

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

Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar

Flávia Roncato Frasson

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Máquinas
Agrícolas**

**Piracicaba
2007**

Flávia Roncato Frasson
Engenheiro Agrônomo

Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar

Orientador:
Prof. Dr. JOSÉ PAULO MOLIN

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Máquinas
Agrícolas**

Piracicaba
2007

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Frasson, Flávia Roncato

Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar / Flávia Roncato Frasson. --
Piracicaba, 2007.
76 p. : il.

Dissertação (Mestrado) -- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Adubação 2. Agricultura de precisão 3. Cana-de-açúcar 4. Fertilizantes nitrogenados
5. Plantio 6. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 633.61

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

A Deus, por estar presente na minha vida, no meu trabalho e em meu coração.

OFEREÇO

Aos meus pais José Luiz e Márcia, pelo exemplo de vida e confiança.

As minhas irmãs, Roberta e Renata, pelo carinho e amizade.

Ao meu namorado Marco pela ajuda, compreensão, paciência e amor.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

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

Ao Professor Livre Docente José Paulo Molin, pela orientação, exemplo de competência, paciência, amizade, conselhos e confiança, e a toda sua família, por me acolher de uma maneira tão carinhosa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida durante a realização deste curso.

À Máquinas Agrícolas Jacto S.A. e ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) que muito contribuíram para realização deste trabalho.

Ao companheiro de trabalho José Vitor Salvi pela colaboração na análise estatística dos dados do presente trabalho.

Aos amigos Fabrício Pinheiro Pohv e Anamari Viegas de Araujo Motomiya pela amizade, consideração e ajuda em todas as fases deste trabalho. Sem o apoio de vocês tudo seria mais difícil.

Aos colegas de pós-graduação Rubén, Cassiano, Leonardo, Giuliano, Gustavo Faulin, Thiago Machado, Tiago Carletti, Daniel (Mutuca), Marcos, Fernando, Étore, Marcelo, Daniel, Vitória, Geraldo, e aos estagiários e ex-estagiários do Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão (GMAP) pelos bons momentos, troca de conhecimentos e convivência durante o mestrado.

A Equipe do Setor de Máquinas Agrícolas – ESALQ/ USP Áureo, Juarez, Afonso, Fernanda, Davilmar, Sandra, Francisco (Chicão), Dona Lourdes, Juquita, José Geraldo, Dona Vera, pela amizade, apoio técnico e operacional.

Aos professores do departamento pela troca de experiências.

À amiga Maria Elda Ferreira César, a tia Cristiane Roncato pela amizade, companheirismo e força durante toda minha estadia em Piracicaba.

Aos amigos do CTC (Fortes, Airton, Teo, João Eduardo, Marcelo, Edson, Antonio Carlos, Jorge, Fernando, Paulo César, Audir), a Caio Fortes (Usina Iracema), pela amizade, ajuda contínua e ensinamentos.

A tia Tetê, vó Toninha, vó Cida e família, que fizeram mais alegres os meus dias em Piracicaba.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Sensoriamento remoto.....	13
2.2 Cana-de-açúcar.....	18
2.3 Falhas nas linhas de cana-de-açúcar.....	19
2.4 Importância das variedades de cana-de-açúcar.....	22
2.5 A cana-de-açúcar e a adubação nitrogenada.....	23
2.6 Uso de sensores óticos na Agricultura.....	27
Referências.....	29
3 COMPORTAMENTO TEMPORAL DO NDVI MENSURADO COM SENSOR ÓTICO ATIVO PARA DIFERENTES VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	37
Resumo.....	37
Abstract.....	37
3.1 Introdução.....	38
3.2 Material e Métodos.....	40
3.3 Resultados e Discussão.....	41
3.4 Conclusão.....	47
Referências	47
4 IDENTIFICAÇÃO DE NÍVEIS DE NITROGÊNIO NA CULTURA DA CANA-DE- AÇÚCAR UTILIZANDO SENSOR ÓTICO ATIVO.....	50
Resumo.....	50
Abstract.....	50
4.1 Introdução.....	51
4.2 Material e Métodos.....	52
4.3 Resultados e Discussão.....	54
4.4 Conclusão.....	62
Referências	62

5 UTILIZAÇÃO DE SENSOR ÓTICO ATIVO NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS DE PLANTIO EM CANA-DE-AÇÚCAR.....	65
Resumo.....	65
Abstract.....	65
5.1 Introdução.....	66
5.2 Material e Métodos.....	68
5.3 Resultados e Discussão.....	70
5.4 Conclusão.....	75
Referências	75

RESUMO

Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar

Devido à grande importância do setor sucroalcooleiro na economia brasileira vem aumentando a demanda por novas tecnologias na cultura de cana-de-açúcar, visando melhorar a produtividade e qualidade, para atingir assim maiores níveis de competitividade. O sensoriamento remoto é uma ferramenta importante nas aplicações de agricultura de precisão, principalmente como forma de avaliar as condições das culturas e recentemente surgiram sensores óticos ativos dedicados para a utilização direta com culturas. Observando-se a ausência de trabalhos que estudem a utilização deste tipo de sensores na cana-de-açúcar estabeleceu-se o objetivo desta pesquisa que visou avaliar o potencial de utilização de um sensor ótico ativo comercial (GreenSeeker Red Hand HeldTM, NTech Industries, Inc., Ukiah, CA) na cultura da cana-de-açúcar. Para tanto, avaliou-se o comportamento do NDVI de diferentes variedades de cana-de-açúcar e analisou-se o desempenho temporal deste índice para as diferentes variedades; realizou-se uma análise do desempenho do sensor para entender o comportamento do NDVI na cana-de-açúcar, planta e soca, em condições de campo, sob diferentes doses de nitrogênio aplicado e por fim correlacionou-se o NDVI gerado pelo sensor com a mensuração convencional de falhas. Os dados do NDVI, para variedades, foram coletados aos 90, 120 e 150 dias após o plantio (DAP), com o sensor. No experimento de doses de nitrogênio, considerando a cana-planta, o delineamento experimental foi em blocos casualizados, com cinco tratamentos (0, 30, 60, 90, 120 kg ha⁻¹) e quatro repetições, para três variedades (CTC2, RB855536, SP83-2847). O experimento de cana-soca (de terceiro corte) teve delineamento experimental em blocos casualizados, com 25 tratamentos e quatro repetições, para a variedade RB855536. Os dados de NDVI foram coletados no período de 30, 60, 90 e 120 DAP ou dias após o corte (DAC). Para medição de falhas o experimento foi conduzido em 4 talhões comerciais, com 4 amostras por hectare. Notou-se que as variedades interferem nas leituras do NDVI, assim como de forma geral, as leituras aos 90 DAP foram diferentes das realizadas aos 120 e 150 DAP, tendendo a se estabilizar ao longo do tempo para cada variedade. Os valores do NDVI, em relação às doses de N aplicadas, apresentaram uma tendência crescente ao longo do período das leituras, sendo afetados significativamente pelas doses de N aplicadas, para a variedade RB855536 aos 90 DAC para cana-soca, e apenas para a variedade SP83-2847 aos 120 DAP para cana-planta. Estes dados indicam que o sensor pode ser utilizado para detectar deficiência foliar de N em cana-de-açúcar, especialmente para cana-soca, onde a adubação nitrogenada tem um maior efeito sobre a planta. Considerando o uso do sensor como um indicativo da porcentagem de falhas de plantio as observações indicam que o NDVI gerado pelo sensor apresenta correlações significativas com a porcentagem de falhas levantadas pelo método tradicional, assim como as equações obtidas indicaram bons resultados quando validadas.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; NDVI; Adubação nitrogenada; Falhas de plantio

ABSTRACT

Use of active optic sensor in sugarcane

Due to the great importance of sugarcane sector to the Brazilian economy, it becomes increasingly important the demand of new technologies for this crop aiming to improve yield and quality, thus reaching higher levels of competitiveness. Remote sensing is an important tool for the implementation of precision agriculture practices, mainly as a way to evaluate crop conditions. Recently became available active optical sensors dedicated to be used directly with crops and observing the absence of works studying the use of these sensors on sugarcane it was established the objective of this research that aimed to evaluate the potential use of a commercial active optic sensor (GreenSeeker Red Hand Held™, NTech Industries, Incorporation, Ukiah, CA) on sugarcane crop. The behavior of NDVI of different varieties of sugarcane and its temporal response were studied; an analysis of the sensor signal was conducted to understand the behavior of the NDVI in the sugarcane, plants and ratoon, under field conditions and under different levels of nitrogen applied and a correlation study between the NDVI generated for the sensor with the conventional crop failure measurement was also conducted. NDVI data related to varieties was collected with the sensor at 90, 120 and 150 days after the plantation (DAP). The experiment with nitrogen levels, considering the sugarcane plant was conducted under a randomized block design with five treatments (0, 30, 60, 90, 120 kg ha⁻¹) and four replications, for three varieties (CTC2, RB855536, SP83-2847). The experiment of sugarcane ratoon (of third cut) was conducted at randomized block design with 25 treatments and four replications using the variety RB855536. NDVI data were collected at 30, 60, 90 and 120 DAP or days after the cut (DAC). For the crop failure measurements the experiment was repeated in four commercial fields, with four samples per hectare. It was observed that the varieties interfere on the NDVI readings, as well as, on general, the readings of 90 DAP were different from those carried out at 120 and 150 DAP, tending to stabilize throughout the time for each variety. The values of the NDVI related to N levels presented an increasing trend throughout the period of readings, being significantly affected by the levels of N applied at 90 DAC for sugar cane ratoon and only for SP83-2847 variety at 120 DAP for sugarcane plants. The data indicate that the sensor can be used to detect N deficiency in sugarcane, especially for sugarcane beat where N fertilization has a bigger effect on the plant. Considering sensors use as an indicative of crop failure, observations indicate that the NDVI generated from the sensor is sufficiently precise, presenting high correlations with the percentage of crop failure measured by the conventional method, as well as the gotten equations showed a good result when validated, indicating that it may be a promising method for automation of failure measurement on sugarcane areas.

Keywords: Precision agriculture; NDVI; Nitrogen fertilization; Crop failure

1 INTRODUÇÃO

A conjuntura comercial para os produtos derivados da cana-de-açúcar tem sido bastante favorável, principalmente em relação ao mercado externo. A previsão para o comportamento do mercado mundial do álcool é bastante otimista, uma vez que os países desenvolvidos estão dispostos em implementar as determinações e metas acordadas por meio do Protocolo de Kyoto.

A expansão do mercado mundial de açúcar e álcool tem estimulado o aumento do investimento no setor em todo o país. Atualmente, o Brasil é o maior exportador mundial de açúcar e álcool, exercendo forte influência na determinação dos preços internacionais do açúcar. O setor possui grande importância econômica, social e ambiental, sendo grande gerador de ocupação no meio rural, com geração de divisas e produção de energia renovável e limpa. Na safra 2006/2007, a moagem foi de 474,8 milhões de toneladas de cana, que resultou na produção de 30,2 milhões de toneladas de açúcar e 17,5 bilhões de litros de álcool, representando um crescimento de 9,1% em relação à safra anterior (CONAB, 2007).

O setor sucroalcooleiro está em plena ascensão em função da forte demanda interna e externa, o que é justificado pela expansão da capacidade produtiva existente e pela implantação de novas unidades, bem como melhoria tecnológica no processo de produção de cana-de-açúcar, tais como introdução de novas variedades adaptadas ao clima, tipo de solo e sistema de corte (manual e mecânico), uso dos conceitos de agricultura de precisão, entre outros. Portanto somente com a aplicação de processos mais eficientes para melhoria da produtividade e da qualidade dos produtos, juntamente com a redução dos custos de produção, será possível para o setor a atuação em mercados cada vez mais competitivos (OMETTO, 1997).

As denominadas geotecnologias, como Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS), sensores remotos terrestres, aéreos e orbitais, programas para armazenamento de dados georreferenciados (SIG – Sistemas de Informações Geográficas), sistemas informatizados de medição e coleta de dados, controladores e automação em máquinas auxiliam no planejamento das operações agrícolas. O uso de tais tecnologias possibilita um melhor gerenciamento do agronegócio, seja pela aplicação localizada de insumos, pela estimativa de atributos da cultura, pela redução no tempo de aquisição dos dados, ou pelos menores custos de amostragens e menor impacto ambiental.

As pesquisas relativas à utilização do sensoriamento remoto em áreas de cana-de-açúcar têm abordado questões importantes como classificação e mapeamento (TARDIN et al., 1992),

manejo (FIORIO et al., 2000) e estimativa de produtividade (RUDORFF; BATISTA, 1990). Por outro lado, informações equivalentes podem ser obtidas com sensoriamento em tempo real, o que tem proporcionado os estudos do potencial deste tipo de sensor em áreas comerciais de cana-de-açúcar, principalmente visando à adubação em tempo real. Entretanto algumas pesquisas têm mostrado que a cana-de-açúcar apresenta comportamentos espectrais diferenciados entre variedades e ambientes. Assim o entendimento destas variações deve anteceder os estudos de aplicações específicas como a adubação nitrogenada em tempo real utilizando sensores óticos ativos. Estes se caracterizam por utilizar luz própria como fonte de energia e vêm sendo aplicados na agricultura montados em tratores ou adubadoras como uma alternativa atrativa aos métodos de amostragem tradicionais de solo e planta (INMAN, 2005).

Acompanhar o desenvolvimento das culturas tem sido cada vez mais imprescindível para a tomada de decisões. Ajustes em tratos culturais, irrigação e mesmo replantios podem ser executados pela detecção de falhas nos talhões da cultura ou diferenças no seu desenvolvimento. Imagens de alta resolução podem fornecer tais dados e auxiliar o acompanhamento do desenvolvimento de lavouras, uma vez que as falhas e as diferenças de padrões são claramente percebidas (JORGE; TRINDADE JUNIOR, 2002).

Nos países produtores de cana-de-açúcar a preocupação com a questão do desenvolvimento e teste de variedades têm sido constante, visando aumentar a produtividade, obter uma maior resistência às pragas e doenças e uma melhor adaptação às variações de clima, tipos de solos, técnicas de corte ou manejo. Estudos vêm sendo desenvolvidos, utilizando sensores orbitais para discriminação de variedades (JOAQUIM, 1998; FORTES, 2003; GALVÃO et al., 2005), entretanto não são disponíveis trabalhos que verificam a influência das variedades nas leituras de NDVI obtidas com sensores óticos ativos, assim como a conseqüente calibração destes para os diferentes cenários de cana-de-açúcar existentes no Brasil.

Inamasu et al. (2006) testaram um sensor ativo de refletância (ACS- 210 Crop Circle, Holland Scientific) em cana-de-açúcar com o objetivo de mensurar os teores de nitrogênio e potássio aplicados ao solo. O sensor não foi capaz de detectar diferença de potássio, entretanto os índices da leitura de refletância foram crescentes de acordo com as doses de nitrogênio aplicadas, sugerindo que há possibilidade do sensor ser aplicado na identificação de deficiência de nitrogênio.

Tal constatação indica ser necessário conduzir estudos mais detalhados com o uso destes sensores e entender o comportamento espectral da cana-de-açúcar, planta e soca, em diferentes níveis de nitrogênio, o que permitirá seu uso em sistemas de controle de aplicação de fertilizante em tempo real. Com isso estabeleceu-se o objetivo geral desta pesquisa que foi avaliar o potencial de utilização de um sensor ótico ativo comercial na cultura da cana-de-açúcar (GreenSeeker Red Hand Held™, NTech Industries, Inc., Ukiah, CA).

Especificamente objetivou-se: 1) avaliar o comportamento do NDVI de diferentes variedades de cana-de-açúcar e analisar o desempenho temporal deste índice para as diferentes variedades; 2) realizar uma análise do sensor ótico ativo e entender o comportamento do NDVI na cana-de-açúcar, planta e soca, em condições de campo, sob diferentes doses de nitrogênio aplicado; 3) correlacionar o NDVI gerado por este sensor com a mensuração convencional de falhas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto é a aquisição de informações sobre um objeto sem que haja contato físico, segundo Colwell (1983). Campbell (1987) define sensoriamento remoto como a ciência que obtém informações da superfície terrestre a partir de imagens obtidas à distância. A obtenção dessas informações geralmente depende da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos de interesse. Sensoriamento remoto é a ciência e a arte de observar um alvo sem ter contato físico com o mesmo, baseando-se apenas na interpretação deste alvo com a radiação eletromagnética (LILLESAND; KIEFER, 1995) e tem sido utilizado por um número crescente de pesquisadores, consultores técnicos e produtores.

Os sensores utilizados pelo sensoriamento remoto são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética em determinada faixa do espectro eletromagnético e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação, quer seja na forma de imagem, na forma gráfica ou de tabelas. Os sensores remotos podem ser classificados como: (i) imageadores – quando fornecem uma imagem fotográfica da cena de interesse; (ii) não imageadores – quando o produto final é apresentado na forma de valores numéricos ou gráficos; (iii) passivos – aqueles que necessitam uma fonte externa de radiação eletromagnética para poderem operar; (iv) ativos – os que possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética.

Os sistemas sensores são basicamente formados por uma parte óptica (coletor), constituída por lentes e espelhos, que têm o objetivo de captar e direcionar a energia proveniente dos alvos para os detectores. Um sistema sensor pode ser definido como qualquer equipamento capaz de transformar alguma forma de energia em sinal passível de ser convertido em informação sobre o ambiente. No caso específico do sensoriamento remoto a energia utilizada é a radiação eletromagnética (NOVO, 1989).

Os sensores dessa categoria são classificados de acordo com a faixa de comprimento de onda que captam; Campbell (1987) define as principais faixas do espectro eletromagnético:

- raios gama - são produzidos no núcleo dos átomos, possuem pequenos comprimentos de ondas e são bastante utilizados para identificar minerais radioativos; não existe, em princípio, limite superior para frequência das radiações gama, embora ainda seja

encontrada uma faixa superior de frequências para radiação conhecida como raios cósmicos;

- raios-X - é a radiação na faixa de comprimentos de onda de 1Å a 10nm ($1\text{Å}=10^{-10}\text{ m}$) são gerados, predominantemente, pela parada ou diminuição da velocidade de elétrons de alta energia; por se constituir de fótons de alta energia, os raios-X são altamente penetrantes, sendo uma poderosa ferramenta em pesquisa sobre a estrutura da matéria;
- ultravioleta (UV) - radiação de extensa faixa do espectro, desde $0,1\mu\text{m}$ a $0,38\mu\text{m}$; possui um relativo potencial de aplicações em sensoriamento remoto, principalmente no campo da pesquisa mineral e de análise que exijam luminescência;
- visível (VIS) - possui uma pequena variação no comprimento de onda, que vai de aproximadamente $0,38\mu\text{m}$ a $0,72\mu\text{m}$; é definida como capaz de produzir a sensação de visão para o olho humano normal, sendo decomposta nas cores violeta, azul, verde, amarela, laranja e vermelho; possui grande importância para o sensoriamento remoto, pois imagens obtidas, nessa faixa, apresentam excelente correlação com a experiência visual do intérprete;
- infravermelho (IV) - possui comprimento de onda de $0,72\mu\text{m}$ a $15\mu\text{m}$; é dividido em próximo, médio e afastado, sendo facilmente absorvida pela maioria das substâncias (efeito de aquecimento);
- microondas - suas radiações situam-se na faixa entre 1mm a 1m ; amplamente utilizadas pelo sensoriamento remoto em RADARES, sendo pouco atenuadas pela atmosfera ou por nuvens; permitem o uso de sensores em qualquer condição de tempo; podem ser utilizadas na detecção de óleo no mar e estimativa de perfil atmosférico (temperatura, umidade); e
- ondas de rádio - possuem grandes comprimentos e são utilizadas para comunicações a longa distância, pois são pouco atenuadas pela atmosfera.

Segundo Steffen et al. (1981) sensor remoto é um dispositivo capaz de responder à radiação eletromagnética de determinada faixa do espectro eletromagnético, registrá-la e gerar um produto numa forma adequada à interpretação pelo usuário.

A mensuração da reflectância espectral é a abordagem sem contato e não destrutiva mais promissora para a determinação de alguma característica da cultura, como a deficiência de

nitrogênio (TUMBO et al., 2002). A reflectância não leva em consideração a distribuição espacial dos fluxos de radiação refletida e incidente, e é por isso denominada reflectância difusa. Em geral, os fluxos considerados na determinação da reflectância estão contidos em dois ângulos sólidos e a razão desses fluxos determina a reflectância bicônica do elemento de superfície ($\Delta\alpha$).

Na determinação da reflectância pode-se considerar o fluxo radiante contido em uma banda espectral $\Delta\lambda$ e nesse caso a denominação recebe também o sufixo multiespectral. Se a banda for muito pequena ($<10\text{nm}$), o valor médio da reflectância pode ser associado ao comprimento de onda central da mesma e a reflectância é então denominada espectral. Se a banda compreende todo o espectro, a reflectância é denominada total (ANGULO FILHO, 2005).

Cada objeto apresenta um comportamento frente à radiação nele incidente, que depende de diversos fatores, muitos dos quais não são controlados. As frações de energia transmitida, refletida e absorvida pelos objetos variam com suas propriedades físico-químicas, estrutura e posição em relação à fonte de radiação (NOVO, 1992). Mesmo assim, dentro de determinadas condições é possível estabelecer a característica espectral de alguns alvos.

Segundo Moreira (2005), no estudo da resposta espectral de folhas verdes, constatou-se que no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm (faixa do visível - VIS) a reflectância é baixa, da ordem de 10%, com um suave aumento da resposta na região do verde (550nm). A queda da reflectância está associada à absorção pelos pigmentos foliares, principalmente pela clorofila. Na região do azul, a absorção ocorre nas proximidades do comprimento de onda de 445 nm e está associada à presença dos pigmentos xantofila, carotenos, clorofilas α e β e na região do vermelho (V) apenas a clorofila atua, absorvendo energia em torno de 645 nm. Na faixa do infravermelho próximo (IVP), de 700 a 1300 nm, ocorre outro aumento na reflectância para valores próximos a 50%, devido à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células, e à quantidade de espaços intercelulares). Daí em diante, até 2500 nm (infravermelho médio - IVM), há um gradual decréscimo, na reflectância aparecendo algumas feições de absorção pelo conteúdo de água líquida.

Diversos produtos podem ser obtidos com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto na agricultura. Segundo Epiphanyo e Formaggio (1990), muita informação pode ser retirada a partir da análise de apenas uma banda espectral, porém a disponibilidade de várias bandas permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, ou seja,

quanto maior o número de bandas espectrais dispuser um sistema sensor, mais possibilidades de extração de informações do objeto de estudo ele poderá abranger.

Os índices espectrais de vegetação, ou simplesmente índices de vegetação (IVs), podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais dessas bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com os parâmetros da vegetação. Para isso, podem ser utilizados os valores de dados espectrais de voltagem de saída do sensor, radiância, número digital e reflectância. Normalmente usam-se os valores de reflectância, devido à maior facilidade de obter este dado espectral comparado às dificuldades em interpretar e obter os resultados das medidas calibradas com valores de voltagem de saída, número digital e radiância. Um índice de vegetação ideal deve ser capaz de responder a sutis variações no estado fenológico da vegetação, independentemente da situação temporal ou espacial, e não pode sofrer fortes influências por variações de tipos de solo, na geometria de iluminação e visada e nas condições atmosféricas (HUETE,1996).

Com o trabalho de Rouse et al. (1973) surgiu o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*), o qual preconizava uma relação entre medidas espectrais de duas bandas que melhor resolvia o problema das interferências do solo na resposta da vegetação e também diminuía as influências da atmosfera e das variações sazonais do ângulo do Sol. No entanto, a influência do solo, da atmosfera e da geometria de iluminação e visada não foi adequadamente eliminada, tendo surgido diversas variações para o NDVI, na tentativa de obter um índice menos sensível a tais influências. Atualmente, utiliza-se qualquer par de bandas do V e do IVP, proveniente de qualquer sensor óptico, e alguns estudos mais recentes têm investigado a aplicabilidade de bandas do IVM (MIURA et al., 1998).

A normalização proposta por Rouse et al. (1973) visou eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica, observados para dados multitemporais. Com ela os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1. Para esse índice, adota-se a seguinte expressão:

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)}$$

Em que:

ρ_{IVP} = reflectância no infravermelho próximo;

ρ_v = reflectância no vermelho.

A normalização é produzida pela combinação da forte absorção pela clorofila na região do vermelho e a forte reflectância no infravermelho devido à dispersão no mesófilo da folha e a ausência de absorção pelos pigmentos (WOOLLEY, 1971). Uma particularidade do NDVI é sua rápida saturação tornando-o insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento. Gleriani (1994) identificou indícios de saturação já com o índice de área foliar (IAF) em torno de 2. Entretanto, quando comparado com outros índices o NDVI foi o índice que melhor estimou este parâmetro, apresentando menor dispersão dos pontos. Tratando da avaliação do ruído inerente (razão sinal-ruído), Qi et al. (1994) apontaram o NDVI como sendo o menos afetado dos cinco índices estudados, tendo o pior desempenho nas situações de baixa densidade vegetal.

Existem diversos fatores que interferem na obtenção dos índices de vegetação e que para as mesmas condições de superfície podem conduzir à obtenção de valores diferentes. Esses fatores podem ser separados em dois grupos: fatores relacionados com a superfície observada e fatores relacionados com o processo de obtenção dos dados (GALVÃO et al., 1999). São ainda conhecidos como fatores internos e externos, respectivamente (GUYOT, 1990; BARET; GUYOT, 1991). Fatores relacionados com a superfície observada incluem os aspectos intrínsecos à vegetação e ao solo, que influenciam as medidas espectrais dos sensores. Fatores relacionados com o processo de obtenção dos dados envolvem as características de construção do sensor, como a largura e o posicionamento das bandas e a calibração do equipamento, a geometria de iluminação do Sol e de visada do sensor e os efeitos atmosféricos (absorção e espalhamento).

As contribuições do solo na resposta espectral da vegetação variam com a quantidade exposta, com as suas propriedades intrínsecas e com as condições da superfície. Na determinação dos índices de vegetação, a influência do solo é significativa em situações de cobertura parcial pela vegetação, especialmente onde possam ocorrer variações espaciais ou temporais da superfície do solo. Essa influência ocorre tanto em relação ao brilho do dossel, associado à magnitude (amplitude) da radiância refletida, quanto ao perfil da curva espectral, associado às características mineralógicas, orgânicas e de absorção de água (HUETE, 1989).

2.2 Cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) apresenta grande importância na economia brasileira, contribuindo para a geração de divisas. Tal importância é atribuída à sua múltipla utilização, podendo ser empregada *in natura*, sob a forma de forragem para alimentação animal ou como matéria prima para a fabricação de açúcar, álcool, aguardente, rapadura e melado. O Brasil destaca-se no cenário mundial como produtor de cana-de-açúcar, possuindo cerca de 5,8 milhões de hectares cultivados.

O ciclo evolutivo da cultura pode ser de 12 (cana de ano) e 18 meses (cana de ano e meio) em cana-planta. Após o primeiro corte o ciclo passa a ser de 12 meses (ALFONSI et al., 1987), e a partir do corte passa a ser denominada de cana-soca. Os fatores ambientais que afetam de maneira significativa a produção da cana-de-açúcar são temperatura, luz, disponibilidade de água e nutriente (ALFONSI et al., 1987).

A cana de ano (12 meses), plantada em setembro-outubro, na região Centro Sul, tem seu desenvolvimento máximo de novembro a abril, reduzindo a partir de então devido às condições climáticas adversas do período caracterizado por ausência de chuvas e baixas temperaturas de acordo com Rodrigues (1995), podendo essa colheita ocorrer a partir de julho, em função do cultivar. A cana de ano e meio (18 meses), plantada de janeiro ao início de abril, apresenta taxa de crescimento mínimo ou mesmo nulo ou negativo, de maio a setembro em função das condições pouco favoráveis do inverno. Já com o início das precipitações, aumento da intensidade luminosa e também da temperatura, a fase de maior desenvolvimento da cultura acontece de outubro a abril, intensificada a partir de dezembro.

A cana-de-açúcar é uma poaceae semi-perene com metabolismo fotossintético C₄, que responde melhor a elevadas intensidades luminosas. Segundo Lucchesi (1995) a radiação solar afeta todos os estágios de desenvolvimento da cultura, sendo que em condições de baixa luminosidade a planta tem seu desenvolvimento comprometido, apresentando colmos finos e longos, com menor acúmulo de matéria seca.

Sendo a cana-de-açúcar uma planta de metabolismo fotossintético C₄, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg dm⁻² h⁻¹ de CO₂ fixado pela área foliar, segundo Rodrigues (1995). Entretanto, esta alta atividade fotossintética não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa. A grande capacidade da cana-de-açúcar, para a

produção de matéria orgânica, reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciado pelo Índice de Área Foliar (IAF). Além disso, o longo ciclo de crescimento da planta resulta em elevadas produções de matéria seca.

As características dos cultivares influenciam a eficiência fotossintética da cana, além das variações climáticas que prevalecem durante o desenvolvimento da cultura. A fotossíntese é correlacionada negativamente com a largura das folhas e positivamente com a sua espessura. Posição mais vertical da folha no colmo, traduz-se em maior eficiência fotossintética, normalmente em populações de alta densidade populacional, devido à penetração mais eficiente da luz no dossel. A fotossíntese varia com a idade das folhas, atingindo valores de fixação de C4 apenas às folhas recém-expandidas, enquanto as folhas mais velhas e as muito jovens realizam fotossíntese em níveis semelhantes aos das plantas C3 (RODRIGUES, 1995).

2.3 Falhas nas linhas de cana-de-açúcar

O setor canavieiro conta com a contribuição tecnológica da mecanização, em constante evolução, principalmente na colheita de cana-de-açúcar, para o aumento da competitividade. Para que a colheita, principalmente a mecanizada, seja bem sucedida, é necessário atentar-se a qualidade do plantio já que a longevidade do canavial depende da interação entre estas duas operações. Muitos são os fatores que interferem na qualidade do plantio, desde o preparo do solo, densidade de plantio, época, escolha da variedade, qualidade e idade da muda.

Vale a observação de que, conforme Rípoli e Rípoli (2004), as touceiras de cana ordenadas em filas devem ser denominadas de fileiras de plantio. Porém devido aos estudos utilizados no embasamento deste trabalho utilizar a denominação de linha de plantio ao invés de fileira de plantio, optou-se pela utilização da terminologia usual.

Acompanhar o desenvolvimento de uma cultura tem sido cada vez mais imprescindível para a tomada de decisões. Ajustes em tratamentos culturais, irrigação e mesmo replantios podem ser executados pela detecção de falhas ou diferenças no desenvolvimento da cultura. Stolf (1986) propôs um método de avaliação de falhas de plantio e o define como um critério extremamente simples, pois basta contar e computar a somatória da distância de falhas acima de 0,5 m, num determinado trecho da linha. Para tal basta uma trena e um gabarito de 0,5 m para, que em caso de dúvida, possa definir se a falha é maior ou menor que este valor. A trena utilizada na mensuração das falhas é colocada no ponto inicial da primeira falha na marcação zero e lê-se o

comprimento da falha fazendo marcação na trena do valor correspondente ao tamanho total da falha na trena. Na seqüência, quando for necessária nova medição, coloca-se o ponto referente ao tamanho da falha anterior, ao invés de zero, no ponto inicial da falha, lê-se o valor da falha e marca-se o valor acumulado e na seqüência o mesmo é feito nas demais falhas. Assim, ao final do trecho lido tem-se na trena a marcação do total de metros de falhas que foram lidos não sendo necessário anotar e medir o tamanho de cada falha. Ainda, no mesmo trabalho, o autor qualificou o plantio segundo a porcentagem de falhas, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Avaliação dos resultados de plantio, segundo critérios de Stolf (1986)

Falhas (%)	Qualidade do plantio	Observações
0 – 10	Excelente	15 gemas por metro em condições excepcionais de germinação
10 – 20	Normal	Tipo mais comum encontrado
20 – 35	Subnormal	_____
35 – 50	Ruim	Pode-se considerar a reforma
> 50	Péssimo	Reformar ou replantar

Stolf et al. (1986) correlacionou o índice de falhas com o rendimento agrícola em cana planta, constatando que a diminuição da produtividade com o aumento da porcentagem de falhas é linear até valores em torno de 55% de falhas, intervalo esse que engloba a variabilidade natural de áreas comerciais. No mesmo experimento foi constatado que para um aumento de 10% de falhas há uma queda de 3,2% no rendimento agrícola, demonstrando a sensibilidade do parâmetro. Da mesma forma, Stolf et al. (1991) correlacionou o rendimento agrícola com o índice de falhas em soqueiras de cana-de-açúcar, concluindo que as falhas em soqueiras assumem uma importância menor quando comparadas com cana-planta. Contudo as perdas assumem a mesma grandeza das da cana-planta, o que permitiu propor a mesma curva de calibração que relaciona o índice de falha com a produtividade relativa, já estimada em cana-planta.

Num ensaio realizado por Pinto e Moraes (1997a), onde foram apresentadas as principais características do sistema de plantio mecanizado com um equipamento distribuidor de toletes, a avaliação de falhas realizada após o plantio apresentou uma qualidade normal nos primeiros meses e excelente após 10 meses do plantio segundo os critérios propostos por Stolf (1986).

Ao avaliarem uma plantadora de cana Pinto e Moraes (1997b) notaram que houve uma redução na porcentagem de toletes sadios para a variedade RB 806043 após o transbordo e plantio mecanizado. As avaliações efetuadas 90 dias após o plantio mostraram a maior ocorrência de falhas de brotação (21 %), na área onde houve uma menor distribuição de toletes provocada pela maior incidência de impurezas vegetais na muda fornecida, já nas áreas onde houve maior distribuição de toletes as falhas foram de 7 e 12 %.

Todos estes levantamentos foram realizados utilizando a metodologia proposta por Stolf (1986) que segue sendo adotada quando este tipo de avaliação torna-se necessário. Entretanto, como tal método requer tempo considerável, apenas é feito por amostras, não possibilitando a averiguação de toda a área.

A necessidade de obtenção de dados em larga escala e que possam descrever as lavouras faz com que os usuários busquem novas ferramentas de trabalho, como as imagens de alta resolução que podem fornecer tais dados e auxiliar o acompanhamento do desenvolvimento de um campo de cultivo, uma vez que as falhas e as diferenças de padrões são claramente percebidas (JORGE; TRINDADE JUNIOR, 2002).

Muitos pesquisadores usaram o sensoriamento remoto para estimar parâmetros das culturas como radiação fotossinteticamente ativa e índice de área foliar (BARET et al., 1991), conteúdo de clorofila nas folhas (TUMBO et al., 2002), cobertura do solo (BOISSARD et al., 1992), acumulação total de matéria seca (TUCKER et al., 1981), conteúdo de água (WAHEED et al., 2006), produtividade (FISCHER et al., 1993), conteúdo de nitrogênio (SOLIE et al., 2002), e outras propriedades químicas da vegetação.

Conforme apontado por Fontana et al. (1998), as mudanças estruturais da vegetação no decorrer da estação de crescimento resultam em uma diferenciação da sua reflectância, o que permite empregar o NDVI para o monitoramento da vegetação, bem como distinguir diferentes tipos de vegetação e detectar possíveis problemas de crescimento. Embora o uso da reflectância apresente grande potencial de utilização na cana-de-açúcar, apenas alguns trabalhos foram desenvolvidos estudando-a (RUDORFF; BATISTA, 1990, JOAQUIM, 1998, PELLEGRINO, 2000) permanecendo uma carência em estudos do comportamento espectral da cana-de-açúcar, especialmente com o surgimento de sensores óticos ativos com potencialidade em avaliar falha de plantio ou arranquio de soqueiras em áreas comerciais.

2.4 Importância das variedades de cana-de-açúcar

É bastante antiga a busca por formas varietais que apresentem maior teor de sacarose, destacando-se nesta contribuição a espécie *Saccharum officinarum*, que até o início do século XX era responsável por grande parte da matéria-prima mundial. A técnica do melhoramento genético adquiriu grande importância a partir de 1880, em função do surgimento da doença de *sereh*, mosaico e a gomose visando à resistência a essas doenças, utilizou-se o cruzamento interespecífico (LANDEL, 2005). Plantas, antes sem capacidade de perfilhamento, passaram a apresentar, a partir de então, não apenas tal característica, como também grande habilidade de brotação após o corte. Colmos que apresentavam diâmetro excessivo e baixíssimo teor de fibra, agora eram de média grossura, com valores médios e altos de fibra (EDGERTON, 1955). Desde o advento de hibridações manipuladas, o perfil varietal se distinguiu, oferecendo à indústria uma nova concepção de matéria-prima.

No Brasil, assim como em outros países produtores de cana-de-açúcar, variedades têm sido continuamente desenvolvidas e testadas com os objetivos de aumentar a produtividade, obter maior resistência às pragas e doenças e melhor adaptação às variações de clima, tipos de solos, técnicas de corte ou manejo (GALVÃO et al., 2005).

O planejamento dos cruzamentos é realizado adotando-se como critérios principais: grau de endogamia entre varietais, teor de açúcar, produtividade agrícola, resistência às principais doenças (carvão, mosaico, ferrugem, amarelinho e escaldadura), capacidade de brotação da soqueira e hábito ereto de crescimento da touceira dos genitores. O grau de sucesso nessa etapa correlaciona-se com a qualidade da coleção de genótipos mantida para o fim de hibridação. Ela deve receber, de maneira contínua, germoplasma de diversas origens e, principalmente, conter uma estratégia para incorporação de indivíduos oriundos do processo de seleção recorrente, que tem como principal objetivo alterar a média populacional dos caracteres no sentido de uma melhor adequação aos interesses agrícolas (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992).

A identificação varietal e o conhecimento das áreas de produção de cana-de-açúcar são práticas utilizadas, de acordo com Joaquim (1998), para censos quantitativos, logísticas de transporte, políticas de compra e venda dos produtos finais, tomadas de decisão quanto à abertura de novas unidades, expansão da lavoura até práticas agrícolas. Atualmente a pretensão de se identificar variedades e áreas de cana-de-açúcar se justifica pela lei de proteção de cultivares, que

visa proteger aqueles que investem no desenvolvimento de variedades (JOAQUIM; DONZELLI, 1999).

Na área canavieira, o sensoriamento remoto tem auxiliado no desenvolvimento de trabalhos que visam à identificação de variedades, sintomas de deficiências nutricionais e stress, classificação, mapeamento da produção e manejo (ALMEIDA et al., 2002; JOAQUIM, 1998; INAMASU et al., 2006; RUDORFF; BATISTA, 1990; FIORIO et al., 2000).

A maior parte das pesquisas para testar a discriminação de variedades de cana-de-açúcar com sensoriamento remoto tem utilizado dados multiespectrais. Joaquim (1998), utilizando as variedades SP70-1143, SP71-1406 e SP71-6163, constatou que para a cultura da cana-de-açúcar a textura do solo não tem influência na identificação de variedades e obteve boa separação destas utilizando o sensor orbital TM (Thematic Mapper)/Landsat-5. Fortes (2003), utilizando dados dos sensores ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus)/Landsat-7 afirma ser possível discriminar as variedades de cana-de-açúcar com 93,55 % de acerto.

Pesquisas relativas à utilização de dados hiperespectrais para a discriminação de variedades de cana-de-açúcar são mais raras na literatura. Galvão et al. (2005) trabalharam com imagens do sensor Hyperion/EO-1 demonstrando que a variedade SP80-1842 apresentou uma reflectância menor do que as demais, o que facilitou sua discriminação na imagem. A discriminação das outras quatro variedades (RB 72454, SP80-1816, SP81-3250 e SP87-365), que possuem valores de reflectância similares, foi feita com análise discriminante. Esta técnica produziu uma exatidão de classificação de 87,5%.

2.5 A cana-de-açúcar e a adubação nitrogenada

O manejo da adubação se faz necessário para que a produtividade agrícola seja satisfatória e com um custo adequado. Além do incremento da produtividade a adubação deve ser realizada de forma racional evitando desperdícios de fertilizantes, contaminações ambientais, perda de competitividade devido ao aumento excessivo de custos, dentre outros. Segundo Malavolta (1981) é de suma importância o manejo de adubação nitrogenada e potássica para incremento de produtividade visto que o nitrogênio e o potássio são os macronutrientes absorvidos e exportados em maiores quantidade pela cana de açúcar.

Na ordem de extração de nutrientes pela cultura, verifica-se que o potássio é extraído em maior quantidade que o nitrogênio ($K > N > Ca > Mg > P$). O mesmo é constatado na exigência

de macronutrientes para produzir 100 toneladas de cana, onde são necessários 174 de K, 143 kg de N, 87 de Ca, 49 de Mg, 44 de S e 19 de P (ORLANDO FILHO et al., 1980). Deve se observar, segundo Rodrigues (1995), que para a maioria dos elementos minerais, o pico de absorção na cana-planta acontece na segunda metade do grande período, ou seja, dos 9 meses em diante. Para a cana soca, o pico de absorção ocorre na primeira metade do grande período, ou seja, até os seis meses de idade.

O fósforo tem grande importância na qualidade da matéria prima, pois teores de P_2O_5 acima de 300 ppm facilitam a clarificação do caldo. O potássio possui importante ação na translocação de sacarose, seja no transporte via floema ou no transporte célula a célula da sacarose em direção ao floema, ou deste no sentido do armazenamento. Deficiência de K^+ pode levar ao acamamento por diminuição da turgescência celular, bem como à menor fotossíntese por fechamento dos estômatos. O excesso desse elemento, no entanto, não é desejável para a fabricação do açúcar, pois como é o maior constituinte das cinzas, estas em alta concentração no caldo dificultam a cristalização, em função da formação de núcleos falsos, reduzindo o rendimento industrial de açúcar. No entanto, altos teores de cinzas favorecem a produção de álcool, agindo como fonte de nutrientes para as leveduras.

A adubação nitrogenada em cana-de-açúcar no Brasil vem desde 1940, quando se utilizava principalmente o nitrato de sódio como fonte de N e já eram observados pequenos ganhos de produção com essa prática (RUSHEL, 1982). Diversos trabalhos encontrados na literatura mostram a importância do N na cultura da cana-de-açúcar. Mesmo estando em apenas 1% da matéria seca total da cana-de-açúcar, havendo deficiência de N a planta apresenta redução na síntese de clorofila, de aminoácidos essenciais e da energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos (MALAVOLTA; HAAG, 1964; SILVEIRA, 1980). Elevando-se o teor de nitrogênio, a cana-de-açúcar responde produzindo mais fitomassa, e o aumento no conteúdo desse nutriente nas folhas e entrenós está correlacionado com o aumento de seu conteúdo no solo (BOLTON; BROWN, 1980). No quarto mês do ciclo, as quantidades de N extraídas do solo por colmos e folhas já são elevadas, sugerindo a necessidade de adição de N no solo logo no início do ciclo de produção (ORLANDO FILHO et al., 1980).

Segundo Das (1936) o N aumenta o comprimento dos colmos da cana-de-açúcar, o que provoca redução na espessura da parede celular, podendo levar à redução na porcentagem de fibras na planta. Existem relatos de que ocorre aumento linear na quantidade de açúcar produzida

com as doses de N, apesar de resultar, também, em elevação no teor de água dos colmos, levando à redução no teor de sacarose (KORNDORFER et al., 1992).

Como a falta de nitrogênio é preocupante, o excesso também é indesejável, levando a planta a crescimento vegetativo excessivo, atrasando a maturação e prejudicando a qualidade da matéria prima pela diminuição do teor de sacarose dos colmos.

Mesmo a cultura da cana retirando do solo elevadas quantidades de N, de 0,7 a 0,9 kg de N por tonelada de colmo, a cana planta tem menor resposta a esse nutriente comparado à cana soca, a qual responde a doses maiores principalmente em solos argilosos (ORLANDO, 1993).

Estudos realizados no Hawaí mostraram que a cana-planta necessitou de 0,9 kg de N para cada tonelada produzida, ao passo que a cana-soca necessitou de 1,3 kg de N (DILLEWIJN, 1952). O N aplicado, em contato com o solo, entra no complexo da matéria orgânica morta ou viva, sofrendo as reações de imobilização e mineralização, cuja dimensão é pouco conhecida para os solos brasileiros, sobretudo para a cultura da cana-de-açúcar.

A ausência de resposta da cana-planta à adubação nitrogenada está ligada às fontes alternativas de N para cana, como a fixação biológica (DOBEREINER, 1961), a maior disponibilidade de N proporcionada pela mineralização do resíduo vegetal resultante da reforma do canavial (CARNAÚBA, 1990) e da matéria orgânica do solo (GREENLAND, 1965), além do N armazenado no tolete da planta (CARNEIRO, 1995) e as práticas agrícolas envolvendo principalmente a calagem.

A adubação nitrogenada em cana-planta é viável, aplicando-se no sulco de plantio de cana de 18 meses cultivada em área em que não foi cultivada cultura leguminosa para adubação verde e em cana de ano, 30 kg ha⁻¹ de N. Em cobertura é possível aplicar até 60 kg ha⁻¹ de N, mas somente em cana de ano (VITTI et al., 2001).

Com a implantação, no Estado de São Paulo, da lei estadual nº 11.241, assinada pelo Governador Geraldo Alckmin em 19/09/2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas, vem aumentando a colheita mecanizada de cana crua e com isto aumentado os estudos do impacto da palha no solo, assim como novos manejos de adubação. Estima-se que no Estado de São Paulo a massa de palha que fica no solo após a colheita da cana crua, varia de 13 a 20 t ha⁻¹ de matéria seca (HERMAN et al., 1977). Segundo Cantarella (1998), a palha depositada sobre o solo, após a colheita da cana sem queima prévia, está na faixa de 10 a 15 t ha⁻¹.

Segundo Sampaio (1991), a queima da palha pode levar à redução no teor de matéria orgânica do solo, o que é agravado pela diminuição na qualidade dessa matéria orgânica. Segundo Vitti (2004) a mudança do sistema de colheita de cana com prévia despalha a fogo para cana crua colhida mecanicamente, é um processo irreversível e apresenta vantagens no sentido de conservação do solo, manutenção da unidade e reciclagem de nutrientes. Entretanto implicará numa maior dificuldade para aplicação de fertilizantes, em razão da necessidade de incorporá-los durante o cultivo e a redução da porosidade do solo devido ao tráfego agrícola. (ABRAMO FILHO et al., 1993) evidenciam que a palha possibilita menor temperatura e maiores teores de umidade e de matéria orgânica no solo.

Como a cana-de-açúcar é considerada cultura semi-perene, a cobertura do solo com restos de cultura (palha) é uma das mais eficientes práticas de controle de erosão, protegendo o solo contra a ação direta dos ventos e impedindo o transporte de partículas por erosão eólica, agindo, ainda, como protetor contra a erosão causada pela chuva (SALLAWAY, 1979). Segundo Furlani Neto et al. (1997), a palha de cana deixada no campo proporciona retorno de nutrientes, principalmente N e S, pois apresenta cerca de 40 a 80 kg ha⁻¹ de N e metade desses valores como S que, junto com outros nutrientes, poderiam ser disponibilizados à cultura por ação de microrganismos do solo. Segundo Cantarella (1998), a contribuição da palha depositada sobre o solo é pequena, devido à baixa taxa de mineralização. Dessa maneira, nos primeiros anos sob sistema de cana crua, não deve haver redução na necessidade de adubação nitrogenada em relação à cana queimada. Com diminuição nas perdas de solo por erosão e aumento contínuo na palha, ocorrerão aumentos nos teores de matéria orgânica e nitrogênio do solo, podendo representar menor necessidade nas doses de N após alguns anos de implantação dessa prática.

A presença da palha de cana-de-açúcar na superfície do solo também pode ter aspectos negativos. Abramo Filho et al. (1993) relata possível aumento de pragas e retardamento da brotação de soqueiras. Buzolin (1997) constatou que áreas com cobertura de palha sobre o solo foram mais afetadas pela ocorrência de geada em relação às áreas cultivadas sem a presença de palha. A palha resultante da colheita de cana crua provoca mudanças no agroecossistema, exigindo reformulação na tecnologia até então empregada no manejo da cana colhida queimada. Tendo em vista que a prática da colheita de cana crua pode alterar significativamente a fertilidade dos solos, em função do material orgânico deixado na superfície, há necessidade de estudo do potencial de mineralização. Do ponto de vista da fertilidade do solo e da nutrição das plantas,

com relação ao manejo da adubação, a maior problemática é quanto ao uso do nitrogênio na adubação de soqueiras. A adubação dessas áreas com N em superfície, leva à imobilização do nutriente devido à elevada relação C/N da palha (GAVA, 1999).

Para adubação nitrogenada de soqueiras colhidas sem queima, constata-se a necessidade de uso de fontes nitrogenadas que apresentem menores perdas do elemento por volatilização, pois com a palha há dificuldade de incorporação do adubo (TRIVELIN et al., 1997). Outra possibilidade para reduzir perdas por volatilização seria garantir a presença de componente acidificante do meio. Em alguns casos, a mistura da fonte nitrogenada com vinhaça mostrou-se eficiente para reduzir perdas por volatilização de N-NH₃. A utilização de fontes nitrogenadas que apresentem o N em outras formas também tem se mostrado eficiente para reduzir perdas por volatilização de N-NH₃.

2.6 Uso de sensores óticos na Agricultura

Estudos realizados por Blackmer e Schepers (1994), mostraram a viabilidade da utilização de medidor de clorofila Minolta SPAD 502, para monitoração temporal e espacial de N em folhas do milho. Nestes trabalhos as aplicações de N foram feitas conforme requerido em função dos teores presentes no dossel vegetativo e estágio de desenvolvimento, mostrando um avanço em relação ao método tradicional baseado em medidas do conteúdo de N no solo.

O teor de clorofila na planta é um dos fortes indicativos de deficiência ou suficiência de N no solo (SCHEPERS; SHANAHAN, 2005), pois integra os parâmetros de solo como pH, matéria orgânica, taxa de mineralização de nitrogênio, umidade entre outros.

Esse comportamento do nitrogênio nas folhas indicado indiretamente pela clorofila motiva vários estudos conduzidos para avaliar o status do nutriente através da resposta espectral (LI et al., 1999; READ et al., 2003). A maioria dos casos estudados indicou que a reflectância das folhas ou do dossel perto de 550 nm apresenta boa correlação com a quantidade de nitrogênio nas folhas.

Muito pesquisadores utilizaram o sensoriamento remoto para estimar parâmetros das culturas como radiação fotossinteticamente ativa e índice de área foliar (BARET et al., 1991), conteúdo de clorofila nas folhas (TUMBO et al., 2002), cobertura do solo (BOISSARD et al., 1992), acumulação total de matéria seca (TUCKER et al., 1981), conteúdo de água (WAHEED et

al., 2006), produtividade (FISCHER et al., 1993), conteúdo de nitrogênio (SOLIE et al., 2002), e muitas outras propriedades químicas da vegetação.

Em plantas estressadas há um decréscimo na absorção pela clorofila, diminuindo também a reflectância no infravermelho devido a mudanças na estrutura das células da planta, e esse decréscimo leva a um aumento na reflectância no vermelho (AYALA-SILA et al., 2005).

Muitos estudos foram realizados para estimar a deficiência de nitrogênio, em milho (BLACKMER et al., 1996), trigo (STONE et al., 1996), feijão (THAI et al., 1998), algodão (SUI, 2005) e citros (MIN et al., 2005). Eles mostraram um grande potencial do uso de análise espectral para estimar a quantidade de nitrogênio nas culturas. Seus resultados mostram que a reflectância espectral é inversamente correlacionada com a quantidade de nitrogênio nas culturas.

Outros métodos podem ser utilizados para medir indiretamente o estresse causado pela falta de nitrogênio, como a quantidade de clorofila nas folhas, utilizando um medidor de clorofila (PIEKIELEK et al., 1995). Wright et al., (2004) analisando fotografias aéreas e imagens de satélite encontraram menor correlação com as variáveis da cultura do trigo do que sensores terrestres, além de não ser possível obter sempre as imagens de satélite com a qualidade desejada devido a condições climáticas, como a presença de nuvens. Stone et al. (1996) utilizaram um trator com os componentes de um sensor montados na sua frente para adquirir dados espectrais em trigo. Os autores obtiveram boa correlação entre a reflectância e a absorção de nitrogênio pela cultura ($R^2 = 0,64$ a $0,81$) para diferentes variedades de trigo. Taylor et al. (1998) usaram as mesmas configurações que Stone et al. (1996) para coletar dados espectrais de pastagens e também obtiveram boa correlação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a remoção de nitrogênio pela cultura ($R^2 = 0,75$).

Wright et al. (2004) encontraram maior correlação entre o índice de vegetação NDVI de um sensor comercial (GreenSeeker®) do que os índices de vegetação de imagens do satélite Quickbird II e imagens aéreas para a quantidade de nitrogênio aplicada na época da semeadura, quantidade de nitrogênio presente na folha bandeira, produtividade e teor de proteína em grãos de trigo. No mesmo trabalho Wright et al. (2004) mostraram que aplicações de nitrogênio no estágio de florescimento, em plantas de trigo deficientes em nitrogênio, aumentaram significativamente a qualidade dos grãos, enquanto aplicação em plantas com N disponível teve pouco efeito sobre a qualidade dos grãos.

Schwab et al. (2000), correlacionando os valores de NDVI coletados com o mesmo sensor comercial, não obtiveram boas correlações com a produtividade final, mas correlacionando com o INSEY (*in-season estimate of grain yield*), que é calculado dividindo o NDVI pelo número de dias após a semeadura, dizem haver uma correlação ($R^2 = 0,55$). Kim et al. (2005), estudando dados de coleta com esse mesmo sensor em três épocas diferentes e dois tipos de sistema sem irrigação em cevada, encontraram correlações entre o NDVI e a dose de nitrogênio aplicado na semeadura de 63 a 90%, e correlações entre o NDVI e valores obtidos com um sensor de clorofila de 58% a 94%.

Referências

- ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D.; MARCHIETTI, L.L. Resíduo da colheita mecanizada da cana crua. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v. 13, n. 67, p. 23- 25, 1993.
- ALFONSI, R.R.; PEDRO, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 42-87.
- ALMEIDA, T.I.R.; ROSSETO, R.; SOUZA FILHO, C.R. Imagens ASTER e LANDSAT ETM aplicadas à previsão de safra de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: discussão metodológica e primeiros resultados. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 8., 2002, Recife. **Anais ...** Recife: STAB, 2002. p. 488-492.
- ANGULO FILHO, R. **Apontamentos das aulas de sensoriamento remoto I: LER 831**, Piracicaba: ESALQ, 2005. 52 p.
- AYALA-SILVA, T.; BEYL, C.A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advances in Space Research**, Elmsford, v. 35, p. 305-317, 2005.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 161-173, 1991.
- BARET, F.; JACQUEMOUND, S.; HANOCQ, J. F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing of environment**, New York, v. 7, n. 1, p. 1-18, 1993.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, n. 9/10, p. 1791-1800, 1994.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, p. 56-60, 1995.

- 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.
- BOISSARD, P.; POINTEL, J.G.; TRANCHEFORT, J. Estimation of the ground cover ratio of a wheat canopy using radiometry. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 13, n. 9, p. 1681-1692, 1992.
- BOLTON, J.K.; BROWN, R.H. Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways. V. Response of *Panicum maximum*, *Panicum milioides* and tallfescue (*Festuca arundinaceae*) to nitrogen nutrition. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 66, p. 97- 100, 1980.
- BUZOLIN, P.R.S. **Efeitos da palha residual da colheita mecanizada associada a fontes de potássio e doses de nitrogênio, no solo e nas socas de cana-de-açúcar.** 1997. 89 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1997.
- CAMPBELL, J.B. **Introduction to remote sensing.** New York: Virginia Polytechnic Institute, The Guildford Press, 1987. 551 p.
- CANTARELLA, H. Adubação nitrogenada em sistema de cana crua. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, n. 4, p. 21-22, mar./abr. 1998.
- CARNAÚBA, B.A.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 8, n. 3/4, p. 24- 41, jan./abr. 1990.
- CARNEIRO, A.E.V.; TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana-planta. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 53, p. 199-209, 1995.
- COLWELL, R.N. Manual of Remote Sensing. **American Society of Photogrammetry**, Falls Church v. 2, p. 138-336, 1983.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira da cana-de-açúcar 2007/2008: primeiro levantamento.** Brasília, 2007. 12 p.
- DAS, U.K. Nitrogen nutrition of sugarcane. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 5, n. 11, p. 251- 317, 1936.
- DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane.** Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371 p.
- EDGERTON, C.W. **Sugarcane and its disease.** Baton Rouge: Louisiana State University Press, 1955. 290 p.
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 1988. p. 400-405.

- FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; SPAROVEK, G. Cronologia e impacto ambiental o uso da terra na microbacia hidrográfica do Ceveiro, em Piracicaba, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 671-679, 2000.
- FISHER, R.A.; HOWE, G.N.; IBRAHIM, Z. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. I. Grain yield and protein content. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 33, p. 37-56, 1993.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, p. 1399-1405, 1998.
- FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7**. 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- FURLANI NETO, V.L.; RIPOLI, T.C.; VILLA NOVA, N.A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhico remanescente de colheita mecânica. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 15, n. 4, p. 24- 27, 1997.
- GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 4, p. 523-534, 2005.
- GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; ALMEIDA FILHO, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannas. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 67, n. 2, p. 181-193, 1999.
- GAVA, G.J.C. **Utilização do nitrogênio da uréia (15N) e da palhada (15N) por soqueira e cana-de-açúcar no manejo sem despalha a fogo**. 1999. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciência) – **Centro de Energia Nuclear na Agricultura**, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- GLERIANI, J.M. **Influencia do solo de fundo e da geometria da radiação na resposta espectral da cultura do feijão**. 1994. 87 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.
- GREENLAND, D.J. Interactions between clay and organic compounds in soils. Part 2. Adsorption of soil organic compounds and its effects on soil properties. **Soil and Fertilizers**, Harpenden, v.28, 415-425, 1965.
- GUYOT, G. Optical properties of vegetation canopies. In: STEVEN, M.D.; CLARK, J.A. **Applications of remote sensing in agriculture**. London: Butterworths, 1990. chap. 2, p. 19-43.
- HERMAN, W.A.; MCGILL, W.B.; DORMAAR, J.F. Effects of initial chemical composition on decomposition of roots of three grass species. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 57, p. 205- 215, 1977.

- HUETE, A.R. Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. In ASRAR, G. (Ed.). **Theory and application of optical remote sensing**. Ney York: Wiley Interscience, 1989. p. 107-141.
- HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, Paris, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1996.
- 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 ...** São Pedro: Esalq/Usf, 2006. 8 p.
- INMAN, D.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G. Nitrogen uptake across site specific management zones in irrigated maize production systems, **Agronomy Journal**., Madison, v. 97, p. 169-76, 2005.
- JOAQUIM, A.C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara – SP, através de análise de nível de cinza em imagens LANDSAT/TM**. 1998. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.
- JOAQUIM, A.C.; DONZELLI, J.L. **Desenvolvimento do geoprocessamento na cultura da cana-de-açúcar: Identificação varietal usando imagens de satélite: safra 98/99**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1999. 22 p. (Relatório de Projeto).
- JORGE, L.A.C.; TRINDADE JUNIOR, O. **Metodologia para utilização de aeromodelos em monitoramento aéreo**. São Carlos: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002. 6 p. (Circular Técnica, 15).
- KIM, Y.; EVANS, R.G.; WADDELL, J. **Evaluation of in-field optical sensor for nitrogen assessment of barley in two irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 2005. p. 22-25. (ASAE Paper, PNW05-1004).
- KORNDORFER, G.H.; MARTINS, M. Importância da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 10, n. 3, p. 26- 31, jan./fev. 1992.
- LANDELL, M.G.A.; PINTO, L.R.; CRESTE, S.; XAVIER, M.A.; ANJOS, I.A. dos; VASCONCELOS, A.C.M.; BIDÓIA, M.A.P.; SILVA, D.N. da; SILVA, M.A. Seleção de novas variedades de cana-de-açúcar e seu manejo de produção. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 110, p. 18-24, jun. 2005.
- LI, X.; COMMANE, M.; BURNS, C.; VITHALANI, K.; CAO, Z.; STARK, G.R. Mutant cells that do not respond to interleukin-1 (IL-1) reveal a novel role for IL-1 receptor-associated kinase. **Molecular and Cellular Biology**, Washington, v. 19, p. 4643–4652, 1999.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3rd ed. New York: John Wiley, 1995. 784 p.

- LUCCHESI, A.A. Processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **Boletim Técnico ESALQ/CENA**, Piracicaba, n. 7, p. 1-50, 1995.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3.ed. São Paulo: Ceres, 1981. 596 p.
- MALAVOLTA, E.; HAAG, H.P. Nutrição e adubação. In: MALAVOLTA, E. (Ed.) **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro da Potassa, 1964. p. 237- 278.
- MIN, M.; LEE, W.S. Determination of significant wavelengths and prediction on nitrogen content for citrus. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 2, p. 455-461, 2005.
- MIURA, T.; HUETE, A.R.; VAN LEEUWEN, W.J.D.; DIDAN, K. Vegetation detection through smoke-filled AVIRIS images: an assessment using MODIS band passes. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 103, n. D24, p. 32001-32011, 1998.
- MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320p.
- NOVO, E.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo. Edgard Blucher, 1989. 307 p.
- NOVO, E.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1992.
- OMETTO, J.G.S. Mecanismo de desenvolvimento limpo. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. Piracicaba: COPERSUCAR, 1997 p. 452.
- ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E. A.M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 133-146.
- ORLANDO FILHO, J.; HAAG, H.P.; ZAMBELLO JR, E. Crescimento e absorção de macronutrientes pela cana-de-açúcar variedade CB 41- 76, em função da idade, em solos do Estado de São Paulo. **Boletim Técnico Planalsucar**, Piracicaba, v. 2, n. 1, p. 1- 128, fev. 1980.
- PELLEGRINO, G.Q. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa de fitomassa de cana-de-açúcar**. 2000. 109 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Água e solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- PIEKIELEK, W.P.; FOX, R.H.; TOTH, J.D.; MACNEAL, K.E. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 403-408, 1995.
- PINTO, A.C.P.; MORAES, E.E. Equipamento distribuidor de toletes para plantio da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. Piracicaba: COPERSUCAR, 1997a. p. 213-222.

PINTO, A.C.P.; MORAES, E.E. Plantadora de cana. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. Piracicaba: COPERSUCAR, 1997b. p. 223-231.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE A.R.; KERR, Y.H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing Environmental**, New York, v. 48, p. 119-126, 1994.

READ, J.J.; WHALEY, E.L.; TARPLEY, L.; REDDY, R. Evaluation of a hand-held radiometer for field determination of nitrogen status in cotton. **American Society of Agronomy, Special Publication**, Madison, n. 66, p. 177-195, 2003.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: O autor, 2004. 302 p.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, Instituto de Biociências, 1995. 101 p.

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., 1973, Washington, DC. **Proceedings ...** Washington, DC: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317.

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological spectral models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 33, n. 3, p. 183-192, 1990.

RUSHEL, A.P. Nitrogen cycling in sugarcane. **Plant and Soil**, The Hague, v. 67, p. 139-146, 1982.

SALLAWAY, M.M. Trash retention as a soil Technique. In: CONFERENCE OF AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR TECHNOLOGISTS, 1979, Mackay. **Proceedings ...** Brisbane: BSES, 1979. p. 89- 93.

SAMPAIO, E.V.S.B. **Dinâmica de nitrogênio em solos de Pernambuco, especialmente em solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar**. 1991. 115 p. Tese (Titular) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1991.

SCHEPERS, J.S.; SHANAHAN, J.F. Variable-rate N management. **Fluid Journal**, Bethlehem, v. 13, n. 3, p. 20-23, 2005.

SCHWAB, G.J.; MULLINS, G.L.; BURMESTER, C.H. Growth and uptake by cotton roots under field conditions. **Communications in soil science and plant analysis**, Philadelphia, PA, v. 31, n. 1/2, p. 149-164. 2000.

SILVEIRA, J.A.G. **Aspectos bioquímicos e fisiológicos da relação K:N em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) cv. NA 56-79 cultivada em solução nutritiva**. 1980. 127 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímicas de Plantas – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1980.

SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; NEEDHAM, D.E.; REED, S.; WASHMON, C.N. Real-time sensing and N fertilization with a

field scale GreenSeeker applicator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2002, Minneapolis. Minneapolis. **Anais eletrônicos...** Minneapolis: USDA, 2002. Disponível em: < http://nue.okstate.edu/Papers/Minnesota_2002_Solie.htm>. Acesso em: 10 nov. 2006.

STEFFEN, C.A.; LORENZZETTI, J.A.; STECH, J.L.; SOUZA, R. **Sensoriamento remoto: princípios físicos; sensores e produtos e sistema Landsat.** São José dos Campos: INPE, 1981. 72 p. (INPE. Publicação 2226-MD/013).

STOLF, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.4, n.6, p.22-36, jul./ago.1986.

STOLF, R.; IAIA, A.M.; LEE, T.S.G. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em soqueiras de cana-de-açúcar. **Alcool e Açúcar**, São Paulo, v. 11, n. 58, p. 12-16, maio/jun.1991.

STOLF, R.; IAIA, A.M.; LEE, T.S.G. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em cana-planta. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 104, n. 5/6, p. 44-50, 1986.

STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R.; WHITNEY, R.W.; TAYLOR, S.L.; RINGER, J.D. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1623-1631, 1996.

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.

TARDIN, A.T.; ASSUNÇÃO, G.V.; SOARES, J.V. Análise preliminar de dados TM para discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas. MG. Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 9, p. 1355-1361. 1992.

TAYLOR, S.L.; RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; WHITNEY, R.W. Use of spectral radiance for correcting nitrogen deficiencies and estimating soil test variability in an established Bermuda grass pasture. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 11, p. 2287-2302, 1998.

THAI, C.N.; EVANS, M.D.; DENG, X.; THEISEN, A.F. **Visible & NIR imaging of bush beans grown under different nitrogen treatments.** St. Joseph: ASAE, 1998. 10 p. (ASAE Paper, 98-3074).

TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte I: Estabilidade química da mistura. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, n. 2, p. 26-29, 1997.

TUCKER, C.J.; HOLBEN, B.N.; ELGIN Jr., J.H.; McMURTREY, J.E. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 11, p. 171-189, 1981.

TUMBO, S.D.; WAGNER, D.G.; HEINEMANN, P.H. Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 45, n. 3, p. 815-823, 2002.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Sociedade Brasileira de Genética, Ribeirão Preto, p. 486, 1992.

VITTI, G.C.; TAVARES Jr., J.E.; LUZ, P.H.C.; COSTA, M.C.G.; FAVARIN, J.L. Características físicas e químicas da mistura entre uréia e sulfato de amônio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 18., 2001, Londrina. **Anais ...** Londrina: SBCS, 2001. p. 312.

WAHEED, T.; BONNELL, R.B.; PRASCHER, S.O.; PAULET, E. Measuring performance in precision agriculture: CART – A decision tree approach. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, n. 1-2, p173-185, 2006.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 47, p. 656–662, 1971.

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

3 COMPORTAMENTO TEMPORAL DO NDVI MENSURADO COM SENSOR ÓTICO ATIVO PARA DIFERENTES VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

Novas técnicas são demandadas para a otimização da produtividade e qualidade na produção de cana-de-açúcar. O uso de sensores óticos apresenta potencial para contribuir especialmente na gestão da adubação nitrogenada, sendo necessários estudos que dêem embasamento para tais técnicas. Este trabalho consistiu em avaliar o comportamento do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) de 28 variedades de cana-de-açúcar, assim como analisar o comportamento temporal deste índice para as diferentes variedades, ao longo dos primeiros 150 dias de seu ciclo. Os dados do NDVI foram coletados aos 90, 120 e 150 dias após o plantio (DAP), com um sensor ótico ativo comercial. Realizou-se análise estatística descritiva dos dados e teste de Tukey para contrastar as médias do NDVI. Notou-se que as variedades interferem nas leituras do NDVI, assim como, de forma geral, as leituras aos 90 DAP foram diferentes das realizadas aos 120 e 150 DAP, tendendo a se estabilizar ao longo do tempo para cada variedade.

Palavras-chave: Índice de vegetação; Sensoriamento remoto; Agricultura de precisão

TEMPORAL BEHAVIOR OF NDVI MEASURED WITH AN ACTIVE OPTIC SENSOR FOR DIFFERENT VARIETIES OF SUGARCANE

Abstract

New techniques are demanded for optimizing yield and quality on sugar cane production. The use of optic sensors presents potential for contributing, especially on the management of nitrogen fertilization, and studies for its development are required. This work consisted on the evaluation of NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) behavior of 28 sugarcane varieties, as well as analyzing its temporal behavior for the different varieties, throughout the first 150 days of its cycle. NDVI data was collected at 90, 120 and 150 days after the plantation (DAP) with a commercial optic active sensor. Descriptive statistical analyzes and Tukey test were applied to the data for contrasting the NDVI averages. It was observed that the varieties interfere on the NDVI readings, as well as, on general, the readings of 90 DAP were different from those carried out at 120 and 150 DAP, tending to stabilize throughout the time for each variety.

Keywords: Vegetation index; Remote sensing; Precision agriculture

3.1 Introdução

O setor sucroalcooleiro possui grande importância econômica, social e ambiental para o Brasil, sendo grande gerador de ocupação no meio rural, de divisas e produção de energia renovável e limpa. O segmento fatura, direta e indiretamente, cerca de R\$ 40 bilhões por ano, o que corresponde a aproximadamente 2,35% do PIB nacional, além de ser um dos setores que mais empregam com mais de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos (DIEESE, 2007). De 2000 a 2005 as exportações brasileiras cresceram de 258 milhões de litros de álcool para 2,4 bilhões de litros de álcool, e as receitas, de 33 milhões de dólares para quase meio bilhão por ano (DIEESE, 2007).

A expansão do mercado mundial de açúcar e álcool tem estimulado o aumento do investimento no setor em todo o país. A moagem de cana na safra 2005/2006 foi de 431,4 milhões de toneladas, o que representa um crescimento de 3,8%, ou um acréscimo de 15,7 milhões de toneladas sobre o total produzido na safra 2004/2005, resultando na produção de 26,7 milhões de toneladas de açúcar e 17 bilhões de litros de álcool (DIEESE, 2007).

A agricultura de precisão, segundo Molin (2004), está alicerçada em um conjunto de recursos que permitem que o agricultor possa identificar regiões de altas e baixas produtividades dos talhões e assim administrá-las com os mesmos critérios agrônômicos já dominados, porém com maior grau de detalhamento. Para que isto seja possível é necessário um grau de automatização que depende de algumas tecnologias adaptadas como o caso dos sistemas de posicionamento por satélite, sistemas de informação geográfica, informática, sensoriamento remoto, entre outros.

Durante as duas últimas décadas, o desenvolvimento na capacidade de aquisição, processamento e interpretação dos dados terrestres, aéreos e de satélite tem tornado possível utilizar as tecnologias do sensoriamento remoto em conjunto com os sistemas de agricultura de precisão (McNAIRN et al., 2001). Novo (1989), além de mostrar as principais vantagens que justificam os programas de sensoriamento remoto, mostra a importância do aspecto multiespectral associado à capacidade dos sistemas sensores de gerarem produtos em diferentes faixas espectrais, tornando possível o estudo e análise de diferentes elementos, os quais são identificados em determinadas faixas do espectro. Os índices de vegetação (IVs) podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com os parâmetros da vegetação.

Índices espectrais, tal como o índice de vegetação da diferença normalizado (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), vêm sendo desenvolvidos para obter de forma indireta informações da cultura como eficiência fotossintética, estimativa de produtividade e potencial de rendimento (RAUN et al., 2001). O NDVI surgiu com o trabalho de Rouse et al. (1973), que encontraram uma relação entre medidas espectrais de duas bandas e que melhor resolvia o problema das interferências do solo na resposta da vegetação e também diminuía as influências da atmosfera e das variações sazonais do ângulo do Sol.

Como apontado por Fontana et al. (1998), as mudanças estruturais da vegetação no decorrer da estação de crescimento resultam em uma diferenciação da sua reflectância, o que permite empregar o NDVI para o monitoramento da vegetação, bem como distinguir diferentes tipos de vegetação e detectar possíveis problemas de crescimento. Especificamente para a cultura da cana-de-açúcar as pesquisas relativas à utilização do sensoriamento remoto têm abordado questões importantes como classificação e mapeamento (TARDIN et al., 1992), manejo (FIORIO et al., 2000) e estimativa de produtividade (RUDORFF; BATISTA, 1990).

A preocupação com a questão do desenvolvimento e teste de variedades têm sido constante, visando aumentar a produtividade, obter maior resistência às pragas e doenças e melhor adaptação às variações de clima, tipos de solos, técnicas de corte ou manejo. A maior parte das pesquisas para testar a discriminação de variedades de cana-de-açúcar com sensoriamento remoto orbital tem utilizado dados multiespectrais, (JOAQUIM, 1998; FORTES, 2003). Já pesquisas relativas à utilização de dados hiperespectrais para a discriminação de variedades de cana-de-açúcar são raras na literatura, a exemplo de Galvão et al. (2005) que trabalharam com o sensor Hyperion/EO-1.

Inamasu et al. (2006) testaram um sensor ativo de reflectância em cana-de-açúcar com o objetivo de mensurar os efeitos de teores de nitrogênio e potássio aplicados. O sensor não foi capaz de detectar diferenças de potássio, entretanto os índices da leitura de reflectância foram crescentes de acordo com o tratamento de doses de nitrogênio, sugerindo que há possibilidade do sensor ser aplicado na identificação de deficiência de nitrogênio.

Tais sensores, providos de luz própria, vêm sendo avaliados para verificar o potencial de uso em recomendações de adubação nitrogenada em tempo real para várias culturas, dentre elas a cana-de-açúcar, entretanto não tem sido contemplada a influência das variedades no NDVI obtido, bem como seu comportamento temporal, considerando especificamente a cultura da cana-

de-açúcar. Foi com esta motivação que o presente trabalho foi conduzido e consistiu em avaliar o comportamento do NDVI de 28 variedades de cana-de-açúcar para verificar a sua influência nas leituras realizadas por um sensor ótico ativo, assim como analisar o comportamento temporal deste índice para as variedades estudadas.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVA, ambiente D, classificação Copersucar) na região de Assis, SP, com coordenadas aproximadas de 22° 40' S e 50° 25' O. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 28 tratamentos (variedades - CT963206, CT951390, RB867515, CT931595, CT943410, RB985823, RB986955, CT963024, CT963335, SP91-1049, CT961234, CT963334, CT951086, CT951209, RB985840, CT961014, RB985814, RB986952, CT951373, RB985846, SP83-2847, CT963346, RB72454, RB855536, RB985829, RB985844, IACSP97-3402, CT961226) e 3 repetições. Cada parcela continha 5 linhas de 8 m com espaçamento de 1,40 m entre elas, sendo as duas linhas externas consideradas bordaduras e as três linhas centrais as mensuradas pelo sensor. O experimento foi instalado em 31 de março de 2006, com adubação de base de 530 kg ha⁻¹ da fórmula 09-23-27.

Devido à deficiência de água no solo no início do ciclo produtivo, a cana apresentou baixo crescimento vegetativo até os 90 dias após o plantio (DAP); sendo assim, a coleta de dados começou a partir deste período. Foram realizadas leituras nas parcelas aos 90, 120 e 150 DAP utilizando o sensor ótico ativo portátil GreenSeeker Red Hand Held™ (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA), que utiliza LEDs (*light emitting diodes*) que emitem luz em 660 nm (± 10 nm, vermelho) e 770 nm (± 15 nm, infravermelho próximo), capta a reflectância dos alvos por um fotodiodo detector e calcula automaticamente alguns índices de vegetação; neste trabalho foi utilizado o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). As leituras foram feitas, em média, a um metro de distância do alvo, como recomendado pelo fabricante. Não foram realizadas leituras após os 150 DAP devido à limitação em posicionar o sensor acima das plantas, em função da altura que estas atingiram.

Realizou-se a análise estatística descritiva e aplicou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, para contrastar as médias de NDVI das variedades e para comparar o comportamento do NDVI ao longo das três leituras, para cada variedade estudada.

3.3 Resultados e Discussão

A influência das variedades nas leituras do NDVI pode ser observada quando se analisa o comportamento das médias do NDVI obtido pelo sensor, como pelas diferenças do coeficiente de variação (CV) para uma mesma época e alteração deste ao longo dos períodos de leitura.

A média geral do NDVI do experimento, em cada época de leitura foi de 0,329 aos 90 DAP, 0,459 aos 120 DAP e 0,501 aos 150 DAP. Este acréscimo das médias ocorreu devido ao incremento de massa verde que provoca o aumento do valor de NDVI mensurado com o sensor. Considerando as médias do NDVI de cada variedade nota-se a tendência destas em crescer ao longo do período de leitura, com exceção das variedades CT963206, RB867515, CT931595, para as quais a leitura diminuiu após os 120 DAP. A Figura 1 mostra este comportamento das médias nas três leituras realizadas.

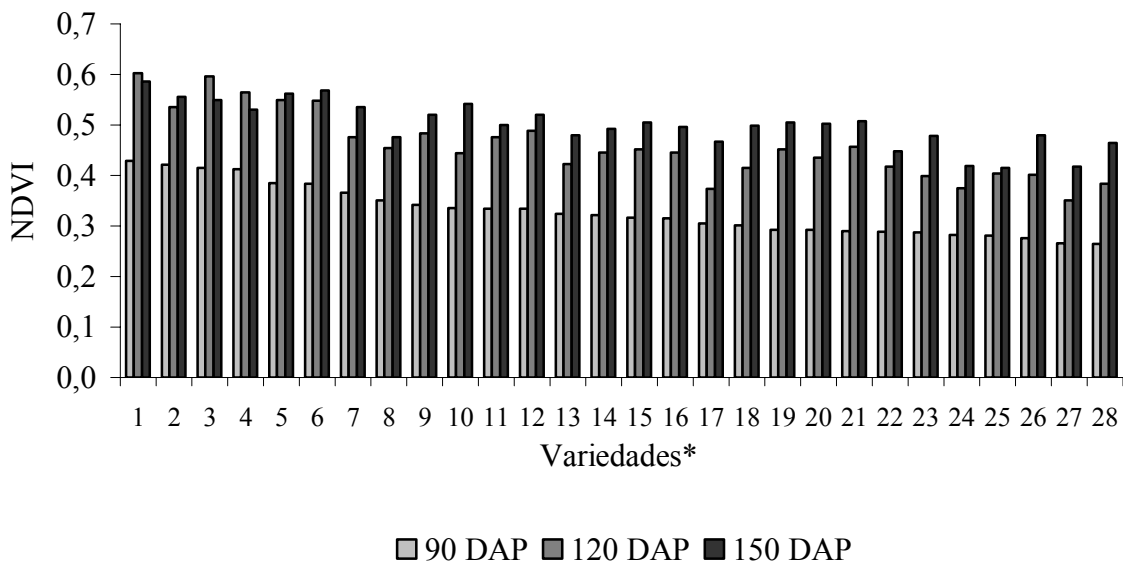


Figura 1 - Gráfico das médias de NDVI, de cada variedade, nas três leituras realizadas

* 1-CT963206, 2-CT951390, 3-RB867515, 4-CT931595, 5-CT943410, 6-RB985823, 7-RB986955, 8-CT963024, 9-CT963335, 10-SP91-1049, 11-CT961234, 12-CT963334, 13-CT951086, 14-CT951209, 15-RB985840, 16-CT961014, 17-RB985814, 18-RB986952, 19-CT951373, 20-RB985846, 21-SP83-2847, 22-CT963346, 23-RB72454, 24-RB855536, 25-RB985829, 26-RB985844, 27-IACSP97-3402, 28-CT961226

Em relação ao comportamento do NDVI das variedades (Tabela 1), percebe-se que aos 90 e 150 DAP havia uma menor variabilidade na média das leituras quando comparada aos 120 DAP entre as variedades. Contudo, em todas as épocas de leituras, pelo menos duas variedades foram diferentes entre si, indicando que a variedade de cana-de-açúcar interfere no valor do NDVI calculado pelo sensor. Portanto se faz necessário uma calibração dos sensores ativos nas áreas onde serão utilizados, pois variedades diferentes podem ter comportamentos fenológicos distintos para um mesmo número de DAP.

Tabela 1 - Comparação das médias das leituras de NDVI de 28 variedades de cana-de-açúcar aos 90, 120 e 150 DAP

(continua)

Médias de NDVI					
90 DAP		120 DAP		150 DAP	
CT963206	0,429 a	CT963206	0,603 a	CT963206	0,586 a
CT951390	0,422 ab	RB867515	0,597 a	RB985823	0,568 ab
RB867515	0,415 abc	CT931595	0,565 ab	CT943410	0,562 ab
CT931595	0,413 abc	CT943410	0,549 abc	CT951390	0,556 ab
CT943410	0,385 abcd	RB985823	0,548 abc	RB867515	0,550 ab
RB985823	0,384 abcd	CT951390	0,536 abcd	SP91-1049	0,541 abc
RB986955	0,365 abcd	CT963334	0,489 abcde	RB986955	0,536 abcd
CT963024	0,350 abcd	CT963335	0,483 abcde	CT931595	0,530 abcd
CT963335	0,341 abcd	RB986955	0,476 abcde	CT963335	0,520 abcd
SP91-1049	0,336 abcd	CT961234	0,476 abcde	CT963334	0,520 abcd
CT961234	0,334 abcd	SP83-2847	0,457 bcde	SP83-2847	0,507 abcd
CT963334	0,334 abcd	CT963024	0,454 bcde	RB985840	0,505 abcd
CT951086	0,324 abcd	RB985840	0,451 bcde	CT951373	0,505 abcd
CT951209	0,322 abcd	CT951209	0,446 bcde	RB985846	0,502 abcd
RB985840	0,316 abcd	CT961014	0,445 bcde	CT961234	0,500 abcd
CT961014	0,315 abcd	SP91-1049	0,444 bcde	RB986952	0,499 abcd
RB985814	0,305 abcd	RB985846	0,436 bcde	CT961014	0,496 abcd

Tabela 1 - Comparação das médias das leituras de NDVI de 28 variedades de cana-de-açúcar aos 90, 120 e 150 DAP

(conclusão)

Médias de NDVI								
90 DAP			120 DAP			150 DAP		
RB986952	0,301	abcd	CT951086	0,423	cde	CT951209	0,493	abcd
CT951373	0,293	abcd	CT963346	0,417	cde	RB985844	0,480	abcd
RB985846	0,292	abcd	RB986952	0,415	cde	CT951086	0,479	abcd
SP83-2847	0,290	abcd	RB985829	0,404	de	RB72454	0,478	abcd
CT963346	0,288	bcd	RB985844	0,401	de	CT963024	0,476	abcd
RB72454	0,287	bcd	RB72454	0,399	de	RB985814	0,467	abcd
RB855536	0,283	bcd	CT951373	0,392	e	CT961226	0,464	abcd
RB985829	0,280	cd	CT961226	0,383	e	CT963346	0,448	bcd
RB985844	0,276	cd	RB855536	0,375	e	RB855536	0,419	cd
IACSP97-3402	0,266	d	RB985814	0,374	e	IACSP97-3402	0,418	d
CT961226	0,265	d	IACSP97-3402	0,350	e	RB985829	0,415	d

* Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Outra característica observada é a mudança de posição entre algumas variedades quando consideradas as médias do NDVI. Nota-se que a variedade CT963206 permaneceu em primeira posição nas três leituras, já a variedade CT951390 saiu da segunda posição aos 90 DAP para sexta posição aos 120 DAP e subindo para quarta posição aos 150 DAP. A variedade CT961226 saiu da 28ª posição aos 120 DAP para a 25ª aos 120 DAP e 24ª posição aos 150 DAP. Estes comportamentos devem-se as diferenças morfológicas das plantas (FORTES, 2003) e suas conseqüentes respostas espectrais captadas pelo sensor. A descrição destas diferenças é importante no momento de usar as bandas espectrais e os índices de vegetação no processo de discriminação das variedades, o que não é o objeto do presente trabalho.

A média do CV foi 15,9% aos 90 DAP, 17,2% aos 120 DAP e 13,9% aos 150 DAP. Tais valores, segundo a classificação de Pimentel-Gomes (1987), são considerados médios, quando estão no intervalo de 10 a 20%, verificando que as condições do experimento foram bem controladas, uma vez que se trata de experimento em campo aberto.

Analisando os valores de CV do NDVI, para cada variedade (Figura 2), observa-se que na maioria destas (67,8%) os CVs encontrados aos 90 DAP foram maiores que aos 150 DAP. Essa tendência era esperada, uma vez que com o aumento da massa verde o valor do NDVI tende à saturação (MOREIRA, 2000) e com isso diminui a variabilidade das leituras. Entretanto os maiores valores de CV ocorreram nas leituras realizadas aos 120 DAP. Isto pode ter ocorrido devido ao lento desenvolvimento das plantas diante do estresse hídrico, comportamento que foi perceptível ao sensor utilizado. O desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar é fortemente relacionado à umidade adequada no solo que favorece o sistema radicular no processo de absorção dos nutrientes necessários para a estrutura básica das plantas e seu desenvolvimento.

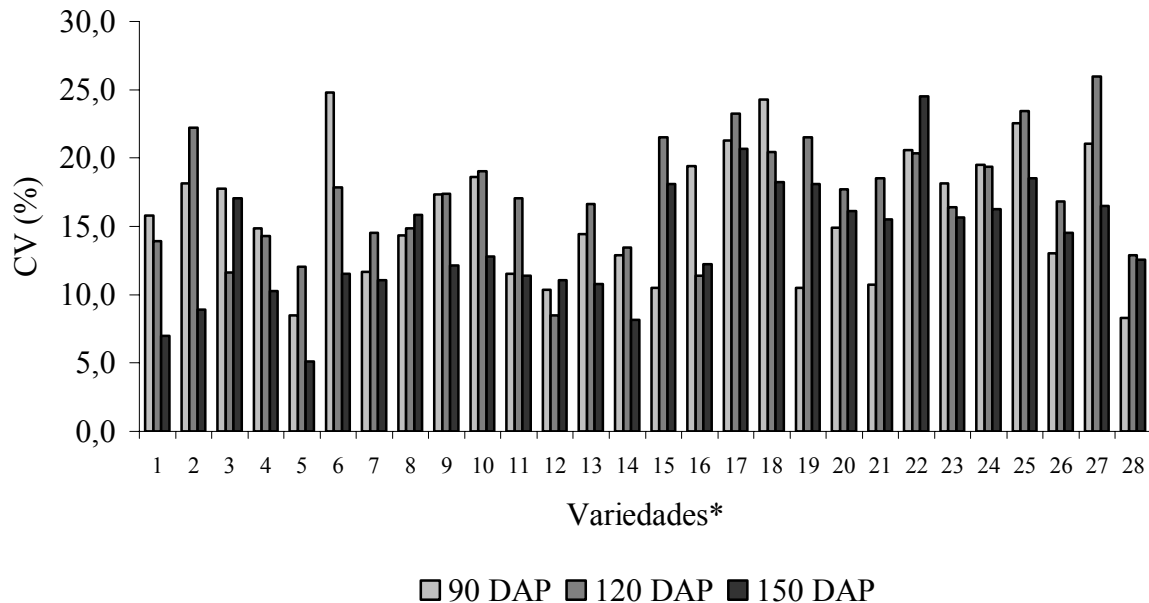


Figura 2 - Gráfico dos coeficientes de variação (CV) do NDVI para cada variedade nas três leituras realizadas

* 1-CT963206, 2-CT951390, 3-RB867515, 4-CT931595, 5-CT943410, 6-RB985823, 7-RB986955, 8-CT963024, 9-CT963335, 10-SP91-1049, 11-CT961234, 12-CT963334, 13-CT951086, 14-CT951209, 15-RB985840, 16-CT961014, 17-RB985814, 18-RB986952, 19-CT951373, 20-RB985846, 21-SP83-2847, 22-CT963346, 23-RB72454, 24-RB855536, 25-RB985829, 26-RB985844, 27-IACSP97-3402, 28-CT961226

Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com este tipo de sensor para recomendação de aplicação de doses de nitrogênio em tempo real, principalmente em trigo. Johnson e Raun (2003) desenvolveram o conceito da “faixa rica em N” (N-rich strip) visando reduzir as variações dos

modelos de recomendação de adubação nitrogenada em tempo real, uma vez que se considera tanto o estágio de desenvolvimento da planta, quanto o tipo de solo. Destaca-se assim a importância de se conhecer a variabilidade do NDVI para as diferentes variedades, sendo que a técnica da “faixa rica em N” também tende a diminuir esta variação no modelo proposto.

Em relação à análise temporal do NDVI, observa-se o seu crescimento (Figura 2), para cada variedade, nas três épocas de leitura. Este comportamento caracteriza o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. No começo do ciclo os valores de NDVI apresentavam-se menores devido ao baixo desenvolvimento da cultura e baixa quantidade de biomassa. Entrando no período das águas a cana inicia um processo vegetativo intenso e os valores de NDVI crescem sensivelmente aos 120 e 150 DAP. Para confirmar tal comportamento foi realizado o teste de Tukey, considerando as médias de cada variedade nas épocas estudadas. Como apresentado na Tabela 2, para quase todas as variedades o comportamento foi o mesmo, ou seja, a leitura feita aos 90 DAP difere das leituras realizadas aos 120 e 150 DAP, sendo estas últimas não estatisticamente distintas entre si, para cada variedade estudada. Com exceção das variedades CT951373, RB985844, CT961226 que apresentaram médias estatisticamente diferentes para as três leituras realizadas.

Tabela 2 - Comparação de médias das leituras de NDVI em 3 períodos para 28 variedades de cana-de-açúcar

(continua)

Variedade	Médias de NDVI					
	90 DAP		120 DAP		150 DAP	
CT963206	0,429	B	0,603	A	0,586	A
CT951390	0,422	B	0,536	A	0,556	A
RB867515	0,415	B	0,597	A	0,550	A
CT931595	0,413	B	0,565	A	0,530	A
CT943410	0,385	B	0,549	A	0,562	A
RB985823	0,384	B	0,548	A	0,568	A
RB986955	0,365	B	0,476	A	0,536	A
CT963024	0,350	B	0,454	A	0,476	A

Tabela 2 - Comparação de médias das leituras de NDVI em 3 períodos para 28 variedades de cana-de-açúcar

(conclusão)

Médias de NDVI							
Variedade	90 DAP		Variedade	90 DAP			
CT963335	0,341	B	0,483	A	0,520	A	
SP91-1049	0,336	B	0,444	A	0,541	A	
CT961234	0,334	B	0,476	A	0,500	A	
CT963334	0,334	B	0,489	A	0,520	A	
CT951086	0,324	B	0,423	A	0,479	A	
CT951209	0,322	B	0,446	A	0,493	A	
RB985840	0,316	B	0,451	A	0,505	A	
CT961014	0,315	B	0,445	A	0,496	A	
RB985814	0,305	B	0,374	A B	0,467	A	
RB986952	0,301	B	0,415	A	0,499	A	
CT951373	0,293	C	0,451	B	0,505	A	
RB985846	0,292	B	0,436	A	0,502	A	
SP83-2847	0,290	B	0,457	A	0,507	A	
CT963346	0,288	B	0,417	A	0,448	A	
RB72454	0,287	B	0,399	A	0,478	A	
RB855536	0,283	B	0,375	A	0,419	A	
RB985829	0,280	B	0,404	A	0,415	A	
RB985844	0,276	C	0,401	B	0,480	A	
IACSP97-3402	0,266	B	0,350	A B	0,418	A	
CT961226	0,265	C	0,383	B	0,464	A	

* Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Pontes et al. (2005), utilizando sensoriamento remoto orbital para cana-de-açúcar, observaram que no início do ciclo vegetativo a diferença entre os valores de NDVI não foi expressiva. A saturação do NDVI ocorreu imediatamente após o período das chuvas, onde a diferença entre talhões que apresentaram maior e menor biomassa foi mais perceptível. Após esse

período de saturação, correspondente à senescência das plantas e concentração de açúcar, não existiu diferença significativa de valores de NDVI. O valor máximo de NDVI corresponde ao pico do ciclo vegetativo da cultura.

Pode-se comprovar que as variedades de cana-de-açúcar estudadas, apesar de apresentarem mesmo comportamento temporal de evolução do índice NDVI, apresentam diferenças na resposta espectral. Assim, mais estudos com este tipo de sensor devem ser desenvolvidos, incluindo na análise do comportamento espectral novas variáveis físicas e químicas, para que se possa entender melhor o comportamento espectral da cana-de-açúcar tendo em vista a sua utilização na estimativa da demanda de nitrogênio. Além disso, devem ser conduzidos estudos para correlacionar o comportamento do NDVI ao longo do tempo com a produtividade e definir qual o melhor momento para utilizar o NDVI estimado pelos sensores ativos como suporte para previsão de produtividade.

3.4 Conclusão

Constatou-se a interferência das variedades nas leituras com o sensor, confirmando a necessidade de calibração deste nas áreas onde será utilizado como forma indireta de investigação da condição de reflectância da cana-de-açúcar. Em relação à evolução temporal verificou-se que para as leituras realizadas mais cedo (90 DAP) as médias de NDVI eram mais baixas quando comparadas às médias das leituras realizadas aos 120 e 150 DAP, que na grande maioria não apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Referências

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICAS E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. Desempenho do setor sucroalcooleiro brasileiro e os trabalhadores. **Estudos e Pesquisas**, São Paulo, ano 3, n. 30, 34 p. fev. 2007.

FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; SPAROVEK, G. Cronologia e impacto ambiental o uso da terra na microbacia hidrográfica do Ceveiro, em Piracicaba, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 671-679, 2000.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, 1399-1405, 1998.

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7**. 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 4, p. 523-534, 2005.

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 ...** São Pedro: Esalq/Usp, 2006. 8 p.

JOAQUIM, A. C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara – SP, através de análise de nível de cinza em imagens LANDSAT/TM**. 1998. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

JOHNSON, G.V.; RAUN, W.R., Nitrogen response index as a guide to fertilizer management. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, p. 249-62, 2003.

McNAIRN, H.; DEGUISE, J.C.; PACHECO, A.; SHANG, J.; RABE, N. Estimation of crop cover and chlorophyll from hyperspectral remote sensing. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 23., Quebec, 2001. **Proceedings ...** Quebec: Sainte-Foy, 2001. p. 1-6.

MOLIN, J.P. Tendência da agricultura de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 1., 2004, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: Esalq/Usp 2004. 10 p.

MOREIRA, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. 179 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

NOVO, E.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 307 p.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 12.ed. Piracicaba: Livraria Nobel, 1987. 467 p.

PONTES, P.P.B.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 217-224.

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; 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.

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., 1973, Washington, DC. **Proceedings ...** Washington, DC: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317.

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological spectral models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.33, n. 3, p. 183-192, 1990.

TARDIN, A.T.; ASSUNÇÃO, G.V.; SOARES, J.V. Análise preliminar de dados TM para discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas. MG. Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 9, p. 1355-1361, 1992.

4 IDENTIFICAÇÃO DE NÍVEIS DE NITROGÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO SENSOR ÓTICO ATIVO

Resumo

O objetivo deste trabalho foi realizar a análise do desempenho de um sensor ótico ativo e entender o comportamento do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizado) na cana-de-açúcar, planta e soca, em condições de campo, sob diferentes doses de nitrogênio (N) aplicado. O experimento de cana-planta teve delineamento experimental em blocos casualizados, com cinco tratamentos (0, 30, 60, 90, 120 kg ha⁻¹), quatro repetições e três variedades (CTC2, RB855536, SP83-2847). O experimento de cana-soca (de terceiro corte) teve delineamento experimental em blocos casualizados, com 25 tratamentos e quatro repetições, variando doses de N e K, para a variedade RB855536. Os dados de NDVI foram coletados no período de 30, 60, 90 e 120 dias após o plantio (DAP) ou dias após o corte (DAC). Os valores do NDVI apresentaram uma tendência crescente ao longo do período das leituras, sendo afetados significativamente pelas doses de N aplicadas aos 90 DAC para cana-soca, sem efeito para as doses de K, e apenas para a variedade SP83-2847 aos 120 DAP para cana-planta. Estes dados indicam que o sensor pode ser utilizado para detectar deficiência foliar de N em cana-de-açúcar, especialmente para cana-soca onde a adubação nitrogenada tem um maior efeito sobre a planta.

Palavras-chave: Nitrogênio; NDVI; Sensoriamento remoto

NITROGEN LEVELS IDENTIFICATION IN SUGARCANE USING OPTICAL ACTIVE SENSOR

Abstract

The objective of this work was to analyze the performance of an active optical sensor and to understand the behavior of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) in the sugarcane, plants and ratoon, in field conditions, under different levels of nitrogen (N) applied. The sugarcane plant experiment used a randomized block design with five treatments (0, 30, 60, 90, 120 kg ha⁻¹), four replications and three varieties (CTC2, RB855536, SP83-2847). The experiment of sugarcane ratoon (of third cut) used a randomized block design with 25 treatments and four replications, varying N and K levels, with the variety RB855536. NDVI data was collected at 30, 60, 90 and 120 days after the plantation (DAP) or days after the cut (DAC). The values of the NDVI presented an increasing trend throughout the period of readings, being significantly affected by the levels of N applied at 90 DAC for sugarcane ratoon, without K effect, and only for SP83-2847 variety at 120 DAP for sugarcane plant. The data indicate that the sensor can be used to detect N deficiency in sugarcane, especially for sugarcane ratoon where N fertilization has a bigger effect on the plant.

Keywords: Nitrogen; NDVI; Remote sensing

4.1 Introdução

Agricultura de precisão é um sistema de gestão da produção agrícola, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados. O modelo em ciclo que considera a geração dos mapas de colheita, amostragem sistêmica de solo, análise do conjunto de dados e confecção de mapas de variabilidade, interpretação das informações, geração de mapa de recomendação e aplicação dos insumos, medidas de correção da variabilidade e acompanhamento da lavoura com aquisição de novos dados, tem sido aceito como artifício padrão para implantação e o uso da agricultura de precisão.

Houve grandes avanços em quase duas décadas de existência de tais técnicas, porém fechar esse ciclo com a aplicação de fertilizante nitrogenado em taxa variada tem sido o grande desafio. O nitrogênio (N) é um dos nutrientes essenciais encontrado em maiores quantidades nas plantas e devido à sua alta mobilidade no solo, a grande dificuldade é encontrar a melhor forma de manejá-lo. Na cana-de-açúcar, havendo deficiência de N a planta apresenta redução na síntese de clorofila, de aminoácidos essenciais e da energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos (MALAVOLTA; HAAG, 1964; SILVEIRA, 1985) e elevando o teor de nitrogênio a cana-de-açúcar responde produzindo mais fitomassa (BOLTON; BROWN, 1980). Portanto, se a leitura da variabilidade espacial do N puder ser identificada com intervenção localizada, certamente a qualidade da aplicação e a resposta da cultura a esta intervenção serão melhores.

A recomendação da adubação nitrogenada, com queima prévia para despalha, em cana-planta, está relacionada com o histórico da área, enquanto em cana-soca recomenda-se 1kg de N por tonelada de colmo esperada, segundo Vitti (2003). Nas áreas de cana-de-açúcar sem queima pouco se conhece sobre o manejo da adubação nitrogenada, entretanto a recomendação do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), segundo Manechini (2007), é de adubar pela curva de calibração e não mais pela estimativa da produtividade. O autor descreve que na maioria dos experimentos o ponto ótimo entre adução nitrogenada e produtividade foi de 60 kg ha⁻¹, para cana-planta, e 100 kg ha⁻¹ para cana-soca.

Indiretamente, a deficiência de N causa mudanças na distribuição espectral de radiação refletida pelas folhas das plantas deficientes devido às alterações sofridas por estas na falta do nutriente (TARPLEY et al., 2000). A mensuração da reflectância espectral é a abordagem, sem contato e não destrutiva, mais promissora para a determinação de algumas características da

cultura e apesar de ser uma medida indireta tem-se obtido boa correlação para estimar adubação nitrogenada em milho (BLACKMER et al., 1996), trigo (STONE et al., 1996), algodão (SUI, 2005) e citros (MIN et al., 2005).

Diante destas circunstâncias o sensoriamento remoto é uma opção para se avaliar o status de N num campo cultivado e associado à possibilidade da leitura e aplicação em tempo real a operação seria aperfeiçoada, refletindo na melhora da produtividade. Novo (1989) mostra a importância da capacidade dos sistemas sensores gerarem produtos em diferentes faixas espectrais (sensores multiespectrais), tornando possível o estudo e análise de diferentes elementos. Índices espectrais, tal como índice de vegetação da diferença normalizado (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) vem sendo desenvolvidos para obter, de forma indireta, informações da cultura como eficiência fotossintética, estimativa de produtividade e potencial de rendimento (RAUN et al., 2001).

Entretanto não se tem conhecimento suficiente sobre o comportamento espectral da cana-de-açúcar, que no Brasil vem apresentando demanda crescente de tecnologias, exigindo um sistema de cultivo mais competitivo, otimizando insumos e diminuindo danos ao ambiente. Inamasu et al., (2006) testaram um sensor ativo de refletância em cana-de-açúcar com o objetivo de mensurar os teores de nitrogênio e potássio. O sensor não foi capaz de detectar diferença de potássio, entretanto os índices da leitura de reflectância foram crescentes de acordo com as doses de nitrogênio.

Em vista disso o objetivo deste trabalho foi desenvolver a análise do desempenho de um sensor ótico ativo comercial para entender o comportamento do NDVI na cana-de-açúcar, planta e soca, em condições de campo. Para tanto se considerou diferentes níveis de N aplicados, para identificar a partir de que tamanho de planta o sensor consegue identificar estas diferenças, além de se obter as correlações entre as diferentes doses de nitrogênio aplicadas com as leituras de NDVI geradas pelo sensor.

4.2 Materiais e Métodos

Os experimentos foram conduzidos em área experimental na região de Assis, SP, com coordenadas aproximadas de 22° 40' S e 50° 25' O. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVA, ambiente D, classificação Copersucar).

O experimento de cana-planta teve delineamento experimental em blocos casualizados, com cinco tratamentos (0, 30, 60, 90, 120 kg ha⁻¹), quatro repetições e três variedades (CTC2, SP83-2847, RB855536) totalizando 60 parcelas. Cada parcela continha seis linhas de plantas, com 15 m de comprimento e espaçamento de 1,40 m entrelinhas. Os dados foram coletados nas quatro linhas centrais, descartando-se uma linha de bordadura de cada lado da parcela.

O plantio semi-mecanizado foi realizado na segunda semana de abril de 2006 com adubação manual de N, na forma de uréia, nos sulcos de plantio. Os tratos culturais de controle de plantas daninhas e “quebra-lombo” (nivelamento das entrelinhas) foram realizados de maneira uniforme em área total, garantindo o adequado desenvolvimento vegetativo da cultura.

O experimento de cana-soca (de terceiro corte, segunda soca) teve delineamento experimental em blocos casualizados, com 25 tratamentos e quatro repetições, para a variedade RB855536, totalizando 100 parcelas. Cada parcela contava com seis linhas de cana-de-açúcar, com 15 m de comprimento e espaçamento de 1,40 m entrelinhas. Os dados foram coletados nas quatro linhas centrais, descartando-se uma linha de bordadura de cada lado da parcela.

Os tratamentos, de cana-soca, consistiram na combinação fatorial das doses de N, na forma de uréia, de 0 (N0), 50 (N1), 100 (N2), 150(N3) e 200 (N4) kg ha⁻¹, com as doses de K, na forma de cloreto de potássio, de 0 (K0), 60 (K1), 120 (K2), 180 (K3), 240 (K4) kg ha⁻¹ aplicadas em cobertura aos 23 dias após o corte (DAC), que foi realizado em 26 de setembro de 2006.

As leituras foram realizadas aos 30, 60, 90 e 120 dias após o plantio (DAP), utilizando o sensor ótico ativo portátil GreenSeeker Red Hand Held™ (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA), o qual utiliza LEDs (*light emitting diodes*) que emitem luz em 660 nm (± 10 nm, vermelho) e 770 nm (± 15 nm, infravermelho próximo), capta a reflectância dos alvos por um fotodiodo detector e calcula automaticamente alguns índices de vegetação, sendo que neste trabalho foi utilizado o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). O sensor foi utilizado a uma altura média de 1,00 m de distância do alvo, com largura constante de 0,61 m, pois, de acordo com o fabricante, no intervalo de 0,80 a 1,20 m o sensor não apresenta variações nas leituras com a variação da altura de trabalho. A leitura aos 120 DAC na cana-soca não foi possível devido à limitação em posicionar o sensor acima das plantas que se encontravam bem desenvolvidas devido à ocorrência de precipitações.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa SAS (1998). O efeito dos tratamentos e da relação entre as variáveis foi avaliado por meio de análise de variância,

verificando-se a significância pelo teste F de Snedecor e análise de regressão. No experimento de cana-soca foi realizada a análise fatorial para verificar a interação entre N e K.

4.3 Resultado e Discussão

Primeiramente são analisados e discutidos os resultados obtidos no experimento em cana-planta, com análises separadas por variedades. Os valores médios entre as doses de N aplicadas e a resposta das variedades através do NDVI e do seu coeficiente de variação (CV), são apresentados na Tabela 1.

Nas três variedades estudadas os valores do CV para o NDVI foram baixos e tiveram uma tendência de aumento com o decorrer do experimento, com valor médio máximo de 14,9% aos 120 DAP e mínimo de 4,1% aos 30 DAP para variedades CTC2; 12,8% aos 90 DAP e mínimo de 7,8% aos 30 DAP para variedade SP83-2847; 24,7% aos 120 DAP e mínimo de 3,0% aos 30 DAP para variedade RB855536. Este aumento inesperado do CV deve-se ao fato de que no início do experimento, devido à falta de chuvas (período da seca), as plantas encontravam-se em lento desenvolvimento vegetativo, portanto a massa verde presente era baixa e o sensor acabava por receber influência direta do solo. Isto pode ser percebido quando se compara o comportamento das médias do NDVI ao longo do experimento, pois todas as variedades apresentaram tendência crescente do índice analisado.

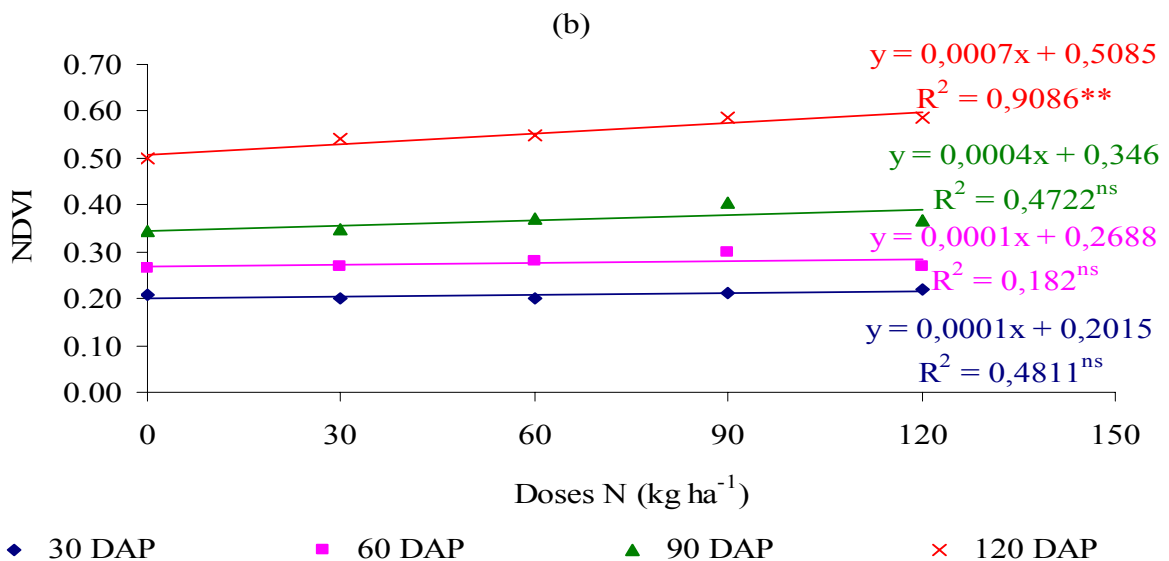
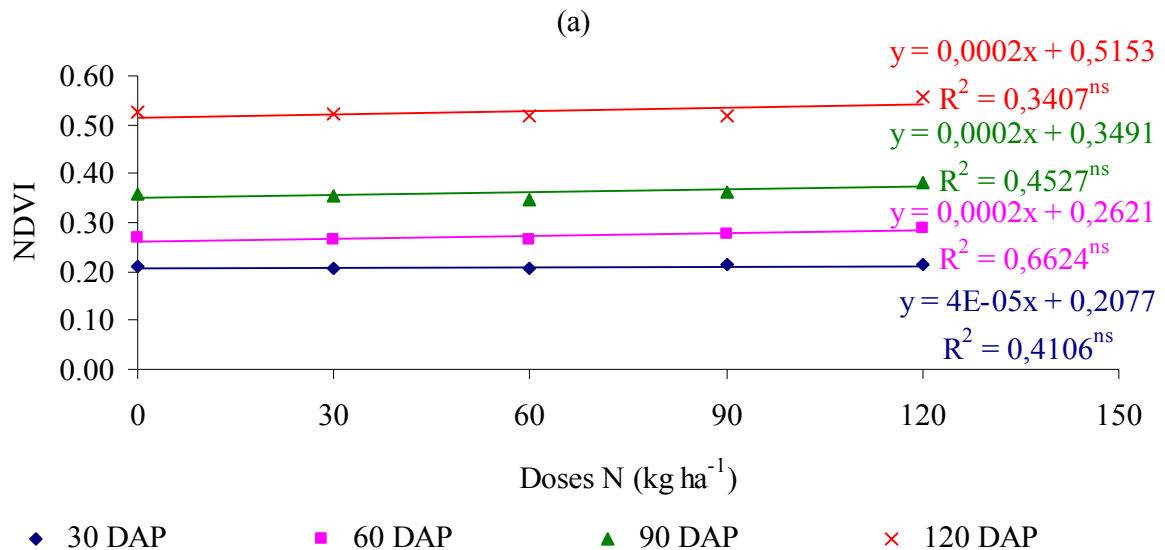
A variedade CTC2 apresenta desenvolvimento ereto, bom fechamento de entrelinhas, hábito final ereto, colmos de diâmetro médio, com despalha fácil, de cor amarelo-esverdeada, entrenós médios. De acordo com o CTC (2007), é recomendado o plantio desta variedade em ambientes de médio a baixo potencial (ambientes C, D e E) e colher no final da safra já que é uma variedade de alta produtividade, ótima brotação de soqueira, rusticidade. A variedade SP83-2847 caracteriza-se por apresentar alta tolerância a solos fracos, por ser pobre em açúcar e florescer muito. É uma variedade recomendada para os ambientes C, D e E, com colheita de junho a agosto sendo de alta rusticidade, de acordo com UDOP (2007). A variedade RB855536 apresenta alta produtividade agrícola e industrial em ambientes de produção B, C, D e E, porte médio, hábito de crescimento ereto, e bom fechamento entrelinhas. Recomenda-se, segundo a UDOP (2007), utilizar ambientes sem deficiência hídrica pronunciada no outono/inverno, evitar espaçamento reduzido, realizar plantio precoce (dezembro a janeiro), pois pode sofrer um estresse muito forte se o inverno (julho a agosto) for muito seco.

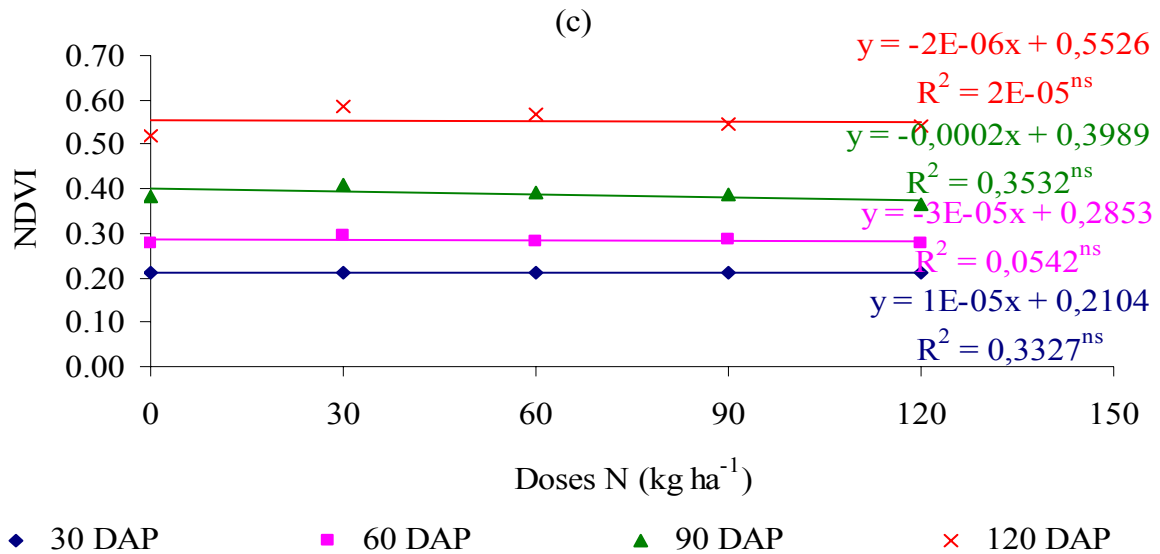
Tabela 1 - Médias de NDVI nos quatro períodos avaliados, para as variedades CTC2, SP83-2847, RB855536 para os tratamentos com doses de N

Doses de N (kg ha ⁻¹)	30 DAP		60 DAP		90 DAP		120 DAP	
	NDVI	CV	NDVI	CV	NDVI	CV	NDVI	CV
Variedade CTC2								
0	0,203	5,2	0,269	8,1	0,357	9,4	0,525	12,7
30	0,207	4,3	0,263	7,2	0,356	9,4	0,521	27,7
60	0,207	2,2	0,265	7,5	0,346	16,6	0,518	15,6
90	0,213	2,5	0,277	6,1	0,362	8,9	0,518	11,1
120	0,212	6,1	0,288	13,7	0,383	11,1	0,558	7,3
Média	0,210	4,1	0,272	8,5	0,361	11,1	0,528	14,9
Variedade SP83-2847								
0	0,208	8,0	0,266	12,2	0,344	14,1	0,499	15,1
30	0,201	3,6	0,268	10,0	0,348	12,2	0,541	14,7
60	0,202	3,0	0,281	12,8	0,371	11,4	0,548	8,0
90	0,211	5,9	0,297	11,5	0,405	8,7	0,587	8,2
120	0,220	18,7	0,269	10,7	0,368	17,7	0,586	10,2
Média	0,208	7,8	0,276	11,5	0,367	12,8	0,552	11,3
Variedade RB855536								
0	0,211	4,2	0,279	5,9	0,383	10,7	0,520	21,0
30	0,211	1,2	0,294	5,8	0,410	10,5	0,587	21,2
60	0,211	3,0	0,280	1,6	0,391	13,5	0,570	22,9
90	0,210	3,7	0,287	9,7	0,386	16,2	0,544	33,6
120	0,212	2,7	0,277	2,0	0,365	3,8	0,541	24,7
Média	0,211	3,0	0,283	5,0	0,387	10,9	0,552	24,7

As três variedades avaliadas são recomendadas para o ambiente de produção D, característica do experimento, explicando assim a boa adaptação à seca no início do experimento e boa recuperação ao início das chuvas. Isto pode ser percebido pelo aumento expressivo nas leituras do NDVI obtidos com o sensor aos 120 DAP.

Na Figura 1 (a,b,c) estão apresentadas as respostas do NDVI, nas quatro datas de coleta de dados, para as três variedades estudadas. Como era de se esperar não houve efeito significativo entre as doses de N aplicadas e os valores de NDVI, exceto para variedade SP83-2847 aos 120 DAP, uma vez que a cana-planta não apresenta resposta expressiva à aplicação de N. Bittencourt et al. (1986) mostraram que o efeito do N residual ao solo tende a minimizar os efeitos dos fertilizantes nitrogenados. Outros fatores podem explicar a baixa resposta do N em cana-planta como a fixação biológica (LIMA et al., 1987) e as reservas orgânicas de N presentes nos toletes (CARNEIRO et al., 1995).





^{ns} não significativo, ** altamente significativo ($P < 0,01$).

Figura 1 - Valores do NDVI em relação às doses de N aplicadas aos 30, 60, 90 e 120 dias após o plantio (DAP), para as variedades CTC2 (a), SP83-2847 (b) e RB855536 (c)

Os valores do NDVI obtidos com o sensor aos 120 DAP, para a variedade SP83-2847 (Figura 1b), apresentaram-se altamente significativos com relação às doses de N aplicadas. Para as leituras realizadas antes deste período não se constatou diferença estatística entre as doses de N aplicadas e os valores de NDVI obtidos pelo sensor. Vitti (1998), utilizando o medidor de clorofila (SPAD-502) em cana-de-açúcar, constatou que as leituras realizadas aos 90 DAP revelaram que a quantidade relativa de clorofila aumenta predominantemente com as doses de N. Como a concentração de clorofila no tecido foliar afeta a reflectância na região do visível do espectro eletromagnético, quanto menor o suprimento de N na planta, menor será o nível de clorofila e, portanto menor será a absorção da radiação na região do visível, o que causa a redução do NDVI.

A falta de água na área no período inicial do experimento pode ser um dos responsáveis pela não absorção do nutriente pelo sistema radicular. Segundo Orlando Filho et al. (1979), citado por Malavolta (1982), a absorção do N é favorecida em solo com água disponível, principalmente em aplicações superficiais. Sendo assim pode-se considerar que a adubação nitrogenada seja realizada o mais próximo possível da época das chuvas para que o nutriente seja mais bem

absorvido. No entanto não deve-se ultrapassar os 150 DAP, pois a partir deste período a falta de nutriente à cultura já é prejudicial ao seu desenvolvimento. Malavolta (1982) recomenda que a adubação nitrogenada de cobertura em cana-soca no Estado de São Paulo não deve ultrapassar os 4 meses após o corte (120 DAC) e no Paraná 6 meses após o corte (180 DAC).

Com relação ao experimento em cana-soca a variedade avaliada (RB855536) é recomendada para o ambiente D (Copersucar) onde foi conduzido o experimento, segundo a UDOP (2007). Esta variedade apresenta alta produtividade em ambientes de produção favoráveis, ótima brotação de soqueira, mesmo sob colheita mecanizada e sob palha.

Os valores médios entre os tratamentos aplicados à cultura e a resposta da variedade através do NDVI e seu CV, são apresentadas na Tabela 2. Os valores do CV para o NDVI foram baixos, com valor médio máximo de 7,5% aos 60 DAP e mínimo de 4,3% aos 30 DAP. Este aumento imprevisto do CV em relação às duas primeiras leituras deve-se ao fato das plantas estarem com baixo desenvolvimento vegetativo devido à falta de umidade no solo causada pela ausência de chuvas no período. A massa verde presente era baixa e o sensor recebia influência direta do solo nas leituras. Entretanto nota-se uma redução no CV aos 90 DAP, um comportamento esperado, uma vez que com o aumento da massa verde o valor do NDVI tende a entrar na zona de saturação (MOREIRA, 2000), e com isso diminuí a variabilidade das leituras. Isto pode ser percebido quando se compara o comportamento das médias de NDVI ao longo do experimento, que apresentaram tendência crescente, sendo de 0,221 aos 30 DAP e 0,626 aos 90 DAP.

A tendência crescente do NDVI com o aumento das doses de N aplicadas era esperada, pois folhas com baixos teores de nitrogênio sintetizam baixos teores de clorofila, apresentando uma maior reflectância e transmitância no visível (400-700 nm) e baixa reflectância e transmitância no infravermelho próximo (NOH et al., 2005), causando alterações nos valores de NDVI.

Tabela 2 - Valores médios de NDVI e CV, para os tratamentos com doses de N e K, para a variedade RB855536 (cana-soca), nas três leituras realizadas

Tratamento	30 DAP		60 DAP		90 DAP	
	NDVI	CV	NDVI	CV	NDVI	CV
N0K0	0,218	5,0	0,291	8,3	0,570	4,1
N1K0	0,227	4,0	0,304	2,3	0,620	4,5
N2K0	0,223	1,7	0,300	8,5	0,645	8,2
N3K0	0,222	3,5	0,300	7,5	0,638	2,9
N4K0	0,217	6,4	0,300	4,2	0,674	3,6
N0K1	0,224	1,7	0,293	7,0	0,558	3,8
N1K1	0,218	4,7	0,293	6,0	0,605	2,6
N2K1	0,223	5,3	0,311	3,0	0,636	4,1
N3K1	0,225	6,0	0,297	11,1	0,627	9,3
N4K1	0,217	4,1	0,293	6,9	0,656	6,8
N0K2	0,219	1,7	0,281	8,5	0,560	8,4
N1K2	0,230	3,5	0,306	10,9	0,651	4,8
N2K2	0,223	7,5	0,291	10,7	0,635	11,3
N3K2	0,215	4,4	0,282	7,1	0,625	6,6
N4K2	0,218	2,4	0,310	11,2	0,664	1,4
N0K3	0,222	1,8	0,288	9,2	0,559	5,1
N1K3	0,222	4,5	0,293	4,2	0,614	8,7
N2K3	0,222	3,9	0,296	6,0	0,633	7,7
N3K3	0,224	3,6	0,307	7,0	0,655	5,7
N4K3	0,220	3,4	0,303	8,5	0,648	6,6
N0K4	0,222	6,2	0,312	12,2	0,594	8,4
N1K4	0,214	5,4	0,297	4,4	0,672	4,2
N2K4	0,223	5,9	0,301	10,0	0,629	7,0
N3K4	0,215	3,6	0,287	6,4	0,636	4,7
N4K4	0,226	6,2	0,297	7,6	0,657	4,0
Média	0,221	4,3	0,297	7,6	0,626	5,8

Na análise estatística fatorial (Tabela 3) dos tratamentos constatou-se que, aos 30 e 60 DAC, não houve efeito significativo da interação NK com as leituras de NDVI, e nem dos nutrientes N e K isolados. Entretanto aos 90 DAC houve efeito altamente significativo das leituras de NDVI em relação às doses de N aplicadas ($P < 0,01$), sendo que as doses de K e a interação NK continuaram não apresentando relação significativa com as leituras obtidas.

Tabela 3 - Análise estatística fatorial dos tratamentos, para as três leituras realizadas

	30 DAC	60 DAC	90 DAC
	Pr > F		
N	0,7296 ^{ns}	0,8229 ^{ns}	< 0,0001**
K	0,9665 ^{ns}	0,9782 ^{ns}	0,2952 ^{ns}
N*K	0,2266 ^{ns}	0,8763 ^{ns}	0,5178 ^{ns}

Nas duas primeiras leituras realizadas (30 e 60 DAC) não houve diferença entre os tratamentos, pois o N e K aplicados não haviam sido completamente absorvidos pelas plantas devido à falta de umidade no solo que impossibilitou a absorção dos nutrientes por fluxo de massa. Já aos 90 DAC só houve efeito significativo entre as doses de N aplicadas e as leituras do NDVI, não havendo efeito significativo entre as doses de K, nem da interação N e K. Estes resultados eram esperados uma vez que a normalização do índice é produzida pela combinação da forte absorção pela clorofila na região do vermelho, e está ligada à presença de N na folha, e à forte reflectância no infravermelho devido à dispersão no mesófilo das folhas e a ausência de absorção pelos pigmentos (WOOLLEY, 1971).

Na Figura 2 é apresentada a resposta do NDVI aos 90 DAC em relação às doses de N aplicadas, independentes das doses de K. As leituras do NDVI apresentaram relação linear altamente significativa com as doses de N aplicadas à cultura, independente das doses de K aplicadas. Esta relação leva a inferir que houve resposta da cana-soca à adubação nitrogenada. No geral, ou seja, avaliando todas as doses de N sem considerar as doses de K aplicadas, a reta de regressão apresentou um R^2 de 0,74 e uma correlação de 86%. Kim et al. (2005), estudando dados de coleta com esse mesmo sensor em três épocas diferentes e dois tipos de sistema sem irrigação em cevada, encontraram correlações entre o NDVI e a dose de nitrogênio aplicado na semeadura, de 63 a 90%.

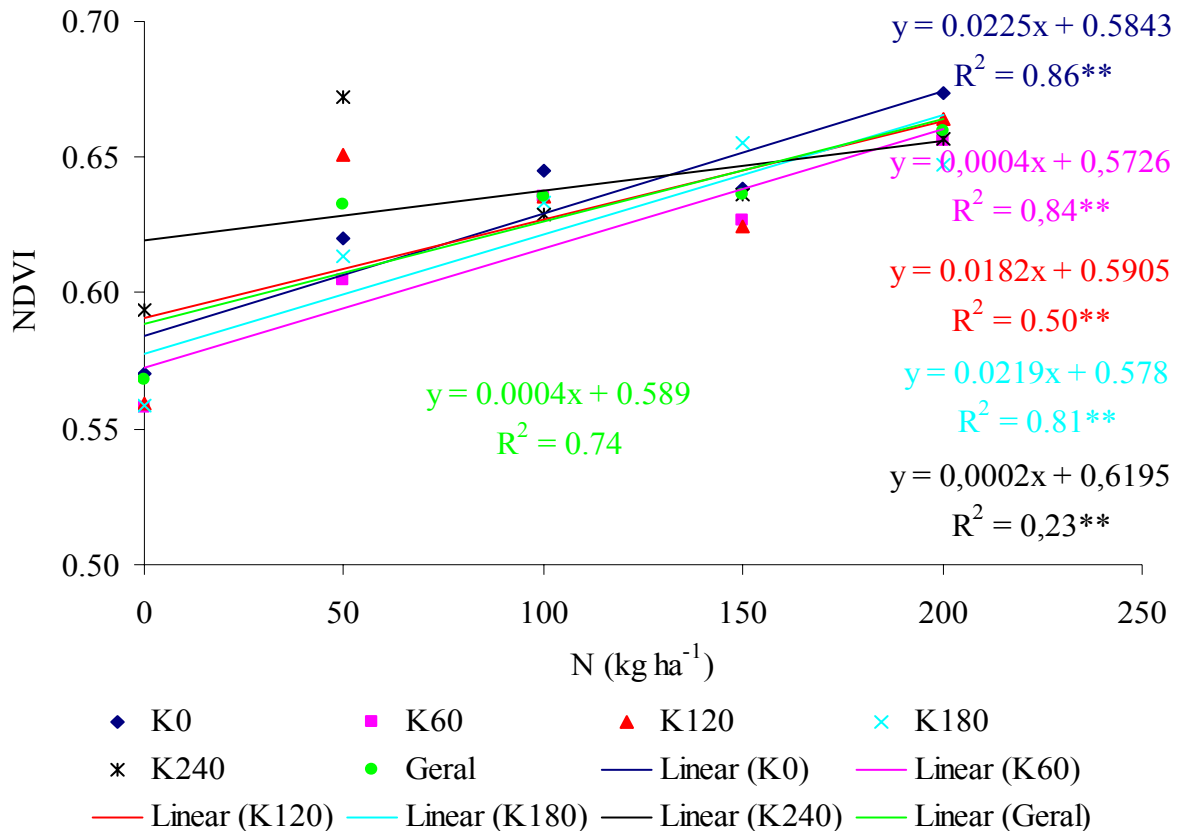


Figura 2 - Regressão linear simples entre as doses de N aplicadas e as leituras do NDVI, considerando as doses de K para a variedade RB855536 de cana-soca

Stone et al. (1996), usando sensor montado na parte frontal de um trator, para adquirir dados espectrais em trigo, obtiveram boa correlação entre a reflectância e a absorção de nitrogênio pela cultura, com R^2 de 0,64 a 0,81 para diferentes variedades de trigo. Taylor et al. (1998), para coletar dados espectrais de pastagens, utilizaram os mesmos componentes e obtiveram boa correlação entre o NDVI e a remoção de nitrogênio pela cultura ($R^2 = 0,75$).

Com base na utilização das técnicas de mensuração do NDVI com sensores óticos trabalhos vêm sendo conduzidos no sentido de desenvolver e aperfeiçoar o uso de algoritmos de fertilização. Para predizer o quanto de N a cultura necessita para atingir uma produtividade esperada, usa-se o índice de resposta (RI) cujo conceito foi desenvolvido por JOHNSON e RAUN (2003) onde compara-se o valor de NDVI de uma área de interesse com o valor de NDVI de uma “faixa rica em N” (N-rich strip). Esta faixa, implantada na área onde o sensor será utilizado, recebe uma quantidade de N adequada para o crescimento e desenvolvimento da

cultura (“consumo de luxo”). A utilização da “faixa rica em N” reduz a variação do modelo de recomendação de adubação nitrogenada em tempo real, tanto na questão do tempo (estágio de desenvolvimento), quanto ao tipo de solo e outras variações locais. Considerando essa técnica e os resultados obtidos no presente estudo infere-se sobre a possibilidade de utilização de sensores óticos ativos para detectar a deficiência de N nas plantas, e combinado com os algoritmos de fertilização, recomendar em tempo real a adubação nitrogenada, otimizando o manejo desta operação na cana-de-açúcar.

4.4 Conclusão

Os valores de NDVI apresentaram uma tendência crescente ao longo do período das leituras e foram afetados significativamente pelas doses de N aplicadas. Este fato ocorreu a partir dos 90 DAC para cana-soca e aos 120 DAP para variedade SP83-2847 em cana-planta, indicando que o sensor pode ser utilizado para detectar deficiência foliar de N em cana-de-açúcar, especialmente para cana-soca onde a adubação nitrogenada tem um maior efeito sobre a planta.

Referências

- BITTENCOURT, V.C.; FAGANELLO, B.F.; SALATA, J.C. Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (planta). **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 25-29, 1986.
- 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.
- BOLTON, J.K.; BROWN, R.H. Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways. V. Response of *Panicum maximum*, *Panicum milioides* and tallfescue (*Festuca arundinaceae*) to nitrogen nutrition. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 66, p. 97- 100, 1980
- CARNEIRO, A.E.V.; TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana-planta. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 53, p. 199-209, 1995.
- CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **1ª Geração de Variedades CTC**. Piracicaba, 2007. 1 p. Disponível em <<http://www.ctcanavieira.com.br/var/html/ctc2.html>>. Acesso em 02 jun. 2007.

- 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 ...** São Pedro: Esalq/Usp, 2006. 8 p.
- JOHNSON, G.V.; RAUN, W.R. Nitrogen response index as a guide to fertilizer management. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, p. 249-62, 2003.
- KIM, Y.; EVANS, R.G.; WADDELL, J. **Evaluation of in-field optical sensor for nitrogen assessment of barley in two irrigation systems.** p. 22-25. St. Joseph: ASAE, 2005. (ASAE Paper, PNW05-1004).
- LIMA, E.; BODDEY, R.M.; DÖBEREINER, J. Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using a ¹⁵N aided nitrogen balance. **Soil Biology and Biochemistry**, New York, v. 19, p. 165-170, 1987.
- MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar.** Piracicaba: Ultrafertil, 1982. 80 p.
- MALAVOLTA, E.; HAAG, H.P. Nutrição e adubação. In: MALAVOLTA, E. (Ed.). **Cultura e adubação da cana-de-açúcar.** São Paulo: Instituto Brasileiro da Potassa, 1964. p. 237- 278.
- MANECHINI, C. Manejo da adubação nitrogenada em cana crua. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 3., 2007, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: Esalq/Usp 2007.
- MIN, M.; LEE, W.S. Determination of significant wavelengths and prediction on nitrogen content for citrus. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 2, p. 455-461, 2005.
- MOREIRA, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação.** 2000. 179 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.
- NOH, H.; ZHANG, Q.; HAN, S.; SHIN, B.; REUM, D. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 1, p. 393-401, 2005
- NOVO, E.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 307 p.
- RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; 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.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT: user s guide** (Release 6.4). Cary, 1998. 398 p.
- SILVEIRA, J.A.G. **Interações entre assimilação de nitrogênio e o crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) cultivada em condições de campo.** 1985. 152 p. Tese (Doutorado em

Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R.; WHITNEY, R.W.; TAYLOR, S.L.; RINGER, J.D. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1623–1631, 1996.

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.

TAYLOR, S.L.; RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; WHITNEY, R.W. Use of spectral radiance for correcting nitrogen deficiencies and estimating soil test variability in an established Bermuda grass pasture. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.21, n.11, p. 2287–2302, 1998.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar**. São Carlos, 2007. Disponível em <<http://www.udop.com.br/>>. Acesso em 02 jun. 2007.

VITTI, A.C. **Utilização pela cana-de-açúcar (cana planta) do nitrogênio da uréia (^{15}N) e do mineralizado no solo em sistemas de manejo com e sem a queima**. 1998. 93 p. (Dissertação em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

VITTI, G.C. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2., 2003, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: Esalq/Usp 2003. 27 p.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 47, p. 656–662, 1971.

5 UTILIZAÇÃO DE SENSOR ÓTICO ATIVO NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS DE PLANTIO EM CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

O sensoriamento remoto fornece uma visão sinóptica das áreas agrícolas, possibilitando a monitoração das culturas em grandes áreas. Recentemente surgiram sensores óticos ativos com características específicas e grande potencial de uso no setor sucroalcooleiro, que vai além do estudo do comportamento espectral da cana-de-açúcar. O objetivo deste trabalho foi correlacionar o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizado) gerado por um sensor ótico ativo comercial com a mensuração convencional de falhas. Tais mensurações são regularmente realizadas manualmente por equipes de controle de qualidade do plantio e requerem grande empenho de mão-de-obra. O experimento foi conduzido em quatro talhões comerciais, com quatro amostras por hectare. As observações indicam que o NDVI gerado pelo sensor apresenta correlações significativas com a porcentagem de falhas levantada pelo método tradicional, assim como as equações obtidas tiveram bons resultados quando validadas, sugerindo sua aplicação como método automatizado de mensuração de falhas.

Palavras-chave: NDVI; Falhas de plantio; Cana-de-açúcar

USE OF ACTIVE OPTIC SENSOR FOR CROP FAILURE DIAGNOSIS IN SUGARCANE

Abstract

Remote sensing provides a summarized vision of agricultural areas, making possible monitoring crop development in large areas. Recently became available active optic sensors with specific characteristics and great potential of use in sugarcane that goes beyond studies of spectral behavior of sugarcane. The objective of this work was to correlate the NDVI generated from active optic sensor and crop failure made under conventional measurement. Such measurements are regularly conducted by control quality crew and require significant labor. The experiment was repeated in four commercial fields, with four samples per hectare. Observations indicate that the NDVI generated from the sensor is sufficiently precise, presenting high correlations with the percentage of crop failure measured by the conventional method, as well as the gotten equations showed a good result when validated, indicating that it may be a promising method for automation of failure measurement on sugarcane areas.

Keywords: NDVI; Crop failure; Sugarcane

5.1 Introdução

O desenvolvimento do setor canavieiro é muito importante para economia brasileira, visto que a cana-de-açúcar está entre as três culturas mais importantes do país, tornando-se necessário o aumento da produção para atender ao mercado consumidor crescente. Na safra 2006/2007, a moagem foi de 474,8 milhões de toneladas de cana, resultando na produção de 30,2 milhões de toneladas de açúcar e 17,5 bilhões de litros de álcool, representando um crescimento de 9,1% em relação à safra anterior (CONAB, 2007).

A implantação de uma lavoura de cana-de-açúcar envolve uma série de cuidados por se tratar de uma cultura semi-perene. Para que a colheita, principalmente a mecanizada, seja bem sucedida, é preciso atentar-se ao plantio uma vez que a longevidade do canavial depende da interação entre estas duas operações. Muitos são os fatores que interferem na qualidade do plantio, desde sua densidade, preparo do solo, época de plantio, escolha da variedade, qualidade e idade da muda.

Acompanhar o desenvolvimento de uma cultura tem sido cada vez mais imprescindível para a tomada de decisões. Ajustes em tratamentos culturais, irrigação e mesmo replantios podem ser executados pela detecção de falhas nos talhões da cultura ou diferenças no desenvolvimento. Imagens de alta resolução podem fornecer tais dados e auxiliar o acompanhamento do desenvolvimento de uma lavoura, uma vez que as falhas e as diferenças de padrões são claramente percebidas (JORGE; TRINDADE JUNIOR, 2002). O uso correto das tecnologias de geoprocessamento e de sensoriamento remoto pode tornar o monitoramento do calendário agrícola e previsão de safras mais eficiente e dinâmico nas escalas regional e nacional. Estas tecnologias, segundo Motta, et al. (2001), permitem a obtenção de informações precisas, em tempo real, das condições de desenvolvimento e do potencial de produção das culturas, permitindo a realização de estimativas com maior antecedência, com maior precisão e com menor custo quando comparadas com as técnicas tradicionais.

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para determinação das condições do solo, estado da cultura, detecção de pragas e estresse hídrico, utilizando-se imagens multiespectrais (BARNES et al., 1996). Além disso, sistemas de visão artificial foram utilizados para seleção de produtos agrícolas (PARK; CHEN, 1996), identificação de plantas (GUYER et al., 1986, JIA; KRUTZ, 1992, PÉREZ et al., 2000) e avaliação das condições da cultura (BACCI et al., 1998).

No entanto, poucos têm sido os trabalhos publicados onde se utiliza processamento de imagens digitais para levantamento de falhas de plantio em culturas.

Os índices de vegetação são provavelmente a maneira mais simples e eficiente de se realçar o sinal “verde” ao mesmo tempo em que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato sobre o dossel vegetal (JACKSON; HUETE, 1991). A lógica que rege esses índices baseia-se no fato que a energia refletida no vermelho e infravermelho próximo é diretamente relacionada à atividade fotossintética da vegetação. Além disso, fundamenta-se na suposição de que a utilização de duas ou mais bandas espectrais podem, substancialmente, minimizar as principais fontes de “ruídos” que afetam a resposta da vegetação como variações na irradiância solar, efeitos atmosféricos, contribuições da vegetação não fotossinteticamente ativa, contribuições do substrato e efeitos da composição e estrutura do dossel.

Um dos índices de vegetação mais utilizados tem sido o chamado índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), cuja simplicidade e relativa alta sensibilidade à densidade da cobertura vegetal tornaram possível comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética terrestre, bem como o monitoramento sazonal, inter-anual e variações de longo prazo dos parâmetros estruturais, fenológicos e biofísicos da vegetação em escala global (WANG et al., 2003).

Fontana et al. (1998), descreve que as mudanças estruturais da vegetação no decorrer da estação de crescimento resultam em uma diferenciação da sua reflectância, o que permite empregar o NDVI para o monitoramento da vegetação, bem como distinguir diferentes tipos de vegetação e detectar possíveis problemas de crescimento. Na cultura da cana-de-açúcar a utilização das técnicas de sensoriamento remoto tem sido empregadas nas questões como classificação e mapeamento (TARDIN et al., 1992), manejo (FIORIO et al., 2000) e estimativa de produtividade (RUDORFF e BATISTA, 1990).

Os sensores óticos ativos, ou seja, aqueles providos de luz própria vêm sendo avaliados para verificar o potencial de uso em recomendações de adubação nitrogenada em tempo real, no Brasil, para cana-de-açúcar (INAMASU et al., 2006), trigo (POVH et al., 2007), algodão (MOTOMIYA et al., 2007), entre outras culturas.

Stolf (1986) propôs um método de avaliação de falhas de plantio em cana-de-açúcar que basta contar e computar a somatória da distância de falhas acima de 0,5 m num determinado trecho da linha. Entretanto essa mensuração realizada manualmente por equipes de controle de

qualidade do plantio requer grande empenho de mão-de-obra, e com a mecanização da colheita ao plantio a escassez de mão-de-obra é cada vez maior. Dentro deste enfoque o presente trabalho busca fazer um levantamento em canaviais comerciais, da ocorrência de falhas de plantio, correlacionando o NDVI gerado por um sensor ótico ativo comercial com a mensuração convencional de falhas e assim verificar a possibilidade de utilizar este tipo de equipamento para diagnosticar a qualidade do plantio assim como o dano causado pelo arranquio de soqueiras na colheita mecanizada.

5.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em áreas comerciais, sem acompanhamento do plantio, na Usina Iracema, localizada em Iracemápolis, SP. Foram avaliados quatro talhões comerciais, sendo dois com a variedade SP89-1115 e dois com a SP91-1049, ambas com aproximadamente 150 DAP (dias após o plantio). A densidade amostral foi, em média, de quatro amostras por hectare, onde cada ponto amostral era composto por 10 linhas de 30 m.

Foi realizado um levantamento manual das falhas, seguindo o método proposto por Stolf (1986), que consiste em contar e computar a somatória do comprimento de falha acima de 0,5 m em cada linha, tendo um índice em porcentagem, da área com falhas maiores que 0,5 m. Para tal é necessária uma trena e um gabarito de 0,5 m para definir se a falha é maior ou menor que este valor (Figura 1).



Figura 1 - Medida de falhas com gabarito e trena, segundo método proposto por Stolf (1986)

Em seguida realizaram-se as leituras destas linhas utilizando um sensor ótico ativo comercial (GreenSeeker Red Hand Held™, NTech Industries, Inc., Ukiah, CA). Este sensor emite radiação ativa em dois comprimentos de onda, 660 nm (± 10 nm, vermelho) e 770 nm (± 15 nm, infravermelho próximo), capta a reflectância dos alvos independente das condições de luminosidade e calcula automaticamente o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). As leituras foram feitas, em média, a 1,0 m de distância do alvo, como recomendado pelo fabricante (Figura 2). As análises foram realizadas para cada talhão, como tentativa de reduzir as variações no modelo proposto, uma vez que a variedade, o tipo de solo, a idade da planta interferem nos valores das leituras do NDVI.



Figura 2 - Leitura de NDVI com o sensor ativo com leituras diretas sobre as linhas da cultura

Realizou-se a análise estatística descritiva dos dados. O teste t de Student foi realizado para avaliar a correlação entre as leituras de NDVI e a porcentagem de falhas. A análise de regressão foi avaliada por meio de variância, verificando-se a significância pelo teste F de Snedecor, definindo assim os melhores parâmetros para a geração de gráficos de regressão linear entre as variáveis NDVI e índice de falhas (%) da área, além da análise de correlação. Gerada a equação referente às falhas de cada talhão foi realizada a sua validação, utilizando-se um ponto de cada talhão que não foi utilizado na geração da equação. Posteriormente foi realizada a análise de regressão e correlação entre os dados estimados e os observados.

5.3 Resultados e Discussão

Os dados de leituras de NDVI, geradas pelo sensor, e área falhada (%) nos talhões analisados, são apresentados na Tabela 1. Segundo a metodologia proposta por Stolf (1986), as áreas comerciais plantadas com a variedade SP91-1049 apresentam qualidade de plantio normal, sendo este o tipo mais comum encontrado em áreas comerciais (porcentagem de falhas entre 10-20%) e a área cultivada com a variedade SP89 1115 encontra-se com uma qualidade do plantio subnormal (porcentagem de falhas entre 20-35%). Não foram investigadas as causas das falhas nestas áreas.

Tabela 1 - Análise estatística e correlação do NDVI e porcentagem de falhas, nos talhões avaliados, considerando as duas variedades estudadas

	Talhão 1		Talhão 2		Talhão 3		Talhão 4	
	SP91-1049		SP89-1115					
	NDVI	% falhas	NDVI	% falhas	NDVI	% falhas	NDVI	% falhas
Média	0,506	12,80	0,592	11,20	0,387	22,75	0,487	23,50
Desvio padrão	0,09	12,27	0,09	7,95	0,06	12,74	0,15	14,40
CV (%)	17,16	95,83	15,16	70,96	15,52	56,01	31,73	61,28
Curtose	0,68	5,58	3,11	0,24	-0,56	0,11	-1,23	0,74
Assimetria	-0,67	2,21	-1,55	0,98	0,02	0,92	0,15	0,84
Intervalo	0,34	52,67	0,40	30,47	0,24	46,67	0,52	62,43
Mínimo	0,32	0,00	0,29	0,00	0,27	5,00	0,23	2,23
Máximo	0,66	52,67	0,70	30,47	0,51	51,67	0,75	64,67
Contagem	20	20	30	30	30	30	36	36
r	-0,70**		-0,57**		-0,71**		-0,78**	

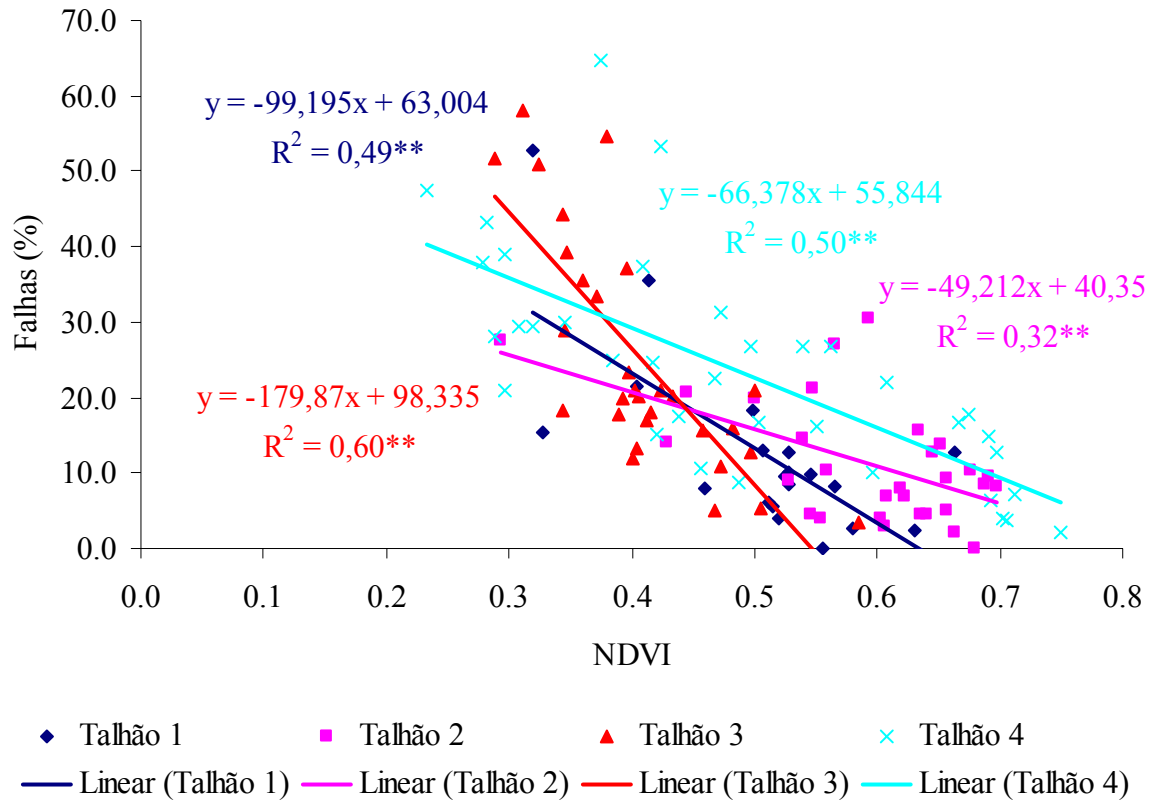
** significativo (P<0,05)

Em relação às médias de NDVI apresentadas nota-se que são diferentes entre as variedades e condições da cultura. Estudos mostraram a sua alta correlação com parâmetros associados ao desenvolvimento e produtividade das plantas, tais como densidade de vegetação e cobertura (ORMSBY et al., 1987).

Feita a análise de correlação, (Tabela 1) entre as leituras de NDVI e a porcentagem de falhas nos ambientes estudados, comprovou-se que há correlação significativa entre estas variáveis. A variedade SP91-1049 apresentou a menor correlação, sendo esta de 70% no talhão 1 e 57% no talhão 2, enquanto a variedade SP89-1115 apresentou maior correlação sendo de 71% no talhão 3 e 78% no talhão 4. O valor de r mostra-se negativo, pois à medida que se aumenta a porcentagem de falhas diminui a média do NDVI lido pelo sensor ativo (correlação negativa).

O NDVI apresenta boa relação com o índice de área foliar (JACKSON; HUETE, 1991), assim sendo espera-se que áreas com maior porcentagem de falha apresentem menores valores de NDVI devido à interferência do solo, como foi observado nos talhões 1 e 2 para a variedade SP91-1049, porém tal fenômeno não foi observado na variedade SP89-1115. Este comportamento inesperado do NDVI pode ser atribuído às influências do ambiente no desenvolvimento vegetativo da cultura. Entretanto, pesquisas relativas à utilização de sensores óticos ativos para entender o comportamento espectral de variedades de cana-de-açúcar são praticamente inexistentes na literatura.

Na Figura 3 apresenta-se a análise da regressão linear das porcentagens de falhas nos quatro talhões avaliados. A variedade SP89-1115, talhão 3, apresentou o maior R^2 (0,60) enquanto a variedade SP91-1049, talhão 2, apresentou o menor R^2 (0,32). Nota-se um comportamento descendente das retas geradas em função das equações. Isso ocorre, pois áreas com maior porcentagem de falha apresentam menores valores médios de NDVI devido à interferência do solo (Figura 3), ou seja, quanto maior forem as falhas, maior é a parcela de solo exposto e mais fácil é para o sensor identificá-las. Uma situação onde podem ocorrer problemas é no caso do canavial estar em estágio mais avançado de desenvolvimento, canas mais altas, e as folhas das plantas vizinhas encobrirem as falhas, induzindo o sensor a não identificar essas falhas.



** significativo ($P < 0,05$)

Figura 3 - Gráfico de regressão linear das variáveis NDVI e porcentagem de falhas nos talhões de cana estudados

Nota-se um comportamento diferente para cada variedade e este resultado pode ocorrer dentre outras situações devido às condições da cultura, solo ou ambiente. Isto indica que para que as leituras do sensor possam ser utilizadas como um indicador de falhas deve-se realizar uma calibração prévia na área. Assim, para cada situação deve-se montar uma função para que, quando a lavoura tenha suas linhas lidas pelo sensor possa ser estimada a porcentagem de falhas maiores que 0,5m.

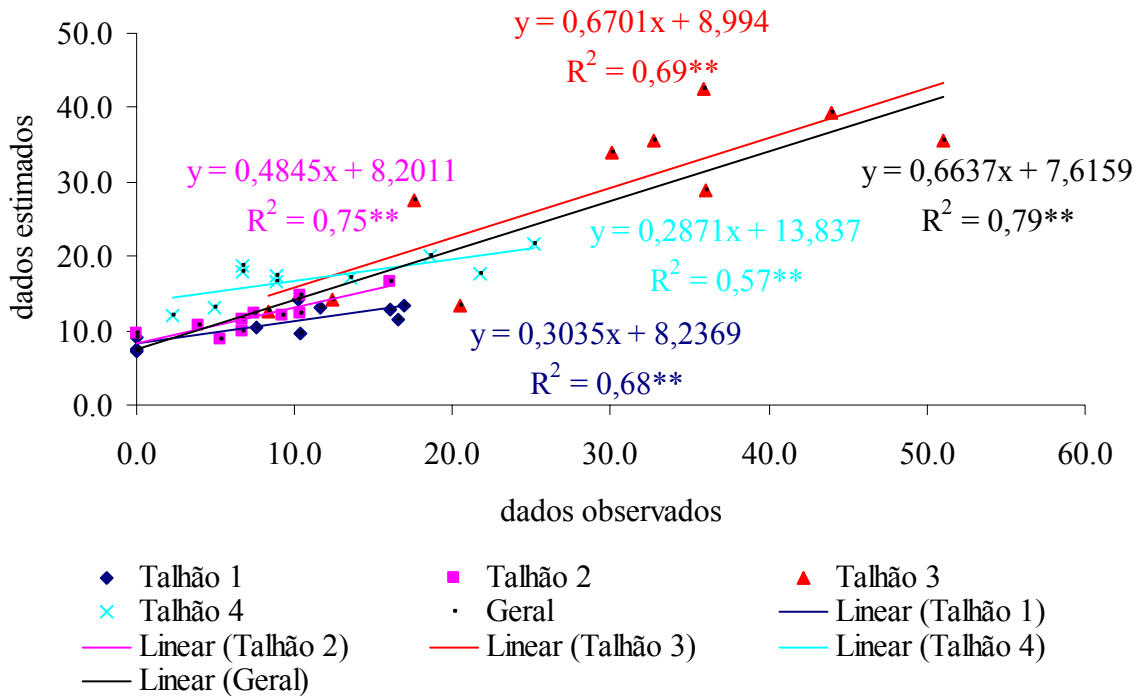
As funções $y = ax + b$ foram definidas para as duas variedades, nos talhões avaliados, sendo possível nestas áreas e condições, a estimativa da porcentagem de falhas a partir das leituras de NDVI obtidas pelo sensor ativo. A Tabela 2 mostra os valores estimados de porcentagem de falhas quando se tem o valor do NDVI obtido com o sensor e o erro médio para cada talhão.

Tabela 2 - Porcentagem de falhas observadas pelo método de Stolf (1986) e estimadas utilizando as equações obtidas

	Falhas (%)		
	Observadas (a)	Estimadas (b)	Erro (a-b)
SP91-1049			
Talhão 1	8,92	10,94	2,02
Talhão 2	7,60	11,88	4,28
SP89-1115			
Talhão 3	28,83	28,31	-0,52
Talhão 4	11,72	17,20	5,48
Média	14,27	17,08	2,08

Os valores estimados da porcentagem de falhas com as equações obtidas (Figura 3) foram, na sua maioria, maiores que os valores observados pelo método tradicional de levantamento de falhas. Na tentativa de estabelecer um coeficiente de determinação entre os valores de falhas observadas e estimadas com o uso do sensor, traçou-se a curva de regressão entre estas variáveis (Figura 4).

Os valores estimados com o uso das equações para porcentagem de falhas de plantio em cana-de-açúcar apresentam regressão significativa em relação aos valores levantados pelo método tradicional, o que pode ser notado pelos valores de R^2 . Este fato também é comprovado quando se traça a curva de regressão geral, ou seja, sem considerar os talhões e as variedades, na qual se obteve um coeficiente de determinação (R^2) elevado (0,81) e com uma correlação de 90%.



** significativo ($P < 0,05$)

Figura 4 - Curva de regressão (linear) entre os valores de falhas observados pelo método de Stolf (1986) e os valores estimados com o uso do sensor

Os dados estimados com o auxílio do sensor ótico ativo utilizado e os dados obtidos por medições de campo, apresentam boa correlação entre si, sendo esta dependente das variedades e condições dos talhões, devido à interferência do ambiente no desenvolvimento vegetativo das plantas e no comportamento do NDVI obtido com o sensor. Após o plantio, quando as plantas já se encontram bem desenvolvidas, normalmente próximo aos 120 DAP, realiza-se a operação de “quebra lombo” para aumentar área de suporte ao tráfego e evitar pisoteio dos sulcos pelos veículos de transporte e além de deixar a superfície do solo plana, facilitando a colheita mecanizada. Sensores dessa natureza poderiam ser adaptados ao trator que realiza esta operação, de modo que a lavoura pudesse ser “escaneada” para monitorar a qualidade do plantio realizado. Esses dados são facilmente georreferenciáveis com o uso de um receptor de GPS integrado ao coletor de dados, como no caso do sensor utilizado nesse estudo. Com isso haveria não somente a mensuração e quantificação das falhas, mas também a sua localização. Nota-se a necessidade de novos trabalhos, em diferentes áreas e condições de campo para um melhor ajuste desse tipo de

sensor para tal aplicação, além de testá-lo acoplado a um trator, para que se possa realizar a leitura espacializada de todas as linhas de um talhão.

5.4. Conclusões

Os valores de NDVI gerados pelo sensor mostraram resultados bastante satisfatórios, apresentando altas correlações com a porcentagem de falhas de plantio mensurada manualmente e encontradas nas áreas comerciais avaliadas, fazendo-se necessária uma calibração prévia para adequar o sensor às condições da cultura. O uso das equações para estimativa de porcentagem de falhas de plantio mostrou-se satisfatório.

Referências

- BACCI, L.; DE VINCENZI, M.; RAPI, B.; ARCA, B.; BENINCASA, F. Two methods for the analysis of colorimetric components applied to plant stress monitoring. **Computers and Electronics Agriculture**, Oxford, v. 19, p. 167-186, 1998.
- BARNES, E.M.; MORAN, M.S.; PINTER JR., P.J.; CLARKE, T.R. Multispectral remote sensing and site-specific agriculture: Examples of current technology and future possibilities precision agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, ASA/CSSA/SSSA, 3., 1996, Madison. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1996. p. 845-854.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira da cana-de-açúcar 2007/2008**: primeiro levantamento. Brasília, 2007. 12 p.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, p. 1399-1405, 1998
- GUYER, D.E.; MILES, G.E.; SCHREIBER, M.M.; MITCHELL, O.R.; VANDERBILT, V.C. Machine vision and image processing for plant identification. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.6, p.1500-1507, 1986.
- 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 ...** São Pedro: Esalq/Usp, 2006. 8 p.
- JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 185-200, Dec. 1991.
- JIA, J.; KRUTZ, G.W. Location of the maize plant with machine vision. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 52, p. 169-181, 1992.

- JORGE, L.A.C.; TRINDADE JUNIOR, O. **Metodologia para utilização de aeromodelos em monitoramento aéreo**. São Carlos: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002. 6 p. (Circular Técnica, 15).
- MOTOMIYA, A.V. DE A.; MOLIN, J.P.; DIAS, C.T. DOS S.; LIMA, V.P. DE T.; CHIAVEGATO, E.J.; FRASSON, F.R. Sensoriamento remoto na detecção de deficiência de nitrogênio em algodoeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 299-304.
- MOTTA, J.L.G.; FONTANA, D.C.; WEBER, E. Verificação da acurácia da estimativa de área cultivada com soja através de classificação digital em imagens Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais ...** São José dos Campos: SELPER; INPE, 2001. v. 1, p. 1-6.
- ORMSBY, J.P.; CHOUDHURY, B.J.; OWE, M. Vegetation spatial variability and its effects on vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 9, p. 1301-1306, 1987.
- PARK, B.; CHEN, Y.R. Multispectral image co-occurrence matrix analysis for poultry carcasses inspection. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v. 39, n.4, p.1485-1491, 1996.
- PÉREZ, A.J.; LÓPEZ, F.; BENLLOCH, J.V.; CHRISTENSEN, S. Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 25, p. 197-212, 2000.
- POVH, F.P.; GIMENEZ, L.M.; SALVI, J.V.; FRASSON, F.R.; MOLIN, J.P.; PAULETTI, V. Uso de sensor ótico ativo aplicado ao manejo de nitrogênio em trigo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 343-350.
- QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L.(Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV. 2000. p.1-41.
- STOLF, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 22-36, jul./ago.1986.
- WANG, Z.X; LIU, C; HUETE, A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research. **Acta Ecologica Sinica**, cidade, v. 23, n. 5, p. 979-988, 2003.