H.; ARNALL, D.B.; BRIXEY, K.D.; CASILLAS, M.A.; CHUNG, B.; DOBEY, B.C.; KAMENIDOU, S.K.; KARIUKI, S.K.; KATSALIROU, E.E.; MORRIS, J.C.; MOSS, J.Q.; ROHLA, C.T.; SUDBURY, B.J.; TUBANA, B.S.; RAUN, W.R. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, n. 5, p. 873–897, 2006.

GITELSON, A.A.; VIÑA, A.; RUNDQUIST, D.C.; CIGANDA, V.; ARKEBAUER, T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 32, p. 1-4, 2005.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 101–112, 2009.

HEEGE, H.J. **Precision in crop farming**. London: Springer, 2013. 356 p.

HOLLAND, K.H.; SCHEPERS, J.S. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 5, p. 1415–1424, 2010.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination: impact of seed rate, variety and growth stage. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2009, Monticello. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2009. 1 CD-ROM.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; SCHARF, P.C.; PALM, H.L.; ROBERTS, D.F.; VORIES, E.D. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 1, p. 71–84, 2010.

LOFTON, J.; TUBANA, B.S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H. Predicting sugarcane response to nitrogen using a canopy reflectance-based response index value. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 1, p. 106–113, 2012a.

LOFTON, J.; TUBANA, B.S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H.; DALEN, M. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. **Sensors**, New York, v. 12, p. 7529–7547, 2012b.

LUKINA, E.; FREEMAN, K.; WYNN, K.; THOMASON, W.; MULLEN, R.; STONE, M.; SOLIE, J.; KLATT, A.; JOHNSON, G.; ELLIOTT, R.; RAUN, W. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 6, p. 885–898, 2001.

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.

OLIVEIRA, M.W. de; FREIRE, F.M.; MACEDO, G.A.R.; FERREIRA, J.J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30–43, 2007.

OLIVEIRA, R.A. de; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; SILVA, D.K.T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 5, p. 87–94, 2004.

PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

PORTZ, G.; AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Measuring sugarcane height in complement to biomass sensor for nitrogen management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianapolis. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2012. 1 CD-ROM.

PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 33–44, 2011.

PORTZ, G.; AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Optimum sugarcane growth stage for canopy reflectance sensor to predict biomass and nitrogen uptake. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianápolis. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2012. CD-ROM.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1075–1083, 2008.

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 110, p. 12-17, 2005.

- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. 279 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; THOMASON, W.E.; LUKINA, E.V. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 815–820, 2002.
- RAUN, W.R.; SOLIE, J.; STONE, M.; MARTIN, K.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.; JOHNSON, G. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 19/20, p. 2759–2781, 2005.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1974, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1974. v. 1, p. 309-317.
- SAMBORSKI, S.M.; TREMBLAY, N.; FALLON, E. strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 4, p. 800–816, 2009.
- SANDHU, H.S.; GILBERT, R.A.; MCCRAY, J.M.; PERDOMO, R.; EILAND, B.; POWELL, G.; MONTES, G. Relationships among leaf area index, visual growth rating, and sugarcane yield. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, Belle Glade, v. 32, p. 1–14, 2012.
- SHAVER, T.M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 12, p. 892–904, 2011.
- SHIRATSUCHI, L.S. **Integration of plant-based canopy sensors for site-specific nitrogen management**. 2011. 222 p. Thesis (PhD) – Graduate College at the University of Nebraska, Lincoln, 2011.
- SHIRATSUCHI, L.S.; FERGUSON, R.B.; SHANAHAN, J.F.; ADAMCHUK, V.I.; SLATER, G.P. Comparison of spectral indices derived from active crop canopy sensors for assessing nitrogen and water status. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2010. 1 CD-ROM.
- SIMÕES, M.S.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Growth indices and productivity in sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 1, p. 23–30, 2005.
- SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 571–579, 2008.

SOLIE, J.B.; MONROE, A.D.; RAUN, W.R.; STONE, M.L. Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 2, p. 378–387, 2012.

TAUBINGER, L.; AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Vegetation indices from active crop canopy sensor and their potential interference factors on sugarcane. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianapolis. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2012. 1 CD-ROM.

TEAL, R.K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, W.R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 6, p. 1488–1494, 2006.

TREMBLAY, N.; WANG, Z.; MA, B.-L.; BELEC, C.; VIGNEAULT, P. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 2, p. 145–161, 2008.

VARVEL, G.E.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1233–1239, 1997.

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 3, p. 701–706, 2007.

VIÑA, A.; GITELSON, A.A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 32, p 1-4, 2005.

VIÑA, A.; GITELSON, A.A.; NGUY-ROBERTSON, A.L.; PENG, Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 12, p. 3468–3478, 2011.

WRIGHT, D.; RASMUSSEN, V.; RAMSEY, R.; BAKER, D.; ELLSWORTH, J. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience & Remote Sensing**, Columbia, v. 41, n. 4, p. 287–300, 2004.

3 RESPOSTA DE CANAVIAIS COMERCIAIS À APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO E EFICIÊNCIA DO SENSOR DE DOSSEL EM ESTIMAR A PRODUTIVIDADE

Resumo

A fertilização com nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar é um desafio devido à resposta variável dessa cultura ao N. Dessa forma, são demandadas maneiras de avaliar essa resposta durante o ciclo da cultura. Dentre elas, a estimativa da variabilidade na produção é uma alternativa promissora, inclusive para direcionar a aplicação de N. Com essa finalidade, sensores de refletância do dossel vêm sendo estudados. O presente trabalho apresenta os seguintes objetivos: 1) avaliar a resposta de canaviais comerciais à aplicação de N, sendo esta resposta mensurada por diferentes meios; 2) verificar a relação da produtividade da cana com as mensurações obtidas por um sensor de dossel, um clorofilômetro e análises foliares; 3) avaliar a eficácia de um sensor de dossel em estimar a produção da cana-de-açúcar. Para tanto, dez experimentos em parcelas foram instalados em canaviais comerciais na região de Ribeirão Preto, SP. Os tratamentos consistiram de doses crescentes de N aplicadas logo após o corte da cana, no delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. Os experimentos foram avaliados quando a cultura apresentava em torno de 0,5 m de altura. A cana-de-açúcar apresentou resposta variável e generalizadamente baixa ao N aplicado. O sensor de dossel foi eficiente em diferenciar as doses de N e em se relacionar com a produtividade de colmos. As análises foliares e o clorofilômetro apresentaram eficiência semelhante em diferenciar os tratamentos, mas capacidade inferior em estimar a produção da cultura. Por meio da normalização dos dados, foi possível prever a produtividade da cana-de-açúcar a partir de leituras com um sensor de dossel.

Palavras-chave: Fertilização nitrogenada; Adubação; Estimativa de produtividade; Análise foliar; Medidor portátil de clorofila

Abstract

The nitrogen fertilization (N) in sugarcane is a challenge due to the variable N response of this crop. Thus, means to evaluate this response during the crop cycle are demanded. The estimation of the yield variability is a promising alternative which may guide the variable-rate N application. In this context, canopy reflectance sensors have been studied. This paper had the following goals: 1) evaluate the response of sugarcane-producing fields to N application using different tools; 2) verify the relationship of the sugarcane yield with canopy sensor and chlorophyll meter readings and leaf analyzes; and 3) test the canopy sensor effectiveness to estimate the sugarcane yield. To this end, ten plot-experiments were performed in sugarcane-producing fields in Ribeirão Preto, SP, Brazil. The treatments comprised increasing N fertilization rates applied immediately after harvest. The experimental design was a randomized complete block with four replications. The evaluations were performed when the crop stem height was about 0.5 m. The sugarcane N response was variable and generally low. The canopy sensor was efficient in differentiating the N rates as well as to correlate its readings with the sugarcane yield. Chlorophyll meter readings and leaf analyzes showed similar efficiency in treatments differentiation, but they showed less ability to estimate the yield. Through the data normalization, it was possible to predict the sugarcane yield by canopy sensor readings.

Keywords: Nitrogen fertilization; Fertilization; Yield estimation; Leaf analyzes; Portable chlorophyll meter

3.1 Introdução

A fertilização com nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar é um desafio aos produtores, consultores e pesquisadores dedicados ao assunto, uma vez que nas condições tropicais e subtropicais, devido à sua complexidade e dinâmica, não há um método eficiente que mensure a quantidade de N disponível no solo (CANTARELLA, 2007). Uma alternativa para tal seria o uso de análises foliares, assim como é feito em laranjais e cafezais (RAIJ et al., 1997), mas essa técnica ainda apresenta resultados inconsistentes em cana-de-açúcar (ESPIRONELO et al., 1986; FRANCO et al., 2010). Assim, as doses de N são estabelecidas por meio de curvas de calibração (CANTARUTTI et al., 2007), obtidas a partir de experimentação realizada por instituições de pesquisa, ou mesmo pelos próprios produtores. Seguindo essa metodologia, a dosagem recomendada para cana-planta está entre 40 e 60 kg ha⁻¹ de N, enquanto que para cana-soca é de 80 a 120 kg ha⁻¹ de N (RAIJ; CANTARELLA, 1997).

Entretanto, como as curvas de calibração são geralmente obtidas em condições experimentais (condições controladas), com repetição dos tratamentos por vários anos (comumente por todo o ciclo semiperene de um canavial), é esperada, em condições de canaviais comerciais, resposta diferenciada da cana-de-açúcar a fertilização com N, embora poucos resultados sejam apresentados na literatura científica. Prado e Pancelli (2008) verificaram que no primeiro ano de aplicação de doses de N não houve efeito na produtividade da cana-de-açúcar, mas no segundo ano esse efeito positivo se manifestou. Resultados de ausência de resposta ao N também foram encontrados por Urquiaga et al. (1998). Isso pode ocorrer por diversos fatores, como pelo aporte anual de massiva quantidade de adubos químicos e orgânicos (vinhaça e torta de filtro), os quais podem atuar como fonte de N às safras seguintes. Além disso, a cana-de-açúcar possui notória habilidade em absorver N em profundidade, devido ao seu sistema radicular vigoroso, e de formar associações endofíticas com bactérias diazotróficas capazes de fixar o N atmosférico (CANTARELLA et al., 2007). Assim sendo, frequentemente a fertilização nitrogenada resulta em baixa eficiência de utilização do N proveniente do fertilizante (CANTARELLA et al., 2007; FRANCO et al., 2011).

Uma alternativa para possibilitar maior flexibilização da fertilização, em contraste às doses limitadas pelos experimentos de calibração, é a aplicação de N de acordo com a extração e exportação pela cultura, calculada a partir da produtividade estimada. Vários métodos e modelos de simulação vêm sendo propostos com diferentes objetivos, como avaliar os riscos de produção considerando séries climáticas históricas para uma região, otimização de data de plantio, densidade de plantio, espaçamento, escolha de variedade e aplicação de fertilizantes para diferentes tipos de solo (BOOTE et al., 1996; SUGAWARA, 2010). No entanto, essa abordagem não tem como objetivo permitir intervenções de forma localizada ao longo dos canaviais, já que não leva em conta a variabilidade no desenvolvimento da cana-de-açúcar dentro do mesmo talhão.

Tal variabilidade tende a ser expressiva em canaviais em razão de seu comportamento semiperene, somando todos os problemas ocorridos ao longo dos ciclos da cultura. Vitti et al. (2007) alertam que, com o passar dos anos, a produtividade tende a ser reduzida gradualmente, uma vez que, além do baixo vigor da soqueira, surgem ou se agravam problemas relacionados ao nível nutricional, compactação do solo, pragas e doenças. Com base nisso, diversos estudos vêm analisando a relação da produtividade com a biomassa da cultura avaliada por meio do sensoriamento remoto (ABDEL-RAHMAN; AHMED, 2008; BÉGUÉ et al., 2010). Essa técnica busca possibilitar estimativas espacializadas da produção, permitindo, assim, a gestão localizada das intervenções.

Nesse contexto, o uso de sensores de refletância do dossel pode ser uma alternativa ao setor sucroenergético por apresentarem a possibilidade de serem embarcados a maquinário agrícola. Isso permite a coleta de dados de refletância da cultura de forma densa e no momento em que o usuário considerar adequado, possibilitando a aplicação de N em taxas variáveis por meio de uma estimativa de produtividade da cultura. Esta abordagem tem sido bastante estudada e eficientemente utilizada nas culturas de milho (KITCHEN et al., 2010; SCHMIDT et al., 2011; SOLARI et al., 2008; TEAL et al., 2006), trigo (BERNTSEN et al., 2006; GIRMA et al., 2006; GROHS et al., 2009; LUKINA et al., 2001; RAUN et al., 2005, 2001) e arroz (XUE et al., 2013).

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a resposta de canaviais comerciais a fertilização com N, comparando diferentes métodos (análise foliar e a avaliação do teor de clorofila a partir de medidor portátil). Além disso, busca-se avaliar a eficiência desses métodos, em especial a do sensor de dossel, em prever a produtividade da cana-de-

açúcar, a qual pode servir de informação base para estratégias de aplicação de N em taxas variáveis.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Áreas experimentais

Foram conduzidos dez experimentos em canaviais comerciais em usina de açúcar e etanol na região de Ribeirão Preto, SP, com sede situada a 21°21'34" Sul e 48°03'56" Oeste, abrangendo diferentes condições de cultivo em um raio de 50 km de distância (Tabela 3.1). Os tratamentos consistiram de doses de N, aplicadas na forma de nitrato de amônio (31:00:00), logo após o corte da cana-de-açúcar, de forma manual, sobre a palhada remanescente da colheita. Nas áreas PD, AS, CA, CB, NJ e RO, os tratamentos consistiram de quatro doses de N (50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N), além de um tratamento controle sem aplicação de N; nas áreas AP e VE, as doses foram alteradas para 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, também totalizando cinco tratamentos; já para as áreas CC e SI, a dose de 240 kg ha⁻¹ de N foi excluída, passando a contabilizar apenas quatro tratamentos.

Cada parcela experimental era constituída por seis fileiras de cana-de-açúcar, espaçadas 1,5 m, com 15,0 m de comprimento, utilizando-se como área útil os 10,0 m centrais das quatro fileiras internas, instaladas no delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. Realizou-se amostragem de solo composta por dez sub-amostras retiradas de 0 a 0,2 m de profundidade (Tabela 3.2).

Tabela 3.1 – Características das áreas experimentais, datas de colheita e avaliações

Área	Variedade	Solo ⁽¹⁾	Ambiente de Produção ⁽²⁾	Época ⁽³⁾	Corte ⁽⁴⁾	Colheita anterior	Avaliações (DAC) ⁽⁵⁾	Colheita
PA	RB855453	LV	A	Meio	Segundo	Maio 2009	116	Jun. 2010
AS	RB855453	LV	A	Meio	Quarto	Jun. 2009	109	Jun. 2010
CA	CTC2	RQ	E	Final	Segundo	Out. 2009	91	Out. 2010
CB	CTC2	LVA	D	Final	Terceiro	Out. 2009	84	Out. 2010
NJ	RB855156	LV	A	Meio	Terceiro	Maio 2010	183	Jun. 2011
RO	RB855453	PV	A	Meio	Terceiro	Jul. 2010	140	Jun. 2011
AP	CTC2	LVA	C	Final	Quarto	Set. 2011	88	Ago. 2012
VE	RB867515	LV	B	Final	Quarto	Out. 2011	80	Jul. 2012
CC	CTC2	RQ	E	Final	Segundo	Set. 2012	85	Set. 2013
SI	CTC2	LVA	D	Final	Terceiro	Nov. 2012	62	Set. 2013

⁽¹⁾ Classificação dos solos de acordo com EMBRAPA (2006)

⁽²⁾ Classificação dos Ambientes de Produção para a cana-de-açúcar de acordo com Prado (2005)

⁽³⁾ Época de corte da cana-de-açúcar, sendo que colheita de meio de safra compreende os meses de maio a agosto e colheita de final de safra entre setembro e dezembro

⁽⁴⁾ Número de cortes (colheitas) realizados, contando com a colheita dos experimentos

⁽⁵⁾ Número de dias após o corte em que foram realizadas as avaliações

Antes da implantação dos experimentos, as áreas vinham sendo conduzidas de forma convencional pela usina, com aplicação de adubo formulado e/ou aplicação de vinhaça e composto orgânico enriquecido (torta de filtro). Apenas durante a condução dos experimentos é que foi alterado o manejo, cessando a aplicação de qualquer produto com propriedades fertilizante que pudesse introduzir N no solo. Dessa forma, o fornecimento de potássio foi realizado por meio da aplicação de cloreto de potássio, com eventual aplicação de calcário e gesso, seguindo a necessidade de cada área. Os demais tratamentos culturais seguiram o padrão adotado pela usina.

Tabela 3.2 – Resultados das análises de fertilidade do solo nas áreas experimentais

Área	M.O. g dm ⁻³	P _{res} mg dm ⁻³	K ----- mmol _c dm ⁻³ -----	Ca	Mg	CTC	m%	V%
PA	35,6	6,0	1,4	41,9	15,8	89,9	0,2	65,7
AS	34,8	25,9	4,9	36,2	9,3	102,6	0,6	49,1
CA	17,2	6,4	0,6	17,1	6,3	33,7	0,4	71,2
CB	22,6	9,9	0,4	25,2	10,4	49,3	0,3	73,1
NJ	34,1	23,1	0,8	18,3	6,9	60,2	5,8	43,1
RO	26,1	9,1	0,6	18,7	6,5	53,6	6,9	48,2
AP	16,9	21,7	1,9	25,0	10,0	56,9	0,0	64,8
VE	24,0	12,0	1,1	26,0	9,0	68,1	0,0	53,0
CC	- ⁽¹⁾	25,0	0,7	22,0	7,0	46,1	0,0	64,0
SI	-	9,0	1,6	29,0	10,0	93,3	0,0	44,0

⁽¹⁾ Análise não realizada

3.2.2 Sensores de dossel

Foram utilizados dois modelos do sensor de dossel Crop Circle (*Holland Scientific, Lincoln, NE, EUA*). O modelo ACS-210 foi utilizado nos primeiros dois anos da pesquisa, 2009 e 2010, compreendendo as áreas PD, AS, CA, CB, NJ e RO; o modelo ACS-430 foi usado nos dois últimos anos, 2011 e 2012, nas áreas AP, VE, CC e SI.

O sensor ACS-210 possui sua própria fonte de luz modulada, com frequência de emissão de 40.000 Hz, emitida a partir de um único LED (*light emitting diode*) que simultaneamente emite energia eletromagnética na região do visível (âmbar, 590 nm) e na região do infravermelho próximo (IVP, 880 nm). A refletância do alvo é captada por dois fotodetectores (400 nm a 680 nm e 800 nm a 1100 nm), o que elimina a interferência da luminosidade do ambiente (SOLARI, 2006) e possibilita o cálculo do índice de vegetação da diferença normalizada pelo âmbar (aNDVI, Eq. 3.1); seu campo de visão é de 32 por 6 graus, coletando dados cinematicamente em apenas uma fileira de plantas por vez, sendo sua distância ideal em relação ao alvo (dossel da cultura) entre 0,8 e 1,2 m.

O sensor ACS-430 possui funcionamento e especificações semelhantes ao ACS-210, alterando apenas os comprimentos de onda do espectro utilizados. Esse sensor trabalha com três bandas espectrais distintas, na região do vermelho (670 nm), na região de transição entre vermelho e infravermelho próximo (*red edge*, 730 nm) e na região do infravermelho próximo (IVP, 780 nm). Com essas refletâncias é possível calcular grande número de índices de vegetação, mas baseado nos resultados do Capítulo 1, optou-se pelo índice de vegetação da diferença normalizada pelo *red edge* (reNDVI), nomeado a partir daqui de NDRE (Eq. 3.2).

$$aNDVI = \frac{(IVP - \hat{a}mbar)}{(IVP + \hat{a}mbar)} \quad (3.1)$$

onde: $aNDVI$ - é o índice de vegetação da diferença normalizada pelo âmba; IVP - é a refletância na banda do infravermelho próximo (880 nm); $\hat{a}mbar$ - é a refletância no visível (590 nm).

$$NDRE = \frac{(IVP - RedEdge)}{(IVP + RedEdge)} \quad (3.2)$$

onde: $NDRE$ - é índice de vegetação da diferença normalizada pelo red edge; IVP - é a refletância na banda do IVP (780 nm); $RedEdge$ - é a refletância na região do red edge (730 nm).

O modelo ACS-210 deixou de ser fabricado, dando lugar ao ACS-430. Por essa razão, optou-se pela continuação da pesquisa com o equipamento que estará disponível no mercado nos próximos anos (ACS-430). Assim, foram coletadas várias leituras com esses dois sensores em talhões e parcelas experimentais em diferentes condições (*dados não apresentados*) para verificar a similaridade entre os equipamentos, especificamente na avaliação da cana-de-açúcar. Com essa comparação verificou-se que existe alta relação entre as leituras dos diferentes sensores (Figura 3.1). Esse resultado possibilitou a conversão dos dados de $aNDVI$, obtidos com o ACS-210, para $NDRE$, aumentando a quantidade de dados disponível e permitindo maior robustez nas análises realizadas. Desse modo, os dados são considerados a partir daqui como leituras do sensor de dossel CropCircle ACS-430 na forma do índice $NDRE$.

Figura 3.1 – Relação entre o índice de vegetação aNDVI obtido pelo sensor de dossel CropCircle ACS-210 e o índice de vegetação NDRE obtido pelo sensor de dossel CropCircle ACS-430, mostrando a equação utilizada para converter os dados de aNDVI para NDRE ($p < 0,001$), o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa (EPE)

3.2.3 Avaliações

As avaliações com o sensor de dossel foram realizadas quando a cultura apresentava altura de colmos média entre 0,4 e 0,6 m, medida a partir da inserção da primeira folha com aurícula visível (folha +1), seguindo recomendações de Amaral e Molin (2014) e Portz et al. (2012). O sensor foi conduzido manualmente nas áreas PD, AS, CA e CB (Figura 3.2a), e acoplado à barra de aplicação da máquina Uniport 3000 NPK (Máquinas Agrícolas Jacto S/A, Pompéia, SP, Brasil), nas demais áreas (Figura 3.2b), apresentado velocidade de deslocamento em torno de $0,75 \text{ m s}^{-1}$ ($2,7 \text{ km h}^{-1}$). Independente da forma de condução do sensor, cerca de 400 leituras foram coletadas por parcela experimental, sendo que a média desses dados representou o valor da respectiva parcela.

Figura 3.2 – Sensor de dossel conduzido de forma manual (a) e acoplado à barra de aplicação da máquina Uniport 3000 NPK (b)

Imediatamente após as avaliações com o sensor de dossel, procedeu-se a coleta de dados com um medidor portátil de clorofila (clorofilômetro), modelo SPAD-502 (*Konica Minolta Sensing, Inc.*, Sakai, Osaka, Japão). Foram coletadas 30 leituras em 30 folhas diferentes, amostrando a porção central de um dos limbos da folha +1 (primeira folha completamente expandida). A média dessas leituras representou o valor SPAD de cada parcela.

Estas mesmas 30 folhas tiveram o terço médio de seu limbo foliar separado da nervura central (RAIJ et al., 1997), os quais foram secos em estufa com circulação forçada de ar por 72 horas a 65°C, trituradas e enviadas para laboratório para determinação do teor de N total. A metodologia utilizada para tal foi a do semi-micro Kjeldahl, por meio de digestão sulfúrica, destilação e titulação com ácido sulfúrico diluído (SARRUGE; HAAG, 1974).

Ao final do ciclo da cultura, procedeu-se a colheita da cana-crua, com pesagem individualizada dos colmos produzidos dentro da área útil de cada parcela. Para tanto, utilizou-se colhedora convencional com balança embarcada em caminhão para a colheita das áreas PD, AS, CA, CB, NJ, RO e VE; já para as áreas AP, CC e SI, a colheita foi realizada de forma manual, com pesagem através de célula de carga instalada em carregadora de cana modificada.

3.2.4 Análise de dados

Os resultados de produtividade de colmos, sensor de dossel (NDRE), clorofilômetro e N foliar de cada área foram submetidos separadamente à análise de variância (ANOVA) e análise de regressão linear, buscando identificar a resposta da cana-de-açúcar às doses de N ($p < 0,05$). Adicionalmente, buscando inferir se o N influenciou de alguma forma a cultura, mesmo que apresentando grande variação de resposta entre os tratamentos, realizou-se a análise por contrastes ortogonais ($p < 0,05$), confrontando a média dos tratamentos que receberam N e a média do tratamento controle (sem aplicação de N). Essas análises foram realizadas com o auxílio do software estatístico SISVAR (Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil - FERREIRA, 2011).

Para avaliar a correlação existente entre as variáveis, procederam-se análises de correlação linear de *Pearson*, tendo sua significância avaliada pelo *teste t*. Para tanto, foi utilizado o suplemento para análises estatísticas para Microsoft Excel, denominado Action (EstatCamp, São Carlos, SP, Brasil).

Para possibilitar a análise conjunta da relação entre o sensor de dossel e a produtividade da cana, realizou-se a normalização dos dados através do cálculo do índice de suficiência (SI - PETERSON et al., 1993). Para tanto, os valores médios de produtividade e do sensor em cada tratamento, foram normalizados pelo valor obtido no tratamento onde foi empregada a maior dose de N (Eq. 2.3).

$$SI = \frac{V_{doses}}{V_{maior}} \quad (2.3)$$

onde: *SI* – indica o índice de suficiência; *Vdoses* – indica o valor de produtividade de colmos ou da leitura do sensor de dossel obtida nos tratamentos; *Vmaior* – indica o valor de produtividade de colmos ou da leitura do sensor de dossel obtida no tratamento com a aplicação da maior dose de N em cada área.

A relação entre o SI da produtividade e o SI das leituras com o sensor de dossel foram avaliadas por meio de regressões. Os modelos testados foram linear, exponencial, logarítmico e sigmoide. O modelo escolhido foi aquele que obteve maior coeficiente de determinação ajustado (R^2) e menor erro padrão da estimativa (EPE). Todos os gráficos e regressões foram efetuados no software SigmaPlot® (SPSS Inc., Chicago, IL, EUA).

3.3 Resultados

3.3.1 Resposta da cana-de-açúcar a aplicação de nitrogênio

A cana-de-açúcar apresentou resposta variável à aplicação de N (Tabela 3.3). A análise de variância não identificou diferença entre os tratamentos. No entanto, quando se comparou os resultados de produtividade através de contrastes ortogonais, verificou-se resposta em metade das áreas experimentais. Isso mostra que em quatro áreas (PA, NJ, RO e SI) o N aumentou a produtividade da cana, mesmo que a variabilidade de resposta entre os tratamentos tenha sido grande. O aumento de produção foi de 13,8 t ha⁻¹ de colmos, assumindo a média dos tratamentos que receberam N em relação ao tratamento controle nas áreas que mostraram efeito positivo do N. Dessa forma, a fertilização nitrogenada possibilitou um incremento médio de produtividade da ordem de 16,3%.

Por outro lado, a aplicação de N prejudicou a produtividade na área VE, resultando em uma redução média de 6,5 t ha⁻¹, ou seja, rendimento 9,7% inferior. Esse efeito deletério da fertilização pode ser atribuído à grande disponibilidade de N no solo, causando toxidez, ou então, atribuído a presença de fatores limitantes ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, o que a fez gastar muita energia para absorver todo N disponível no solo. Portanto, a fertilização nitrogenada provavelmente promoveu crescimento vegetativo excessivo em detrimento da produção de colmos. Thorburn et al. (2005) apontam que além da queda na produtividade, a aplicação excessiva de N também pode acarretar redução no acúmulo de açúcar e maturação tardia.

A variabilidade na resposta da cana-de-açúcar ao N foi encontrada também por outros autores (CANTARELLA et al., 2007; FRANCO et al., 2011; LOFTON, et al., 2012b; ROSSETO et al., 2010) Esse comportamento é frequentemente atribuído à disponibilização de N por outras fontes, como mineralização da matéria orgânica e fixação por microrganismos no solo (BODDEY et al., 2003; FRANCO et al., 2011; SCHULTZ et al., 2012). Ademais, essa ausência de resposta pode estar associada ao profundo e robusto sistema radicular da cana, ou ainda ser causada pela presença de fatores limitantes ao desenvolvimento da cultura, assim como proposto pela “Lei do Mínimo” de Liebig.

Nesse sentido, observa-se que os teores de P no solo estão generalizadamente baixos (Tabela 3.2). Ainda, mesmo com áreas recebendo vinhaça nos anos anteriores, os teores de K no solo também estão baixos, com exceção da área AS. Outra informação preocupante é a

saturação por bases, abaixo da recomendada em 60% das áreas, embora os níveis de Ca e Mg estejam satisfatórios (RAIJ et al., 1997). Assim, esses desequilíbrios nutricionais frequentes em canaviais comerciais podem limitar a resposta da cana ao N.

Contudo, mesmo apresentando baixa resposta ao N aplicado, a dispensa da fertilização com esse nutriente precisa ser analisada com cautela, já que Vitti et al. (2007) afirmam que, se não for feita tal aplicação em determinado ano, a produtividade naquela safra pode não ser afetada de forma marcante, mas o efeito negativo tende a ocorrer nos anos seguintes, inclusive com reflexo na longevidade do canavial. Esse comportamento foi demonstrado por Prado e Pancelli (2008), ao conduzirem experimentos com doses de N em área de cana-crua e identificar que a cultura não respondeu a esse nutriente na safra em que este foi aplicado, mas veio a responder na safra seguinte.

Oliveira et al. (2007) afirmam que em cerca de 90% das áreas de cana-soca é observada resposta à aplicação de N. Corroborando essa afirmação, Rosseto et al. (2010) identificaram que dentre 15 experimentos, 14 deles apresentaram resposta significativa ao N, representando incremento médio na produção da ordem de 9 t ha⁻¹. Citam ainda que apesar da variabilidade na resposta da cana-de-açúcar, a fertilização com N tende a aumentar a produtividade da cana-de-açúcar.

Entretanto, os resultados observados no presente estudo mostram que, quando considerado apenas a safra em que o N foi aplicado, a frequência de resposta da cana-de-açúcar é menor. Essa contradição de informações pode ser explicada pela relutância de pesquisadores em divulgar estudos que não apresentem resultados significativamente diferentes entre os tratamentos, assim como a ausência de experimentos instalados em condições de canaviais comerciais.

Cantarella et al. (2007) alertam que experimentos com doses de N realizados a nível de campo frequentemente não apresentam resposta significativa, principalmente em razão do grande erro experimental, mas que, quando os dados dos experimentos são analisados em conjunto, observa-se importante resposta a esse nutriente. Dessa forma, o erro experimental comentado por esses autores, principalmente na operação de colheita, pode ser uma das causas para a identificação de baixa resposta ao N nos experimentos da presente pesquisa. Isso é comprovado pelo alto coeficiente de variação (CV%) dos dados de produtividade em algumas áreas (Tabela 3.3), quando comparados ao CV% obtido pelo sensor de dossel, clorofilômetro ou mesmo pelo teor de N foliar (Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6).

Tabela 3.3 – Produtividade média obtida em cada tratamento (doses crescentes de nitrogênio) de acordo com a área experimental, suas respectivas análises de variância, regressão linear simples (componentes linear e quadrática) e contrastes ortogonais

Área	Doses de N ⁽¹⁾					ANOVA ⁽²⁾	CV ⁽³⁾	Reg. linear ⁽⁴⁾	Reg. quadr. ⁽⁵⁾	Cont. ortog. ⁽⁶⁾
	1	2	3	4	5					
	-----t ha ⁻¹ -----									
PA	90,4	103,5	99,7	96,1	104,6	0,093	7,31	0,091	0,517	0,023
AS	96,5	104,9	108,3	114,0	112,1	0,552	14,48	0,127	0,542	0,152
CA	68,0	75,0	82,6	71,1	69,8	0,444	13,44	0,992	0,132	0,325
CB	73,9	70,8	74,4	79,9	76,8	0,634	11,11	0,282	0,910	0,738
NJ	93,5	108,5	112,6	103,5	103,8	0,151	9,59	0,345	0,041	0,032
RO	89,8	101,7	101,1	106,9	102,6	0,157	12,52	0,019	0,571	0,035
AP	83,9	77,6	84,4	87,0	88,9	0,149	7,10	0,061	0,294	0,858
VE	66,7	61,0	59,0	60,4	60,4	0,187	7,14	0,085	0,098	0,022
CC	73,3	90,2	92,7	90,6	na ⁽⁷⁾	0,167	14,22	0,080	0,158	0,033
SI	77,1	78,7	83,6	84,8	na	0,426	9,08	0,123	0,945	0,243

⁽¹⁾ Doses de nitrogênio (tratamentos) variável entre as áreas, representando respectivamente os valores 1, 2, 3, 4 e 5 apresentados na tabela. PA, AS, CA, CB, NJ e RO receberam 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N; AP e VE receberam 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹; CC e SI receberam 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹

⁽²⁾ Análise de variância

⁽³⁾ Coeficiente de variação

⁽⁴⁾ Regressão linear (1° grau)

⁽⁵⁾ Regressão quadrática (2° grau)

⁽⁶⁾ Contraste ortogonal confrontando os tratamentos que receberam nitrogênio (doses de N) e o controle (sem aplicação de N, 0 kg ha⁻¹)

⁽⁷⁾ não se aplica devido à ausência de um quinto tratamento

Apesar de o N ter aumentado a produtividade de apenas 40% das áreas, o sensor de dossel foi capaz de identificar diferença no desenvolvimento da cana em 70% das áreas experimentais (Tabela 3.4). Nos outros 30%, a análise por contrastes ortogonais mostrou que o N não influenciou o desenvolvimento da cana, ao menos até o momento das avaliações (plantas com altura entre 0,4 e 0,6 m).

Na área VE, no momento da avaliação com o sensor de dossel, não foi observado o efeito deletério do N, ao contrário do que foi verificado para a produtividade de colmos. Isso mostra que esse efeito prejudicial do N ocorreu em fases mais avançadas do desenvolvimento da cultura. Da mesma forma, verifica-se que em algumas situações o sensor foi capaz de identificar efeito positivo das doses de N, mas que não chegaram a refletir em produtividade. Esse foi o caso das áreas CA e CB, as quais estão alocadas, respectivamente, em Ambiente de Produção E e D (Tabela 3.1), o que pode ter ocasionado limitação ao desenvolvimento da

cana em estágios avançados, principalmente causados por déficit hídrico ou desequilíbrios nutricionais (Tabela 3.2). Esses fatores podem ter mascarado ou limitado o efeito positivo do N ao final do ciclo da cultura.

Dentre as sete áreas que apresentaram resposta ao N mensurada pelo sensor de dossel, quatro apresentaram resposta linear e três apresentaram significância também da componente quadrática. O máximo desenvolvimento da cana (avaliada com o sensor de dossel) nessa fase da cultura foi atingido com as doses de 111, 208 e 153 kg ha⁻¹ de N, respectivamente para as áreas CA, NJ e RO.

Entretanto, no caso da aplicação dessas doses ótimas de N, não haveria garantia de resposta equivalente, já que esta poderia ser mascarada por algum outro fator limitante que viesse a ocorrer em estágios posteriores no desenvolvimento da cultura. Neste caso, a produção só poderia ser otimizada mediante a correção de tal limitação. Outro fato que pode ocorrer, é que a área que receba essa dose ótima de N venha a produzir de forma semelhante a uma área próxima que não tenha tido esse aporte. Como já discutido, isso seria totalmente possível, já que a cana é comumente capaz de absorver do próprio solo parte do N necessário para seu desenvolvimento. Nesse último caso, seria interessante reduzir a dose de N aplicada, uma vez que o solo seria a principal fonte desse nutriente, gerando economia pelo menor uso desse fertilizante.

Efeito semelhante ao observado para o sensor de dossel foi verificado pelos resultados adquiridos com o clorofilômetro (Tabela 3.5). Das seis áreas em que o sensor de dossel foi capaz de diferenciar as doses de N, as quais também foram avaliadas com o clorofilômetro, este equipamento não apresentou a mesma capacidade em diferenciar os tratamentos em apenas uma (área CB). Amaral e Molin (2014) verificaram que as leituras com clorofilômetro, assim como o teor foliar de N, são mais suscetíveis a alterações nos valores mensurados, do que em comparação com o sensor de dossel, em função de variações ambientais e de desenvolvimento da cana. Isto porque o acúmulo de biomassa pela parte aérea da cana-de-açúcar é o fator determinante nos valores obtidos pelo sensor (*discutido no Capítulo 1*), sendo esse um parâmetro que oscila menos do que o teor de clorofila e N nas folhas, em curtos espaços de tempo.

Tabela 3.4 – Valor médio da leitura do sensor de dossel, representado pelo índice de vegetação NDRE, para cada tratamento (doses crescentes de nitrogênio) de acordo com a área experimental, suas respectivas análises de variância, regressão linear simples (componentes linear e quadrático) e contrastes ortogonais

Área	Doses de N ⁽¹⁾					ANOVA ⁽²⁾	CV ⁽³⁾	Reg. linear ⁽⁴⁾	Reg. quadr. ⁽⁵⁾	Cont. ortog. ⁽⁶⁾
	1	2	3	4	5					
	-----NDRE-----					p > F	(%)	-----p > F-----		
PA	0,171	0,200	0,198	0,200	0,211	0,003	5,35	0,001	0,130	<0,001
AS	0,143	0,173	0,186	0,197	0,199	0,019	11,96	0,002	0,182	0,003
CA	0,201	0,231	0,234	0,227	0,233	0,022	5,87	0,015	0,040	0,002
CB	0,193	0,208	0,211	0,226	0,222	0,005	4,88	0,001	0,210	0,001
NJ	0,204	0,227	0,233	0,239	0,239	<0,001	3,09	<0,001	0,006	<0,001
RO	0,239	0,283	0,312	0,313	0,325	<0,001	3,30	<0,001	<0,001	<0,001
AP	0,198	0,211	0,206	0,223	0,236	0,305	12,01	0,052	0,614	0,181
VE	0,212	0,230	0,217	0,231	0,246	0,238	9,31	0,059	0,578	0,138
CC	0,182	0,211	0,233	0,229	na ⁽⁷⁾	0,041	10,66	0,011	0,178	0,010
SI	0,232	0,237	0,261	0,253	na	0,092	6,24	0,037	0,417	0,075

⁽¹⁾ Doses de nitrogênio (tratamentos) variável entre as áreas, representando respectivamente os valores 1, 2, 3, 4 e 5 apresentados na tabela. PA, AS, CA, CB, NJ e RO receberam 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N; AP e VE receberam 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹; CC e SI receberam 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹

⁽²⁾ Análise de variância

⁽³⁾ Coeficiente de variação

⁽⁴⁾ Regressão linear (1° grau)

⁽⁵⁾ Regressão quadrática (2° grau)

⁽⁶⁾ Contraste ortogonal confrontando os tratamentos que receberam nitrogênio (doses de N) e o controle (sem aplicação de N, 0 kg ha⁻¹)

⁽⁷⁾ não se aplica pela ausência de um quinto tratamento

A incapacidade do clorofilômetro em identificar diferença entre os tratamentos nas áreas CB e AP pode ainda ter sido influenciada pelo déficit hídrico a que a cana pode ter sido submetida, uma vez que essas áreas são classificadas como Ambiente de Produção E e D, respectivamente, e portanto estão sujeitas a limitações quanto à disponibilidade de água (PRADO, 2005). Corroborando essa afirmação, Jangpromma et al. (2010), avaliando diferentes lâminas de água no teor de clorofila nas folhas de cana-de-açúcar, identificaram que o déficit hídrico ocasiona alterações nos valores obtidos por clorofilômetros.

Por outro lado, esse equipamento foi capaz de identificar incremento no teor de clorofila em função do aumento da dose de N aplicada na área VE, enquanto o sensor de dossel não apresentou tal eficácia. Isso ocorreu porque o sensor de dossel possui campo de visão com largura de cerca de 0,5 m, o que faz com que ele integre falhas de brotação na

refletância mensurada. Por essa área apresentar grande presença de falhas de brotação, a diferença entre os equipamentos foi marcante. Ainda, esse resultado mais uma vez mostra que o efeito prejudicial do N na produção de colmos dessa área (Tabela 3.3) foi causado em fase mais adiantada de desenvolvimento da cultura.

Tabela 3.5 – Valor médio do índice SPAD obtido por clorofilômetro na folha +1 para cada tratamento (doses crescentes de nitrogênio) de acordo com a área experimental, suas respectivas análises de variância, regressão linear simples (componentes linear e quadrática) e contrastes ortogonais

Área	Doses de N ⁽¹⁾					ANOVA ⁽²⁾	CV ⁽³⁾	Reg. linear ⁽⁴⁾	Reg. quadr. ⁽⁵⁾	Cont. ortog. ⁽⁶⁾
	1	2	3	4	5					
	-----SPAD-----					p > F	(%)	-----p > F -----		
PA	44,3	47,1	48,1	47,9	47,9	0,003	2,55	0,001	0,010	<0,001
AS	43,3	45,4	45,6	46,5	47,2	0,003	2,38	<0,001	0,321	0,001
CA	40,0	40,1	41,0	41,4	41,1	0,043	1,60	0,007	0,353	0,041
CB	40,8	39,9	41,3	41,4	41,4	0,128	2,10	0,080	0,716	0,760
NJ	47,2	50,0	49,7	50,6	50,5	0,035	2,96	0,009	0,110	0,003
RO	44,7	45,6	47,9	48,2	49,0	<0,001	1,57	<0,001	0,142	<0,001
AP	42,7	41,8	43,1	42,4	43,8	0,226	2,65	0,157	0,243	0,938
VE	49,3	51,5	50,5	50,9	52,5	0,049	2,59	0,015	0,952	0,015

Nota: Diferentemente da produtividade e das leituras com sensor de dossel que foram realizadas em 10 áreas experimentais, as leituras com clorofilômetro foram realizadas apenas em 8 áreas

⁽¹⁾ Doses de nitrogênio (tratamentos) variável entre as áreas, representando respectivamente os valores 1, 2, 3, 4 e 5 apresentados na tabela. PA, AS, CA, CB, NJ e RO receberam 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N; AP e VE receberam 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹

⁽²⁾ Análise de variância

⁽³⁾ Coeficiente de variação

⁽⁴⁾ Regressão linear (1º grau)

⁽⁵⁾ Regressão quadrática (2º grau)

⁽⁶⁾ Contraste ortogonal confrontando os tratamentos que receberam nitrogênio (doses de N) e o controle (sem aplicação de N, 0 kg ha⁻¹)

As análises foliares para determinação do teor de N apresentaram eficácia semelhante ao clorofilômetro em diferenciar as doses de N, mostrando maiores teores conforme a aplicação crescente nas áreas PD, AS e CA (Figura 3.6). Entretanto, esse método mostrou os resultados mais variáveis, caracterizado pelo alto CV% encontrado nas áreas AP e VE. Pesquisadores e agricultores que trabalham com fertilização da cana frequentemente não confiam nos resultados das análises, uma vez que é rotineiro observar áreas produtivas que

apresentam níveis baixos de nutrientes nas folhas, assim como experimentos com altas doses de um nutriente que não correspondem à sua concentração foliar (Vitti, 2012²).

Uma alternativa à análise foliar é a determinação da concentração de nutrientes presentes na seiva das plantas, mas que ainda não está disponível comercialmente. Bons resultados têm sido observados em citros, focando a avaliação rápida e precisa da nutrição das plantas para permitir a fertirrigação (SOUZA et al., 2012). Adaptando a metodologia desenvolvida para citros, Joris et al. (2012) tem obtido bons resultados em cana-de-açúcar, ao avaliar a seiva presente na nervura da folha mais nova.

Tabela 3.6 – Teor de nitrogênio foliar médio (g kg^{-1}) obtido na folha +1 para cada tratamento (doses crescentes de nitrogênio) de acordo com a área experimental, suas respectivas análises de variância, regressão linear simples (componentes linear e quadrática) e contrastes ortogonais

Área	Doses de N ⁽¹⁾					ANOVA	CV ⁽³⁾	Reg.	Reg.	Cont.
	1	2	3	4	5	⁽²⁾		linear ⁽⁴⁾	quadr. ⁽⁵⁾	ortog. ⁽⁶⁾
	-----g kg ⁻¹ -----					p > F	(%)	-----p > F-----		
PA	20,8	23,6	23,9	25,3	24,6	0,051	8,20	0,009	0,129	0,006
AS	21,0	22,4	25,5	24,5	26,7	0,015	8,77	0,002	0,524	0,008
CA	20,2	22,8	21,4	22,8	22,9	0,148	7,66	0,062	0,496	0,031
CB	22,3	24,2	22,0	22,7	22,6	0,185	5,45	0,711	0,615	0,379
AP	18,6	19,2	21,7	21,9	22,0	0,470	16,17	0,100	0,620	0,198
VE	11,7	14,2	10,3	10,6	17,0	0,030	22,69	0,147	0,047	0,414

Nota: Diferentemente da produtividade e das leituras com sensor de dossel, os quais foram realizadas em 10 áreas experimentais, a análise foliar para determinar o teor de N foliar foi realizada em apenas 6 áreas.

⁽¹⁾ Doses de nitrogênio (tratamentos) variável entre as áreas, representando respectivamente os valores 1, 2, 3, 4 e 5 apresentados na tabela. PA, AS, CA e CB receberam 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N; AP e VE receberam 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹

⁽²⁾ Análise de variância

⁽³⁾ Coeficiente de variação

⁽⁴⁾ Regressão linear (1º grau)

⁽⁵⁾ Regressão quadrática (2º grau)

⁽⁶⁾ Contraste ortogonal confrontando os tratamentos que receberam nitrogênio (doses de N) e o controle (sem aplicação de N, 0 kg ha⁻¹)

Ademais, seriam esperadas boas relações entre leituras de clorofilômetro e teor de N na folha, assim como observado por Argenta et al. (2003), Ciganda et al. (2009) e Zotarelli et al. (2003) no milho. Segundo Argenta et al. (2001), essa relação é atribuída principalmente ao fato de que 50 a 70 % do N total das folhas ser constituinte de enzimas que estão associadas

² Vitti, André César. Informação transmitida durante o II Curso Teórico-Prático de Interpretação de Análise de Solo e Recomendação de Fertilizantes e Corretivos para a Cana-de-Açúcar, organizado pela Infobibos, Piracicaba-SP, 2012.

aos cloroplastos. No entanto, correlações significativas nem sempre são encontradas, assim como observado no presente estudo (Tabela 3.7). Amaral et al. (2010), testando diferentes clorofilômetros em experimentos com doses de N aplicadas em cana-de-açúcar, verificaram baixa correlação entre as leituras dos equipamentos e o teor N presente na folha +1.

3.3.2 Relação com a produção de colmos

O sensor de dossel apresentou as melhores correlações com a produção de colmos, apresentando relação significativa em metade das áreas (Tabela 3.7). Em outras duas áreas o resultado provavelmente seria parecido se não fossem os erros experimentais intrínsecos ao procedimento de colheita, tanto manual quanto mecânica. Tal capacidade do sensor em se relacionar com a produtividade também foi verificada por Amaral e Molin (2011), Lofton et al. (2012a), Molin et al. (2010) e Rosa (2012).

O desempenho superior do sensor de dossel em prever a produtividade era esperado quando comparado ao clorofilômetro e ao teor de N foliar. Da mesma forma, era esperada baixa relação entre leituras do sensor e os valores obtidos com o clorofilômetro e o teor de N foliar (Tabela 3.7).

Tal comportamento advém da diferença do campo de visão de cada equipamento. O sensor de dossel avalia todo o dossel da cultura e integra a refletância dos locais com falhas de brotação da cana; já o clorofilômetro, avalia apenas uma pequena porção do limbo foliar, selecionado pelo usuário do equipamento, sendo obrigatoriamente um local sem danos por doença, praga, etc. O mesmo ocorre com o N foliar, onde apenas folhas sadias são amostradas, sendo que, nesse caso, o teor de N tende a variar em função das condições de clima, solo e desenvolvimento da cultura, assim como observado por Franco et al. (2010), ao avaliarem a resposta de duas áreas de cana-de-açúcar à adubação nitrogenada. Portanto, como o campo de visão do sensor compreende todo o dossel, este possibilita boa estimativa da biomassa acumulada pelas plantas (*apresentado no Capítulo 1*), refletindo diretamente na produção de colmos ao final do ciclo da cultura (SANDHU et al., 2012; SIMÕES et al., 2005).

Tabela 3.7 – Coeficientes de correlação de Pearson entre a produtividade, leituras do sensor de dossel (NDRE), leituras do clorofilômetro (SPAD) e teor de nitrogênio foliar entre cada uma das parcelas nas respectivas áreas experimentais

Área	Produtividade vs NDRE	Produtividade vs SPAD	Produtividade vs N foliar	NDRE vs SPAD	NDRE vs N foliar	SPAD vs N foliar
PA	0,762**	0,338 ^{ns}	0,203 ^{ns}	0,643**	0,327 ^{ns}	0,468*
AS	0,633**	0,406 ^{ns}	0,296 ^{ns}	0,778**	0,482*	0,638**
CA	0,476 ^{ns}	-0,325 ^{ns}	-0,124 ^{ns}	0,182 ^{ns}	0,573**	0,063 ^{ns}
CB	0,632**	-0,025 ^{ns}	-0,456*	0,012 ^{ns}	-0,304 ^{ns}	-0,037 ^{ns}
NJ	0,476*	0,108 ^{ns}	na ⁽¹⁾	0,650**	na	na
RO	0,630**	0,465*	na	0,880**	na	na
AP	0,227 ^{ns}	0,638**	0,232 ^{ns}	0,100 ^{ns}	0,021 ^{ns}	0,218 ^{ns}
VE	0,193 ^{ns}	-0,004 ^{ns}	-0,027 ^{ns}	0,471*	0,502*	0,608*
CC	0,296 ^{ns}	na	na	na	na	na
SI	0,406 ^{ns}	na	na	na	na	na

Nota: ^{ns} representa correlação não significativa a 5% de probabilidade pelo teste t; * e ** representam, respectivamente, correlação significativa a 5%, e a 1% pelo teste t

⁽¹⁾ Não se aplica, pois os dados de clorofilômetro e/ou análise foliar não foram coletados

Apesar da boa relação, a produtividade da cana, assim como as leituras com o sensor de dossel, apresentaram intervalos de valores diferentes entre as áreas (Figura 3.3). Isso ocorre porque a cana-de-açúcar apresenta produtividade altamente variável em função da variedade cultivada, da idade do canavial, do ambiente de produção e da variação climática ao longo da safra. Somado a isso, as leituras do sensor apresentam sensibilidade às variações de arquitetura foliar, porte e densidade de plantas no momento da avaliação. Logo, a relação entre sensor e produtividade absoluta de cana tende a ser específica para cada situação de cultivo.

Figura 3.3 – Relação linear entre a produtividade de colmos e a leitura do sensor de dossel (NDRE) nas dez áreas experimentais, a partir da média entre as repetições nos diferentes tratamentos (doses de nitrogênio)

Contudo, para que possa ocorrer adoção dessa tecnologia por produtores, os quais cultivam cana-de-açúcar nas mais diversas condições de clima e solo, é necessário o desenvolvimento de um modelo geral que relacione leituras do sensor com a produtividade de colmos, independentemente da situação de cultivo, permitindo maior aceitação e praticidade da tecnologia.

Uma das alternativas para contornar esse efeito é a normalização dos dados. Para tanto, Peterson et al. (1993) propuseram o índice de suficiência (SI - Eq. 2.3), o qual ajusta a variação não associada aos tratamentos (doses de N) (VARVEL et al., 2007), permitindo a análise conjunta dos dados obtidos nas diferentes áreas.

Por meio dessa normalização, a relação entre as leituras do sensor de dossel e a produtividade da cana foi aumentada (Figura 3.4). Estes resultados corroboram Lofton et al. (2012b) e Rosa (2012) ao avaliarem a eficiência da normalização de dados através de um índice semelhante (índice de resposta, RI - JOHNSON; RAUN, 2003), o qual apenas inverte o numerador e o denominador da equação.

Figura 3.4 – Relação linear entre o índice de suficiência (SI) calculado para a produtividade de colmos e as leituras do sensor de dossel ($p < 0,001$), analisando os dados das dez áreas experimentais em conjunto

Nota: “EPE” significa o erro padrão da estimativa

Mesmo com um ajuste razoável, foi verificado erro padrão da estimativa (EPE) de 0,056, o que representa um erro de 5,6% na produtividade estimada, o qual, no entanto, parece ser um valor aceitável. Ademais, é preciso levar em consideração que as avaliações com o sensor de dossel precisam ser realizadas na fase inicial de desenvolvimento da cana, antes de o canavial atingir altura média de colmos superior a 0,7 m (AMARAL; MOLIN, 2014). Caso contrário, ocorre perda da sensibilidade do sensor devido ao acúmulo de várias camadas de folhas, além de a entrada na lavoura com veículos para executar intervenções ficar dificultada. Assim, existe um grande período entre a avaliação com o sensor de dossel e a colheita, onde vários fatores (principalmente climáticos) podem atuar nesse intervalo, reduzindo a correlação existente entre as leituras e a produção de colmos.

3.4 Discussão

No presente estudo foi possível verificar a resposta variável da cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em apenas uma safra. Esse comportamento provavelmente seja devido ao fornecimento de N por outras fontes que estão disponíveis principalmente em áreas comerciais, devido à frequente fertilização química e orgânica (vinhaça e torta de filtro) à que são submetidas. No entanto, esse nutriente precisa ser aplicado para manter a capacidade produtiva dos solos ao longo das safras, assim como evitar a redução na longevidade dos canaviais (FRANCO et al., 2010; TRIVELIN; VITTI, 2005; VITTI et al., 2007).

Mesmo com a variável resposta da cana ao N em termos de produtividade de colmos, o sensor de dossel foi ferramenta eficiente na identificação das doses aplicadas à cultura. Dessa forma, alterações edafoclimáticas após as leituras com o sensor, podem influenciar o desenvolvimento das plantas e a disponibilização de N pelo solo, alterando a resposta em termos de produtividade de cana. Ainda, o desenvolvimento do sistema radicular durante o ciclo da cultura, intensificado a partir da época de avaliação com o sensor de dossel (JADOSKI et al., 2010; MARIN, 2014), pode ocasionar maior absorção de N em profundidade, também alterando a resposta da cultura a esse nutriente.

Desse modo, essas variáveis determinantes na resposta da cultura a aplicação de N interferem diretamente na relação obtida entre produtividade e leituras do sensor. A normalização dos dados, como por exemplo, através do cálculo do SI, reduzem esses efeitos, mas não os eliminam. No entanto, mesmo com essa dificuldade, julga-se que o sensor seja ferramenta útil na identificação da variabilidade na produção de canaviais comerciais, comprovada pela relação significativa ao trabalhar com o SI ($p < 0,001$).

Dessa forma, o uso de sensores de dossel embarcados em maquinário agrícola, que adentre a lavoura no período em que a cultura apresente altura média de colmos entre 0,4 e 0,7 (AMARAL; MOLIN, 2014), pode possibilitar o levantamento da variabilidade da produção de forma espacializada. Assim, é possível direcionar não só a aplicação de N, como também qualquer outra intervenção gerencial que tenha a informação de produtividade ou biomassa como fator importante para a tomada de decisão. Ademais, essa eficiência do sensor permite projeções de produção, com desdobramentos relacionados à sua espacialização e à própria logística de colheita. Da mesma forma, possibilita o direcionamento de amostragens *in loco* baseadas na variabilidade do vigor das plantas que tenham como objetivo identificar

fatores que possam estar interferindo na produção da cana-de-açúcar, como compactação do solo, pragas, erosão, etc.

3.5 Conclusões

No presente estudo foi possível verificar que canaviais comerciais colhidos mecanicamente sem a queima da cana apresentam resposta variável, mas generalizadamente baixa, à aplicação de N na mesma safra. Entretanto, a fertilização com tal nutriente não deve ser descartada para não prejudicar a colheita das safras seguintes.

Mesmo a cana não respondendo ao N aplicado, sensores de dossel são ferramentas eficientes para identificar a disponibilidade desse nutriente no solo.

Após a avaliação com sensores de dossel, fatores climáticos podem interferir no desenvolvimento da cana-de-açúcar, prejudicando a relação entre as leituras do sensor com a produtividade da cultura. Entretanto, estes equipamentos apresentam eficiência superior aos medidores portáteis de clorofila e as análises foliares da concentração de N na folha ao estimar a produtividade da cana-de-açúcar.

Como a produtividade é variável entre os sistemas de cultivo da cana-de-açúcar, a normalização dos dados permite que diferentes áreas sejam analisadas em conjunto, possibilitando a construção de modelos para predição da produtividade de cana por meio de leituras com um sensor de dossel.

Referências

ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B. 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.

AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 1, p. 1633–1642, 2011.

_____. The Effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, n. 1, p. 273–280, 2014.

AMARAL, L.R.; PORTZ, G.; FARIA, T.F.; MOLIN, J.P. Comparação de clorofilômetros como indicadores de suficiência de nitrogênio em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., 2010, Ribeirão Preto, SP. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 158–167, 2001.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; FOSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L.L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio de clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 109–119, 2003.

BÉGUÉ, 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.

BERNTSEN, J.; THOMSEN, A.; SCHELDE, K.; HANSEN, O.M.; KNUDSEN, L.; BROGE, N.; HOUGAARD, H.; HØRFARTER, R. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, n. 2, p. 65–83, 2006.

BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; REIS, V. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil**, The Hague, v. 252, p. 139–149, 2003.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704–716, 1996.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375–470.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. p. 355–412.

CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F.; MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 769–850.

CIGANDA, V.; GITELSON, A.; SCHEPERS, J. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 166, p. 157–161, 2009.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

ESPIRONELO, A.; GALLO, J.R.; LAVORENTI, A.; IGUE, T.; HIROCE, R. Efeitos da adubação NPK nos teores de macronutrientes das folhas de cana-de-açúcar (cana-soca). **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 377–382, 1986.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FRANCO, H.C. J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 5, p. 579–590, 2010.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, E.C.A.; 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.

GIRMA, K.; MARTIN, K.L.; ANDERSON, R.H.; ARNALL, D.B.; BRIXEY, K.D.; CASILLAS, M.A.; CHUNG, B.; DOBEY, B.C.; KAMENIDOU, S.K.; KARIUKI, S.K.; KATSALIROU, E.E.; MORRIS, J.C.; MOSS, J.Q.; ROHLA, C.T.; SUDBURY, B.J.; TUBANA, B.S.; RAUN, W.R. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, n. 5, p. 873–897, 2006.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 101–112, 2009.

JADOSKI, C.J.; TOPPAI, E.V.B.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 3, n. 2, p. 169–176, 2010.

JANGPROMMA, N.; SONGSRI, S.; THAMMASIRIRAK, S.; JAISIL, P. Rapid assesment of chlorophyll content in sugarcane using a SPAD chlorophyll meter across different water stress conditions. **Asian Journal of Plant Science**, Islamabad, v. 9, n. 6, p. 368–374, 2010.

JOHNSON, G.; RAUN, W. Nitrogen response index as a guide to fertilizer management. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 2, p. 249–262, 2003.

JORIS, H.A.W.; CANTARELLA, H.; ROSA, H.J.A.; MOLIN, J.P.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C.; DIAS, F.L.F.; VARGAS, V.P. Preliminary diagnosis of nitrogen status in sugarcane in response to nitrogen fertilization: sap analysis, NDVI and SPAD readings. In: INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 29., 2012, Townsville. **Proceedings...** Townsville: ISSCT, 2012. 1 CD-ROM.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; SCHARF, P.C.; PALM, H.L.; ROBERTS, D.F.; VORIES, E.D. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 1, p. 71–84, 2010.

LOFTON, J.; TUBANA, B.S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H.; DALEN, M. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. **Sensors**, New York, v. 12, p. 7529–7547, 2012a.

_____. Predicting sugarcane response to nitrogen using a canopy reflectance-based response index value. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 1, p. 106–113, 2012b.

LUKINA, E.; FREEMAN, K.; WYNN, K.; THOMASON, W.; MULLEN, R.; STONE, M.; SOLIE, J.; KLATT, A.; JOHNSON, G.; ELLIOTT, R.; RAUN, W. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 6, p. 885–898, 2001.

MARIN, F.R. **Cana-de-açúcar**: fenologia. Agência EMBRAPA de Informação tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html>. Acesso em: 12 fev. 2014.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão**: o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba: O Autor, 2001. 83 p.

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.

OLIVEIRA, M.W.; FREIRE, F.M.; MACEDO, G.A.R.; FERREIRA, J.J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30–43, 2007.

PETERSON, T.A.; BLACKMER, T.M.; FRANCIS, D.D.; SCHEPERS, J.S. **Using a chlorophyll meter to improve N management**: NebGuide G93–1171-A. Lincoln: University of Nebraska, Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, 1993. Disponível em: <<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2349&context=extensionhist>>. Acesso em: 17 fev. 2014.

PORTZ, G.; AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Optimun sugarcane growth stage for canopy reflectance sensor to predict biomass and nitrogen uptake. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianapolis. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2012. CD-ROM.

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 110, p. 12-17, 2005.

PRADO, R.M.; PANCELLI, M.A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951–959, 2008.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 189-203. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. 279 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-Season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 131–138, 2001.

RAUN, W.; SOLIE, J.; STONE, M.; MARTIN, K.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.; JOHNSON, G. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 19/20, p. 2759–2781, 2005.

ROSA, H.J.A. **Uso de sensor ativo de dossel na detecção da resposta da cana-de-açúcar ao suprimento de nitrogênio**. 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

ROSSETO, R.; DIAS, F.L.F.; LANDELL, M.G.A.; CANTARELLA, H.; TAVARES, S.; VITTI, A.C.; DERECIN, D. N and K fertilisation of sugarcane ratoons harvested without burning. In: INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 27., 2010, Veracruz. **Proceedings...** Veracruz: ISSCT, 2010. 1 CD-ROM.

SANDHU, H.S.; GILBERT, R.A.; MCCRAY, J.M.; PERDOMO, R.; EILAND, B.; POWELL, G.; MONTES, G. Relationships among leaf area index, visual growth rating, and sugarcane yield. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, Belle Glade, v. 32, p. 1–14, 2012.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1974. 56 p.

SCHMIDT, J.; BEEGLE, D.; ZHU, Q.; SRIPADA, R. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 94–101, 2011.

SCHULTZ, N.; MORAIS, R.F. de; SILVA, J.A.; BAPTISTA, R.B.; OLIVEIRA, R.P.; LEITE, J.M.; PEREIRA, W.; CARNEIRO JÚNIOR, J.B.; ALVES, B.J.R.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; REIS, V.M. Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 261–268, 2012.

SIMÕES, M.S.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Growth indices and productivity in sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 1, p. 23–30, 2005.

SOLARI, F. **Developing a crop based strategy for on the go n management in irrigated cornfields**. 2006. 157 p. Thesis (PhD) – Graduate College at the University of Nebraska, Lincoln, 2006.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 571–579, 2008.

SOUZA, T.R.; VILLAS BÔAS, R.L.; QUAGGIO, J.A.; SALOMÃO, L.C. Nutrientes na seiva de plantas cítricas fertirrigadas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v. 34, n. 2, p. 482–492, 2012.

SUGAWARA, L.M. **Variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio de um modelo agrônômico**. 2010. 92 p. Tese (Doutor em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

TEAL, R.K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, W.R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 6, p. 1488–1494, 2006.

THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; PROBERT, M.E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 337–351, 2005.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Manejo do nitrogênio e enxofre na nutrição e adubação da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2., 2005, Piracicaba. **Apresentação...** Piracicaba: IPNI, 2005. Disponível em: <[http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/926048f0196c9d4285256983005c64de/b6c64e4f37c50990032570d80040f0d0/\\$FILE/Palestra Paulo Trivelin e Andre Vitti.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/926048f0196c9d4285256983005c64de/b6c64e4f37c50990032570d80040f0d0/$FILE/Palestra%20Paulo%20Trivelin%20e%20Andre%20Vitti.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2014.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; OLIVEIRA, O.C.; RESENDE, A.S.; WEBER, H. **Efeito da queima, aplicação de N, irrigação e molibdênio na produção e acumulação de nitrogênio na cana de açúcar a longo prazo**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 1998. 13 p. (EMBRAPA. CNPAB. Documentos, 72)

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 3, p. 701–706, 2007.

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.

XUE, L.; LI, G.; QIN, X.; YANG, L.; ZHANG, H. Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in south China. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 15, p. 95–110, 2013.

ZOTARELLI, L.; CARDOSO, E.G.; PICCININ, J.L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; TORRES, E.; ALVES, B.J.R. Calibração do medidor de clorofila Minolta SPAD-502 para avaliação do conteúdo de nitrogênio do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1117–1122, 2003.

4 ALGORITMO AGRONÔMICO DE FERTILIZAÇÃO PARA DIRECIONAR A APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM TAXAS VARIÁVEIS NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR A PARTIR DE LEITURAS COM UM SENSOR DE DOSSEL

Resumo

Sensores de refletância do dossel vêm sendo usados para possibilitar a aplicação de nitrogênio (N) em taxas variáveis. No entanto, até então nenhuma metodologia foi desenvolvida para o uso de tal equipamento em cana-de-açúcar. O objetivo do presente trabalho foi justamente analisar algumas delas que são utilizadas para direcionar a aplicação de N com base em leituras de um sensor de dossel, definindo uma estratégia específica para a cana-de-açúcar. Para tanto, foram instalados experimentos em forma de faixas de cana-de-açúcar, com cada tratamento compreendendo todo o comprimento dos talhões, onde foram aplicadas diferentes doses de N, assim como experimentos em parcelas. Foi avaliada a eficácia das metodologias, da Faixa Rica em N e da Faixa Virtual, em estimar a resposta da cana ao N nas condições de seu cultivo. Em razão da variabilidade na brotação e no desenvolvimento da cana-de-açúcar, o uso de qualquer faixa de referência instalada em canaviais é comprometido, seja ela real ou virtual. Devido à capacidade do sensor em prever a produção de colmos, foi estabelecida uma metodologia (algoritmo) que leva em conta tal relação e a variabilidade no vigor da cultura para direcionar a aplicação de N. O conceito desse algoritmo é aplicar maior dose de fertilizante onde o potencial produtivo da cana é maior, assumindo que nessas condições há maior chance da cultura otimizar o uso do N aplicado.

Palavras-chave: Fertilização nitrogenada; Aplicação em tempo real; Doses variáveis; Estimativa de produtividade

Abstract

Crop canopy reflectance sensors have been used for variable-rate nitrogen (N) application. However, up to now none methodology has been developed for the use of such equipment on sugarcane. The objective of the present study was to analyze some methodologies used to guide N application based on canopy sensor readings, as well as defining a specific strategy for this purpose in sugarcane. Experiments were performed in sugarcane strips with N rates, where each treatment was comprised by the entire length of the fields. Plot experiments with N rates were performed as well. It was evaluated the efficiency of the N-Rich Strip and Virtual Strip methodologies in order to assess the crop N response in the sugarcane growing conditions. Because of the variability in regrowth and sugarcane development, the use of any reference strip installed in sugarcane fields is compromised, regardless of this strip being real or virtual. Due to the ability of the sensor for predicting sugarcane yield, it was established an algorithm that takes into account this relationship and the variability in crop vigor in order to guide the N application. This approach applies higher fertilizer rates where the sugarcane yield potential is higher either, assuming that there is a greater chance to optimize the crop uses of the applied N under that condition.

Keywords: Nitrogen fertilization; On-the-go application; Variable-rate; Yield estimation

4.1 Introdução

A fertilização com nitrogênio (N) é um desafio para as diferentes culturas agrícolas devido à dinâmica complexa desse elemento no solo, fazendo com que sua disponibilidade para as plantas seja difícil de prever e controlar. Tal comportamento faz com que a eficiência de uso do N (EUN), para a maioria das culturas, seja inferior a 60% (CANTARELLA, 2007). Há trabalhos apontando que a EUN em cana-de-açúcar seja ainda menor, da ordem de 20 a 40% (CANTARELLA et al., 2007; FRANCO et al., 2011; GAVA et al., 2005; TRIVELIN et al., 1995).

Para aumentar a EUN, é essencial a aplicação de N em taxas variáveis, respeitando a demanda local da cultura por esse nutriente (SOLARI, 2006). Com esse objetivo, os sensores de refletância do dossel (sensores de dossel) vêm ganhando destaque na última década (SAMBORSKI et al., 2009). Logo, várias formas de uso das leituras provenientes desse tipo de sensor vêm sendo propostas, especialmente para as culturas de milho e trigo.

A metodologia mais consolidada para tal finalidade é a determinação da resposta da cultura ao N, estimada a partir de áreas de referência instaladas ao longo da própria lavoura (RAUN et al., 2002, 2008). Essa estratégia assume que o N seja, até certo ponto, o fator limitante ao desenvolvimento da cultura (ROBERTS et al., 2011). Assim, uma ou várias porções da lavoura são adotadas como referência. Nessas regiões, geralmente em forma de faixas da cultura (Faixa Rica em N – FRN), é aplicada, usualmente, no plantio, toda a quantidade de N demandada pela cultura para seu pleno desenvolvimento. Posteriormente, no momento da aplicação de N em cobertura nas áreas que não foram fertilizadas, a FRN é avaliada com o sensor de dossel, sendo que o valor médio obtido é comparado ao valor encontrado nas regiões que não tiveram aporte de N. Para tanto, são utilizados alguns índices, como o índice de resposta (RI - JOHNSON; RAUN, 2003) e o índice de suficiência (SI - PETERSON et al., 1993). Mullen et al. (2003) e Raun et al. (2005b) afirmam que tais índices podem ser usados para estimar o incremento na produtividade da cultura quando da fertilização com N.

Algumas variações dessa estratégia foram desenvolvidas e vêm sendo utilizadas principalmente nos Estados Unidos e Europa (DESTA et al., 2012; ROBERTS et al., 2011). Dentre essas variações, destaca-se a faixa de calibração em rampa (RAUN et al., 2008; SHAVER et al., 2011). Nessa metodologia, ao invés de se aplicar apenas uma dose de N na área de referência (geralmente uma faixa ao longo da lavoura), aplica-se várias doses crescentes de N, buscando inferir qual a melhor dose para ser utilizada no restante da área.

Entretanto, para a adoção, tanto da FRN quanto da faixa de calibração em rampa, se faz necessário a seleção criteriosa da porção da lavoura onde será implantada tal área de referência. Kitchen et al. (2010) apontam que a área usada como referência deve representar o restante da lavoura. No entanto, essa prática apresenta o inconveniente de ter sua efetividade comprometida em função do desenvolvimento inadequado da cultura ao longo da lavoura, ou então, devido a variações no solo (BAUSCH; BRODAHL, 2011), resultando em baixa repetibilidade das estimativas dentro de uma mesma área (ROBERTS et al., 2010).

Assim, outras formas de utilização do sensor de dossel vêm sendo avaliadas para direcionar a fertilização nitrogenada. Uma delas é o conceito de modelagem da demanda do N pela cultura, levando em conta alguns parâmetros de planta, solo e uso de fertilizantes (HOLLAND; SCHEPERS, 2010; SOLIE et al., 2012).

No entanto, tais estratégias foram desenvolvidas para direcionar a aplicação de N nas culturas de trigo e milho, as quais apresentam características diferentes da cultura da cana-de-açúcar. Os trabalhos que utilizaram sensores de dossel em cana demonstraram que este equipamento apresenta eficiência em diferenciar doses de N (AMARAL; MOLIN, 2011; INAMASU et al., 2006; MOLIN et al., 2010), em estimar biomassa e extração de N pela planta (PORTZ et al., 2011) e em se relacionar com a produtividade (AMARAL; MOLIN, 2011; LOFTON et al., 2012). No entanto, nenhum destes trabalhos desenvolveu ou avaliou uma metodologia de utilização do dado de refletância obtido pelo sensor de dossel para direcionar a aplicação de N em cana-de-açúcar.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo analisar algumas metodologias propostas inicialmente para as culturas de milho e trigo, para direcionar a aplicação de N em taxas variáveis com base nas leituras obtidas com sensores de dossel, assim como estabelecer uma forma de uso específica para a cultura da cana-de-açúcar.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Sensor de dossel

O sensor de dossel utilizado foi o Crop Circle, modelo ACS-430 (*Holland Scientific, Lincoln, NE, EUA*). Esse sensor capta a refletância do alvo através de dois fotodetectores, um na região do espectro eletromagnético centrada no infravermelho próximo (IVP, 780 nm), e outro na região de transição entre vermelho e infravermelho próximo, chamado de red edge

(730 nm). Com a refletância dessas duas bandas, calculou-se o NDRE (*chamado de reNDVI no Capítulo 1*) (Eq. 4.1).

$$NDRE = \frac{(IVP - RedEdge)}{(IVP + RedEdge)} \quad (4.1)$$

onde: *NDRE* - índice de vegetação da diferença normalizada pelo red edge; *IVP* - refletância na banda do infravermelho próximo (780 nm); *RedEdge* - refletância na região do red edge (730 nm).

4.2.2 Avaliação de metodologias para direcionar a aplicação de N

4.2.2.1 Áreas experimentais e avaliação com o sensor de dossel

Experimentos em forma de faixas de cana-de-açúcar foram instalados em doze canaviais comerciais na região de Ribeirão Preto, SP, abrangendo diferentes condições de cultivo em um raio de 50 km de distância (Tabela 4.1). Os experimentos foram instalados em blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada faixa (unidade experimental) possuía o comprimento do talhão em estudo, sendo que uma fileira de cada lado foi considerada bordadura.

As áreas foram divididas em dois grupos, "Áreas com Doses de N" e "Áreas com Faixa Rica em N". O primeiro grupo era constituído por quatro tratamentos, representados por três doses de N (25, 50 e 100 kg ha⁻¹ de N) e mais um tratamento controle sem aplicação de N, ao longo de faixas compostas por nove fileiras de cana. O segundo grupo era composto por dois tratamentos, um com aplicação de N em quantidade suficiente para o pleno desenvolvimento da cultura (200 kg ha⁻¹ de N), sendo este denominado "Faixa Rica em N" (FRN - JOHNSON; RAUN, 2003; MULLEN et al., 2003; RAUN et al., 2005b), e outro tratamento sem aplicação de N (SAN). Neste último grupo as faixas eram compostas por 18 fileiras de cana.

Independente do grupo de experimentos, as doses de N foram aplicadas na forma de nitrato de amônio (31:00:00), logo após o corte da cana-de-açúcar, com a máquina adubadora pneumática Uniport 3000 NPK (Máquinas Agrícolas Jacto S/A, Pompéia, SP, Brasil), sobre a palhada remanescente da colheita.

Antes da implantação dos experimentos, as áreas vinham sendo conduzidas de forma convencional pela usina, com aplicação de adubo formulado e/ou aplicação de vinhaça e composto orgânico enriquecido (torta de filtro). Apenas durante a condução dos experimentos

foi alterado o manejo, cessando a aplicação de qualquer produto com propriedades fertilizante que pudesse introduzir N ao solo. Dessa forma, o fornecimento de potássio foi realizado por meio da aplicação de cloreto de potássio, com eventual aplicação de calcário e gesso, seguindo a necessidade de cada área. Os demais tratos culturais seguiram o padrão adotado pela usina.

Tabela 4.1 – Características das áreas experimentais e época das avaliações com o sensor de dossel

Área	Variedade	Solo ⁽¹⁾	Corte ⁽²⁾	Colheita anterior	Avaliações (DAC) ⁽³⁾	Comprimento das faixas	Grupo de experimentos ⁽⁴⁾
PA	RB855453	LV	2°	Maio 2009	116	400 m	Áreas com doses de N
AS	RB855453	LV	4°	Jun. 2009	109	500 m	
CA	CTC2	RQ	2°	Out. 2009	91	900 m	
CB	CTC2	LVA	3°	Out. 2009	84	800 m	
NJ	RB855156	LV	3°	Maio 2010	183	380 m	
RO	RB855453	PV	3°	Jul. 2010	140	400 m	Áreas com faixa rica em N
AP	CTC2	LVA	4°	Set. 2011	88	650 m	
VE	RB867515	LV	4°	Out. 2011	80	730 m	
SE	CTC7	LV	2°	Ago. 2012	92	800 m	
CC	CTC2	RQ	2°	Set. 2012	85	650 m	
BA	CTC20	LV	2°	Nov. 2012	79	700 m	
SI	CTC2	LVA	2°	Nov. 2012	68	400 m	

⁽¹⁾ Classificação dos solos de acordo com EMBRAPA (2006)

⁽²⁾ Número de cortes (colheitas) realizados, contando com a colheita dos experimentos

⁽³⁾ Número de dias após o corte em que foram realizadas as avaliações com o sensor de dossel

⁽⁴⁾ As áreas experimentais foram divididas em dois grupos, de acordo com os tratamentos empregados

As mensurações com o sensor de dossel foram realizadas quando as plantas apresentavam altura média de colmos de 0,5 m (AMARAL; MOLIN, 2014; AMARAL et al., 2012; PORTZ et al., 2012). O sensor de dossel foi acoplado à barra de aplicação da máquina Uniport 3000 NPK e mantido a uma distância média de 1,0 m do dossel das plantas. A máquina se deslocava a uma velocidade de 4,5 m s⁻¹ (16 km h⁻¹), com o sensor conectado a um sistema de posicionamento por satélite (GNSS), registrando a localização e o valor de NDRE na frequência de 1,0 Hz (1 dado s⁻¹).

4.2.2.2 Análise dos dados

Os dados do sensor, para cada faixa separadamente, foram tratados em planilha eletrônica (Microsoft Excel). Por meio de histogramas, os limites inferiores e superiores foram avaliados, excluindo-se os valores que se diferenciaram do comportamento geral do conjunto dados.

Os dados do grupo de “Áreas com Doses de N” foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com as leituras do sensor em cada tratamento sendo exploradas por meio de diagramas de caixa (box-plot). Já, os dados oriundas do grupo de “Áreas com Faixa Rica em N”, tiveram sua distribuição avaliada por meio de histogramas, separadamente para cada tratamento.

Ainda, os dados dos dois grupos foram utilizados para identificar quanto o valor médio de NDRE obtido nas faixas ricas em N representam na distribuição acumulada de áreas não fertilizadas. Para tanto, as faixas com maior quantidade de N aplicado no grupo de “Áreas com Doses de N” foram utilizadas como FRN (100 kg ha^{-1}). Posteriormente, analisou-se a distribuição acumulada das leituras do sensor nas faixas sem aplicação de N (SAN), individualmente para cada faixa, encontrando-se quanto o valor médio das FRNs representariam na distribuição acumulada das SANs.

4.2.3 Definição de uma metodologia para direcionar a aplicação de N

Com a finalidade de desenvolver uma metodologia que possa direcionar a aplicação de N por meio das leituras com o sensor de dossel, utilizou-se dados de 12 experimentos em parcelas submetidas a doses de N (Tabela 4.2). Os experimentos foram instalados em blocos ao acaso com quatro repetições, sendo que o tamanho das parcelas variou de 10 a 15 m de comprimento, por 5 a 6 fileiras de cana, espaçadas 1,5 m. Buscando reduzir o erro experimental na operação de colheita dos experimentos, calculou-se a média das leituras do sensor de dossel e da produtividade de colmos para cada tratamento (doses de N). Os dados médios foram então normalizados pela média de cada área (Anexo G). Essa normalização permitiu que os dados das diversas áreas (tratamentos, solos e variedades diferentes) fossem submetidos a uma única análise de regressão, focando a obtenção de um modelo geral para prever a produtividade da cana a partir de leituras com o sensor de dossel.

Os modelos testados para tal finalidade foram linear, exponencial, logarítmico e sigmoide. O escolhido foi aquele que obteve maior coeficiente de determinação ajustado (R^2)

e menor erro padrão da estimativa (EPE). Todos os gráficos e regressões foram desenvolvidos no software SigmaPlot® (SPSS Inc., Chicago, IL, EUA).

Tabela 4.2 – Características das áreas experimentais, datas de colheita e avaliações

Área	Variedades	Solo ⁽¹⁾	Corte ⁽²⁾	Colheita anterior	Avaliações (DAC) ⁽³⁾	Colheita	Tratamentos
PA	RB855453	LV	segundo	Maio 2009	116	Jun. 2010	50, 100, 150 e 200 kg ha ⁻¹ de N + controle (sem N)
AS	RB855453	LV	quarto	Jun. 2009	109	Jun. 2010	
CA	CTC2	RQ	segundo	Out. 2009	91	Out. 2010	
CB	CTC2	LVA	terceiro	Out. 2009	84	Out. 2010	
NJ	RB855156	LV	terceiro	Maio 2010	183	Jun. 2011	
RO	RB855453	PV	terceiro	Jul. 2010	140	Jun. 2011	
AP	CTC2	LVA	quarto	Set. 2011	88	Ago. 2012	60, 120, 180 e 240 kg ha ⁻¹ de N + controle (sem N)
VE	RB867515	LV	quarto	Out. 2011	80	Jul. 2012	
PI	SP81-3250, IAC87-3396, CTC14	PVA	segundo	Jul. 2011	152	Out. 2012	50, 100 e 150 kg ha ⁻¹ de N + controle (sem N)
JÁ	SP81-3250, IACSP95-5000, RB85-5536	LV	terceiro	Out. 2012	76	Ago. 2013	
CC	CTC2	RQ	segundo	Out. 2012	85	Set. 2013	60, 120 e 180 kg ha ⁻¹ de N + controle (sem N)
SI	CTC2	LVA	terceiro	Nov. 2012	68	Set. 2013	

⁽¹⁾ Classificação dos solos de acordo com EMBRAPA (2006)

⁽²⁾ Número de cortes (colheitas) realizados, contando com a colheita dos experimentos

⁽³⁾ Número de dias após o corte em que foram realizadas as avaliações

4.3 Resultados

4.3.1 Variabilidade intrínseca das áreas *versus* doses de N

No grupo de “Áreas com Doses de N”, foi possível identificar diferença consistente entre os tratamentos apenas em uma área (RO) (Figura 4.1). Nas demais, verificou-se que a variabilidade identificada pelo sensor de dossel é função da localização das faixas dentro dos talhões. Sendo assim, a variabilidade causada pela brotação e desenvolvimento diferenciado da cultura ao longo das fileiras é muito maior do que uma possível resposta ao N aplicado.

Figura 4.1 – Diagrama de caixa (box-plot) para as leituras com o sensor de dossel (NDRE), em seus respectivos tratamentos (25, 50 e 100 kg ha⁻¹ de N + controle) e blocos (repetições A, B, C e D), nas seis áreas experimentais (PD, AS, CA, CB, NJ e RO). Os diagramas estão plotados de acordo com a sequência de instalação das faixas em campo, ou seja, de acordo com a sequência de entrada da máquina no canavial (indicado pela seta na parte superior da figura)

Nota: ANOVA indica a análise de variância dos tratamentos em cada área experimental; “Regressão linear” indica a significância da análise de regressão para os tratamentos quando a ANOVA foi significativa ($p < 0,05$). As linhas tracejadas na vertical indicam a separação dos blocos

As leituras do sensor de dossel variaram conforme a passada da máquina (Figura 4.1). Esse efeito fica claro, por exemplo, nas áreas PD e AS, onde a variação nas leituras com o sensor nada tem a ver com as doses de N, mas sim com certo padrão de desenvolvimento da cana conforme a sequência de deslocamento de máquinas em passadas paralelas. Tal variabilidade pode ser atribuída, em sua maioria, a danos na soqueira durante a colheita.

4.3.2 Avaliação de metodologias

4.3.2.1 Metodologia da Faixa Rica em N

Avaliando-se a resposta da cultura no grupo de “Áreas com FRN”, observou-se que, com exceção da área AP, todas as demais mostraram resposta da cultura ao N aplicado (Figura 4.2). Na área SE, apenas as plantas com maior desenvolvimento responderam ao N ($NDRE > 0,3$). Isso é constatado pela maior frequência de ocorrência de valores altos de NDRE na FRN do que em comparação a SAN, sendo que, por outro lado, as regiões com valores menores de NDRE não tiveram sua distribuição alterada.

No entanto, quando analisado cada bloco separadamente, verificou-se alta variação de resposta (Anexo F). Através desse comportamento infere-se que a instalação de apenas uma (ou poucas) área de referência não é suficiente para extrapolar a resposta da cana ao N para todo o canavial. Roberts et al. (2010) também verificaram baixa repetibilidade dos resultados ao comparar várias FRNs com SANs ao longo de lavouras de trigo.

Ainda, em cana-de-açúcar era esperada essa resposta altamente variável ao N aplicado em faixas, devido à alta variabilidade intrínseca de cada área, o que tende a mascarar o efeito das adubações. Tal variabilidade na resposta a esse nutriente tende a ser potencializada devido à disponibilização de N a partir de outras fontes (CANTARELLA et al., 2007), como a mineralização de N pela matéria orgânica e a fixação por microrganismos no solo (BODDEY et al., 2003; FRANCO et al., 2011; SCHULTZ et al., 2012).

Figura 4.2 – Histogramas mostrando a frequência relativa das distribuições das leituras com o sensor de dossel (NDRE) nas faixas ricas em N e nas faixas que não receberam aplicação de N, nas seis áreas experimentais (AP, VE, SE, CC, BA e SI)

4.3.2.2 Metodologia da Faixa Virtual

O conceito de faixa virtual proposto por Holland e Schepers (2011, 2013) para a cultura do milho, assume que o valor médio das leituras com um sensor de dossel em uma FRN seja geralmente equivalente ao valor de NDRE que representa 95% da distribuição acumulada de uma população de plantas que não tenha recebido N (SCHEPERS, 2013³). Esse conceito é baseado na disponibilidade extremamente variável desse elemento a curtas distâncias, fazendo com que sejam encontradas porções das lavouras com disponibilidade suficiente para a cultura. Assim, o valor acumulado de 95% é usado como referência para o cálculo do índice de suficiência (SI - VARVEL et al., 1997).

A partir do SI, Holland e Schepers (2010) desenvolveram uma modelagem do desenvolvimento da cultura, agregando parâmetros de disponibilidade de N no solo e da extração pela cultura. Com isso, possibilitaram as aplicações em taxas variáveis seguindo uma resposta teórica da cultura. Esses mesmos autores apontam que tal metodologia se mostra mais eficiente, em termos práticos, do que a da FRN (RAUN et al., 2002), já que dispensa a implantação de áreas de referência ao longo das lavouras. Kitchen et al. (2010) afirmam que a estratégia da FRN apresenta o inconveniente de ser preciso instalar as faixas em um local diferente para cada safra, já que elas precisam representar o padrão encontrado em todo o restante da lavoura.

Entretanto, como a resposta da cana-de-açúcar ao N se mostrou inconsistente (Figura 4.1 e Anexo F), a adoção dessa metodologia é dificultada. O impedimento para tal prática é devido ao fato de que raramente o valor médio das leituras do sensor, obtidas em uma FRN, é similar à distribuição acumulada da SAN (Figura 4.3). Ainda, devido à intensa variabilidade dos canaviais, é encontrada grande alteração, dentro da mesma área (entre os blocos), da proporção entre valor médio da FRN e do valor de 95% da SAN (Anexo F). Tal resultado é oposto ao verificado por Holland e Schepers (2013), os quais notaram consistente resposta do milho cultivado nas condições norte-americanas ao N aplicado em faixas de referência.

³ SCHEPERS, James. Informação fornecida pessoalmente durante o período do doutorado sanduiche na University of Nebraska, no primeiro semestre de 2013.

Figura 4.3 – Proporção equivalente a quanto o valor médio obtido pelo sensor de dossel (NDRE) na faixa rica em N (FRN) representa na distribuição acumulada da faixa que não recebeu N (SAN) nas 12 áreas experimentais. Acima de 50% representa resposta da cultura ao N; abaixo de 50% indica efeito deletério da fertilização

4.3.3 Algoritmo de fertilização: direcionamento do N pela estimativa de produtividade

Devido à variação no tipo de solo e disponibilidade hídrica de cada área, aliada ao potencial produtivo diferenciado de cada variedade, a produtividade obtida em cada experimento instalado em parcelas foi completamente distinta (Anexo G). Similarmente, as leituras obtidas pelo sensor também foram variáveis, em função do porte das plantas no momento da avaliação. Dessa forma, uma das opções de se analisar os dados de diferentes áreas em conjunto é a normalização dos dados.

Uma das formas de se proceder é através do cálculo do índice de suficiência (SI - VARVEL et al., 1997). Esse tipo de normalização exige a utilização de um valor de referência, normalmente oriundo de uma FRN ou similar. No entanto, ficou provado no presente estudo que o estabelecimento eficiente de áreas de referência é dificultado na cultura da cana-de-açúcar, devido à variabilidade intrínseca dos canaviais.

Dessa forma, a normalização dos dados pela média é uma opção. Usando-se dessa técnica, verificou-se que a informação obtida pelo sensor de dossel foi eficiente em prever a produtividade normalizada da cana (Figura 4.4). O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o linear, o que resultou em um erro padrão da estimativa da ordem de 4,1%.

A qualidade do ajuste desse modelo é inferior ao normalmente observado para as culturas de trigo e milho que, embora variável, frequentemente apresentam R^2 superior a 0,5 (INMAN et al., 2005; POVH et al., 2008; RAUN et al., 2001; SHIRATSUCHI et al., 2010; SOLARI et al., 2008; SOLIE et al., 2012; TEAL et al., 2006). No entanto, é preciso considerar que após a avaliação com o sensor, a cana-de-açúcar fica em desenvolvimento no campo por, pelos menos, mais 200 dias. Assim, o sensor identifica a biomassa presente no momento da avaliação, mas a produção de colmos é suscetível à influência de vários fatores durante todo o restante do ciclo. Sandhu et al. (2012) apontam que quanto mais tarde no ciclo é avaliada a biomassa da cana, mais exata é a estimativa da produtividade.

Figura 4.4 – Modelo linear para a predição da produtividade normalizada com base nos valores de NDRE normalizado obtido pelo sensor de dossel ($p < 0,001$)

Nota: As áreas PI e JA foram cultivadas com três variedades cada. Em PI, as variedades foram CTC14, IAC87-3396 e SP81-3250, representadas, respectivamente, pelos símbolos PI-I, PI-II e PI-III. Em JA, as variedades foram IACSP95-5000, RB85-5536 e SP81-3250, representadas, respectivamente, pelos símbolos JA-I, JA-II e JA-III

Partindo-se do pressuposto básico de que a demanda por qualquer nutriente deve ser tanto maior quanto for a produtividade da cultura, ainda mais quando tal produção está relacionada ao acúmulo de biomassa, a aplicação de N pode ser estabelecida em função de uma estimativa de produtividade. Assim, propõe-se uma metodologia para direcionar a aplicação de N com base na variabilidade da cultura, a qual pode ser dividida em duas etapas básicas: estimativa da produtividade e definição da dose de N.

4.3.4.1 Estimativa da produtividade

O algoritmo agrônomo de fertilização aqui proposto é baseado na capacidade do sensor em prever a produtividade da cana (Figura 4.4). Mas, como o modelo de previsão foi construído a partir de dados normalizados, é preciso que primeiramente seja definido o valor médio do NDRE obtido pelo sensor de dossel na área a ser fertilizada. Para tanto, há três possibilidades. A primeira é viável quando a fertilização é feita através de mapas de aplicação, enquanto as duas outras podem ser utilizadas quando se realiza a aplicação de fertilizantes em taxas variáveis e em tempo real.

Para a primeira opção, é realizada uma leitura prévia da área com o sensor de dossel. Os dados são importados em um *software* para tratamento, análise e preparação do mapa de aplicação. Esse mapa é então utilizado pelo controlador para taxa variável da máquina adubadora, o qual controla as doses aplicadas em cada porção do canavial. Dessa forma, o valor médio de NDRE pode ser obtido através de simples análise dos dados da leitura prévia com o sensor.

A segunda forma é realizar algumas passadas com o sensor ao longo do canavial, mas sem aplicação de fertilizante. Para tanto, preconiza-se conduzir a máquina em faixas representativas do restante da área (áreas com alto e baixo desenvolvimento da cultura), com a finalidade de captar a variabilidade presente no canavial. Assim, se calcula o valor médio de NDRE a partir dessas leituras.

A terceira opção é calcular o valor médio de NDRE conforme a máquina se desloca no canavial realizando a aplicação. Utilizando essa alternativa, o valor médio de NDRE seria calculado constantemente, ajustando os parâmetros do algoritmo. No entanto, essa estratégia causa grande erro na dosagem durante o início da operação ou enquanto não foi captada a variabilidade existente na área (HOLLAND; SCHEPERS, 2013).

Independente da forma de obtenção do valor médio de NDRE, esse valor possibilita o cálculo do NDRE normalizado (Eq. 4.2), o qual é incluído na equação para determinação da produtividade normalizada (Figura 4.4, Eq. 4.3).

$$NDRE\% = \frac{NDRE_{pt}}{NDRE_{md}} \quad (4.2)$$

onde: $NDRE\%$ – indica o valor de NDRE normalizado para cada leitura do sensor de dossel; $NDRE_{pt}$ – é o valor de NDRE obtido em cada leitura do sensor de dossel; $NDRE_{md}$ – é o valor de NDRE médio levantado para o canavial.

$$Prod\% = 0,459 + NDRE\% * 0,541 \quad (4.3)$$

onde: $Prod\%$ - indica a produtividade normalizada pela média; $NDRE\%$ - indica o valor de NDRE obtido pelo sensor de dossel e normalizado pela média.

Para converter a produtividade normalizada em produtividade absoluta, é preciso que seja feita uma estimativa de produtividade média para o canavial a ser fertilizado. Para tanto, existem algumas modelagens disponíveis na literatura (BOOTE et al., 1996; SUGAWARA, 2010), mas a forma mais simples é a partir da colheita da safra anterior. Os produtores de cana tem a informação de quanto cada canavial produziu na safra anterior. Esse valor pode ser ajustado para mais, por exemplo, quando as condições climáticas do ano anterior foram problemáticas, ou ajustado para menos, levando em conta uma queda na produtividade natural dos canaviais ao longo do ciclo (VITTI et al., 2007). Centro de Tecnologia Canavieira (CTC, 2012) e Orlando Filho e Rodella (1999) mostraram que essa redução da produtividade pode ser de 5 a 30%. Assim, ter-se-á um valor de produtividade absoluta estimada para cada leitura obtida pelo sensor de dossel (Eq. 4.4).

$$Prod_{pt} = Prod\% * Pest \quad (4.4)$$

onde: $Prod_{pt}$ – expressa em $t\ ha^{-1}$, representa a produtividade estimada para cada ponto onde foi obtida a leitura com o sensor de dossel; $Prod\%$ – indica a produtividade normalizada pela média em cada ponto; $Pest$ – expressa em $t\ ha^{-1}$, é a produtividade média esperada para o canavial em questão.

4.3.4.2 Definição da dose de N

Para cada ponto onde se obteve uma estimativa de produtividade com base na leitura do sensor de dossel (Eq. 4.4), é então atribuída uma dose de N a ser aplicada. Para tanto, é preciso definir qual a demanda da cana-de-açúcar para produzir a quantidade de colmos estimada pelo sensor.

Esta definição da exigência da cultura é um desafio, já que frequentemente são observadas discrepâncias no balanço entre o N aplicado e o N absorvido pela cana-de-açúcar, assim como mostram diversos estudos apresentados por Cantarella et al. (2007) e Franco et al. (2011). Cantarella et al. (2007) afirmam que a demanda da cultura por N, para produção de colmos, raízes e folhas, está em torno de 2 kg t^{-1} de matéria verde, sendo que a produtividade média dos canaviais, incluindo os colmos industrializáveis, as folhas secas e os ponteiros, tem oscilado em torno de 100 toneladas de matéria natural por hectare (OLIVEIRA et al., 2007). Isso resultaria, em média, na aplicação de 200 kg ha^{-1} de N. No entanto, como a cana-de-açúcar tem capacidade de absorver esse nutriente em profundidade, devido ao seu vigoroso sistema radicular, assim como extrair N de outras fontes (BODDEY et al., 2003; SCHULTZ et al., 2012), a dose de N frequentemente recomendada é inferior.

Raij e Cantarella (1997) recomendam, para a cana-soca, a aplicação de 60 a 120 kg ha^{-1} de N, de acordo com a produtividade esperada, resultando em cerca de 1,0 a $1,2 \text{ kg t}^{-1}$ de N. Similarmente, Vitti e Mazza (2002) sugerem que a aplicação de N em cana soca deva estar, em função da produtividade esperada, entre 80 e 120 kg ha^{-1} , apresentando o mesmo intervalo de doses (em kg t^{-1} de N) proposto por Raij e Cantarella (1997). Oliveira et al. (2007), em amplo trabalho sobre nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar, recomendam que a dose de N a ser aplicada deve ser de $1,25 \text{ kg t}^{-1}$ de colmos produzidos. Ainda, Vitti e Rodella (2008) apontam que em cana-crua, a dosagem de N deve ser um pouco maior, devido à retenção inicial desse elemento pela palhada, recomendando $1,3 \text{ kg t}^{-1}$ de N. De forma semelhante, o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC⁴) recomenda a dose padrão de 100 kg ha^{-1} de N, independente da produtividade. Entretanto, assumindo a produtividade média dos canaviais de 75 t ha^{-1} (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013), a dose de N também seria equivalente a $1,3 \text{ kg t}^{-1}$ de N. Dessa forma, a dose selecionada pelo presente algoritmo de fertilização é de $1,3 \text{ kg t}^{-1}$ de N, sendo que esta recomendação poderia ser alterada conforme a necessidade.

⁴ Recomendações de correção e adubação para a cana-de-açúcar. Boletim interno para cooperados.

Ademais, a fertilização com N é usualmente realizada logo após o corte da cana. No entanto, para propiciar boa efetividade do sensor de dossel, é preciso aguardar até que a cultura atinja 0,4-0,7 m de altura para que haja biomassa suficiente para a leitura (AMARAL; MOLIN, 2014; PORTZ et al., 2012). Dessa forma, pode-se realizar o parcelamento da adubação nitrogenada, sendo que a dose fornecida inicialmente seria descontada da total recomendada com base na estimativa de produtividade efetuada pelo sensor. No entanto, há relutância dos produtores de cana em realizar parcelamento nas adubações. Rossetto e Dias (2005) afirmam que o parcelamento de N não é prática comumente observada, pois representa operação adicional, o que dificulta o gerenciamento em grandes áreas, e tem seu custo. Esses autores comentam que, além disso, há controvérsias quanto ao resultado do parcelamento.

Assim, a forma de utilização do sensor de dossel para direcionar a aplicação de N, que tende a sofrer menor resistência dos produtores, é aguardar que a cana atinja o porte mínimo recomendado (0,4 m), para então realizar a aplicação da dose total. Entretanto, nesse estágio de desenvolvimento, a cultura já terá absorvido certa quantidade de N do solo. Assim, é interessante subtrair esse montante da dose que será aplicada. Nesse sentido, Oliveira (2011) encontrou que a extração de N pela cana-soca no período em que há biomassa suficiente para ser avaliada pelo sensor (geralmente entre novembro e janeiro, dependendo da época de corte e das condições climáticas), já atingiu de 30% a 60% do total demandando pela cana-de-açúcar. Assim, assumindo-se uma margem de segurança, pode-se reduzir 30% da dose total de N a ser aplicado, já que o solo atuou como a principal fonte até esse período.

Destaca-se que a dose a ser aplicada por tonelada de cana produzida, assim como a redução de 30% na dose, em função do N já absorvido no momento da avaliação com o sensor, podem ser alterados de acordo com a experiência dos produtores, as recomendações de consultores e pesquisadores e/ou com o objetivo de otimizar os lucros em função da razão preço do fertilizante *versus* preço pago pela cana.

4.3.4.3 Definição do algoritmo

Assumindo a relação entre produtividade e leitura do sensor de dossel, ambos normalizados pela média (Figura 4.4), foi definido um algoritmo de fertilização que possibilita direcionar a aplicação de N em cana-de-açúcar com base na variabilidade da cultura em cada área (Eq. 4.5).

$$Nap = \left[0,459 + \left(\frac{NDRE_{pt}}{NDRE_{md}} \right) * 0,541 \right] * Pest * Nkt * \left(1 - \frac{Nex}{100} \right) \quad (4.5)$$

onde: Nap – expressa em kg ha^{-1} , representa a dose de N recomendada para cada leitura do sensor de dossel a partir da estimativa da produtividade e a demanda por N; $NDRE_{pt}$ – é o valor de NDRE obtido em cada leitura do sensor de dossel; $NDRE_{md}$ – é o valor de NDRE médio levantado para o canavial; $Pest$ – expressa em t ha^{-1} , é a produtividade média esperada para o canavial em questão; Nkt – expresso em kg t^{-1} , é a quantidade de N recomendado para cada tonelada de colmos produzida, sendo adotado como $1,3 \text{ kg t}^{-1}$; Nex – expresso em porcentagem (%), é a porcentagem de N já acumulada pela cultura em relação ao total de N demandado para todo o ciclo da cultura, sendo adotado como 30%.

4.4 Discussão

Os experimentos em faixas de cana-de-açúcar mostraram respostas altamente variáveis ao N aplicado, o que é explicado pela intensa variabilidade intrínseca dos canaviais, a qual é resultado dos danos à soqueira ao longo dos ciclos da cultura. Tais danos prejudicam a brotação da cana, influenciando diretamente o perfilhamento e o desenvolvimento da parte aérea das plantas, o que, conseqüentemente, altera o acúmulo da biomassa e reduz a expressão da resposta ao N mensurado por sensores de dossel.

Além dessa variabilidade causada pelo desenvolvimento desuniforme da cultura, respostas significativas ao N aplicado são pouco frequentes, uma vez que em lavouras comerciais, vários fatores podem limitar o desenvolvimento da cultura e, portanto, mascarar o efeito do N. Dentre esses fatores, pode-se citar o déficit hídrico, a compactação do solo, o ataque de pragas, dentre outros. Ainda, a cana é eficiente em obter N de outras fontes que não o fertilizante.

Segundo Kitchen et al. (2010), qualquer área de referência (FRN) deve ser instalada em uma porção da lavoura que represente o restante da mesma, exigindo conhecimento prévio da variabilidade existente. Entretanto, tal informação geralmente não está disponível. Uma solução para prever tal variabilidade seria o mapeamento da produtividade. Entretanto, embora haja monitores de produtividade disponíveis no mercado (MAGALHÃES; CERRI, 2007), esses equipamentos ainda carecem de maior desenvolvimento para conseguirem atingir o nível de exatidão querida para tal prática.

Desse modo, a instalação de FRN em canaviais tende a ser problemática, já que o maior causador da variabilidade é a desuniformidade na brotação da cana, o qual é uma variável difícil de ser estimada por não apresentar, necessariamente, agrupamento das ocorrências (dependência espacial).

Para realizar a investigação da variabilidade na brotação da cana-de-açúcar, seria necessário aguardar o início do desenvolvimento das plantas. Com isso, ocorreria um encurtamento do período disponível para a implantação da FRN e a avaliação do restante da lavoura com o sensor para a aplicação de N em taxas variáveis. Isso porque, para que se proceda tal avaliação, é preciso que a cultura tenha tido tempo hábil para responder ao N aplicado na FRN.

Por todas essas razões acima citadas, o uso de faixas ou áreas fertilizadas, para servirem de referência da resposta da cultura ao N, como vem sendo proposto por diversos estudos (DESTA et al., 2012; EDMONDS et al., 2008; JOHNSON; RAUN, 2003; MULLEN et al., 2003; RAUN et al., 2002, 2005a; ROBERTS et al., 2010; SOLARI et al., 2010), não se mostra exequível na maioria das situações de cultivo da cana-de-açúcar.

No entanto, essa quantificação da resposta da cana ao N é fundamental para aumentar a eficiência de seu uso (EUN). Dessa forma, mais estudos precisam ser conduzidos com o objetivo de identificar parâmetros que auxiliem na seleção de áreas de referência, assim como formas alternativas de estimar a resposta da cana ao N.

Uma metodologia de aplicação de N alternativa seria através da modelagem da demanda da cultura, a partir de faixas virtuais, as quais consideram que em toda lavoura há regiões que disponibilizam N do solo em quantidade suficiente para a cultura (HOLLAND; SCHEPERS, 2010, 2013). Entretanto, a imprevisível resposta da cana-de-açúcar inviabiliza também essa proposta.

Como não foi possível identificar uma metodologia capaz de estimar a resposta da cana ao N por meio da instalação ou estabelecimento de faixas de referência, sejam elas reais ou virtuais, acredita-se que uma metodologia que leve em conta a variabilidade no desenvolvimento da cultura é, ao menos por enquanto, uma opção aceitável e promissora. Assim, foi proposto um algoritmo agrônomo de fertilização, o qual apresenta como variáveis principais a estimativa da produtividade através do sensor de dossel e a mensuração da variabilidade no desenvolvimento da cultura, aplicando N nas regiões com maior potencial produtivo.

Esse conceito de aplicar mais N onde a cultura está mais bem desenvolvida (plantas com maior vigor) advém da ideia de que, nas condições atuais de cultivo de cana no Brasil, o baixo desenvolvimento da cultura não é causado por esse nutriente, mas sim por danos à soqueira ou ainda devido à presença de outros fatores limitantes, como água, compactação do solo, ataque de pragas, etc. Logo, de nada adiantaria seguir a linha de pensamento norte-americana e europeia de aplicar mais N onde a cultura apresenta baixo desenvolvimento, uma vez que esse conceito considera que todos os outros fatores de produção estão presentes em quantidade ótima e, portanto, o limitante ao desenvolvimento seria o N (LUKINA et al., 2001; RAUN et al., 2005b; SOLARI et al., 2010; VARVEL et al., 2007).

Sendo assim, embora a aplicação de N com base na produtividade esperada não represente garantia de aumento da EUN, uma vez que não estima a resposta da cultura a esse nutriente, acredita-se que esse aumento na EUN possa ainda assim vir a ocorrer. Isso porque, como se aplica maior quantidade de fertilizante nos locais onde há plantas com maior vigor, há menor chance de outros fatores estarem limitando o desenvolvimento da cultura, o que potencializa o aproveitamento do N pela cana-de-açúcar.

É interessante mencionar que, de acordo com dados obtidos por Oliveira (2011), o período de maior acúmulo de N é concomitante com a época em que a cana apresenta porte suficiente para ser avaliada com o sensor de dossel. Assim sendo, a fertilização nesse período pode aumentar o acúmulo de N ou estender esse período de máxima absorção, podendo resultar em incremento na EUN e, talvez, aumento de produtividade.

4.5 Conclusões

No presente estudo buscou-se desenvolver uma metodologia que permitisse direcionar a aplicação de N em taxas variáveis para a cultura da cana-de-açúcar. Verificou-se que a instalação de áreas de referência que recebam a aplicação antecipada de certa dose de N não apresenta bons resultados, devido à variabilidade existente em cada área, na maioria das vezes ocasionada pela desuniformidade na brotação da cana, a qual apresenta magnitude muitas vezes superior à resposta que a cultura possa vir a apresentar em relação ao N.

Devido a essa dificuldade, foi proposto um algoritmo agrônomo de fertilização que leva em conta a variabilidade existente em cada lavoura para direcionar maior aplicação de N nas regiões com maior potencial produtivo, estimadas pelas leituras do sensor de dossel.

É sabido que essa metodologia não irá, por si só, otimizar a aplicação de N ao máximo, pois diversos fatores influenciam na resposta da cana à esse nutriente, mas espera-se

racionalizar seu uso, aplicando mais fertilizante onde a cultura apresente maior possibilidade de aproveitá-lo.

Referências

AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 1, p. 1633–1642, 2011.

_____. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, n. 1, p. 273–280, 2014.

AMARAL, L.R.; PORTZ, G.; ROSA, H.J.A.; MOLIN, J.P. Use of active crop canopy reflectance sensor for nitrogen sugarcane fertilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianapolis. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2012. 1 CD-ROM.

BAUSCH, W.C.; BRODAHL, M.K. Strategies to evaluate goodness of reference strips for in-season, field scale, irrigated corn nitrogen sufficiency. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 104–122, 2011.

BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; REIS, V. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil**, The Hague, v. 252, p. 139–149, 2003.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704–716, 1996.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375–470.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. p. 355–412.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Censo varietal e de produtividade em 2012**. Piracicaba, 2012. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/downloads/Censo2012.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2013/2014, terceiro levantamento, dezembro de 2013**. Brasília, 2013. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>. Acesso em: 05 fev. 2014.

DESTA, B.; ARNALL, B.; RAUN, B. **The evolution of reference strips in Oklahoma.** Stillwater: Oklahoma State University, Oklahoma Cooperative Extension Service, 2012. Disponível em: <<http://nue.okstate.edu/Brian/PSS-2258web.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2013.

EDMONDS, D.E.; DAFT, M.C.; RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; TAYLOR, R.K. Determining mid-season nitrogen rates with ramp calibration strip technology. **Better Crops**, Atlanta, v. 92, n. 1, p. 16–17, 2008.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, E.C.A.; 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, G.J.D.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. de. Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 689–695, 2005.

HOLLAND, K.H.; SCHEPERS, J.S. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 5, p. 1415–1424, 2010.

_____. Active crop sensor calibration using the virtual-reference concept. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 8., 2011, Praga. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2011. 1 CD-ROM.

_____. Use of a virtual-reference concept to interpret active crop canopy sensor data. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 14, n. 1, p. 71–85, 2013.

INAMASU, R.Y.; SOUSA, R.V.; PORTO, A.J.V.; FORTES, C.; LUCHIARI, A.; SCHEPERS, J.S.; SHANAHAN, J.F.; FRANCIS, D.D. Acesso ao estado nutricional da cana-de-açúcar por meio de sensor ativo de refletância. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; MAYFIELD, T. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. **Sensor Review**, Bingley, v. 25, n. 3, p. 209–214, 2005.

JOHNSON, G.; RAUN, W. Nitrogen response index as a guide to fertilizer management. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 2, p. 249–262, 2003.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T. Is a nitrogen-rich reference needed for canopy sensor-based corn nitrogen applications?. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2010. 1 CD-ROM.

LOFTON, J.; TUBANA, B.S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H.; DALEN, M. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. **Sensors**, New York, v. 12, p. 7529–7547, 2012.

LUKINA, E.; FREEMAN, K.; WYNN, K.; THOMASON, W.; MULLEN, R.; STONE, M.; SOLIE, J.; KLATT, A.; JOHNSON, G.; ELLIOTT, R.; RAUN, W. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 6, p. 885–898, 2001.

MAGALHÃES, P.S.G.; CERRI, D.G.P. Yield monitoring of sugar cane. **Biosystems Engineering**, London, v. 96, n. 1, p. 1-6, 2007.

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**, v. 14, n. 12, p. 1345–1349, 2010.

MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; SOLIE, J.B. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 347–351, 2003.

OLIVEIRA, E.C.A. **Balanço nutricional da cana-de-açúcar relacionado à adubação nitrogenada**. 2011. 213 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OLIVEIRA, M.W.; FREIRE, F.M.; MACEDO, G.A.R.; FERREIRA, J.J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30–43, 2007.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, p. 39–41, 1999.

PETERSON, T.A.; BLACKMER, T.M.; FRANCIS, D.D.; SCHEPERS, J.S. **Using a chlorophyll meter to improve N management**: nebGuide G93–1171-A. Lincoln: University of Nebraska: Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, 1993. Disponível em:
<<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2349&context=extensionhist>>. Acesso em: 17 fev. 2014.

PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 33–44, 2011.

PORTZ, G.; AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Optimun sugarcane growth stage for canopy reflectance sensor to predict biomass and nitrogen uptake. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianapolis, EUA. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2012. 1 CD-ROM.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1075–1083, 2008.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 189-203. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; ZAVODNY, D.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W. Automated calibration strip technology for improved in-season nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 338–342, 2005a.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; TAYLOR, R.K.; ARNALL, D.B.; MACK, C.J.; EDMONDS, D.E. Ramp calibration strip technology for determining midseason nitrogen rates in corn and wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 4, p. 1088–1093, 2008.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 131–138, 2001.

RAUN, W.; SOLIE, J.; STONE, M.; MARTIN, K.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.; JOHNSON, G. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 19/20, p. 2759–2781, 2005b.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; THOMASON, W.E.; LUKINA, E.V. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 815–820, 2002.

ROBERTS, D.C.; BRORSEN, B.W.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R. The effect of parameter uncertainty on whole-field nitrogen recommendations from nitrogen-rich strips and ramped strips in winter wheat. **Agricultural Systems**, Essex, v. 104, n. 4, p. 307–314, 2011.

ROBERTS, D.C.; BRORSEN, B.W.; TAYLOR, R.K.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R. Replicability of nitrogen recommendations from ramped calibration strips in winter wheat. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 12, n. 5, p. 653–665, 2010.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar: indagações e reflexões. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 110, p. 6–11, 2005.

SAMBORSKI, S.M.; TREMBLAY, N.; FALLON, E. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 4, p. 800–816, 2009.

SANDHU, H.S.; GILBERT, R.A.; MCCRAY, J.M.; PERDOMO, R.; EILAND, B.; POWELL, G.; MONTES, G. Relationships among leaf area index, visual growth rating, and sugarcane yield. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, Belle Glade, v. 32, p. 1–14, 2012.

SCHULTZ, N.; MORAIS, R.F. de; SILVA, J.A.; BAPTISTA, R.B.; OLIVEIRA, R.P.; LEITE, J.M.; PEREIRA, W.; CARNEIRO JÚNIOR, J.B.; ALVES, B.J.R.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; REIS, V.M. Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 261–268, 2012.

SHAVER, T.M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 12, p. 892–904, 2011.

SHIRATSUCHI, L.S.; FERGUSON, R.B.; SHANAHAN, J.F.; ADAMCHUK, V.I.; SLATER, G.P. Comparison of spectral indices derived from active crop canopy sensors for assessing nitrogen and water status. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. **Proceedings...** Monticello: ISPA, 2010. 1 CD-ROM.

SOLARI, F. **Developing a crop based strategy for on the go n management in irrigated cornfields**. 2006. 157 p. Thesis (PhD) – Graduate College at the University of Nebraska, Lincoln, 2006.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.F.; FERGUSON, R.B.; ADAMCHUK, V.I. An active sensor algorithm for corn nitrogen recommendations based on a chlorophyll meter algorithm. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 4, p. 1090–1098, 2010.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 571–579, 2008.

SOLIE, J.B.; MONROE, A.D.; RAUN, W R.; STONE, M.L. generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 2, p. 378–387, 2012.

SUGAWARA, L.M. **Variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio de um modelo agrônômico**. 2010. 92 p. Tese (Doutor em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

TEAL, R.K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, W.R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 6, p. 1488–1494, 2006.

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.

VARVEL, G.E.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1233–1239, 1997.

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index.

Agronomy Journal, Madison, v. 99, n. 3, p. 701–706, 2007.

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.

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 19, p. 1–16, 2002.

VITTI, G.C.; RODELLA, A.A. Aspectos práticos da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar. In: MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA E MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DA ADUBAÇÃO NITROGENADA, 2008, Piracicaba. **Apresentação...** Piracicaba: IPNI, 2008. Disponível em:

<[http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/1c678d0ba742019483256e19004af5b8/5937ecca501d48fe032574d4003f986f/\\$FILE/Dr.%20G.%20C.%20Vitti%20e%20Dr.%20A.%20Rodella.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/1c678d0ba742019483256e19004af5b8/5937ecca501d48fe032574d4003f986f/$FILE/Dr.%20G.%20C.%20Vitti%20e%20Dr.%20A.%20Rodella.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2014.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há algumas opções de sensores de dossel disponíveis no mercado brasileiro, e outros sendo desenvolvidos no exterior. Dessa forma, é preciso avaliar a eficácia específica de cada um desses sensores em cana-de-açúcar, já que eles foram desenvolvidos para culturas com características fenotípicas e de cultivo diferentes da cana-de-açúcar.

Os resultados apresentados na presente tese são específicos para o sensor Crop Circle, produzido pela *Holland Scientific* (Lincoln, NE, EUA). Contudo, esse mesmo sensor é também comercializado nacionalmente pelas empresas AgLeader (Ames, IA, EUA) e Jacto (Pompéia, SP, Brasil), com os nomes de OptRX e GS-6200, respectivamente, fazendo com que esses resultados possam ser extrapolados para esses equipamentos. No entanto, sensores de outros fabricantes, como o N-Sensor da Yara (Duelmen, Alemanha) e o GreenSeeker da Trimble (Sunyvale, CA, EUA), apresentam características diferentes e, portanto, a extrapolação dos resultados aqui obtidos deve ser realizada com cautela. O que mais pode influenciar nas leituras com esses diferentes sensores é o campo de visão do equipamento, as bandas espectrais (comprimentos de onda) e a intensidade de emissão de energia eletromagnética com que operam.

Como mostraram as pesquisas anteriores com essa tecnologia, avaliações em estágios iniciais de desenvolvimento da cana-de-açúcar podem prejudicar a eficácia dos sensores em identificar a variabilidade existente nos canaviais. Assim, o período disponível para aplicação de N em taxas variáveis fica restrito a uma pequena janela enquanto a cultura apresenta altura de colmos entre 0,4 e 0,7. A cana atinge essa altura entre os meses de outubro e fevereiro, dependendo da época de corte e das condições climáticas. Logo, essa mudança na janela operacional disponível para fertilização é um dos principais entraves para a adoção dessa tecnologia por produtores de cana. Isso porque a aplicação de N é preferencialmente realizada logo após a colheita, mas, por motivos operacionais, os fertilizantes chegam a ser aplicados até o momento limite para a entrada com veículos agrícolas nos canaviais, a partir do qual, a altura das plantas passa a impedir o tráfego.

Mesmo assim, julga-se que a utilização dessa tecnologia seja eficaz para otimizar a fertilização nitrogenada, uma vez que o N será aplicado no momento de maior demanda pela cultura. Ainda, acredita-se que, na maioria das situações, não ocorrerá deficiência de N até o momento da avaliação com o sensor, em razão da alta fertilidade dos canaviais ocasionado pela aplicação de vinhaça e torta de filtro (composto orgânico), os quais são fontes de N,

aliado à habilidade da cultura em extrair N de diversas fontes no solo. Entretanto, utilizando-se de uma visão conservadora, a qual queira impedir ao máximo tal efeito prejudicial à produção, pode-se realizar a aplicação de pequena dose de N em conjunto com outros insumos utilizados nas fases iniciais. Tal manejo faz sentido, já que a aplicação de N com o auxílio de sensores de dossel demandará uma operação específica para esse nutriente.

O sensor de dossel provou ser uma ferramenta eficaz na caracterização da variabilidade do vigor dos canaviais, sendo que o acúmulo de biomassa pela parte aérea, é o fator que mais influencia as leituras com sensores de refletância do dossel. Isso faz com que a estratégia de uso do sensor para direcionar a aplicação de N seja diferente da observada para milho e trigo.

Foi proposto um algoritmo agrônomo de fertilização para converter as leituras do sensor em uma dose de N a ser aplicada em taxas variáveis. Essa abordagem prioriza a aplicação de maiores doses de fertilizante onde é esperada maior produtividade, assumindo que existe maior chance de a cultura absorver o N aplicado nas regiões com melhor brotação e desenvolvimento de plantas. No entanto, isso não é garantia que a produtividade e/ou a eficiência de uso do N será aumentada, devido à intensa variabilidade de resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada. Logo, mais estudos precisam ser conduzidos para identificar formas de avaliar essa resposta.

APÊNDICES

Apêndice A – Parâmetros biométricos (acúmulo de biomassa da parte aérea, altura de plantas e densidade de perfilhos) e leituras do clorofilômetro nas folhas +1 e +3, mensurados na área ALV

ID ⁽¹⁾	Biomassa da parte aérea (t ha ⁻¹)	Altura (m)	Densidade de plantas (perfilhos m ⁻²)	Clorofilômetro Folha +1	Clorofilômetro Folha +3
1	23,2	0,73	15,2	33,7	32,4
2	22,7	0,60	14,2	39,2	38,6
3	10,8	0,54	12,9	38,1	38,4
4	20,6	0,40	12,3	38,7	37,2
5	14,8	0,42	13,8	38,2	37,0
6	11,1	0,35	9,2	39,7	39,1
7	7,9	0,29	6,8	34,0	32,6
8	4,7	0,33	8,3	36,1	35,7
9	6,1	0,30	8,5	37,4	38,3
10	11,5	0,45	10,3	32,7	39,5
11	28,5	0,61	17,7	37,6	39,3
12	21,0	0,47	16,4	34,3	41,1
13	20,6	0,57	14,9	37,7	37,2
14	17,5	0,48	16,7	35,9	37,6
15	18,7	0,50	15,4	38,1	38,7
16	30,5	0,65	14,8	34,3	37,9
17	19,9	0,40	11,0	38,9	36,5
18	13,1	0,45	10,7	37,8	37,1
19	5,6	0,35	9,3	35,7	36,7
20	3,9	0,31	10,1	38,4	40,3
21	23,8	0,57	15,6	38,2	37,7
22	29,3	0,55	15,5	39,2	39,6
23	15,9	0,48	12,1	38,8	34,6
24	12,4	0,40	10,9	36,1	33,7
25	11,8	0,45	14,1	36,7	35,6
26	8,7	0,38	9,3	39,7	39,6
27	11,7	0,43	8,6	38,8	33,6
28	17,7	0,32	12,0	38,2	34,6
29	4,8	0,25	6,8	36,3	35,2
30	3,9	0,32	7,4	36,2	33,8
Média	15,1	0,45	12,0	37,2	37,0
DP ⁽²⁾	7,81	0,12	3,19	1,91	2,35
CV% ⁽³⁾	51,8	26,6	26,6	5,1	6,4

Nota: nessa área não foi realizada a análise para determinação do teor de N foliar

⁽¹⁾ indica o número identificador da amostra

⁽²⁾ indica o desvio padrão

⁽³⁾ indica o coeficiente de variação, em porcentagem

Apêndice B – Parâmetros biométricos (acúmulo de biomassa da parte aérea, altura de plantas e densidade de perfilhos), leituras do clorofilômetro e teor de N foliar nas folhas +1 e +3, mensurados na área APA

ID ⁽¹⁾	Biomassa da parte aérea (t ha ⁻¹)	Altura (m)	Densidade de plantas (perfilhos m ⁻¹)	Clorofil. ⁽²⁾ Folha +1	Clorofil. Folha +3	Teor de N Folha +1	Teor de N Folha +3
1	27,5	0,64	29,9	46,3	48,3	21,7	24,6
2	31,7	0,63	31,4	46,0	50,0	25,9	22,7
3	32,3	0,70	29,7	43,5	43,2	24,6	26,2
4	24,9	0,42	21,8	43,4	47,4	22,5	20,4
5	32,7	0,71	27,2	45,7	47,4	23,7	24,9
6	29,9	0,67	23,8	39,7	44,8	21,9	23,4
7	25,9	0,69	25,2	42,4	45,0	22,2	24,0
8	25,8	0,50	26,3	42,6	45,4	21,9	22,5
9	14,8	0,37	23,2	42,9	43,9	22,0	21,0
10	23,3	0,73	30,4	46,6	51,4	22,2	21,2
11	32,6	0,68	23,0	41,9	44,7	23,9	21,8
12	29,5	0,65	22,5	41,5	44,0	25,0	23,2
13	28,9	0,52	27,5	43,4	45,5	25,9	21,6
14	25,5	0,60	29,4	46,3	49,4	23,9	28,1
15	24,3	0,57	24,2	44,7	46,5	24,5	24,5
16	21,4	0,38	22,8	42,4	46,0	21,2	24,1
17	24,3	0,50	28,6	41,2	45,5	27,6	21,7
18	19,3	0,57	23,7	41,8	42,7	23,2	22,3
19	14,7	0,56	25,5	43,3	45,9	23,7	27,4
20	24,7	0,57	24,9	44,7	47,1	20,4	22,6
21	25,8	0,64	21,7	42,4	46,4	23,5	24,8
22	28,9	0,64	20,7	42,3	44,6	22,2	29,1
23	23,3	0,64	18,4	41,8	45,6	22,8	23,8
24	28,4	0,75	29,4	42,2	46,7	23,1	23,1
25	19,9	0,61	27,3	44,3	46,4	21,5	21,4
26	19,2	0,72	26,5	43,7	48,3	21,9	23,0
27	19,4	0,57	24,7	45,6	47,5	21,8	22,8
28	21,3	0,63	26,9	41,8	45,3	22,0	22,1
29	13,5	0,47	24,6	45,1	41,1	22,1	22,2
30	22,2	0,44	20,9	43,6	47,5	27,8	25,6
Média	24,5	0,59	25,4	43,4	46,1	23,2	23,5
DP ⁽³⁾	5,29	0,10	3,27	1,76	2,17	1,81	2,12
CV% ⁽⁴⁾	21,6	17,5	12,9	4,1	4,7	7,8	9,0

⁽¹⁾ indica o número identificador da amostra

⁽²⁾ leitura do clorofilômetro na respectiva folha

⁽³⁾ indica o desvio padrão

⁽⁴⁾ indica o coeficiente de variação, em porcentagem

Apêndice C – Parâmetros biométricos (acúmulo de biomassa da parte aérea, altura de plantas e densidade de perfilhos), leituras do clorofilômetro e teor de N foliar nas folhas +1 e +3, mensurados na área ARE

ID ⁽¹⁾	Biomassa da parte aérea (t ha ⁻¹)	Altura (m)	Densidade de plantas (perfilhos m ⁻¹)	Clorofil. ⁽²⁾ Folha +1	Clorofil. Folha +3	Teor de N Folha +1	Teor de N Folha +3
1	34,9	0,92	21,3	38,9	42,5	18,4	16,6
2	19,3	0,82	22,8	39,9	42,0	21,9	17,8
3	23,5	0,78	14,7	40,4	44,4	20,2	20,6
4	22,8	0,66	20,0	41,3	42,0	19,1	20,1
5	22,5	0,66	19,5	39,0	43,0	24,0	25,0
6	16,3	0,64	16,7	37,8	38,5	24,2	21,9
7	22,2	0,72	19,7	41,2	41,5	21,4	22,0
8	19,3	0,63	20,3	38,5	42,4	20,0	22,9
9	21,9	0,58	15,4	39,6	42,9	23,1	21,7
10	14,4	0,71	19,0	38,2	39,4	18,8	18,7
11	10,2	0,63	15,7	38,9	42,3	17,5	21,7
12	13,8	0,62	23,8	38,1	40,0	18,5	15,5
13	13,6	0,65	18,7	38,9	42,4	19,0	18,9
14	13,1	0,65	15,9	38,8	38,1	18,2	20,7
15	13,2	0,51	17,6	39,8	39,2	18,2	22,1
16	10,4	0,70	13,4	39,2	39,7	19,7	16,8
17	10,9	0,49	16,0	40,5	41,5	19,8	27,2
18	11,5	0,40	16,4	38,3	38,9	19,0	20,6
19	15,4	0,62	15,4	39,5	39,2	18,4	17,5
20	10,4	0,53	14,6	35,2	37,0	19,7	18,2
21	10,0	0,51	14,3	37,4	39,9	18,2	19,0
22	5,7	0,40	10,4	39,6	40,4	18,3	18,2
23	6,5	0,68	14,4	39,8	39,1	17,0	18,6
24	3,8	0,34	10,0	38,8	37,4	16,7	21,0
25	11,6	0,50	16,4	38,1	41,6	19,3	26,7
26	9,9	0,40	12,4	40,3	43,3	17,0	19,7
27	5,8	0,52	13,0	39,1	40,6	17,4	22,6
28	5,3	0,58	14,2	39,2	38,2	19,6	27,6
Média	14,2	0,60	16,5	39,1	40,6	19,4	20,7
DP ⁽³⁾	7,03	0,13	3,43	1,23	1,96	1,96	3,14
CV% ⁽⁴⁾	49,5	22,2	20,8	3,1	4,8	10,1	15,2

Nota: dois pontos amostrais foram descartados devido a problemas nas leituras com o sensor de dossel

⁽¹⁾ indica o número identificador da amostra

⁽²⁾ leitura do clorofilômetro na respectiva folha

⁽³⁾ indica o desvio padrão

⁽⁴⁾ indica o coeficiente de variação, em porcentagem

Apêndice D – Parâmetros biométricos (acúmulo de biomassa da parte aérea, altura de plantas e densidade de perfilhos), leituras do clorofilômetro e teor de N foliar nas folhas +1 e +3, mensurados na área AGL

ID ⁽¹⁾	Biomassa da parte aérea (t ha ⁻¹)	Altura (m)	Densidade de plantas (perfilhos m ⁻¹)	Clorofil. ⁽²⁾ Folha +1	Clorofil. Folha +3	Teor de N Folha +1	Teor de N Folha +3
1	46.0	0.96	20.6	37.4	44.1	22.72	22.6
2	41.8	1.02	22.3	37.9	42.4	22.58	21.34
3	46.7	0.87	13.5	39.3	42.4	21.46	23.58
4	36.2	1.01	21.2	39.7	42.2	21.41	23.72
5	28.5	0.73	20.7	40.7	45	22.93	24.23
6	22.4	0.71	19.7	39.7	42.9	27.26	22.64
7	21.0	0.50	13.1	39.5	42.2	22.92	22.81
8	28.8	0.71	18.3	38.3	43	22.93	22.26
9	33.8	0.73	19.5	40.5	43.9	23.13	23.13
10	28.4	0.68	21.4	40.4	44.8	24.53	24.75
11	31.9	0.65	17.8	38.4	42.3	24.54	23.86
12	19.3	0.53	17.9	40.3	46.6	28.8	26.59
13	29.9	0.50	15.1	38.9	45.1	22.79	28.11
14	28.2	0.57	18.6	38	42.3	23.16	21.8
15	21.1	0.72	23.5	38.7	40.1	21.67	20.43
16	9.3	0.40	14.1	39.4	41.2	23.25	25.83
17	10.4	0.43	12.0	41.8	43	22.6	23.87
18	12.5	0.42	14.2	40	42.3	23.51	26.36
19	12.4	0.57	13.7	39.5	43.2	21.98	20.54
20	15.6	0.62	13.5	40.6	42.3	25.23	27.16
21	11.3	0.44	12.3	40.1	41	23.3	22.16
22	6.9	0.43	11.5	38	42.2	24.29	23.25
23	8.1	0.47	12.2	41	41.6	28.87	24.19
24	13.3	0.38	8.6	42.2	41.9	24.12	25.58
25	11.0	0.37	13.5	39.2	43.5	24.01	21.59
26	7.5	0.30	10.1	38	37.3	22.6	16.58
Média	22.4	0.60	16.1	39.5	42.6	23.7	23.4
DP ⁽³⁾	12.2	0.2	4.2	1.2	1.8	2.0	2.4
CV% ⁽⁴⁾	54.4	33.4	25.9	3.1	4.2	8.2	10.4

Nota: quatro pontos amostrais foram descartados devido a problemas nas leituras com o sensor de dossel

⁽¹⁾ indica o número identificador da amostra

⁽²⁾ leitura do clorofilômetro na respectiva folha

⁽³⁾ indica o desvio padrão

⁽⁴⁾ indica o coeficiente de variação, em porcentagem

ANEXOS

Anexo A - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa) e leituras do clorofilômetro nas folhas +1 e +3, na área ALV. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, r), inclinação da regressão linear (inclinação, $slope$), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(continua)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro	
					folha +1	folha +3
670 nm	Correlação	-0,799**	-0,863**	-0,789**	0,009 ^{ns}	-0,235 ^{ns}
	Inclinação	-0,642	-0,622	-0,402	0,025	-0,537
	RMSE	0,080	0,067	0,082	0,133	0,129
	SEq	-8,05	-9,27	-4,93	0,19	-4,17
730 nm	Correlação	0,597**	0,555**	0,552**	0,272 ^{ns}	0,030 ^{ns}
	Inclinação	0,146	0,122	0,086	0,225	0,021
	RMSE	0,032	0,034	0,034	0,039	0,040
	SEq	4,51	3,62	2,54	5,78	0,51
780 nm	Correlação	0,802**	0,840**	0,809**	0,109 ^{ns}	0,211 ^{ns}
	Inclinação	0,529	0,498	0,338	0,242	0,395
	RMSE	0,065	0,059	0,064	0,108	0,107
	SEq	8,12	8,42	5,28	2,24	3,71
vNDVI	Correlação	0,817**	0,870**	0,816**	0,039 ^{ns}	0,221 ^{ns}
	Inclinação	0,992	0,949	0,628	0,159	0,762
	RMSE	0,116	0,099	0,116	0,201	0,196
	SEq	8,56	9,59	5,41	0,79	3,89
reNDVI	Correlação	0,781**	0,843**	0,813**	0,023 ^{ns}	0,237 ^{ns}
	Inclinação	0,836	0,809	0,552	0,084	0,720
	RMSE	0,110	0,095	0,103	0,177	0,172
	SEq	7,58	8,51	5,37	0,48	4,20
visNDVI	Correlação	0,834**	0,889**	0,814**	0,042 ^{ns}	0,227 ^{ns}
	Inclinação	1,191	1,140	0,737	0,204	0,921
	RMSE	0,130	0,108	0,137	0,236	0,230
	SEq	9,14	10,53	5,37	0,87	4,01
vCI	Correlação	0,826**	0,896**	0,816**	0,023 ^{ns}	0,264 ^{ns}
	Inclinação	1,285	1,250	0,804	0,120	1,167
	RMSE	0,145	0,114	0,148	0,257	0,248
	SEq	8,89	10,97	5,43	0,47	4,72
reCI	Correlação	0,788**	0,859**	0,819**	0,022 ^{ns}	0,261 ^{ns}
	Inclinação	0,949	0,928	0,626	0,088	0,892
	RMSE	0,122	0,102	0,114	0,199	0,192
	SEq	7,75	9,11	5,49	0,44	4,64
visCI	Correlação	0,835**	0,895**	0,808**	0,030 ^{ns}	0,242 ^{ns}
	Inclinação	1,344	1,293	0,825	0,165	1,109
	RMSE	0,146	0,119	0,157	0,266	0,258
	SEq	9,19	10,91	5,27	0,62	4,30

Anexo A - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa) e leituras do clorofilômetro nas folhas +1 e +3, na área ALV. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, r), inclinação da regressão linear (inclinação, $slope$), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(conclusão)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro	
					folha +1	folha +3
vISR	Correlação	-0,802**	-0,846**	-0,804**	-0,040 ^{ns}	-0,194 ^{ns}
	Inclinação	-0,906	-0,857	-0,576	-0,154	-0,624
	RMSE	0,112	0,100	0,111	0,186	0,183
	SEq	-8,12	-8,61	-5,20	-0,83	-3,41
reISR	Correlação	-0,775**	-0,829**	-0,807**	-0,023 ^{ns}	-0,220 ^{ns}
	Inclinação	-0,398	-0,382	-0,263	-0,040	-0,320
	RMSE	0,054	0,047	0,050	0,085	0,083
	SEq	-7,42	-8,07	-5,25	-0,47	-3,87
visISR	Correlação	-0,827**	-0,877**	-0,811**	-0,047 ^{ns}	-0,213 ^{ns}
	Inclinação	-0,733	-0,697	-0,455	-0,142	-0,536
	RMSE	0,082	0,070	0,086	0,146	0,143
	SEq	-8,90	-9,92	-5,31	-0,97	-3,75
vYALSI	Correlação	0,823**	0,882**	0,819**	0,034 ^{ns}	0,235 ^{ns}
	Inclinação	1,068	1,027	0,674	0,151	0,868
	RMSE	0,122	0,101	0,123	0,214	0,208
	SEq	8,78	10,17	5,49	0,70	4,17
reYALSI	Correlação	0,783**	0,846**	0,815**	0,023 ^{ns}	0,241 ^{ns}
	Inclinação	0,849	0,823	0,560	0,084	0,742
	RMSE	0,112	0,096	0,104	0,179	0,174
	SEq	7,61	8,60	5,39	0,47	4,27
visYALSI	Correlação	0,835**	0,891**	0,813**	0,040 ^{ns}	0,230 ^{ns}
	Inclinação	1,216	1,164	0,751	0,195	0,952
	RMSE	0,132	0,109	0,140	0,240	0,234
	SEq	9,19	10,66	5,37	0,81	4,07
CCCI	Correlação	-0,754**	-0,764**	-0,636**	-0,120 ^{ns}	-0,108 ^{ns}
	Inclinação	-0,245	-0,223	-0,131	-0,131	-0,099
	RMSE	0,035	0,035	0,041	0,053	0,053
	SEq	-6,95	-6,44	-3,16	-2,47	-1,86
MTCI	Correlação	-0,331 ^{ns}	-0,285 ^{ns}	-0,120 ^{ns}	-0,167 ^{ns}	0,059 ^{ns}
	Inclinação	-0,117	-0,090	-0,027	-0,199	0,059
	RMSE	0,055	0,056	0,058	0,057	0,058
	SEq	-2,13	-1,62	-0,46	-3,47	1,01

Anexo B - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa), leituras do clorofilômetro e do teor de N nas folhas +1 e +3, na área APA. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, r), inclinação da regressão linear (inclinação, $slope$), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(continua)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro		Teor de N	
					folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
670 nm	r	-0,443*	-0,157 ^{ns}	-0,637**	-0,070 ^{ns}	-0,302 ^{ns}	-0,095 ^{ns}	-0,198 ^{ns}
	Inclin. ⁽¹⁾	-0,277	-0,130	-0,341	-0,159	-0,619	-0,125	-0,234
	RMSE	0,079	0,087	0,068	0,088	0,084	0,088	0,086
	SEq	-3,51	-1,50	-5,03	-1,82	-7,38	-1,43	-2,72
730 nm	r	0,333 ^{ns}	-0,072 ^{ns}	0,489**	-0,080 ^{ns}	0,006 ^{ns}	0,079 ^{ns}	0,260 ^{ns}
	Inclin.	0,164	-0,047	0,206	-0,145	0,010	0,083	0,243
	RMSE	0,065	0,069	0,060	0,069	0,069	0,069	0,067
	SEq	2,51	-0,68	3,41	-2,10	0,14	1,20	3,63
780 nm	r	0,437*	-0,008 ^{ns}	0,665**	-0,086 ^{ns}	0,103 ^{ns}	0,132 ^{ns}	0,307 ^{ns}
	Inclin.	0,349	-0,009	0,455	-0,251	0,271	0,224	0,464
	RMSE	0,101	0,112	0,084	0,112	0,112	0,111	0,107
	SEq	3,45	-0,08	5,42	-2,24	2,42	2,01	4,34
vNDVI	r	0,528**	0,091 ^{ns}	0,787**	-0,016 ^{ns}	0,266 ^{ns}	0,159 ^{ns}	0,295 ^{ns}
	Inclin.	0,382	0,087	0,488	-0,042	0,631	0,244	0,405
	RMSE	0,087	0,101	0,063	0,102	0,098	0,101	0,097
	SEq	4,41	0,86	7,76	-0,41	6,43	2,42	4,17
reNDVI	r	0,505**	0,086 ^{ns}	0,791**	-0,079 ^{ns}	0,250 ^{ns}	0,194 ^{ns}	0,297 ^{ns}
	Inclin.	0,353	0,080	0,474	-0,202	0,574	0,288	0,394
	RMSE	0,085	0,098	0,060	0,098	0,095	0,097	0,094
	SEq	4,16	0,81	7,86	-2,06	6,03	2,99	4,19
visNDVI	r	0,524**	0,075 ^{ns}	0,764**	0,013 ^{ns}	0,232 ^{ns}	0,139 ^{ns}	0,296 ^{ns}
	Inclin.	0,500	0,095	0,624	0,045	0,726	0,282	0,535
	RMSE	0,114	0,134	0,087	0,134	0,131	0,133	0,128
	SEq	4,37	0,71	7,20	0,33	5,56	2,12	4,17
vCI	r	0,506**	0,043 ^{ns}	0,763**	-0,033 ^{ns}	0,167 ^{ns}	0,164 ^{ns}	0,309 ^{ns}
	Inclin.	0,661	0,075	0,853	-0,157	0,716	0,456	0,765
	RMSE	0,159	0,184	0,119	0,184	0,181	0,181	0,175
	SEq	4,17	0,41	7,18	-0,85	3,95	2,51	4,37
reCI	r	0,501**	0,075 ^{ns}	0,784**	-0,078 ^{ns}	0,219 ^{ns}	0,192 ^{ns}	0,305 ^{ns}
	Inclin.	0,458	0,091	0,615	-0,262	0,656	0,373	0,529
	RMSE	0,111	0,128	0,080	0,128	0,126	0,126	0,123
	SEq	4,12	0,71	7,70	-2,04	5,23	2,96	4,31
visCI	r	0,510**	0,046 ^{ns}	0,751**	-0,003 ^{ns}	0,180 ^{ns}	0,148 ^{ns}	0,299 ^{ns}
	Inclin.	0,629	0,076	0,794	-0,012	0,727	0,388	0,699
	RMSE	0,149	0,173	0,114	0,174	0,171	0,172	0,166
	SEq	4,21	0,44	6,93	-0,07	4,26	2,26	4,22

Anexo B - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa), leituras do clorofilômetro e do teor de N nas folhas +1 e +3, na área APA. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, r), inclinação da regressão linear (inclinação, $slope$), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(conclusão)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro		Teor de N	
					folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
vISR	r	-0,530**	-0,102 ^{ns}	-0,790**	0,014 ^{ns}	-0,293 ^{ns}	-0,156 ^{ns}	-0,291 ^{ns}
	Inclin.	-0,536	-0,136	-0,683	0,052	-0,969	-0,334	-0,557
	RMSE	0,121	0,141	0,087	0,142	0,136	0,140	0,136
	SEq	-4,44	-0,96	-7,83	0,37	-7,13	-2,38	-4,09
reISR	r	-0,507**	-0,091 ^{ns}	-0,793**	0,080 ^{ns}	-0,268 ^{ns}	-0,195 ^{ns}	-0,293 ^{ns}
	Inclin.	-0,224	-0,054	-0,301	0,129	-0,390	-0,183	-0,246
	RMSE	0,054	0,062	0,038	0,062	0,060	0,061	0,060
	SEq	-4,17	-0,87	-7,91	2,08	-6,48	-2,99	-4,13
visISR	r	-0,529**	-0,088 ^{ns}	-0,768**	-0,019 ^{ns}	-0,257 ^{ns}	-0,133 ^{ns}	-0,292 ^{ns}
	Inclin.	-0,418	-0,093	-0,520	-0,054	-0,666	-0,224	-0,439
	RMSE	0,094	0,111	0,071	0,111	0,108	0,110	0,106
	SEq	-4,43	-0,84	-7,29	-0,49	-6,19	-2,03	-4,12
vYALSI	r	0,522**	0,074 ^{ns}	0,781**	-0,022 ^{ns}	0,230 ^{ns}	0,162 ^{ns}	0,301 ^{ns}
	Inclin.	0,464	0,087	0,594	-0,070	0,670	0,305	0,508
	RMSE	0,107	0,125	0,078	0,125	0,122	0,123	0,119
	SEq	4,34	0,70	7,61	-0,56	5,51	2,47	4,26
reYALSI	r	0,505**	0,084 ^{ns}	0,789**	-0,079 ^{ns}	0,243 ^{ns}	0,194 ^{ns}	0,299 ^{ns}
	Inclin.	0,370	0,081	0,496	-0,212	0,585	0,302	0,416
	RMSE	0,089	0,103	0,063	0,103	0,100	0,101	0,098
	SEq	4,15	0,79	7,83	-2,06	5,85	2,98	4,22
visYALSI	r	0,521**	0,068 ^{ns}	0,761**	0,009 ^{ns}	0,219 ^{ns}	0,142 ^{ns}	0,297 ^{ns}
	Inclin.	0,525	0,091	0,657	0,033	0,723	0,303	0,567
	RMSE	0,121	0,141	0,092	0,142	0,138	0,140	0,135
	SEq	4,33	0,64	7,15	0,23	5,22	2,16	4,19
CCCI	r	-0,231 ^{ns}	-0,063 ^{ns}	-0,165 ^{ns}	-0,292 ^{ns}	-0,124 ^{ns}	0,150 ^{ns}	-0,069 ^{ns}
	Inclin.	-0,043	-0,015	-0,026	-0,198	-0,075	0,059	-0,024
	RMSE	0,025	0,026	0,026	0,025	0,026	0,026	0,026
	SEq	-1,68	-0,59	-1,02	-7,96	-2,90	2,29	-0,93
MTCI	r	0,184 ^{ns}	0,010 ^{ns}	0,453*	-0,291 ^{ns}	0,081 ^{ns}	0,277 ^{ns}	0,168 ^{ns}
	Inclin.	0,068	0,005	0,143	-0,394	0,098	0,217	0,118
	RMSE	0,051	0,052	0,046	0,050	0,052	0,050	0,051
	SEq	1,33	0,10	3,09	-7,91	1,90	4,34	2,30

Nota: ^{ns} representa correlação não significativa a 5% de probabilidade pelo teste t; * e ** representam, respectivamente, correlação significativa a 5%, e a 1% pelo teste t

⁽¹⁾ Inclinação da reta

Anexo C - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa), leituras do clorofilômetro e do teor de N nas folhas +1 e +3, na área ARE. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, r), inclinação da regressão linear (inclinação, $slope$), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(continua)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro		Teor de N	
					folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
670 nm	r	-0,691**	-0,736**	-0,802**	-0,276 ^{ns}	-0,452*	-0,514**	0,145 ^{ns}
	Inclin. ⁽¹⁾	-0,634	-0,678	-0,529	-1,238	-1,360	-0,842	0,169
	RMSE	0,098	0,092	0,081	0,130	0,121	0,116	0,134
	SEq	-6,46	-7,37	-6,52	-9,50	-11,23	-7,23	1,26
730 nm	r	-0,732**	-0,557**	-0,762**	-0,499**	-0,481**	-0,480*	0,078 ^{ns}
	Inclin.	-0,095	-0,072	-0,071	-0,316	-0,204	-0,111	0,013
	RMSE	0,013	0,016	0,012	0,017	0,017	0,017	0,019
	SEq	-7,28	-4,55	-5,73	-19,04	-12,19	-6,61	0,68
780 nm	r	0,763**	0,585**	0,790**	0,476*	0,515**	0,471*	-0,101 ^{ns}
	Inclin.	0,192	0,147	0,143	0,583	0,424	0,211	-0,032
	RMSE	0,024	0,030	0,023	0,033	0,032	0,033	0,037
	SEq	7,99	4,90	6,27	17,88	13,32	6,44	-0,88
vNDVI	r	0,720**	0,725**	0,815**	0,317 ^{ns}	0,472*	0,523**	-0,137 ^{ns}
	Inclin.	0,545	0,551	0,444	1,175	1,171	0,707	-0,132
	RMSE	0,078	0,077	0,065	0,106	0,099	0,095	0,111
	SEq	7,02	7,14	6,85	11,07	11,87	7,41	-1,19
reNDVI	r	0,753**	0,579**	0,780**	0,486**	0,502**	0,478**	-0,089 ^{ns}
	Inclin.	0,562	0,434	0,418	1,772	1,229	0,636	-0,085
	RMSE	0,073	0,090	0,069	0,096	0,095	0,097	0,110
	SEq	7,75	4,83	6,05	18,39	12,89	6,57	-0,77
visNDVI	r	0,680**	0,742**	0,798**	0,236 ^{ns}	0,444*	0,519**	-0,155 ^{ns}
	Inclin.	0,633	0,693	0,534	1,074	1,356	0,861	-0,184
	RMSE	0,101	0,092	0,083	0,134	0,123	0,118	0,136
	SEq	6,28	7,52	6,44	8,04	11,01	7,32	-1,35
vCI	r	0,732**	0,711**	0,827**	0,298 ^{ns}	0,486**	0,536**	-0,150 ^{ns}
	Inclin.	0,930	0,907	0,755	1,852	2,026	1,216	-0,243
	RMSE	0,128	0,132	0,106	0,179	0,164	0,158	0,186
	SEq	7,26	6,87	7,15	10,33	12,35	7,67	-1,31
reCI	r	0,755**	0,573**	0,786**	0,481*	0,507**	0,472*	-0,099 ^{ns}
	Inclin.	0,674	0,514	0,504	2,098	1,485	0,751	-0,113
	RMSE	0,086	0,108	0,082	0,116	0,114	0,116	0,131
	SEq	7,80	4,75	6,18	18,14	13,06	6,46	-0,86
visCI	r	0,687**	0,736**	0,799**	0,225 ^{ns}	0,451*	0,538**	-0,153 ^{ns}
	Inclin.	0,854	0,917	0,713	1,368	1,836	1,192	-0,242
	RMSE	0,133	0,124	0,110	0,179	0,164	0,155	0,181
	SEq	6,41	7,38	6,46	7,65	11,21	7,70	-1,33

Anexo C - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa), leituras do clorofilômetro e do teor de N nas folhas +1 e +3, na área ARE. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, *r*), inclinação da regressão linear (inclinação, *slope*), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(conclusão)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro		Teor de N	
					folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
vISR	<i>r</i>	-0,713**	-0,725**	-0,807**	-0,322 ^{ns}	-0,466*	-0,516**	0,130 ^{ns}
	Inclin.	-0,734	-0,749	-0,597	-1,622	-1,575	-0,948	0,171
	RMSE	0,107	0,105	0,090	0,144	0,135	0,130	0,151
	SEq	-6,88	-7,14	-6,64	-11,26	-11,70	-7,27	1,14
reISR	<i>r</i>	-0,751**	-0,583**	-0,775**	-0,489**	-0,499**	-0,481**	0,082 ^{ns}
	Inclin.	-0,270	-0,210	-0,200	-0,860	-0,588	-0,309	0,038
	RMSE	0,035	0,043	0,034	0,046	0,046	0,047	0,053
	SEq	-7,70	-4,87	-5,96	-18,55	-12,77	-6,62	0,71
visISR	<i>r</i>	-0,673**	-0,741**	-0,793**	-0,240 ^{ns}	-0,441*	-0,508**	0,154 ^{ns}
	Inclin.	-0,580	-0,641	-0,491	-1,011	-1,245	-0,781	0,169
	RMSE	0,094	0,085	0,078	0,124	0,114	0,110	0,126
	SEq	-6,16	-7,50	-6,34	-8,18	-10,89	-7,12	1,34
vYALSI	<i>r</i>	0,727**	0,722**	0,822**	0,311 ^{ns}	0,478**	0,530**	-0,142 ^{ns}
	Inclin.	0,653	0,651	0,531	1,368	1,409	0,849	-0,163
	RMSE	0,091	0,092	0,076	0,126	0,117	0,113	0,131
	SEq	7,16	7,09	7,03	10,84	12,08	7,54	-1,24
reYALSI	<i>r</i>	0,754**	0,578**	0,781**	0,485**	0,503**	0,477**	-0,091 ^{ns}
	Inclin.	0,576	0,443	0,429	1,811	1,260	0,650	-0,088
	RMSE	0,074	0,092	0,071	0,099	0,098	0,099	0,112
	SEq	7,76	4,82	6,08	18,35	12,92	6,55	-0,79
visYALSI	<i>r</i>	0,683**	0,741**	0,800**	0,234 ^{ns}	0,447*	0,525**	-0,154 ^{ns}
	Inclin.	0,680	0,740	0,572	1,136	1,458	0,932	-0,196
	RMSE	0,107	0,099	0,088	0,143	0,132	0,125	0,145
	SEq	6,33	7,50	6,47	7,94	11,08	7,44	-1,35
CCCI	<i>r</i>	0,037 ^{ns}	-0,348 ^{ns}	-0,143 ^{ns}	0,357 ^{ns}	0,029 ^{ns}	-0,092 ^{ns}	0,146 ^{ns}
	Inclin.	0,014	-0,130	-0,038	0,648	0,035	-0,061	0,069
	RMSE	0,055	0,051	0,054	0,051	0,055	0,055	0,054
	SEq	0,25	-2,52	-0,70	12,65	0,64	-1,12	1,27
MTCI	<i>r</i>	0,389*	-0,007 ^{ns}	0,250 ^{ns}	0,516**	0,258 ^{ns}	0,151 ^{ns}	0,080 ^{ns}
	Inclin.	0,224	-0,004	0,104	1,456	0,488	0,155	0,059
	RMSE	0,079	0,085	0,083	0,073	0,082	0,084	0,085
	SEq	2,86	-0,05	1,25	19,93	5,93	1,84	0,70

Nota: ^{ns} representa correlação não significativa a 5% de probabilidade pelo teste t; * e ** representam, respectivamente, correlação significativa a 5%, e a 1% pelo teste t

⁽¹⁾ Inclinação da reta

Anexo D - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa), leituras do clorofilômetro e do teor de N nas folhas +1 e +3, na área AGL. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, r), inclinação da regressão linear (inclinação, $slope$), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(continua)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro		Teor de N	
					folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
670 nm	r	-0,733**	-0,669**	-0,799**	0,200 ^{ns}	-0,339 ^{ns}	0,306 ^{ns}	0,002 ^{ns}
	Inclin. ⁽¹⁾	-0,570	-0,580	-0,471	1,054	-1,364	0,697	0,004
	RMSE	0,107	0,117	0,095	0,154	0,148	0,150	0,157
	SEq	-5,34	-4,97	-4,98	6,84	-9,22	4,66	0,02
730 nm	r	-0,709**	-0,639**	-0,793**	0,174 ^{ns}	-0,436*	0,208 ^{ns}	-0,170 ^{ns}
	Inclin.	-0,090	-0,090	-0,076	0,149	-0,286	0,077	-0,049
	RMSE	0,018	0,020	0,016	0,025	0,023	0,025	0,025
	SEq	-4,98	-4,59	-4,87	5,93	-12,41	3,07	-1,96
780 nm	r	0,717**	0,626**	0,803**	-0,209 ^{ns}	0,417*	-0,215 ^{ns}	0,140 ^{ns}
	Inclin.	0,176	0,172	0,150	-0,347	0,530	-0,155	0,079
	RMSE	0,035	0,039	0,030	0,049	0,045	0,048	0,049
	SEq	5,09	4,43	5,06	-7,15	11,75	-3,19	1,60
vNDVI	r	0,741**	0,667**	0,808**	-0,206 ^{ns}	0,357 ^{ns}	-0,292 ^{ns}	0,027 ^{ns}
	Inclin.	0,511	0,513	0,422	-0,959	1,272	-0,589	0,042
	RMSE	0,093	0,104	0,082	0,136	0,130	0,133	0,139
	SEq	5,47	4,95	5,14	-7,04	9,78	-4,42	0,30
reNDVI	r	0,708**	0,632**	0,794**	-0,189 ^{ns}	0,428*	-0,208 ^{ns}	0,155 ^{ns}
	Inclin.	0,479	0,477	0,407	-0,862	1,497	-0,411	0,240
	RMSE	0,096	0,106	0,083	0,134	0,123	0,134	0,135
	SEq	4,97	4,51	4,91	-6,43	12,13	-3,08	1,78
visNDVI	r	0,772**	0,673**	0,822**	-0,234 ^{ns}	0,312 ^{ns}	-0,338 ^{ns}	-0,037 ^{ns}
	Inclin.	0,624	0,606	0,503	-1,280	1,301	-0,798	-0,069
	RMSE	0,104	0,121	0,093	0,159	0,155	0,154	0,163
	SEq	6,01	5,02	5,42	-8,07	8,39	-5,20	-0,42
vCI	r	0,817**	0,650**	0,851**	-0,276 ^{ns}	0,302 ^{ns}	-0,337 ^{ns}	-0,017 ^{ns}
	Inclin.	0,838	0,744	0,662	-1,913	1,601	-1,011	-0,040
	RMSE	0,120	0,158	0,109	0,199	0,198	0,195	0,207
	SEq	7,01	4,72	6,08	-9,60	8,10	-5,18	-0,19
reCI	r	0,722**	0,628**	0,806**	-0,209 ^{ns}	0,417*	-0,219 ^{ns}	0,143 ^{ns}
	Inclin.	0,569	0,552	0,482	-1,114	1,702	-0,505	0,259
	RMSE	0,110	0,124	0,094	0,156	0,145	0,155	0,158
	SEq	5,16	4,45	5,11	-7,15	11,76	-3,25	1,64
visCI	r	0,823**	0,663**	0,847**	-0,273 ^{ns}	0,277 ^{ns}	-0,363 ^{ns}	-0,060 ^{ns}
	Inclin.	0,827	0,743	0,645	-1,858	1,442	-1,066	-0,137
	RMSE	0,115	0,152	0,108	0,195	0,195	0,189	0,203
	SEq	7,17	4,88	5,98	-9,51	7,39	-5,63	-0,68

Anexo D - Parâmetros da relação linear entre os índices de vegetação/bandas espectrais e a biometria da cultura (altura de plantas, densidade de perfilhos e biomassa), leituras do clorofilômetro e do teor de N nas folhas +1 e +3, na área AGL. Os parâmetros analisados foram coeficiente de correlação de Pearson (correlação, *r*), inclinação da regressão linear (inclinação, *slope*), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e equivalente de sensibilidade (SEq = inclinação/RMSE)

(conclusão)

Índices de vegetação		Altura	Densidade de perfilhos	Biomassa	Clorofilômetro		Teor de N	
					folha +1	folha +3	folha +1	folha +3
vISR	<i>r</i>	-0,713**	-0,663**	-0,787**	0,181 ^{ns}	-0,364 ^{ns}	0,277 ^{ns}	-0,035 ^{ns}
	Inclin.	-0,630	-0,654	-0,527	1,081	-1,661	0,717	-0,072
	RMSE	0,125	0,134	0,110	0,176	0,166	0,172	0,178
	SEq	-5,03	-4,89	-4,78	6,16	-9,99	4,18	-0,40
reISR	<i>r</i>	-0,699**	-0,634**	-0,786**	0,175 ^{ns}	-0,434*	0,201 ^{ns}	-0,162 ^{ns}
	Inclin.	-0,247	-0,250	-0,210	0,417	-0,792	0,207	-0,131
	RMSE	0,051	0,055	0,044	0,070	0,064	0,070	0,070
	SEq	-4,85	-4,53	-4,77	5,95	-12,34	2,97	-1,86
visISR	<i>r</i>	-0,743**	-0,670**	-0,804**	0,213 ^{ns}	-0,320 ^{ns}	0,324 ^{ns}	0,030 ^{ns}
	Inclin.	-0,535	-0,538	-0,438	1,038	-1,192	0,683	0,049
	RMSE	0,097	0,108	0,086	0,142	0,138	0,138	0,145
	SEq	-5,50	-4,98	-5,07	7,30	-8,65	4,97	0,34
vYALSI	<i>r</i>	0,772**	0,666**	0,828**	-0,232 ^{ns}	0,341 ^{ns}	-0,310 ^{ns}	0,012 ^{ns}
	Inclin.	0,611	0,587	0,496	-1,243	1,394	-0,716	0,022
	RMSE	0,101	0,119	0,089	0,155	0,150	0,152	0,160
	SEq	6,02	4,92	5,55	-8,00	9,28	-4,71	0,14
reYALSI	<i>r</i>	0,711**	0,632**	0,797**	-0,192 ^{ns}	0,427*	-0,210 ^{ns}	0,153 ^{ns}
	Inclin.	0,490	0,486	0,416	-0,896	1,521	-0,423	0,242
	RMSE	0,098	0,108	0,084	0,137	0,126	0,136	0,138
	SEq	5,00	4,50	4,94	-6,55	12,07	-3,11	1,75
visYALSI	<i>r</i>	0,788**	0,671**	0,831**	-0,246 ^{ns}	0,303 ^{ns}	-0,345 ^{ns}	-0,044 ^{ns}
	Inclin.	0,670	0,636	0,535	-1,412	1,331	-0,859	-0,085
	RMSE	0,106	0,127	0,095	0,166	0,164	0,161	0,172
	SEq	6,33	5,00	5,61	-8,48	8,14	-5,33	-0,49
CCCI	<i>r</i>	-0,201 ^{ns}	-0,232 ^{ns}	-0,168 ^{ns}	0,128 ^{ns}	0,327 ^{ns}	0,461*	0,676**
	Inclin.	-0,034	-0,044	-0,021	0,146	0,284	0,227	0,260
	RMSE	0,033	0,033	0,033	0,034	0,032	0,030	0,025
	SEq	-1,02	-1,32	-0,64	4,34	8,85	7,52	10,41
MTCI	<i>r</i>	0,441*	0,362 ^{ns}	0,536**	-0,072 ^{ns}	0,554*	0,130 ^{ns}	0,559**
	Inclin.	0,147	0,135	0,136	-0,163	0,958	0,127	0,428
	RMSE	0,061	0,063	0,057	0,067	0,056	0,067	0,056
	SEq	2,43	2,14	2,38	-2,41	17,05	1,90	7,63

Nota: ^{ns} representa correlação não significativa a 5% de probabilidade pelo teste t; * e ** representam, respectivamente, correlação significativa a 5%, e a 1% pelo teste t

⁽¹⁾ Inclinação da reta

Anexo E - Produtividade média obtida com as diferentes variedades de cana-de-açúcar em resposta as doses de N aplicadas nas áreas de Piracicaba e Jaú

Área	Variedade	Doses de N (kg ha ⁻¹)			
		Sem N	60	120	180
Piracicaba	SP81-3250	55.6	68.9	64.4	67.0
	IAC87-3396	57.5	76.5	67.8	74.3
	CTC14	74.0	76.2	84.4	90.2
Jaú	SP81-3250	91.4	84.9	88.8	94.6
	IACSP95-5000	72.9	79.8	80.0	87.8
	RB85-5536	86.3	82.2	85.6	88.1

Anexo F - Proporção equivalente a quanto o valor médio obtido pelo sensor de dossel (NDRE) na faixa rica em N representa na distribuição acumulada da faixa que não recebeu N dentro de cada bloco e área experimental

(continua)

Área	Bloco	Média faixa rica ⁽¹⁾ ----- (NDRE) -----	95% faixa sem N ⁽²⁾	Média FRN <i>versus</i> 95% SAN ⁽³⁾ (%)
PD	A	0,158	0,211	60,7
	B	0,197	0,189	97,0
	C	0,166	0,189	77,1
	D	0,200	0,264	56,3
	Média ⁽⁴⁾	0,180	0,213	72,8
AS	A	0,211	0,213	93,8
	B	0,163	0,249	4,8
	C	0,161	0,261	1,8
	D	0,185	0,232	45,5
	Média	0,180	0,239	36,5
CA	A	0,180	0,256	46,0
	B	0,191	0,227	83,1
	C	0,199	0,255	74,6
	D	0,178	0,263	56,2
	Média	0,187	0,250	65,0
CB	A	0,138	0,226	50,9
	B	0,128	0,160	76,9
	C	0,135	0,132	96,0
	D	0,132	0,144	90,7
	Média	0,133	0,165	78,6
NJ	A	0,263	0,285	85,5
	B	0,259	0,344	43,0
	C	0,255	0,310	62,3
	D	0,241	0,307	38,9
	Média	0,255	0,311	57,4
RO	A	0,319	0,323	93,8
	B	0,353	0,343	97,4
	C	0,334	0,340	92,3
	D	0,340	0,361	80,7
	Média	0,336	0,342	91,0
AP	A	0,106	0,252	31,4
	B	0,146	0,258	52,9
	C	0,153	0,251	71,7
	D	0,164	0,272	48,4
	Média	0,142	0,258	51,1

Anexo F - Proporção equivalente a quanto o valor médio obtido pelo sensor de dossel (NDRE) na faixa rica em N representa na distribuição acumulada da faixa que não recebeu N dentro de cada bloco e área experimental

(conclusão)

Área	Bloco	Média faixa rica ⁽¹⁾ ----- (NDRE) -----	95% faixa sem N ⁽²⁾ ----- (NDRE) -----	Média FRN <i>versus</i> 95% SAN ⁽³⁾ (%)
VE	A	0,249	0,352	49,8
	B	0,258	0,344	53,6
	C	0,270	0,336	68,6
	D	0,240	0,344	61,1
	Média	0,254	0,344	58,3
SE	A	0,308	0,375	34,4
	B	0,315	0,384	33,9
	C	0,361	0,373	88,7
	D	0,305	0,375	42,3
	Média	0,322	0,377	49,8
CC	A	0,252	0,279	82,9
	B	0,251	0,282	80,5
	C	0,244	0,306	62,2
	D	0,249	0,288	81,6
	Média	0,249	0,289	76,8
BA	A	0,349	0,364	80,3
	B	0,349	0,367	74,4
	C	0,347	0,375	61,9
	D	0,345	0,365	66,8
	Média	0,347	0,368	70,8
SI	A	0,248	0,314	28,8
	B	0,288	0,330	49,6
	C	0,273	0,330	46,6
	D	0,283	0,334	52,3
	Média	0,273	0,327	44,3

Nota: “Média FRN *versus* 95% SAN” deve ser maior que 50% para indicar resposta ao N aplicado e deveria ser próximo a 95% para justificar o uso dessa porcentagem da distribuição como referência das áreas que não receberam N

⁽¹⁾ Valores médios obtidos pelo sensor de dossel (NDRE) em cada repetição (bloco) das faixas onde foi aplicado N (Faixa rica em N - FRN)

⁽²⁾ Valor de NDRE que representa 95% da distribuição acumulada nas faixas que não receberam aplicação de N (SAN)

⁽³⁾ Proporção de quanto o valor obtido na FRN representa no total acumulado da distribuição

Anexo G - Produtividade média obtida para cada tratamento (doses de N) nas 12 áreas estudadas; produtividade normalizada pela média de cada área; NDRE médio de cada tratamento obtido pelo sensor de dossel e NDRE normalizado pela média de cada área (continua)

Área	Tratamentos (kg ha ⁻¹ de N)	Produtividade (t ha ⁻¹)	Produtividade normalizada	NDRE	NDRE normalizado
PD	0	90,4	0,91	0,171	0,87
	50	103,5	1,05	0,200	1,02
	100	99,7	1,01	0,198	1,01
	150	96,1	0,97	0,200	1,02
	200	104,6	1,06	0,211	1,07
AS	0	96,5	0,90	0,143	0,80
	50	104,9	0,98	0,173	0,96
	100	108,3	1,01	0,186	1,04
	150	114,0	1,06	0,197	1,10
	200	112,1	1,05	0,199	1,11
CA	0	68,0	0,92	0,198	0,90
	50	75,0	1,02	0,229	1,04
	100	81,3	1,10	0,222	1,01
	150	71,0	0,96	0,228	1,03
	200	73,2	0,99	0,225	1,02
CB	0	73,9	0,98	0,193	0,91
	50	70,8	0,94	0,208	0,98
	100	74,4	0,99	0,211	0,99
	150	79,9	1,06	0,226	1,07
	200	76,8	1,02	0,222	1,05
NJ	0	93,5	0,90	0,204	0,89
	50	108,5	1,04	0,227	0,99
	100	112,6	1,08	0,233	1,02
	150	103,5	0,99	0,239	1,05
	200	103,8	0,99	0,239	1,05
RO	0	87,4	0,87	0,239	0,81
	50	98,6	0,98	0,283	0,96
	100	99,7	0,99	0,312	1,06
	150	108,8	1,08	0,313	1,06
	200	109,2	1,08	0,325	1,10
AP	0	83,9	0,99	0,198	0,92
	60	77,6	0,92	0,211	0,98
	120	84,4	1,00	0,206	0,96
	180	87,0	1,03	0,223	1,04
	240	88,9	1,05	0,236	1,10
VE	0	66,7	1,08	0,212	0,93
	60	61,0	0,99	0,230	1,01
	120	59,0	0,96	0,217	0,96
	180	60,4	0,98	0,231	1,02
	240	60,4	0,98	0,246	1,08

Anexo G - Produtividade média obtida para cada tratamento (doses de N) nas doze áreas estudadas; produtividade normalizada pela média de cada área; NDRE médio de cada tratamento obtido pelo sensor de dossel e NDRE normalizado pela média de cada área

(conclusão)					
Área	Tratamentos (kg ha ⁻¹ de N)	Produtividade (t ha ⁻¹)	Produtividade normalizada	NDRE	NDRE normalizado
CC	0	73,3	0,85	0,182	0,85
	60	90,2	1,04	0,211	0,99
	120	92,7	1,07	0,233	1,09
	180	90,6	1,04	0,229	1,07
SI	0	77,1	0,95	0,232	0,95
	60	78,7	0,97	0,237	0,97
	120	83,6	1,03	0,261	1,06
	180	84,8	1,05	0,253	1,03
PI-I	0	74,0	0,91	0,196	0,79
	50	76,2	0,94	0,245	0,99
	100	84,4	1,04	0,256	1,03
	150	90,2	1,11	0,296	1,19
PI-II	0	70,6	1,03	0,226	0,93
	50	62,8	0,92	0,221	0,91
	100	73,9	1,08	0,250	1,03
	150	65,6	0,96	0,272	1,12
PI-III	0	55,6	0,87	0,209	0,87
	50	68,9	1,08	0,239	0,99
	100	64,4	1,01	0,255	1,06
	150	67,0	1,05	0,261	1,08
JA-I	0	72,9	0,91	0,277	0,87
	50	79,8	1,00	0,322	1,01
	100	80,0	1,00	0,325	1,02
	150	87,8	1,10	0,351	1,10
JA-II	0	84,3	0,99	0,300	0,90
	50	84,3	0,99	0,334	1,00
	100	84,9	1,00	0,355	1,07
	150	87,8	1,03	0,341	1,02
JA-III	0	84,9	0,95	0,291	0,86
	50	88,8	0,99	0,349	1,03
	100	94,6	1,06	0,367	1,08
	150	89,8	1,00	0,352	1,04

Nota: As áreas PI e JA foram cultivadas com três variedades de cana cada. Em PI, as variedades foram CTC14, IAC87-3396 e SP81-3250, representadas, respectivamente, pelos símbolos PI-I, PI-II e PI-III. Em JA, as variedades foram IACSP95-5000, RB85-5536 e SP81-3250, representadas, respectivamente, pelos símbolos JA-I, JA-II e JA-III