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

Gestão da adubação nitrogenada em milho utilizando sensoriamento remoto

Fabício Pinheiro Povh

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

**Piracicaba
2011**

Fabício Pinheiro Povh
Engenheiro Agrônomo

Manejo do nitrogênio em milho utilizando sensoriamento remoto

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

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

**Piracicaba
2011**

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

Povh, Fabrício Pinheiro
Gestão da adubação nitrogenada em milho utilizando sensoriamento remoto / Fabrício
Pinheiro Povh. - - Piracicaba, 2011.
107 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Agricultura de precisão 2. Milho 3. Nitrogênio 4. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 633.15
P879g

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

À Deus.

OFEREÇO

À minha família e amigos que me deram apoio
e contribuíram para o bom andamento do trabalho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, da Universidade de São Paulo, por meio do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade do aprendizado e realização do doutorado. Ao professor e amigo **José Paulo Molin**, pela orientação, paciência e confiança, além das diversas oportunidades oferecidas durante o curso. Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** por conceder a bolsa de estudos no início do desenvolvimento dos trabalhos.

À **Fundação ABC** que muito contribuiu para realização deste trabalho, e aos amigos **Étore Francisco Reynaldo**, **Wagner Gusmão dos Anjos**, **Gabriel Barth**, **Rodrigo Tsukahara**, **Rudimar Molin** e **Eltje Jan Loman Filho**, que de alguma forma contribuíram para o bom andamento na execução dos trabalhos. Ao amigo **Leandro Maria Gimenez**, que ajudou no planejamento e execução dos primeiros ensaios. À minha noiva **Suzana Romeiro Araújo** pela paciência e apoio durante o doutorado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Nitrogênio.....	19
2.2 Agricultura de Precisão	23
2.3 Sensoriamento Remoto	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Análises de Solo	31
3.2 Dados climáticos	34
3.3 Descrição do Sensor Óptico.....	37
3.4 Análise Estatística	38
3.5 Custos de Produção.....	39
3.6 Experimento 1 – Safra 2008/2009	40
3.7 Experimento 2 – Safra 2009/2010	42
3.8 Experimento 3 – Safra 2010/2011	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Experimento 1 – Safra 2008/2009	49
4.1.1 Aplicação de Fungicidas e Espaçamento.....	49
4.1.2 População de Plantas	50
4.1.3 Doses de Nitrogênio	57
4.2 Experimento 2 – Safra 2009/2010	69
4.2.1 Irrigação e Espaçamento	70
4.2.2 Doses de Nitrogênio.....	70
4.3 Experimento 3 – Safra 2010/2011	75
4.3.1 Irrigação e Espaçamento	75
4.3.2 Doses de Nitrogênio.....	76
4.3.2 Épocas de Aplicação do Nitrogênio	84
4.4 Discussões gerais.....	85
5 CONCLUSÃO.....	95
REFERÊNCIAS	97

RESUMO

Manejo do nitrogênio em milho utilizando sensoriamento remoto

A aplicação de fertilizantes nitrogenados da forma como é realizada hoje, tem baixa eficiência, causando grandes perdas para o ambiente e aumentando o custo de produção para o agricultor. Novas tecnologias vêm sendo constantemente desenvolvidas para otimizar o manejo de fertilizantes na agricultura. Os sensores ópticos são uma dessas ferramentas que tem potencial para contribuir para a gestão da adubação nitrogenada. Este trabalho consistiu em avaliar o comportamento do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) gerado pelo sensor óptico ativo terrestre Crop Circle® (Holland Scientific, Inc., Lincoln, NE) na cultura do milho. Esse sensor utiliza dois comprimentos de onda centralizados no âmbar (590 ± 5 nm) e no infravermelho próximo (880 ± 10 nm). Ensaios em parcelas foram realizados ao longo de três anos no Campo Demonstrativo e Experimental da Fundação ABC localizado em Itaberá, SP. Os ensaios contemplaram doses de nitrogênio na cultura do milho em dois espaçamentos entre fileiras, 0,80 m e um espaçamento reduzido com 0,40 m, além de outras variáveis avaliadas, que se mostraram importantes no decorrer da execução dos experimentos. A análise estatística dos dados foi feita por regressão (linear, polinomial quadrática e exponencial), correlação e teste de Tukey. Como os ensaios foram realizados em três safras diferentes, um deles aconteceu em uma safra com quantidade de precipitação 53% acima da média histórica, e outro foi realizado em uma gleba com baixo teor de matéria orgânica na camada superficial (0 a 0,2 m) visando obter uma resposta maior à aplicação de nitrogênio. Notou-se que o NDVI tem potencial para uso na cultura do milho, principalmente em anos de baixa resposta às doses de N aplicado. Entretanto o NDVI saturou no ensaio de maior resposta, não identificando os tratamentos com maior dose de nitrogênio devido à grande quantidade de biomassa. Foram encontrados valores de até 75% de economia no uso do nitrogênio ao utilizar a dose correta dos fertilizantes nitrogenados. Entretanto, a alta variação de resultados encontrados entre os três cenários dificulta a geração de um modelo simples para recomendação de nitrogênio em taxa variável. É necessário, portanto, a realização de mais ensaios em uma variação ainda maior de ambientes, levando em consideração outras variáveis com potencial de serem utilizadas em conjunto com o NDVI na geração dos modelos de recomendação, como por exemplo, a matéria orgânica e a disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Sensoriamento remoto; Nitrogênio

ABSTRACT

Nitrogen management in corn using remote sensing

Nitrogen application, in the way it is used today has low efficiency, causing great loss to the environment and increasing the production cost to farmers. New technologies have been constantly developed to optimize fertilizers management in agriculture. The optical sensors are one of the tools with potential to contribute for nitrogen management. This work consisted in evaluate the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) from ground active optical sensor Crop Circle® (Holland Scientific, Inc., Lincoln, NE) in corn crops. This sensor uses two wavelengths centered in amber (590 ± 5 nm) and near infrared (880 ± 10 nm). Split-plot experiments were conducted along three years at an experimental field from Fundação ABC, located in Itaberá, São Paulo State, Brazil. Experiments had nitrogen rates in corn, two row spacing, 0.4 and 0.8 m, and other variables were also analyzed. Statistical analyzes were performed by regressions (linear, quadratic and exponential), correlations and Tukey test. As experiments were conducted in three different seasons, one had rainfall 53% over the historic average, and another had low soil organic matter content at (0 to 0.2 m depth) expecting to show higher nitrogen response by the crop. It was noticed that NDVI has potential to be used in corn crops, mainly in low response years to N applied. However, NDVI saturated at the highest response experiment, failing in identify treatments with higher N rates, due the amount of biomass. Nitrogen saving of up to 75% was observed when using the optimum N rate. But the high variations in the results among the three seasons indicate that it is difficult to create a simple algorithm to recommend nitrogen. More experiments in a larger range of environments are necessary, taking in consideration other variables with potential to be used together with NDVI in the generation of recommendations, like organic matter and water availability.

Keywords: Precision agriculture; Remote sensing; Nitrogen

Nome Comercial	Cropstar
Classe	Inseticida sistêmico
Composição	Imidacloprido (150 g L ⁻¹) + Tiodicarbe (450 g L ⁻¹)
Tipo de Formulação	Suspensão concentrada para tratamento de sementes
Dose	0,3 L ha ⁻¹
Titular do Registro	Bayer CropScience Ltda.
Nome Comercial	Roundup Transorb
Classe	Herbicida
Composição	Glifosato (480 g L ⁻¹)
Tipo de Formulação	Concentrado solúvel
Dose	2,0 L ha ⁻¹
Titular do Registro	Monsanto do Brasil Ltda.
Nome Comercial	Lannate BR
Classe	Inseticida sistêmico e de contato
Composição	Metomil (215 g L ⁻¹)
Tipo de Formulação	Concentrado solúvel
Dose	1,0 L ha ⁻¹
Titular do Registro	Du Pont do Brasil S.A.
Nome Comercial	Match CE
Classe	Inseticida fisiológico
Composição	Lufenurom (50 g L ⁻¹)
Tipo de Formulação	Concentrado emulsionável
Dose	0,3 L ha ⁻¹
Titular do Registro	Syngenta Proteção de Cultivos Ltda.
Nome Comercial	Priori Xtra
Classe	Fungicida sistêmico
Composição	Azoxistrobina (200 g L ⁻¹) + Ciproconazol (80 g L ⁻¹)
Tipo de Formulação	Suspensão concentrada
Dose	1,5 L ha ⁻¹
Titular do Registro	Syngenta Proteção de Cultivos Ltda.
Nome Comercial	Nimbus
Classe	Adjuvante
Composição	Óleo mineral parafínico
Tipo de Formulação	Concentrado emulsionável
Dose	0,5 % v.v.
Titular do Registro	Syngenta Proteção de Cultivos Ltda.

Quadro 1 - Produtos comerciais utilizados no controle de pragas e doenças

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a FAO (2011), no Brasil o milho teve uma área colhida de 13.791.200 ha e produção de 51.232.400 t, sendo responsável por 6,3% da produção mundial e 67,9% da produção na América do Sul. Outro dado importante é a média nacional de produtividade, considerando a média das safras de 2001 a 2009 com $3,5 \text{ t ha}^{-1}$, ficando abaixo da média mundial para o mesmo período, com $4,8 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto que a média dos agricultores na região de atuação da Fundação ABC foi de $8,8 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 1).

Figura 1 – Produtividade média (t ha^{-1}) de milho para o período de 2001 a 2009 (FAO, 2011 e Fundação ABC, 2011)

O milho (*Zea mays* L.), provavelmente é a mais importante planta comercial com origem nas Américas. Há indicações de que sua origem tenha sido no México, América Central ou Sudoeste dos Estados Unidos. A importância econômica do milho é caracterizada pelas diversas formas de sua utilização, que vai desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia (EMBRAPA, 2006).

É uma cultura em que a adubação nitrogenada é realizada por fertilizantes minerais, por não fixar o nitrogênio atmosférico. Dentre os nutrientes utilizados pelas plantas, o nitrogênio (N) é o mais importante e essencial para o desenvolvimento das culturas, e também o mais preocupante do ponto de vista ambiental. O nitrogênio é um integrante da clorofila, um pigmento que é o primeiro a absorver a energia luminosa necessária para a fotossíntese. As plantas normalmente

contêm de 1 a 5% de nitrogênio. Se é utilizado adequadamente, juntamente com os demais nutrientes, pode acelerar o desenvolvimento de culturas como milho e outras culturas de grãos. (TISDALE et al., 1993).

Plantas deficientes em nitrogênio apresentam-se amareladas e com crescimento reduzido. Se por um lado, a falta de nitrogênio pode limitar seriamente a produtividade, por outro, o excesso pode reduzi-la. Em grande parte dos casos, as recomendações emanadas de órgãos de pesquisa são realizadas para condições médias. Por outro lado, os agricultores muitas vezes não utilizam as adubações mais vantajosas e, mesmo quando há limitação de capital, não empregam a combinação de nutrientes que lhes permitiria o máximo retorno (RAIJ, 1991).

A absorção de nitrogênio pelas culturas é variável em uma safra, entre safras, entre locais dentro de um mesmo talhão e entre culturas, mesmo quando o fornecimento de N, tanto do solo quanto aplicações adicionais de fertilizantes são abundantes (GASTAL; LEMAIRE, 2002). O fornecimento de nitrogênio do solo para a cultura varia de acordo com a heterogeneidade da área, conseqüentemente a demanda de nitrogênio pela cultura também apresenta variabilidade. Portanto, o estado nutricional da cultura é um bom indicador para adaptar a dose de N a ser aplicada (SCHÄCHTL et al., 2005).

O manejo tradicional do nitrogênio para os sistemas de produção de cereais ao redor do mundo tem mostrado sua baixa eficiência, contaminação ambiental e consideráveis debates sobre o uso de fertilizantes nitrogenados na produção agrícola. Para que a recomendação seja completa, será necessário utilizar várias ferramentas da agricultura de precisão em conjunto, como sensoriamento de solo e plantas, para que se tenha a habilidade de medir a disponibilidade de N do solo e a necessidade da cultura, e assim aplicar espacialmente as doses de N de acordo com a necessidade (SOLARI, 2006).

Geralmente assume-se que o manejo da fertilidade tem o potencial de aumentar ou manter a produtividade com doses variadas (HEERMANN et al., 2002). Um dos fatores mais significantes que pode ser variado pelo produtor para influenciar na economia dos sistemas produtivos é a aplicação de fertilizantes nitrogenados. Um grande número de trabalhos tem sido realizado visando determinar estratégias de manejo de fertilizantes, incluindo amostragem de solo, dados históricos de produtividade e relevo (WELSH et al., 2003).

Enquanto a radiação solar, temperatura e umidade determinam o potencial produtivo genético da cultura, os níveis de produtividade atingidos atualmente pelos produtores são

menores. Isto por que não é possível, nem economicamente viável, remover todos os fatores limitantes ao desenvolvimento das culturas, como o fornecimento de doses ótimas de fertilizantes, competição com plantas daninhas e danos causados por pragas e doenças. Consequentemente, a interação entre o clima e o manejo causa enormes variações de ano para ano nas produtividades e na necessidade de nitrogênio (CASSMAN et al., 2002).

Práticas como a agricultura de precisão podem beneficiar tanto a agricultura quanto o meio ambiente. As técnicas de agricultura de precisão consideram a variabilidade espacial da cultura e as condições do solo. Em contraste, a agricultura convencional considera as áreas como homogêneas, e utiliza como recomendação doses uniformes de fertilizante, esperando uma produtividade igual para toda a área. Como os produtores não querem que a produtividade seja limitada pela falta de nutrientes, doses excessivas podem ser aplicadas em áreas de baixa produtividade. Sendo assim, a aplicação em taxa variável pode responder à variabilidade espacial da cultura e das características de solo, resultando em um uso mais eficiente dos fertilizantes pelas plantas (HARMELL et al., 2004).

A agricultura de precisão pode ser uma alternativa para a redução desses problemas. Durante o ciclo da cultura, em alguns casos a variabilidade é visível em campo. Condições diferentes de desenvolvimento resultam em variabilidade na produtividade. A aplicação de fertilizantes pode ser adaptada a essas variações para se obter uma rentabilidade máxima (REYNS et al., 2002). Já se tornou tradicional, em culturas anuais, a aplicação de uma pequena quantidade de N por ocasião da semeadura, e uma quantidade maior posteriormente, em cobertura, quando o sistema radicular já estiver suficientemente desenvolvido para absorver o nutriente aplicado (RAIJ, 1991).

Com os avanços tecnológicos na agricultura, sensores estão se tornando mais presentes nas propriedades agrícolas. Com a presença dos equipamentos de aplicação em taxa variável existe a necessidade de se detectar rapidamente a variabilidade das culturas e tomar decisões em campo. Alguns sensores estão permitindo mudanças nas práticas agrícolas, detectando a variabilidade e respondendo a essa variabilidade com decisões em tempo real (INMAN et al., 2005). Sensores ópticos, ativos ou passivos, já vêm sendo comercializados. E dentre suas possibilidades de uso, vêm sendo utilizados mais amplamente para a gestão mais eficiente do nitrogênio em diversas culturas.

O sensoriamento remoto pode ser uma alternativa para o monitoramento da cultura do milho. Enquanto a maioria dos métodos de detecção de deficiência de N (medidores de clorofila, análise foliar, etc.) utiliza uma pequena quantidade de amostras para determinar a condição nutricional de toda a cultura, o sensoriamento remoto torna possível observar os padrões de toda a área (WRIGHT et al., 2004).

Os pigmentos envolvidos na fotossíntese (clorofila) absorvem a luz visível, principalmente nos comprimentos de onda do azul (450 nm) e vermelho (660 nm) e refletem principalmente no verde (550 nm). Em contraste, a refletância e a transmitância são ambas normalmente altas no infravermelho próximo (700 – 1400 nm), pois há uma baixa absorbância pelas partículas subcelulares e pigmentos, e também devido ao considerável espalhamento pelas células do mesófilo (SOLARI, 2006).

A maioria dos índices de vegetação pode ser generalizada com uma derivação da refletância de uma determinada superfície a partir de certos comprimentos de onda. Essa derivação é uma função das propriedades ópticas das folhas e partículas do solo. No caso de vegetação opticamente densa, a derivação espectral, juntamente com os índices, é um indicativo da abundância e atividade dos absorvedores nas folhas. Portanto, os amplamente utilizados índices baseados nas bandas do vermelho e infravermelho próximo, como o NDVI, realizam a mensuração da quantidade de clorofila e absorção de energia (MYNENI et al., 1997).

Um benefício adicional da tecnologia de sensores para a produção agrícola é a habilidade de quantitativamente identificar a variabilidade dentro do talhão (MARTIN et al., 2007). Entretanto as medidas de refletância para prever a biomassa e absorção de N são dependentes do estágio de desenvolvimento da cultura (MOGES et al., 2004). Em condições de maior cobertura do solo com as plantas, associada às boas condições de desenvolvimento e fertilidade adequada, ocorre um pico de absorção na banda do vermelho. Quando isso ocorre, o NDVI se torna insensível às alterações de biomassa, que posteriormente refletem em produtividade (quando o valor do NDVI é alto, a variação de produtividade em um valor específico do NDVI pode ser alta). Pequenas diferenças do NDVI reduzem a habilidade do sensor em prever com maior acurácia a produtividade e absorção de N, especialmente quando a cobertura do solo já é alta em estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (FREEMAN et al., 2003).

Os resultados obtidos em experiências anteriores revelaram a possibilidade de aumentar o período da aplicação de N em milho de maneira considerável. Esta ampliação do momento para

aplicar N representa uma grande vantagem agronômica, pois se incrementa a capacidade de intervenção em estádios muito mais próximos aos períodos críticos para a determinação da produtividade, possibilitando diminuir o risco da tomada de decisão sobre a fertilização. Os resultados obtidos permitem sustentar a proposta de diferenciar a aplicação de N em estádios mais tardios, desde V8 até V14, com resultados semelhantes aos obtidos com a aplicação na semeadura (MELCHIORI, 2007).

Embasado neste contexto, a proposta foi avaliar o sensor óptico ativo Crop Circle® visando atender o objetivo geral de avaliar o uso de sensores ópticos para o manejo do nitrogênio na cultura do milho. Os objetivos específicos foram: 1) verificar se há regressão significativa entre doses de nitrogênio e a refletância espectral da cultura do milho com dois espaçamentos entre fileiras (0,80 e 0,40 m) e em qual estágio da cultura se obtém melhor resposta; 2) verificar se a população de plantas, a aplicação de fungicidas e o uso de irrigação podem influenciar de alguma forma a resposta espectral da cultura; 3) avaliar a resposta da cultura do milho às doses de nitrogênio em diferentes anos, e identificar qual a melhor dose de N para atingir a maior produtividade e/ou maior rentabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nitrogênio

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pelas culturas. Esse fato reflete-se no consumo mundial do elemento em fertilizantes, superando em muito as quantidades utilizadas de fósforo (P_2O_5) ou potássio (K_2O). Por ser um elemento afetado por uma dinâmica complexa e que não deixa efeitos residuais diretos das adubações, o manejo adequado da adubação nitrogenada é um dos mais difíceis. Dos dois elementos incorporados pelos seres vivos ao solo, carbono e nitrogênio, o último é o nutriente mineral mais importante do ponto de vista de quantidades existentes em plantas e, muitas vezes, também do ponto de vista econômico (RAIJ, 1991). A absorção e o acúmulo do nitrogênio pelas culturas representam os dois maiores componentes do ciclo no nutriente no sistema agrícola (GASTAL; LEMAIRE, 2002).

O nitrogênio ocorre nos solos principalmente em combinações orgânicas. Não obstante, são as formas inorgânicas que estão disponíveis para as plantas. Assim, as transformações de nitrogênio orgânico em nitrogênio mineral, e vice-versa, são de grande importância. Dois processos, denominados, de forma genérica, de mineralização e imobilização, afetam o nitrogênio do solo. A mineralização consiste na transformação do nitrogênio orgânico em formas minerais, enquanto a imobilização consiste na passagem do nitrogênio mineral para formas orgânicas (RAIJ, 1991).

Pela mineralização, a matéria orgânica, especialmente restos orgânicos de origem mais recente, é decomposta com a liberação de gás carbônico e formas minerais de nitrogênio, bem como de enxofre e fósforo. A liberação de nitrogênio mineral da matéria orgânica é favorecida por valores baixos da relação C/N da matéria orgânica. A imobilização de nitrogênio consiste na incorporação de nitrogênio na forma mineral ao protoplasma dos microrganismos. O processo é favorecido em solos com a relação C/N muito acima daquela encontrada em solos cultivados e bem drenados, situada em torno de 10, ou quando são incorporados ao solo restos orgânicos frescos cuja relação C/N é elevada (RAIJ, 1991).

Em locais onde a água e outros nutrientes não são limitantes, o nitrogênio é o nutriente que, de maneira geral, tem maior efeito sobre o desenvolvimento e a produtividade das culturas de cereais (GABRIELLE et al., 2001). Em relação ao milho, resultados experimentais obtidos por

vários autores, sob diversas condições de solo, clima e sistemas de cultivo, mostram respostas generalizadas da cultura à adubação nitrogenada, sendo que cerca de 70 a 90% dos ensaios de adubação com milho, realizados em campo no Brasil, respondem à aplicação de nitrogênio. Os altos custos dos fertilizantes nitrogenados, o efeito poluente ao ambiente e a conservação de energia têm estimulado programas de melhoramento de cultivares de milho, visando o uso eficiente de nitrogênio (EMBRAPA, 2006).

Geralmente, a demanda da cultura é determinada pela produção de biomassa e as necessidades fisiológicas dos tecidos, sendo que as plantas C_4 precisam de menos nitrogênio para produzir uma determinada quantidade de biomassa do que as plantas C_3 , como o trigo (GASTAL; LEMAIRE, 2002). Considerando vários ambientes de produção e práticas de manejo, o milho tende a possuir um maior aumento de produtividade por unidade de N absorvido do que a cultura do trigo por ser uma planta C_4 . O trigo ainda tem menor eficiência fisiológica do que o arroz, que também é uma planta C_3 , por ser uma cultura com alto teor de proteína nos grãos (CASSMAN et al., 2002).

As plantas C_4 tendem a ter uma maior eficiência fisiológica de N do que plantas C_3 , porque possuem uma maior taxa fotossintética por unidade de conteúdo de N foliar, resultando em maior produção de biomassa por unidade de acúmulo de N na planta (SAGE; PEARCY, 1987). O aumento nos teores de N com a biomassa, em uma determinada cultura, não é uma função linear; a absorção de N por unidade de biomassa diminui com o desenvolvimento da cultura (GASTAL; LEMAIRE, 2002).

As principais causas para a baixa eficiência no uso do nitrogênio nas práticas tradicionais de manejo são: 1) a baixa sincronia entre o fornecimento do solo e a demanda da cultura; 2) aplicações uniformes de fertilizantes em áreas espacialmente variáveis, e; 3) falha na consideração da variabilidade temporal e a influência do clima nas necessidades nutricionais durante a safra. Quando o nitrogênio é aplicado em altas doses na semeadura e de forma uniforme na lavoura, é de se considerar que há um alto risco de perda para o ambiente (SOLARI, 2006). A perda de nutrientes em áreas agrícolas é frequentemente identificada como a maior contribuição para a degradação de recursos hídricos. Essa ligação entre a agricultura e a qualidade da água tem causado pressão para a incorporação de práticas que mantenham a produtividade agrícola e melhorem a qualidade ambiental (HARMELL et al., 2004).

A agricultura, anteriormente dominada pela produtividade, agora possui múltiplos objetivos. A minimização do impacto ambiental das culturas e sistemas produtivos, qualidade dos produtos, baixo custo de produção e, conseqüentemente o aumento da eficiência no uso do nitrogênio estão entre esses objetivos (GASTAL; LEMAIRE, 2002).

Quando o suprimento de N excede a necessidade da cultura, o excesso é perdido por escoamento superficial e lixiviação, podendo contaminar ecossistemas aquáticos e o lençol freático (WOOD et al., 1993). Essa perda de nitrogênio para o meio ambiente representa também perda econômica para os agricultores. Entretanto, redução inapropriada no suprimento de nitrogênio poderia resultar em redução de produtividade, e por conseqüência, perda econômica. Com esse dilema, a solução seria um método adequado de avaliar os teores de nitrogênio e sua variabilidade na propriedade. Sendo a produtividade determinada pelas condições da cultura nos estádios iniciais de desenvolvimento, se faz necessário identificar os teores de nitrogênio nesses estádios, para se aplicar taxas apropriadas, baseadas em avaliações acuradas das deficiências da cultura (HABOUDANE et al., 2002).

Aumentando a eficiência quanto ao uso de fertilizantes, existe a possibilidade em reduzir perdas que possam contaminar os recursos hídricos (HARMELL et al., 2004). Para aumentar a eficiência no uso do nitrogênio em sistemas agrícolas é necessária uma maior sincronia entre a demanda de N pela cultura e o fornecimento dos nutrientes por todas as fontes durante a safra (CASSMAN et al., 2002).

A determinação da eficiência no uso do nitrogênio (EUN) na agricultura é uma forma importante de avaliar o destino da aplicação mineral de fertilizantes e o seu papel no aumento de produtividade (FAGERIA; BALIGAR, 2005). Devido à resposta da cultura a aplicação de N ser dependente do fornecimento de N pelo solo (por exemplo, matéria orgânica), em determinado ano, estratégias de manejo do N que incluem predições confiáveis do índice de resposta durante o ciclo, poderiam aumentar a eficiência no uso do nitrogênio em culturas de cereais (JOHNSON; RAUN, 2003).

A estimativa da EUN é determinada pela subtração do N removido pela cultura (produtividade multiplicada pelo total de N aplicado) de parcelas com aplicação adicional de N pelo N removido em parcelas sem aplicação de N, dividido pela dose de N aplicada (RAUN et al., 2002). Raun e Johnson (1999) estimaram que a EUN é mundialmente próxima a 33% na produção de cereais.

Raun et al. (2001) desenvolveram uma metodologia para aplicação de nitrogênio baseado na refletância das culturas. A refletância é definida como a razão entre a quantidade de radiação refletida por uma folha ou dossel de uma cultura em relação à quantidade de radiação incidente (SCHRÖDER et al., 2000). O objetivo da metodologia foi desenvolver um parâmetro de produtividade que fosse sensível àquelas condições, intrínseco e que pudesse refletir a produtividade potencial, possível de ser realizado durante o ciclo da cultura (RAUN et al., 2001).

Diversos pesquisadores reconheceram que os índices de vegetação calculados a partir de sensores ópticos podem ser correlacionados com propriedades das plantas como biomassa e fatores que podem induzir algum tipo de estresse (SOLIE et al., 2002).

Ao contrário de modelos de desenvolvimento que necessitam de vários parâmetros para prever o crescimento das plantas, o sensoriamento óptico usa a planta como indicador (RAUN et al., 2001). O início ocorreu com a criação do EY (*in-season estimated yield*), com a soma de duas leituras do NDVI e dividindo pelo GDD (*growing degree-days*) ou graus-dia (RAUN et al., 2001). Depois Raun et al. (2002) reduziram para apenas uma leitura e a dividiram pelo GDD desde a data de semeadura e o denominaram de INSEY.

Utilizando duas leituras do NDVI em conjunto com o GDD, foi possível indicar o potencial produtivo para várias condições de desenvolvimento, épocas de semeadura e datas de leituras com o sensor óptico (RAUN et al., 2001). E, além disso, desenvolveram um índice para prever o potencial produtivo sem a adição de fertilizantes (YP_0).

Posteriormente foi desenvolvido um índice de resposta da aplicação de fertilizante (RI – *response index*) que é calculado dividindo a média do NDVI de uma faixa rica em nitrogênio (faixa demarcada no campo com aplicação de uma alta dose de nitrogênio para que não haja deficiência durante o ciclo) pelos dados do NDVI coletado na lavoura onde foi utilizada a dose do produtor. Esse índice de resposta é multiplicado pelo YP_0 para determinar o potencial produtivo da lavoura com a aplicação da dose complementar de nitrogênio (YP_N) (RAUN et al., 2002).

Esse método leva em consideração a variabilidade espacial do potencial produtivo, a absorção do nitrogênio que foi aplicado na semeadura e a resposta da cultura a uma dose complementar de N. A EUN foi aumentada em 15% utilizando esta metodologia e mostrou que a mensuração da refletância da cultura por sensores ópticos pode ser utilizada para determinar doses de N mais eficientes e lucrativas (RAUN et al., 2002). A habilidade de identificar áreas

onde a cultura irá responder ao fertilizante aplicado é importante. Se essa resposta ao N é esperada, então estratégias de manejo podem ser alteradas para a aplicação de N com base na resposta da cultura (MULLEN et al., 2003).

2.2 Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão pode ser definida como um sistema de gerenciamento que leva em consideração a variabilidade espacial que existe dentro de uma área de produção, independente de seu tamanho e trata de maneira localizada essa variabilidade. Há uma evidência bem comprovada que tanto a qualidade quanto a produtividade são espacialmente variáveis no campo e sistemas vêm sendo desenvolvidos para explorar esta variação e aumentar o rendimento das culturas (STAFFORD, 1999). A aplicação de fertilizantes em taxa variável é uma opção de estratégia para o manejo da variabilidade.

Com o desenvolvimento da agricultura de precisão houve uma redução das unidades de manejo do nível fazenda para o nível talhão, e já existe a possibilidade de manejo ao nível de planta. Essa escala ao nível de planta já existe desde os primórdios da agricultura, mas foi deixada de lado com a substituição das práticas manuais pela mecanização. A principal razão do uso de máquinas cada vez maiores é que os produtores podem tirar vantagem da economia de escala, pois quanto maior a área que um operador pode trabalhar em uma unidade de tempo, menor será o custo (BLACKMORE, 2004).

De acordo com Molin (2003), a investigação da variabilidade espacial pode ser feita por amostragens de solo georreferenciadas ou pelo uso do sensoriamento remoto. A amostragem de solo em grade pode fornecer uma base acurada para a geração de mapas de aplicação de fertilizantes em taxa variável, entretanto, a pesquisa mostra que o custo de mão-de-obra associada à densidade amostral necessária para a geração de um mapa acurado pode ser proibitivo (FLEMING et al., 2000). Medidas indiretas e não destrutivas da cultura são uma alternativa para tomadas de decisão sobre o manejo (MOGES et al., 2004). Segundo Ehlert et al. (2004) a aplicação de nitrogênio com base na amostragem de solo aparece mais como uma solução para agricultura de precisão sob condições de pesquisa.

Historicamente, a determinação da dose de nitrogênio a ser aplicada com base na produtividade esperada tem sido o método mais confiável (RAUN et al., 2001). Long et al.

(1998) mostraram que o nitrogênio pode ser aplicado de acordo com um mapa de qualidade dos grãos (conteúdo de proteína) gerado em uma safra anterior como forma de aumentar a eficiência na absorção e reduzir a variabilidade espacial da qualidade na safra atual.

Os mapas de produtividade, obtidos a partir de sensores instalados nas colhedoras, que são uma das ferramentas mais importantes da agricultura de precisão podem fornecer uma base útil para a aplicação de doses variáveis de fertilizantes, pois integram fatores de solo, relevo, cultura e fatores climáticos; entretanto, os fatores climáticos podem variar de um ano para outro (WELSH et al., 2003). Segundo Cassman et al. (2002) as práticas de manejo e o clima são os fatores que têm maior influência na produtividade.

Dados históricos de produtividade podem ser úteis para a aplicação de outros nutrientes, como P e K, onde pode ser utilizada a estratégia de reposição dos nutrientes, pressupondo que estes nutrientes não estão em deficiência (WELSH et al., 2003). Entretanto, um estudo comparando recomendação de N, baseado no NDVI e na produtividade do milho, com leituras nos estádios V8 e V9, foi mais acurado que aplicações baseadas somente na produtividade (CLAY et al., 2006).

De acordo com Chan et al. (2004) existem dois tipos de aplicação de nitrogênio em taxa variável, baseada em mapas de aplicação ou baseada em sensores, que podem ser utilizados individualmente ou de forma complementar. A aplicação mais comum é com o auxílio de mapas, que consiste em uma máquina responsável pela aplicação, conectada a um receptor de GPS, onde a sua localização no campo determina a dose a ser aplicada de acordo com o mapa. O mapa, geralmente criado em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), contém a localidade e as doses a serem aplicadas. Segundo Pierce e Nowak (1999) a aplicação em taxas variáveis tem uma maior expectativa para o aumento de lucratividade e/ou benefícios ambientais em culturas que requerem altas doses de nitrogênio.

2.3 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é definido como uma técnica de aquisição e de aplicação das informações sobre um objeto sem nenhum contato físico com ele. A informação é adquirida pela detecção e medição das mudanças que o objeto impõe ao campo ao seu redor, e este sinal pode incluir um campo eletromagnético emitido e/ou refletido, ondas acústicas refletidas e/ou

perturbadas pelo objeto ou as perturbações do campo de gravidade ou potencial magnético com a presença do objeto. Geralmente a aquisição de informações é baseada na captação dos sinais que cobrem o espectro inteiro das ondas eletromagnéticas desde a onda longa de rádio, passando pelas microondas, submilímetro, infravermelho termal, médio e próximo, visível, ultravioleta, raios X até os raios gama (LIU, 2007).

Durante as duas últimas décadas o desenvolvimento na capacidade de aquisição, processamento e interpretação dos dados terrestres, aéreos e de satélite têm tornado possível utilizar as tecnologias do sensoriamento remoto em conjunto com os sistemas de agricultura de precisão (McNAIRN et al., 2001). As amostragens em grade podem fornecer uma base confiável para a identificação da variabilidade espacial de nutrientes no solo e em plantas, entretanto o custo das análises pode ser proibitivo. A mensuração da refletância espectral é a abordagem sem contato e não destrutiva mais promissora para a determinação de deficiência de nitrogênio nas culturas (TUMBO et al., 2002).

Para esse propósito, as técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para avaliar as condições das culturas em relação ao nitrogênio. Propriedades espectrais, refletância e transmitância das folhas são afetadas pela deficiência de nitrogênio (BLACKMER et al., 1996). Associado a esse fato, percebe-se um aumento no interesse em agricultura de precisão e desenvolvimento de sistemas inteligentes para manejar os recursos agrícolas. Essas abordagens relativamente novas objetivam aumentar a produtividade, otimizar a rentabilidade e proteger o meio ambiente (HABOUDANE et al., 2002).

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, gráfica ou de tabelas. Os sistemas sensores são basicamente formados por uma parte óptica (coletor), constituída por lentes e espelhos, que tem o objetivo de captar e direcionar a energia proveniente dos alvos para os detectores. Quando o sistema sensor emite radiação e, após ter interagido com o alvo, capta a parte que voltou, o sistema é denominado ativo, pois possui sua própria fonte de radiação. Neste caso, o sensor pode operar durante o dia ou à noite (MOREIRA, 2005). A iluminação natural nem sempre está disponível (à noite ou em presença de nuvens), o que pode variar a intensidade e características espectrais dos alvos quando se utiliza sensores passivos.

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), acúmulo 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.

No estudo da resposta espectral de folhas verdes, Moreira (2000) constatou que no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm (faixa do visível) a refletância é baixa, da ordem de 10%, com um suave aumento da resposta na região do verde (550 nm). Na faixa do infravermelho próximo (700 a 1300 nm) ocorre outro aumento na refletância para valores próximos a 50%. Daí em diante, até 2500 nm (infravermelho médio - IVM), há um gradual decréscimo, aparecendo algumas feições de absorção causadas pelo conteúdo de água líquida. A Figura 1 ilustra um exemplo de uma curva com a porcentagem de refletância de folhas verdes em diferentes comprimentos de onda, no visível e no infravermelho próximo.

Na faixa do visível, a queda da refletância 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 e clorofilas α e β . Na região do vermelho, apenas a clorofila atua, absorvendo energia em torno de 645 nm. Enquanto isso, o aumento de refletância no infravermelho próximo é devida à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células, e à quantidade de espaços intercelulares). Os índices espectrais de vegetação, ou simplesmente índices de vegetação, 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, sendo mais comumente utilizados os valores de refletância, devido às dificuldades em interpretar e obter os resultados das medidas calibradas com valores de voltagem de saída, número digital e radiância (MOREIRA, 2000).

Figura 2 – Diagrama conceitual que ilustra a refletância de uma folha saudável.
Fonte: Inman et al. (2005)

Inicialmente, Jordan (1969) propôs a razão entre as medidas espectrais dos comprimentos de onda de 800 e 675 nm para a determinação do índice de área foliar (IAF) em florestas. Essa relação entre comprimentos de onda do infravermelho próximo e do vermelho ficou conhecida como índice de vegetação da razão simples (RVI – *Ratio Vegetation Index*). O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) surgiu em seguida, com o trabalho de Rouse et al. (1973), que encontraram uma relação entre medidas espectrais de duas bandas que melhor resolvia o problema das interferências do solo na resposta da vegetação e também reduzia 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.

A normalização proposta por Rouse et al. (1973) garante que os valores obtidos com o NDVI estão contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1. Para esse índice, adota-se a eq. (1).

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (1)$$

Em que:

ρ_{IVP} - refletância no infravermelho próximo;

ρ_V - refletância no vermelho.

A normalização é produzida pela combinação da forte absorção pela clorofila na região do vermelho e a forte refletância no infravermelho próximo, devido à dispersão no mesofilo da folha e a ausência de absorção pelos pigmentos (WOOLLEY, 1971). Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é a rápida saturação, que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento. Ou seja, o índice estabiliza em um patamar, apresentando valores constantes, mesmo com o aumento da densidade do dossel (MOREIRA, 2000).

Existem diversos fatores que interferem na obtenção dos índices de vegetação e que, para as mesmas condições de superfície, podem conduzir a 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).

Fatores relacionados com a superfície observada incluem os aspectos intrínsecos à vegetação, que influenciam as medidas espectrais dos sensores. Fatores relacionados com o processo de obtenção dos dados envolvem as características da construção do sensor, como a largura e o posicionamento das bandas e a calibração do equipamento, bem como a geometria de iluminação do Sol e de visada do sensor e os efeitos atmosféricos (absorção e espalhamento) (MOREIRA, 2000).

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

Muitos estudos foram realizados para estimar a deficiência de nitrogênio, em milho (BLACKMER et al., 1996), trigo (RAUN et al., 2001), feijão (THAI et al., 1998), algodão (SUI, 2005), citros (MIN et al., 2005), cevada (WELSH et al., 2003) e cana-de-açúcar (MOLIN et al., 2010). Estes pesquisadores mostraram um grande potencial do uso de análise espectral para estimar a quantidade de nitrogênio nas culturas.

Outros métodos podem ser utilizados para medir indiretamente o estresse 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 às condições climáticas, como a presença de nuvens.

De acordo com Steven (2004) os dados espectrais que podem ser obtidos de imagens de satélites, ainda possuem baixa resolução temporal para o uso na agricultura. A aquisição de dados com sensores terrestres é menos dependente do clima; a coleta de dados pode ser feita aproveitando outras operações agrícolas e os dados são disponibilizados logo em seguida, não sendo necessário esperar o processamento desses dados.

Stone et al. (1996), usou um trator com os componentes de um sensor montados na sua frente, para adquirir dados espectrais do trigo. O trator deslocava-se à velocidade de $0,8 \text{ m s}^{-1}$, e o sistema sensor estava programado para coletar dados na frequência de 10 Hz (leituras por segundo). Os autores obtiveram boa correlação entre a refletância e a absorção de nitrogênio pela cultura para diferentes variedades de trigo. Taylor et al. (1998) usaram as mesmas configurações que Stone et al. (1996) para coletar dados espectrais em pastagens e também obtiveram boa correlação entre o NDVI e a remoção de nitrogênio pela cultura.

Stone et al. (2007) mostraram que o inverso do NDVI ($1/\text{NDVI}$) é diretamente proporcional à deficiência de nitrogênio em trigo, e se referiram a este índice como índice de suficiência de nitrogênio na planta (PNSI) calculado pela eq. (2).

$$PNSI = \frac{(\rho_{IVP} + \rho_V)}{(\rho_{IVP} - \rho_V)} \quad (2)$$

Em que:

ρ_{IVP} - refletância no infravermelho próximo (780 nm);

ρ_V - refletância no vermelho (671 nm).

Wright et al. (2004) encontraram maior correlação entre o índice de vegetação NDVI de um sensor comercial (GreenSeeker®, Ukiah, CA) 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 (última folha emitida pela

planta), produtividade e teor de proteína em grãos de trigo. 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, consideram a existência de uma correlação.

Outro índice de vegetação correlaciona o conteúdo de N na planta combinando as bandas do verde (520-600 nm) e do infravermelho próximo (760-900 nm) (BAUSCH; DUKE, 1996). Os autores encontraram que a refletância do infravermelho próximo, normalizada sobre a refletância do verde (infravermelho próximo/verde), chamado de índice de refletância do nitrogênio (NRI – *Nitrogen Reflectance Index*), poderia determinar a concentração total de N nas folhas em milho irrigado.

Kim et al. (2005), estudando dados coletados com esse mesmo sensor em três épocas diferentes e dois tipos de sistema de 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%. De acordo com os mesmos autores, a luz solar teve efeito sobre as leituras do sensor durante o dia, com valores de NDVI menores ao meio dia e aumentando gradualmente até a noite. Um ensaio de 26 horas mostrou um desvio padrão menor que 0,051 no NDVI, mas com mínima variação para condições de céu limpo ou com presença de nuvens.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos foram realizados no Campo Demonstrativo e Experimental (CDE) da Fundação ABC (24° 04' 00" S, 49° 09' 20" O), localizado nos município Itaberá, no Estado de São Paulo. Ensaio em parcelas foram conduzidos durante três safras de verão consecutivas, 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011, nas glebas 17D, 12C e 21C (Figura 3), respectivamente. Cada gleba possui dimensões de 100 x 50 m, portanto, uma área disponível de 0,5 ha.

3.1 Análises de solo

Nas três safras foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m para análise de rotina e análise física apenas na camada de 0 a 0,2 m, nas glebas onde seriam implantados os ensaios. Comparando as três glebas, pode-se notar que com relação à textura, as três são semelhantes, com argila variando de 369 a 441 g kg⁻¹. Em termos de fertilidade, os teores de nutrientes também apresentaram pequena variação entre as glebas, entretanto a gleba 21C, onde foi realizado o terceiro ensaio, na safra 2010/2011, o teor de matéria orgânica é baixo, com apenas 13 g dm⁻³ na camada superficial, contra 41 e 34 das outras duas áreas. Na Tabela 1 podem-se visualizar os dados das análises das três glebas.

Tabela 1 – Análises de solo de rotina e física das três glebas

Gleba	Profundidade (m)	P mg dm ⁻³		MO	pH	H+Al	Al mmolc dm ⁻³		K	Ca	Mg
		Resina	Na ₂ Cr ₂ O ₇	CaCl ₂		Tampão SMP	KCl	Resina	Resina	Resina	
17D	0 – 0,2	62	41	5,1		69	1,0	2,9	42	18	
	0,2 – 0,4	44	25	5,0		58	1,0	1,7	35	8	
12C	0 – 0,2	50	34	5,1		40	1,9	4,1	31	15	
	0,2 – 0,4	10	21	4,9		34	1,0	2,3	20	5	
21C	0 – 0,2	47	13	4,5		60	12,0	2,4	38	9	
	0,2 – 0,4	14	7	4,5		52	12,0	1,5	24	6	
Gleba	Profundidade (m)	SB mmolc dm ⁻³		CTC	V	Al	Argila	Silte	Areia		
					%			g kg ⁻¹			
17D	0 – 0,2	63	132	47		2,1	369	114	517		
	0,2 – 0,4	45	103	44		2,2					
12C	0 – 0,2	50	89	53		6,0	441	118	441		
	0,2 – 0,4	27	62	44		3,5					
21C	0 – 0,2	49	109	45		20,0	417	130	453		
	0,2 – 0,4	32	84	38		28,0

3.2 Dados climáticos

No CDE de Itaberá há uma estação meteorológica PESSL (Weiz, Áustria) modelo iMETOS-PRO, com um coletor de dados programado para coleta de dados a cada 15 minutos. A estação possui sensores de radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, precipitação pluvial, pressão atmosférica, molhamento foliar e umidade de água no solo. Para fins de comparação entre as safras os dados de precipitação acumulados entre a data de semeadura e colheita estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de precipitação para o ciclo do milho nas três safras obtidos na estação meteorológica do CDE Itaberá, SP

	Safra 08/09	Safra 09/10	Safra 10/11
Data de semeadura	09/10/2008	05/10/2009	14/09/2010
Data de colheita	17/03/2009	02/03/2010	24/02/2011
Precipitação total (mm)	634,1	1073,3	682,8

Pelos valores pode-se identificar que o regime de chuvas entre as safras 2008/2009 e 2010/2011 foram semelhantes, e a safra 2009/2010 apresentou uma precipitação maior. Utilizando o intervalo entre 01/Setembro a 30/Abril para poder comparar com a média histórica da região (1027 mm) e considerando como 100%, os resultados de precipitação em porcentagem seriam 88% na safra 2008/2009, 153% na safra 2009/2010 e 85% na safra 210/2011. A Figura 4 mostra a distribuição mensal da precipitação entre a data de semeadura e a colheita para as três safras.

Para uma comparação mais detalhada, optou-se por fazer o balanço hídrico sequencial das três safras utilizando os dados coletados na estação meteorológica. O balanço hídrico é a contabilização do conteúdo de água do solo, resultante da aplicação do “Princípio de Conservação da Massa” em um volume de solo vegetado. Em síntese, o armazenamento de água é estimado através da contabilização entre as entradas e saídas de água de um volume de solo conhecido.

As entradas são representadas principalmente pela precipitação, uma vez que o orvalho só assume papel importante em regiões muito áridas, sendo assim desprezível. Da mesma forma, as entradas de água pela ascensão capilar também são muito pequenas e somente ocorrem em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos. Mesmo assim, a contribuição dessa variável é pequena, sendo também desprezível.

Figura 4 – Dados de precipitação mensais obtidos na estação meteorológica do CDE Itaberá, SP, para as três safras de milho

Quanto às perdas de água, pode-se considerar a evapotranspiração como a principal saída de água do sistema, especialmente nos períodos secos, ao passo que a drenagem profunda constitui-se em outra via de saída de água do volume controle de solo nos períodos excessivamente chuvosos. Os valores de ETP foram estimados a partir de registros meteorológicos diários observados na estação CDE de Itaberá. Para tanto, foi utilizada a equação adotada como método-padrão FAO, descrito por Montheith (1965) e adaptado posteriormente por Allen et al. (1998). Na Figura 5 estão apresentados os balanços hídricos sequenciais calculados para as três safras.

Figura 5 – Balanço hídrico sequencial das três safras de verão na região de Itabera, SP.

Fonte: Rodrigo Tsukahara – Setor de Agrometeorologia – Fundação ABC

3.3 Descrição do sensor óptico

O sensor óptico ativo utilizado foi o Crop Circle® ACS-210 (Holland Scientific, Inc., Lincoln, Nebraska). É um sensor portátil (Figura 6), composto por um coletor de dados (GeoSCOUT GLS-420), uma bateria de 12 V e o sensor. A conexão entre o coletor de dados e o sensor é feita por um cabo serial (RS232). O sensor possui um único LED (*Light Emitting Diodes*) que emite radiação ativa simultaneamente no visível e infravermelho próximo, em um sistema chamado PolySource™, e dois fotodiodos de silicone com intervalo espectral de 320 a 1.100 nm que fazem a detecção da luz. Um detector trabalha entre 400 e 680 nm e o outro detector em 800 a 1.100 nm. Utilizando um filtro em cada detector, os comprimentos de onda utilizados pelo sensor são o âmbar (590 ± 5 nm) e o infravermelho próximo (880 ± 10 nm). Os dados de saída incluem a refletância independente dos dois comprimentos de onda e o índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). A recomendação do fabricante sobre a distância do sensor ao alvo é entre 0,25 e 2,13 m.

Como padrão para todos os ensaios em parcelas, a coleta de dados foi georreferenciada com um receptor GNSS geodésico (Trimble R6, Sunnyvale, California) conectado ao coletor de dados configurado para uma frequência de 10 Hz (10 medições por segundo). E como distância padrão entre o sensor e o dossel das plantas de milho, foi adotado 0,80 m.

Figura 6 – Sensor óptico ativo Crop Circle® ACS-210 e acessórios

3.4 Análise estatística

A análise dos dados para todos os ensaios foi realizada com os softwares Statistical Analysis System (SAS, 2001) e JMP® Statistical Discovery Software (JMP, 2007). Todos os ensaios foram montados em parcelas subdivididas; o coeficiente de variação, bem como as interações foram analisadas com o SAS, e as demais análises foram realizadas com o JMP. Calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) para os valores de teor de N foliar e produtividade, correlacionados com o NDVI. Foram gerados gráficos de dispersão para verificar a correlação dos dados pelo teste t de Student em níveis de significância de 5% e 1%. Para gerar os gráficos com equação exponencial do NDVI correlacionado com a produtividade, é necessária a transformação dos dados de produtividade pelo logaritmo natural ou neperiano antes de calcular o coeficiente de correlação de Pearson (r). Funções exponenciais entre o NDVI e a produtividade já foram propostas para trigo e milho. Thenkabail (2000) reportou que na maioria dos casos, modelos exponenciais não lineares foram melhores para explicar a variabilidade entre os índices de vegetação e os parâmetros biofísicos em várias culturas.

Para os gráficos com a variável dose de N aplicado, foram obtidas equações de regressão com a análise de variância pelo teste F para a função linear e polinomial, teste das hipóteses em nível de significância de 5% e 1% e cálculo do coeficiente de determinação (R^2).

Segundo Fageria e Baligar (2005) a determinação do NUE (*Nitrogen Use Efficiency*) é uma abordagem importante para avaliar o destino do nitrogênio aplicado e o seu papel no aumento de produtividade. Tal eficiência é calculada com a eq. (3).

$$NUE = \left(\frac{P_n - P_0}{D_n} \right) \quad (3)$$

Onde NUE é a eficiência do uso do nitrogênio, o P_n é a produtividade da parcela onde foi aplicado o nitrogênio, P_0 é a parcela testemunha sem aplicação de nitrogênio e D_n é a dose de nitrogênio utilizada. O resultado é dado em kg de grãos produzidos por kg de nitrogênio aplicado.

3.5 Custos de produção

Para o cálculo do custo de produção foi utilizada a planilha de custo da Fundação ABC para a safra de verão 2010/2011, onde foi considerado como preço médio de venda, R\$ 20,00 à saca de 60 kg de milho, com base na média histórica dos últimos cinco anos, fornecida pela Cooperativa Agropecuária Castrolanda. Foi utilizada a ureia como fonte de nitrogênio para o cálculo dos custos por tratamento, considerando o custo de R\$ 791,00 à tonelada. Os custos foram calculados individualmente para cada tratamento, conforme discriminado na Tabela 3. Os custos variáveis com insumos (sementes, fertilizantes, inseticidas, herbicidas, fungicidas e adjuvantes) foram os mesmos para todos os tratamentos, com exceção do nitrogênio. Entretanto, os custos da Cooperativa (recepção e secagem, pesagem, armazenagem e administração) são maiores para os tratamentos de maior produtividade, pelo custo ser calculado por tonelada entregue.

Tabela 3 – Planilha de custos de produção para a cultura do milho

Cultura	Milho
Produtividade	12 t ha⁻¹
Custos variáveis	
Insumos	
Sementes	400,53
Fertilizantes	606,82
Inseticidas	159,94
Herbicidas	133,05
Fungicidas	88,73
Adjuvantes	2,94
Custos financeiros	71,05
Total de custos variáveis	1.463,05
Mecanização	350,10
Custos fixos	1.362,78
Custo total	3.175,93
Custo total por saca	15,88
Preço de venda	20,00
Receita por hectare	4.000,00
Saldo financeiro	1.258,78
Lucro por hectare	824,07

Fonte: Tobias Katsman – Setor de Economia Rural – Fundação ABC

3.6 Experimento 1 – Safra 2008/2009

O híbrido de milho utilizado foi o P30F53 e a semeadura foi realizada no dia 09/10/2008, para uma população esperada de 70 mil plantas ha^{-1} , em espaçamento de 0,80 e 0,40 m entre fileiras, seguindo a rotação de culturas Aveia preta/Soja/Trigo/Milho. As sementes foram tratadas com Imidacloprido + Tiodicarbe um dia antes da semeadura. A adubação de base foi 450 kg ha^{-1} da fórmula 0-20-20. Um dia após a semeadura a vegetação da área foi dessecada com Glifosato, e em V1 foram aplicados os inseticidas Metomil e Lufenurom.

No mesmo dia da semeadura foram aplicados, em cobertura, doses de nitrogênio na forma de nitrato de amônio, lançadas a mão em cada parcela para completar as doses necessárias para cada tratamento. Os tratamentos com doses de nitrogênio foram 60, 120, 180 e 240 kg ha^{-1} e uma testemunha sem aplicação de nitrogênio. Para os tratamentos com espaçamento de 0,80 m entre fileiras, as parcelas eram formadas por quatro fileiras de plantas e 7,0 m de comprimento, já os tratamentos com espaçamentos de 0,40 m entre fileiras eram formadas por 7 fileiras de plantas com 7,0 m de comprimento. O experimento ficou disposto, portanto, com quatro blocos ao acaso e parcelas subdivididas. A parcela é aplicação de fungicida, a subparcela é o espaçamento entre fileiras e a subsubparcela são as doses de nitrogênio. A lista de tratamentos está apresentada na Tabela 4.

Paralelamente, nos mesmos blocos foram dispostos tratamentos com diferentes populações de plantas, que foram semeadas para uma população esperada de 100 mil plantas ha^{-1} , e foram desbastadas em V4 para formar os tratamentos com 40, 55, 70, 80 e 100 mil plantas ha^{-1} . Em V6 foi aplicado o fungicida Azoxistrobina + Ciproconazol com adição de óleo mineral para os tratamentos com fungicida. O volume de calda utilizado foi de 160 L ha^{-1} .

Tabela 4 – Tratamentos do experimento 1

Tratamento	Nitrogênio (kg ha⁻¹)	Espaçamento (m)	Fungicida	População (mil plantas ha⁻¹)
1	0	0,80	Sem	70
2	60	0,80	Sem	70
3	120	0,80	Sem	70
4	180	0,80	Sem	70
5	240	0,80	Sem	70
6	0	0,40	Sem	70
7	60	0,40	Sem	70
8	120	0,40	Sem	70
9	180	0,40	Sem	70
10	240	0,40	Sem	70
11	0	0,80	Com	70
12	60	0,80	Com	70
13	120	0,80	Com	70
14	180	0,80	Com	70
15	240	0,80	Com	70
16	0	0,40	Com	70
17	60	0,40	Com	70
18	120	0,40	Com	70
19	180	0,40	Com	70
20	240	0,40	Com	70
21	180	0,80	Com	100
22	180	0,80	Com	80
23	180	0,80	Com	70
24	180	0,80	Com	55
25	180	0,80	Com	40
26	180	0,40	Com	100
27	180	0,40	Com	80
28	180	0,40	Com	70
29	180	0,40	Com	55
30	180	0,40	Com	40

As coletas de dados com o sensor foram realizadas em V4, V5, V6, V7, V10, VT e R1 (RITCHIE et al., 1986). As coletas de folhas foram realizadas em V6, V10 e R1 para análise do teor de nitrogênio utilizando o método de combustão Dumas. Foram coletadas 10 folhas por parcela, para formar amostras compostas por parcela. Em V6 e V10 foi coletada sempre a última folha totalmente expandida. Em R1 a folha coletada foi abaixo e oposta à posição da espiga.

A colheita foi realizada manualmente, sendo colhidas todas as espigas de duas fileiras de 5 m para o espaçamento de 0,80 m e quatro fileiras de 4,0 m para o espaçamento de 0,40 m. Após a

colheita foram feitas as avaliações de umidade dos grãos, massa de 250 grãos e produtividade. Na Figura 7 pode-se ver a diferença entre as parcelas sem aplicação de nitrogênio e as parcelas com nitrogênio, indicando resposta ao nutriente.

Figura 7 – Fotos do Experimento 1 (Safr 2008/2009), Gleba 17D, diferença entre o tamanho de plantas com doses de nitrogênio diferentes

3.7 Experimento 2 – Safr 2009/2010

O híbrido de milho utilizado foi o P30F53 e a semeadura foi realizada no dia 05/10/2009, para uma população esperada de 75 mil plantas ha^{-1} , em espaçamento de 0,80 e 0,40 m entre fileiras, seguindo a rotação de culturas Soja/Aveia preta/Milho. As sementes foram tratadas com Imidacloprido + Tiodicarbe um dia antes da semeadura. A adubação de base foi 450 kg ha^{-1} da fórmula 0-20-20. A área foi dessecada com Glifosato, e em V1 foram aplicados os inseticidas Metomil e Lufenurom.

Ainda no dia seguinte à semeadura foram aplicados, em cobertura, doses de nitrogênio na forma de nitrato de amônio, lançadas a mão em cada parcela para completar as doses necessárias para cada tratamento. Os tratamentos com doses de nitrogênio foram 40, 80, 120 e 160 kg ha^{-1} e uma testemunha sem aplicação de nitrogênio. Para os tratamentos com espaçamento de 0,80 m entre fileiras, as parcelas eram formadas por quatro fileiras de plantas e 6,0 m de comprimento, já os tratamentos com espaçamentos de 0,40 m entre fileiras eram formadas por 7 fileiras de plantas com 6,0 m de comprimento. O experimento ficou disposto com 6 blocos ao acaso e com parcelas

subdivididas em sequeiro e mais 6 blocos irrigados. A parcela é o espaçamento entre fileiras e a subparcela são as doses de nitrogênio. A lista de tratamentos está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Tratamentos do experimento 2

Tratamento	Nitrogênio (kg ha⁻¹)	Espaçamento (m)	Irrigação	População (mil plantas ha⁻¹)
1	0	0,80	Irigado	75
2	40	0,80	Irigado	75
3	80	0,80	Irigado	75
4	120	0,80	Irigado	75
5	160	0,80	Irigado	75
6	0	0,40	Irigado	75
7	40	0,40	Irigado	75
8	80	0,40	Irigado	75
9	120	0,40	Irigado	75
10	160	0,40	Irigado	75
11	0	0,80	Sequeiro	75
12	40	0,80	Sequeiro	75
13	80	0,80	Sequeiro	75
14	120	0,80	Sequeiro	75
15	160	0,80	Sequeiro	75
16	0	0,40	Sequeiro	75
17	40	0,40	Sequeiro	75
18	80	0,40	Sequeiro	75
19	120	0,40	Sequeiro	75
20	160	0,40	Sequeiro	75

Em V6 foi aplicado o fungicida Azoxistrobina + Ciproconazol com adição de óleo mineral e volume de calda de 160 L ha⁻¹.

As coletas de dados com o sensor foram realizadas em V1, V7 e V10. A irrigação deveria ser realizada com base nas leituras diárias dos tensiômetros (Figura 8) instalados no experimento, entretanto devido ao excesso de chuvas, acima da média histórica, não foi necessário o uso da irrigação. Foram instalados oito tensiômetros no experimento, sendo quatro no perímetro irrigado e quatro na área de sequeiro. Destes quatro tensiômetros, dois foram instalados na profundidade de 0,20 m e os demais a 0,40 m da superfície do solo. Quando a média dos dois tensiômetros superficiais excedesse 0,44 atm do potencial de água no solo, seria realizada a irrigação, conforme Faria e Costa (1987) e Azevedo e Silva (1999).

Figura 8 – Tensiômetros instalados para monitorar a necessidade de irrigação

A colheita foi realizada manualmente, sendo colhidas todas as espigas de duas fileiras de 5 m para o espaçamento de 0,80 m e quatro fileiras de 4,0 m para o espaçamento de 0,40 m. Após a colheita foram feitas as avaliações de umidade dos grãos, peso de 250 grãos e produtividade. Na Figura 9 têm-se as fotos do ensaio, que diferente do ensaio anterior se mostra mais homogêneo, com baixa resposta à aplicação de nitrogênio.

Figura 9 – Fotos do Experimento 2 (Safrá 2009/2010), Gleba 12C, visão geral

3.8 Experimento 3 – Safra 2010/2011

O híbrido de milho utilizado foi o AG 8088 YG e a semeadura foi realizada no dia 14/09/2010, para uma população esperada de 75 mil plantas por hectare, em espaçamento de 0,80 e 0,40 m entre fileiras, seguindo a rotação de culturas Soja/Aveia preta/Milho. As sementes foram tratadas com Imidacloprido + Tiodicarbe um dia antes da semeadura. A adubação de base foi 450 kg ha⁻¹ da fórmula 0-20-20.

No mesmo dia da semeadura foram aplicados, em cobertura, doses de nitrogênio na forma de nitrato de amônio, lançadas a mão em cada parcela para completar as doses necessárias para cada tratamento. Os tratamentos com doses de nitrogênio foram 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ e uma testemunha sem aplicação de nitrogênio. Para os tratamentos com espaçamento de 0,80 m entre fileiras, as parcelas eram formadas por quatro fileiras de plantas e 6,0 m de comprimento, já os tratamentos com espaçamentos de 0,40 m entre fileiras eram formadas por 7 fileiras de plantas com 6,0 m de comprimento. O experimento ficou disposto com 4 blocos ao acaso e com parcelas subdivididas pelo espaçamento entre fileiras (irrigado) e mais 4 blocos sem irrigação (no sequeiro). A parcela é o espaçamento entre fileiras e a subparcela são as doses de nitrogênio.

Foram adicionados outros 5 tratamentos com 60 kg ha⁻¹ de nitrogênio, com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio em cobertura nos estádios V2, V4, V6, V8 e V10. A lista de tratamentos está apresentada na Tabela 6. No estádio V6 foi aplicado o fungicida Azoxistrobina + Ciproconazol com a adição de óleo mineral e volume de calda de 160 L ha⁻¹. As coletas de dados com o sensor foram realizadas em V2, V4, V6, V8 e V10.

A colheita foi realizada manualmente, sendo colhidas todas as espigas de duas fileiras de 5 m para o espaçamento de 0,80 m e quatro fileiras de 4,0 m para o espaçamento de 0,40 m. Após a colheita foram feitas as avaliações de umidade dos grãos, peso de 250 grãos e produtividade. Na Figura 10 são apresentadas fotos do ensaio, que assim como no primeiro ensaio, evidenciam a resposta ao nitrogênio.

Tabela 6 – Tratamentos do experimento 3

Tratamento	Nitrogênio Base (kg ha ⁻¹)	Nitrogênio Cobertura (kg ha ⁻¹)	Estádio Aplicação	Irrigação	Espaçamento (m)
1	0	---	---	Irrigado	0,80
2	60	---	---	Irrigado	0,80
3	120	---	---	Irrigado	0,80
4	180	---	---	Irrigado	0,80
5	240	---	---	Irrigado	0,80
6	60	120	V2	Irrigado	0,80
7	60	120	V4	Irrigado	0,80
8	60	120	V6	Irrigado	0,80
9	60	120	V8	Irrigado	0,80
10	60	120	V10	Irrigado	0,80
11	0	---	---	Irrigado	0,40
12	60	---	---	Irrigado	0,40
13	120	---	---	Irrigado	0,40
14	180	---	---	Irrigado	0,40
15	240	---	---	Irrigado	0,40
16	60	120	V2	Irrigado	0,40
17	60	120	V4	Irrigado	0,40
18	60	120	V6	Irrigado	0,40
19	60	120	V8	Irrigado	0,40
20	60	120	V10	Irrigado	0,40
21	0	---	---	Sequeiro	0,80
22	60	---	---	Sequeiro	0,80
23	120	---	---	Sequeiro	0,80
24	180	---	---	Sequeiro	0,80
25	240	---	---	Sequeiro	0,80
26	60	120	V2	Sequeiro	0,80
27	60	120	V4	Sequeiro	0,80
28	60	120	V6	Sequeiro	0,80
29	60	120	V8	Sequeiro	0,80
30	60	120	V10	Sequeiro	0,80
31	0	---	---	Sequeiro	0,40
32	60	---	---	Sequeiro	0,40
33	120	---	---	Sequeiro	0,40
34	180	---	---	Sequeiro	0,40
35	240	---	---	Sequeiro	0,40
36	60	120	V2	Sequeiro	0,40
37	60	120	V4	Sequeiro	0,40
38	60	120	V6	Sequeiro	0,40
39	60	120	V8	Sequeiro	0,40
40	60	120	V10	Sequeiro	0,40

Figura 10 – Fotos do Experimento 3 (Safrá 2010/2011), Gleba 21C, visão geral

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de cada ensaio foram discutidos individualmente, com base nas especificidades de cada ano, visando extrair a informação mais importante de cada safra, e ao final uma discussão mais ampla, englobando todos os ensaios e como eles podem ser utilizados para estabelecer um modelo de recomendação de nitrogênio utilizando sensores ópticos.

4.1 Experimento 1 – Safra 2008/2009

O primeiro ensaio (safra 2008/2009) foi realizado para responder primeiramente duas perguntas: se a população de plantas teria impacto significativo nas leituras do sensor, e se a aplicação de fungicidas também teria algum efeito sobre o NDVI. A questão da população foi inserida, pois atualmente existe uma abordagem em agricultura de precisão na qual se faz recomendação de populações de plantas de milho para semeadura em taxa variável. Já o uso do fungicida aconteceu porque justamente na mesma época de instalação do ensaio, havia uma discussão sobre o uso de fungicidas em milho. E por não saber se essa prática se tornaria usual, foi decidido avaliar sua influência sobre a produtividade e sobre a resposta do sensor.

4.1.1 Aplicação de fungicidas e espaçamento

O coeficiente de variação do experimento foi de 8,95%. A análise de interação para a aplicação do fungicida não foi significativa; a interação tripla entre Fungicida x Espaçamento x Doses de N apresentou um $Pr > F$ de 0,68; para as interações duplas para Fungicida x Espaçamento e Fungicida x Doses de N, os valores de $Pr > F$ foram 0,63 e 0,94, respectivamente. Na Figura 11 podem-se ver os dados de produtividades médias comparando a aplicação de fungicida e os espaçamentos entre fileiras, que não foram significativos em nenhum dos dois casos. Como a interação com fungicida não foi significativa para produtividade, os dados foram analisados em conjunto para espaçamento e doses de nitrogênio, aumentando de quatro para oito repetições. Os resultados de espaçamento também não foram significativos para produtividade,

mas a interação entre espaçamento e doses de N foi significativa para os dados de NDVI, portanto as análises de regressão foram realizadas para ambos os espaçamentos. A produtividade dos tratamentos com espaçamento de 0,40 m foi de 1,73% maior que os tratamentos com espaçamento 0,80 m, mas sem diferença estatística.

Figura 11 – Dados de produtividade para aplicação de fungicida e espaçamento entre fileiras.
(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

4.1.2 População de plantas

Para os dados de população de plantas foram gerados gráficos de dispersão, com análise de regressão linear ou polinomial quadrática. As Figuras 12 e 13 mostram os gráficos entre a população de plantas e o NDVI coletado em sete diferentes estádios de desenvolvimento para os dois espaçamentos entre fileiras.

Figura 12 – Análise de regressão entre a população de plantas de milho e o NDVI em sete diferentes estádios de desenvolvimento, para o espaçamento de 0,40 m entre fileiras

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Figura 13 – Análise de regressão entre a população de plantas de milho e o NDVI em sete diferentes estádios de desenvolvimento, para o espaçamento de 0,80 m entre fileiras

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, principalmente em V4 e V5, é nítido o efeito da população de plantas sobre o NDVI. Isso é facilmente explicado pelo fato de que se têm mais plantas na fileira, todas com uma quantidade de parte aérea muito semelhante. E fica mais nítido para o espaçamento de 0,80 m, confirmado pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) maiores que para o espaçamento de 0,40 m nessas duas fases (V4 e V5). Entretanto, com o avanço no desenvolvimento do milho, as populações menores, que tem mais área útil de solo para explorar, acabam compensando a quantidade de biomassa.

Duas plantas inteiras, cortadas rente ao solo, coletadas em cada parcela, foram juntadas para formar uma amostra composta de oito plantas para o cálculo de matéria seca. Como não foram utilizadas as repetições não é possível fazer uma análise estatística. Na média de todas as populações e nos dois espaçamentos o teor de matéria seca foi de 53%, com desvio padrão de 2,5% e coeficiente de variação de 4,7%. Ou seja, mesmo com uma grande variação no estande final de plantas, a variação em teor de matéria seca foi baixa, indicando que realmente as plantas das menores populações conseguiram produzir uma quantidade maior de biomassa.

Nos estádios mais avançados, V7 e V10 nota-se que o efeito da população sobre o NDVI começa a desaparecer, não sendo significativo para o espaçamento de 0,40 m nas duas fases, e no espaçamento de 0,80 m se tornam não significativos apenas em V10. Entretanto, são necessários mais ensaios com doses de nitrogênio em populações diferentes, a fim de verificar se a resposta ao nitrogênio é a mesma.

Mesmo ao utilizar a faixa de referência sem limitação de nitrogênio quando em nível de campo, se utilizar as duas ferramentas (taxa variável de N e de sementes), é preciso verificar se o mesmo modelo de recomendação servirá para todas as populações. Se por acaso, a resposta ao N for diferente nas variações de população, a recomendação pode ser realizada de maneira equivocada.

Ainda com os dados de população de plantas foram gerados também gráficos de dispersão, com cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r). As Figuras 14 e 15 mostram os gráficos entre o NDVI coletado nas diferentes populações de plantas e a produtividade de grãos, em sete diferentes estádios de desenvolvimento para os dois espaçamentos entre fileiras.

Figura 14 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes populações de plantas e a produtividade no espaçamento de 0,40 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

Figura 15 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes populações de plantas e a produtividade no espaçamento de 0,80 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

Analisando os gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos de população e a produtividade de grãos, os resultados são distintos entre os espaçamentos. Para o espaçamento de 0,80 m nenhum coeficiente de correlação foi significativo, indicando que maiores valores de NDVI não resultaram em maior produtividade. Ao contrário dos gráficos do espaçamento de 0,40 m onde até o estágio V10 as correlações foram significativas. Para ficar mais fácil o entendimento dessas correlações, deve-se observar também os resultados de produtividade de grãos apresentados na Figura 16. Para nenhum dos dois espaçamentos houve diferença estatística entre a produtividade de grãos das diferentes populações, entretanto, no espaçamento 0,40 m nota-se uma tendência de aumento de produtividade com o aumento da população plantas.

Portanto, deixando um pouco de lado as avaliações iniciais de NDVI e olhando apenas as correlações nos estádios de V7 e V10 para o espaçamento de 0,40 m, quanto maiores os valores de NDVI maior a produtividade, demonstrando a resposta em produtividade de grãos da cultura à população de plantas neste espaçamento. Já o espaçamento de 0,80 m que não respondeu em produtividade ao aumento de população, os gráficos de correlação em V4 e V5 mostram uma grande variação nos valores de NDVI, mas sem aumento em produtividade, e nos estádios V7 e V10, após a compensação da biomassa, os dados ficaram todos agrupados, confirmando a ausência de resposta ao aumento da população.

Esses resultados indicam que talvez o modelo de estimativa de produtividade pelo uso do NDVI pode ser o mesmo para diferentes populações, faltando confirmar se a resposta ao nitrogênio também será a mesma.

Figura 16 – Resultados de produtividade em relação às diferentes populações de plantas para os dois espaçamentos

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

4.1.3 Doses de nitrogênio

Para os dados de doses de nitrogênio foram gerados gráficos de dispersão, com análise de regressão linear ou polinomial quadrática. As Figuras 17 e 18 mostram os gráficos entre as doses de nitrogênio e o NDVI coletado em sete diferentes estádios de desenvolvimento para os dois espaçamentos entre fileiras.

Ao contrário dos gráficos de população com o NDVI, em que os melhores coeficientes de determinação são obtidos nos estádios iniciais de desenvolvimento, para o nitrogênio os resultados foram melhores a partir de V6. Embora em V4 e V5 os coeficientes de determinação sejam significativos para ambos os espaçamentos, com valores acima de 0,70, é nítido que o tratamento que mais se destaca é a testemunha, sem aplicação de nitrogênio. Entretanto, na prática não é possível fazer a semeadura do milho sem nitrogênio, pois ao se tentar atrasar a aplicação da adubação de cobertura para estádios além de V6, sem o uso de nitrogênio na base, no momento do uso do sensor a cultura pode estar em um nível de deficiência que seja difícil de reverter.

Se compararmos a razão entre o NDVI do tratamento com 180 kg ha^{-1} de N com o tratamento de 60 kg ha^{-1} de N, assumindo que teríamos utilizado a dose de 60 kg na base e a dose 180 kg como faixa de referência, temos os valores de índice de resposta da Tabela 7.

Tabela 7 – Índice de resposta calculado entre os tratamentos de 180 e 60 kg ha^{-1} de N

Estádio	Espaçamento	
	0,40 m	0,80 m
V4	1,027	0,997
V5	1,064	1,022
V6	1,063	1,038
V7	1,082	1,068
V10	1,064	1,018
VT	1,041	1,026
R1	1,053	1,026

Analizando pelo índice de resposta, o melhor estádio para a coleta dos dados de NDVI para identificar a resposta ao nitrogênio foi em V7, onde os valores foram mais altos para ambos os espaçamentos. E o valor foi maior para o espaçamento de $0,40 \text{ m}$, indicando maior resposta ao nitrogênio que o espaçamento de $0,80 \text{ m}$.

Figura 17 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio e o NDVI em sete diferentes estádios de desenvolvimento, para o espaçamento de 0,40 m entre fileiras

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Figura 18 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio e o NDVI em sete diferentes estádios de desenvolvimento, para o espaçamento de 0,80 m entre fileiras

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Como sugerido por alguns autores, as leituras realizadas por sensores ópticos, seja o NDVI ou outros índices de vegetação, têm boa correlação com teor de nitrogênio foliar, podendo ser utilizado para recomendação de nitrogênio em taxa variável. As Figuras 19, 20 e 21 mostram a regressão entre as doses de nitrogênio e o teor de nitrogênio na folha, a correlação entre o NDVI e os teores de N foliar e a correlação entre o N foliar e a produtividade.

As coletas de folhas para análise dos teores de nitrogênio foliar foram realizadas nos estádios V6, V10 e R1. Na Figura 19 estão apresentadas as regressões lineares obtidas entre as doses de nitrogênio e o teor de nitrogênio na folha. Para ambos os espaçamentos os melhores valores do R^2 foram obtidos em V10, mas para espaçamento de 0,80 m, um bom coeficiente de determinação foi obtido já em V6. Esse resultado pode levar a à conclusão de que analisando o teor de N na folha se permitiria uma recomendação de nitrogênio em estádios anteriores.

Figura 19 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio e o teor de nitrogênio foliar em três diferentes estádios de desenvolvimento, para os dois espaçamentos

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Ao analisar os gráficos de correlação entre o NDVI e os teores de N na folha (Figura 20), se observa que a mesma tendência se mantém, com bons resultados em V10 para ambos os espaçamentos e um resultado ainda melhor para espaçamento de 0,80 m em V6. Esses dados reforçam a idéia apresentada anteriormente, de utilizar o N foliar ao invés das correlações do NDVI com a produtividade de grãos.

Figura 20 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes doses de nitrogênio e o teor de nitrogênio foliar em três estádios de desenvolvimento e nos dois espaçamentos

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

Entretanto, quando se analisa os resultados de correlação entre o teor de N na folha e a produtividade de grãos apresentados na Figura 21, surge uma nova questão. Apesar das doses de nitrogênio apresentarem bons valores de R^2 com o N foliar, esses teores encontrados nas folhas não se refletem em produtividade. A biomassa de uma cultura é mais confiável como indicador dos níveis de nitrogênio que a concentração de clorofila (HEEGE et al., 2008). De acordo com

Hong et al. (2007) o clorofilômetro manual SPAD-502, da fabricante Konica Minolta, se correlaciona melhor com o teor de clorofila na folha e matéria seca, e sensores como o Crop Circle, que passa sobre a cultura e realiza várias medições, se correlacionam melhor com a biomassa. Altas correlações entre a leitura do clorofilômetro, teor foliar de nitrogênio e produtividade do milho já foram reportadas por Hurtado et al. (2009), mas os mesmo resultados não foram obtidos neste ensaio.

Malavolta et al. (1997) afirmam que para a cultura do milho, a coleta da folha oposta e abaixo da posição da espiga, na fase R1, como foi realizado neste ensaio, deveria ter um teor de 27,5 a 32,5 g kg⁻¹ de nitrogênio nas folhas para ser considerado um valor adequado e manter o potencial produtivo. Na Tabela 8 pode-se observar os valores médios de N foliar para cada dose de nitrogênio nos dois espaçamentos.

Tabela 8 – Teor de nitrogênio foliar obtido em R1

Doses de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	Teor de N foliar (g kg ⁻¹)	
	Espaçamento 0,40 m	Espaçamento 0,80 m
0	22,0	21,7
60	18,8	21,2
120	23,8	20,7
180	24,8	22,6
240	25,8	26,8

Seguindo os dados da literatura, nenhum dos tratamentos com dose de nitrogênio teria o teor de N foliar necessário para ser considerado como adequado. Portanto, estariam todos em deficiência. Os dois tratamentos que chegaram mais próximos dos valores adequados foram aqueles referentes às doses mais altas de nitrogênio, mas como veremos em seguida com os dados de produtividade de grãos, o potencial máximo de produtividade foi atingido com doses bem abaixo de 240 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

As Figuras 22 e 23 contêm os gráficos de correlação entre o NDVI obtido em sete estádios de desenvolvimento e a produtividade de grãos. Apesar das regressões entre as doses de nitrogênio e o NDVI apresentarem melhores resultados a partir de V6, as correlações entre o NDVI e produtividade para ambos os espaçamentos são bem consistentes desde o estádio V4. Porém, pelos motivos já mencionados em relação ao uso de população de plantas em taxa variável e a determinação do maior valor de índice de resposta, a coleta de dados de NDVI sendo realizada no estádio V7, parece ser uma boa alternativa para se obter ao mesmo tempo o índice de

resposta e fazer a estimativa de produtividade pelos modelos exponenciais obtidos nas Figuras 22 e 23.

Figura 21 – Gráficos de correlação entre o teor de nitrogênio foliar em três estádios de desenvolvimento e a produtividade nos dois espaçamentos

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

Figura 22 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes doses de nitrogênio e a produtividade no espaçamento de 0,40 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

Figura 23 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes doses de nitrogênio e a produtividade no espaçamento de 0,80 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

A Figura 24 apresenta os gráficos mostrando os dados finais de produtividade ($t\ ha^{-1}$), eficiência no uso do nitrogênio (NUE – *Nitrogen Use Efficiency*), saldo financeiro de cada tratamento ($R\$\ ha^{-1}$) e a diferença de saldo ($R\$\ ha^{-1}$) quando comparado com o que seria o padrão realizado hoje, com a aplicação em taxa fixa do nitrogênio na dose de $180\ kg\ ha^{-1}$.

Outra forma de analisar esses dados seria pela geração da curva de regressão entre as doses de nitrogênio e a produtividade, e depois calcular as doses de máxima eficiência técnica (DET) e as doses de máxima eficiência econômica (DEE). Entretanto, essa forma de análise é geralmente utilizada quando se pretende determinar uma dose ótima de N, enquanto que o foco deste trabalho é mostrar um possível ganho com a economia de fertilizantes nitrogenados sem redução do potencial produtivo.

Da maneira como foi analisado, os gráficos de produtividade mostram que para o espaçamento de 0,40 m houve uma resposta um pouco maior para as doses de nitrogênio ($IR = 1,082$ em V7 – Tabela 6), atingindo $12,45\ t\ ha^{-1}$ com $120\ kg\ ha^{-1}$ de nitrogênio, ou seja, neste caso a aplicação de $180\ kg\ ha^{-1}$ de N não teria nenhum acréscimo em produtividade, mesmo com uma economia de 33% do fertilizante nitrogenado. No espaçamento de 0,80 m o índice de resposta foi um ainda menor ($IR = 1,068$ em V7 – Tabela 6), com produtividade de $11,65\ t\ ha^{-1}$ com apenas $60\ kg\ ha^{-1}$ de N. Sem diferença estatística para o tratamento com dose de $180\ kg\ ha^{-1}$ e uma economia de 67% no uso do fertilizante.

No gráfico de eficiência no uso do nitrogênio (NUE), calculado pela fórmula de Fageria e Baliger (2005), os resultados mostram quantos quilos de grãos de milho são produzidos com um quilo de nitrogênio. Nesse caso, os resultados mostram como melhores tratamentos os mesmos obtidos pelos gráficos de produtividade, com $34\ kg\ kg^{-1}$ para o espaçamento de 0,40 m usando $120\ kg\ ha^{-1}$ de N contra $21\ kg\ kg^{-1}$ da referência e $48\ kg\ kg^{-1}$ para o espaçamento de 0,80 m usando $60\ kg\ ha^{-1}$ de N contra $18\ kg\ kg^{-1}$ da referência, ou seja, um aumento de 62% e 167% na eficiência no uso do nitrogênio para os espaçamentos de 0,40 e 0,80 m, respectivamente. Analisando o saldo financeiro também confirmar o aumento na lucratividade, com um saldo positivo de $R\$ 168,00\ ha^{-1}$ e $R\$ 150,00\ ha^{-1}$, respectivamente, para os espaçamentos 0,40 e 0,80 m em relação à referência.

Figura 24 – Resultados de produtividade, eficiência no uso do nitrogênio (NUE), saldo financeiro e diferença de saldo comparado ao tratamento padrão (180 kg N ha⁻¹) nas diferentes doses de nitrogênio para os dois espaçamentos

Letras diferentes, os tratamentos diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%.

4.2 Experimento 2 – Safra 2009/2010

Para o segundo ensaio (safra 2009/2010) foram deixados de lado a questão da população de plantas e do uso de fungicidas, mas foi adicionada a variável irrigação. Existem trabalhos que citam a diferença de resposta ao nitrogênio em condições onde se tem água disponível e em locais com deficiência hídrica. Segundo França (2003) conjuntamente com a água, o nitrogênio desempenha um papel fundamental na fotossíntese, portanto, se um dos fatores for limitante, as plantas enfrentam o dilema de ser eficiente no uso da água ou ser eficiente no uso do nitrogênio. Field et al. (1983) comentam que se a água é mais importante para a planta naquele momento, ela pode reduzir sua eficiência no uso do N, mas se a necessidade de N passa a ser mais importante, a planta pode reduzir sua eficiência no uso da água para manter a eficiência no uso do nitrogênio.

A deficiência hídrica reduz o teor de clorofila total em folhas de milho, e considerando a mesma condição hídrica, maiores teores de clorofila são maiores de acordo com a disponibilidade de nitrogênio. E o aumento no teor de clorofila na folha proporciona maiores taxas de fotossíntese, que é dependente da disponibilidade de água e nitrogênio (FRANÇA, 2003). Ou seja, quanto melhor a planta, mais ela necessita de água e nitrogênio. Talvez mais um conceito equivocado, onde se aplica mais nitrogênio onde a cultura está mais fraca. Dúvida que facilmente pode ser eliminada utilizando a faixa de referência, e será discutido mais adiante.

De acordo com Jorgensen et al. (2007) a interpretação de dados de um sensor óptico sobre os teores de nitrogênio na planta aparentemente se confundiram com sintomas de estresse hídrico nas áreas mais secas. Rodriguez et al. (2005) notaram que a maior parte da variabilidade da cultura do trigo foi relacionada ao fornecimento de água pelo solo, utilizando imagens termais. Na ausência de outros fatores limitantes, o desenvolvimento da cultura do milho varia em função da disponibilidade de nitrogênio e água (STRACHAN, et al., 2002). Infelizmente nos dois ensaios onde houve a tentativa de avaliar a disponibilidade hídrica e sua interação com o nitrogênio, a água não foi um fator limitante.

Antes de implementar um programa de recomendação de nitrogênio com base em sensores, é necessário determinar as interações entre a água e o nitrogênio e seus efeitos na refletância das culturas, na produtividade e nas doses de nitrogênio geradas. Pois a refletância também pode ser afetada pelo estresse hídrico (CLAY et al., 2006).

4.2.1 Irrigação e espaçamento

O coeficiente de variação do experimento foi de 5,30%. Como nova variável seria adicionada a irrigação, entretanto, como observado pelos dados climáticos não foi necessário aplicar nenhuma lâmina de água. Portanto, os tratamentos foram analisados em conjunto, aumentando de 6 para 12 repetições. Os dados de produtividade dos tratamentos com espaçamento 0,40 m foram mais uma vez superiores, com 1,54% a mais que o espaçamento de 0,80 m.

Figura 25 – Dados de produtividade para espaçamento entre fileiras
(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

4.2.2 Doses de nitrogênio

A quantidade de leituras foi reduzida para apenas três estádios, V1, V7 e V10. A Figura 26 mostra os gráficos de regressão linear e quadrática para as doses de nitrogênio e o NDVI coletado nos diferentes estádios, para ambos os espaçamentos.

No primeiro ensaio não havia uma coleta de dados em V1, mas não foi encontrada uma regressão significativa para nenhum dos dois ensaios. Outra peculiaridade deste ensaio, além da quantidade excessiva de chuva, é que com base na análise de solo, e com os resultados do ensaio anterior, optou-se por reduzir as doses de nitrogênio. Ao invés de incrementar em 60 kg N ha⁻¹ cada tratamento, utilizou-se 40 kg N ha⁻¹, reduzindo assim a dose máxima de 240 kg ha⁻¹ para 160 kg ha⁻¹, afim de verificar se o NDVI obtido com o sensor poderia diferenciar menores intervalos de doses de nitrogênio.

Figura 26 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio e o NDVI em três diferentes estádios de desenvolvimento, para os dois espaçamentos entre fileiras

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Neste caso, o único estádio com um bom coeficiente de determinação foi V7, com um R² de 0,58 e 0,62 para os espaçamentos de 0,40 e 0,80 m, respectivamente. Fazendo o mesmo cálculo do índice de resposta em V7 com os dados de NDVI, comparou-se o NDVI no tratamento 160 kg ha⁻¹ como sendo a faixa de referência com o tratamento de 40 kg ha⁻¹ como sendo a dose de N na base. Os resultados foram um IR = 1,074 para o espaçamento de 0,40 m e 1,076 para o espaçamento de 0,80 m. Nota-se que o IR calculado com os valores de NDVI no mesmo estádio do ensaio anterior, foram semelhantes (IR_{0,40} = 1,082 e IR_{0,80} = 1,068), porém, a resposta da cultura à adubação nitrogenada foi diferente, com o tratamento sem aplicação de nitrogênio

atingindo produtividade de 11,03 e 11,07 t ha⁻¹, respectivamente, nos espaçamentos de 0,40 m e 0,80 m.

Esse resultado gera outra questão, em que dois anos com índices de resposta semelhantes, mostraram potenciais produtivos diferentes para o tratamento sem nitrogênio. Uma das prováveis causas foi o excesso de precipitação, que inclusive pode ter causado lixiviação do fertilizante aplicado. Em anos com maior regime de chuva o fator mais limitante ao potencial produtivo são os teores de NO₃ em profundidade, por causa de lixiviação e desnitrificação por excesso de água (MACHADO et al., 2002).

A Figura 27 mostra o gráfico de correlação exponencial entre o NDVI e a produtividade de grãos. Ao contrário do ensaio anterior, o R² não foi significativo, pois a variação em ambos os fatores avaliados foi muito baixa. Ou seja, a diferença entre a maior e a menor dose de N para o NDVI e a produtividade foi muito pequena.

Embora em termos de aproveitamento do ensaio para a geração de um modelo de recomendação de nitrogênio utilizando o sensor, o resultado não seja ideal, ele reforça a ideia de que a resposta ao nitrogênio varia bruscamente de um ano para outro em uma mesma região e com as mesmas condições de solo.

Figura 27 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes doses de nitrogênio e a produtividade nos dois espaçamentos entre fileiras
(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

A Figura 28 apresenta os gráficos com os dados finais de produtividade (t ha⁻¹), eficiência no uso do nitrogênio (NUE), saldo financeiro de cada tratamento (R\$ ha⁻¹) e a diferença de saldo (R\$ ha⁻¹). Entretanto, como as doses de nitrogênio foram reduzidas, a dose que mais se aproxima do padrão e foi utilizada como referência para os cálculos de saldo financeiro, foi o tratamento com 160 kg N ha⁻¹.

Mais uma vez não seria necessário aplicar a dose mais alta de N para se manter o potencial produtivo. Para este ensaio, no espaçamento de 0,40 m, 80 kg N ha⁻¹ já seriam suficientes, enquanto que para o espaçamento de 0,80 m, assim como no ensaio anterior, a menor dose já seria suficiente, com apenas 40 kg N ha⁻¹.

Seguindo com os resultados, neste ensaio ocorreu o mesmo que no ensaio anterior, em que o espaçamento de 0,40 m apresentou uma resposta ligeiramente superior ao nitrogênio, entretanto, o índice de resposta dos dois espaçamentos foi semelhante ($IR_{0,40} = 1,074$ e $IR_{0,80} = 1,076$). A economia de nitrogênio foi mais uma vez alta, com 50% para o espaçamento de 0,40 m e 75% para o espaçamento de 0,80 m.

O gráfico com a eficiência no uso do nitrogênio (NUE), também mostra como melhores tratamentos os mesmos obtidos pelos gráficos de produtividade, com 14 kg kg⁻¹ para o espaçamento de 0,40 m usando 80 kg N ha⁻¹ contra 8 kg kg⁻¹ da referência e 15 kg kg⁻¹ para o espaçamento de 0,80 m usando 40 kg N ha⁻¹ contra 6 kg kg⁻¹ da referência. Ou seja, um aumento de 75% e 150% na eficiência no uso do nitrogênio para os espaçamentos de 0,40 e 0,80 m, respectivamente. Os valores de eficiência foram inferiores a aqueles obtidos no ensaio anterior devido ao fato da baixa resposta à adubação nitrogenada e à elevada produtividade do tratamento sem nitrogênio.

Quanto maior a produtividade de grãos da testemunha, menor é o ganho em produtividade com a aplicação de nitrogênio. E quanto maior a produtividade em um solo sem a aplicação de nitrogênio, em geral, menor será a dose necessária para atingir a produtividade máxima (MULLEN et al., 2003). Hurtado et al. (2009) encontraram produtividade máxima de grãos de 9,2 t ha⁻¹ com 242 kg N ha⁻¹ e baixa resposta ao nutriente devido a baixa produtividade no tratamento sem nitrogênio, com 7,11 t ha⁻¹, indicando que o solo possuía um bom estoque natural de N e que as condições edafoclimáticas foram propícias à mineralização.

Com relação ao saldo financeiro, foi positivo para ambos os espaçamentos, com R\$ 127,00 ha⁻¹ e R\$ 110,00 ha⁻¹, respectivamente, para os espaçamentos 0,40 e 0,80 m em relação à referência.

Figura 28 – Resultados de produtividade, eficiência no uso do nitrogênio (NUE), saldo financeiro e diferença de saldo comparado ao tratamento padrão (160 kg ha⁻¹ de N) nas diferentes doses de nitrogênio para os dois espaçamentos

Letras diferentes, os tratamentos diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%.

4.3 Experimento 3 – Safra 2010/2011

No terceiro ensaio (safra 2010/2011), por não ter sido possível avaliar a variável água no ensaio anterior, optou-se por tentar mais uma vez. Uma característica desse ensaio é que a gleba 21C onde foi instalado era parte de uma área de pastagem. Esse ensaio foi o primeiro realizado nessa gleba, tendo em vista que foi incorporada ao CDE há apenas dois anos. Com isso, seus teor de matéria orgânica na camada superficial (0 a 0,2 m) é considerada baixa, de apenas 13 g dm^{-3} , o que deu indícios de que a cultura do milho poderia apresentar uma maior resposta ao nitrogênio. Outros tratamentos, adicionados com as doses de nitrogênio, e distribuídos nos mesmos blocos, foram épocas de aplicação das doses de nitrogênio em cobertura.

4.3.1 Irrigação e espaçamento

O coeficiente de variação do experimento foi de 7,38%. Como no ensaio anterior, houve a tentativa de adicionar a variável irrigação, entretanto, mesmo com os dados de precipitação um pouco abaixo da média histórica, os dados coletados pelos tensiômetros não indicaram nenhum momento crítico em que fosse necessária a aplicação de uma lâmina de água. Apenas em um momento seria aplicada a irrigação, mas houve uma precipitação no dia seguinte. Portanto, mais uma vez os tratamentos foram analisados em conjunto, aumentando de seis para 12 repetições. Os dados de produtividade dos tratamentos com espaçamento 0,80 m foram superiores aos tratamentos com 0,40 m, ao contrário dos dois ensaios anteriores, com 6,32% a mais em produtividade, e diferente estatisticamente.

Figura 29 – Dados de produtividade para espaçamento entre fileiras

Letras diferentes, os tratamentos diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%.

4.3.2 Doses de nitrogênio

Como o ensaio contemplou outros tratamentos adicionais, os mesmo estádios de desenvolvimentos foram utilizados para as coletas dos dados de NDVI, que foram em V2, V4, V6, V8 e V10. As Figuras 30 e 31 mostram os gráficos de regressão entre as doses de nitrogênio aplicadas e o NDVI obtido em cinco estádios diferentes, para ambos os espaçamentos. Os valores de R^2 são altos a partir de V6, mas são melhores em V8 e V10. Portanto, mantém-se a tendência dos outros ensaios onde os melhores estádios para coleta do NDVI seria em V7/V8.

Calculando o índice de resposta em V8 com os dados de NDVI, comparou-se o NDVI no tratamento 180 kg N ha^{-1} como sendo a faixa de referência com o tratamento de 60 kg N ha^{-1} como sendo a dose de N na base. Os resultados foram surpreendentes, pois foram encontrados valores de IR mais baixos do que nos dois ensaios anteriores, mesmo com uma resposta muito maior em produtividade, com $IR_{0,40} = 1,029$ e $IR_{0,80} = 1,014$. Nesse caso, o tratamento sem aplicação de nitrogênio atingiu produtividades de apenas $3,36$ e $3,22 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente, nos espaçamentos de $0,40 \text{ m}$ e $0,80 \text{ m}$.

Figura 30 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio e o NDVI em cinco diferentes estádios de desenvolvimento, para o espaçamento de 0,40 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Figura 31 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio e o NDVI em cinco diferentes estádios de desenvolvimento, para o espaçamento de 0,80 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

As Figuras 32 e 33 mostram as regressões exponenciais entre o NDVI coletado nos cinco estádios de desenvolvimento e produtividade de grãos para os dois espaçamentos. Ao contrário do que foi observado no ensaio anterior, nos estádios de V8 e V10 para ambos os espaçamentos,

os coeficientes de determinação ficaram acima de 85%, apresentando indícios que os dados poriam ser utilizados para gerar um modelo de recomendação de nitrogênio.

Figura 32 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes doses de nitrogênio e a produtividade no espaçamento de 0,40 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

Figura 33 – Gráficos de correlação entre o NDVI obtido nos tratamentos com diferentes doses de nitrogênio e a produtividade no espaçamento de 0,80 m

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

A Figura 34 apresenta os resultados de produtividade (t ha⁻¹), eficiência no uso do nitrogênio (NUE), saldo financeiro de cada tratamento (R\$ ha⁻¹) e a diferença de saldo (R\$ ha⁻¹). Seguindo as mesmas doses de nitrogênio do primeiro ensaio, os tratamentos foram comparados com o padrão de 180 kg N ha⁻¹.

Comparado aos outros dois ensaios, esse foi o que apresentou maior resposta em produtividade com a aplicação do nitrogênio, onde se observa nitidamente que a dose padrão de 180 kg N ha^{-1} mostrou produtividades mais baixas que na dose de 240 kg ha^{-1} . Entretanto, a recomendação fica confusa, pois analisando apenas pelo índice de resposta, que foi o mais baixo dos três ensaios, se utilizado sozinho, poderia levar à recomendação de uma sub-dose, reduzindo assim o potencial máximo de produção. Tubaña et al. (2008) também encontraram uma diferença de 0,74 entre o índice de resposta estimado pelo NDVI ($RI_{\text{NDVI}} = 1,34$) e o índice de resposta observado pelos dados de produtividade ($RI_{\text{Produtividade}} = 2,08$). Que foi calculado dividindo os dados de produtividade dos mesmos tratamentos utilizados para calcular o índice de resposta do NDVI. Mullen et al. (2003) explicaram que após a coleta do NDVI, fatores podem aumentar ou diminuir o potencial produtivo, o que leva a um erro entre o estimado e o observado. Também encontraram valores bem próximos entre os dois índices de resposta em anos diferentes, pois a ausência de mudanças drásticas nas condições de desenvolvimento resultou em pouca ou nenhuma alteração na resposta da cultura ao nitrogênio entre a época de coleta do NDVI e a colheita.

Os resultados mostram, portanto, uma situação completamente diferente do que a observada com os ensaios anteriores. Primeiramente não houve economia de nitrogênio, pelo contrário, a dose deveria ser superior ao padrão utilizado hoje. Mesmo utilizando uma dose mais alta como referência, essa resposta não teria sido identificada. Aqui entra o fato da saturação do NDVI, já observada por Povh et al. (2008) em milho, com o uso do sensor GreenSeeker. A principal desvantagem do NDVI é a relação não linear com características biofísicas como biomassa e índice de área foliar (MYNENI et al., 1995). Geralmente o NDVI atinge a saturação em condições de média a alta quantidade de biomassa e para certos índices de área foliar (GITELSON et al., 2002). Myneni et al. (1997) mostram um gráfico com a saturação do NDVI de acordo com o aumento do IAF de diferentes culturas.

Mesmo com aumento de produtividade nas doses mais elevadas, os gráficos de regressão das doses de N com o NDVI praticamente não diferenciam as doses maiores que 120 kg ha^{-1} . Esse acontecimento não se destacou nos ensaios anteriores, talvez pelo fato de que nenhum tratamento até então havia respondido em produtividade a doses superiores a 120 kg ha^{-1} . E mesmo analisando as regressões exponenciais, apesar dos altos valores de R^2 , quando se observa na extremidade da linha de tendência dos gráficos, o mesmo valor de NDVI pode assumir valores

bem distintos de produtividade, e um pequeno número de pontos se distancia dos demais, que estão representando as doses mais baixas.

O gráfico com a (NUE) se mostrou inverso aos resultados anteriores; apesar de valores mais elevados, a dose com a maior produtividade não é a dose com melhor eficiência. Como comentado anteriormente, quanto maior a produtividade da testemunha, menor o ganho em produtividade com a aplicação do nitrogênio. Nesse caso, a diferença da testemunha para a dose de 60 kg ha^{-1} , considerando os dois espaçamentos, o salto em produtividade é de pelo menos $4,78 \text{ t ha}^{-1}$. E por ter uma distribuição quadrática, esse efeito diminui com o aumento da dose de nitrogênio, e consequentemente a eficiência no uso nitrogênio também diminui.

Mesmo assim, o NUE utilizando a dose de 240 kg ha^{-1} foi superior ou muito próximos do NUE do primeiro ensaio onde houve uma grande economia de nitrogênio, onde para espaçamento de $0,40 \text{ m}$ o NUE passou de 34 kg kg^{-1} (Ensaio 1) para 42 kg kg^{-1} (Ensaio 3) e para o espaçamento de $0,80 \text{ m}$ se manteve quase o mesmo, de 48 kg kg^{-1} (Ensaio 1) para 46 kg kg^{-1} (Ensaio 3). E neste ensaio deve-se levar em consideração o saldo financeiro, em que, mesmo reduzindo o NUE, a dose de 240 kg ha^{-1} apresentou uma diferença de R\$ 288,00 ha^{-1} e R\$ 166,00 ha^{-1} , respectivamente, para os espaçamentos $0,40$ e $0,80 \text{ m}$ em relação à referência.

Figura 34 – Resultados de produtividade, eficiência no uso do nitrogênio (NUE), saldo financeiro e diferença de saldo comparado ao tratamento padrão (180 kg ha⁻¹ de N) nas diferentes doses de nitrogênio para os dois espaçamentos entre fileiras. Letras diferentes, os tratamentos diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%.

4.3.2 Épocas de aplicação do nitrogênio

Uma preocupação que surge quando o objetivo é utilizar sensores ópticos para a aplicação de nitrogênio, principalmente quando os dados indicam que o melhor estágio para a coleta dos dados está entre V7 e V8, é se o nitrogênio aplicado na base é suficiente para manter a cultura sem que esta apresente sintomas de deficiência. Segundo Zhang et al. (2008) a maioria dos engenheiros agrônomos concordaria que não é apropriado concluir que uma planta de milho apresentando sintomas de deficiência irá sempre se beneficiar do nitrogênio aplicado depois que os sintomas foram detectados. Embora a aplicação de nitrogênio após a detecção da deficiência tenha aumentado a produtividade, essas aplicações não conseguem corrigir os efeitos da deficiência do nutriente, quando já houve uma restrição severa ao desenvolvimento vegetativo por longos períodos de tempo. Visando testar essa hipótese, o melhor dos três ensaios é o terceiro, onde não houve precipitação em excesso e o teor de matéria orgânica é o mais baixo.

Portanto, os tratamentos adicionais foram a aplicação de 120 kg ha^{-1} de nitrogênio em cobertura, sendo que todos eles possuíam 60 kg N ha^{-1} na base, aplicados logo após a semeadura. Os estádios de aplicação do nitrogênio em cobertura foram V2, V4, V6, V8 e V10, e a Figura 35 apresenta os resultados de produtividade de grãos.

Figura 35 – Resultados de produtividade em relação às diferentes populações de plantas para os dois espaçamentos entre fileiras

(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste Tukey com nível de significância de 5%.

Mesmo adotando uma situação de risco, com baixos teores de matéria orgânica no solo, que por consequência tem uma baixa capacidade de disponibilização de nitrogênio para a cultura do milho, ao utilizar 60 kg N ha^{-1} na base, não houve diferença estatística entre os tratamentos,

analisando pelo teste de Tukey com 5% de significância. Ou seja, realizando a aplicação de cobertura entre V2 e V10, a produtividade de grãos foi a mesma.

Menos de 20% do nitrogênio total é absorvido antes de V8 (SCHEPERS et al., 1995). Nas primeiras três semanas após a emergência, o milho absorve até 0,5 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹ (SCHRÖDER et al., 2000). E nos próximos 75 dias absorve em torno de 3,7 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹ (ANDRADE et al., 1996) com picos de até 6 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹ (Solari, 2006). A absorção de N é afetada pelo clima, época de semeadura e época de aplicação do nitrogênio, mas geralmente é maior entre V8 e R1 (RUSSELE et al., 1983). Melchiori et al. (2007) afirmam que é possível ampliar a janela de aplicação de nitrogênio em milho de maneira considerável.

Esse aumento representa uma grande vantagem agrônômica, pois se aumenta a capacidade de intervenção sobre a cultura em estádios muito mais próximos ao período crítico para a determinação da produtividade, diminuindo o risco da tomada de decisão sobre a recomendação, sendo possível aplicar o nitrogênio entre os estádios V8 a V14 com resultados semelhantes às doses aplicadas na semeadura. Entretanto a partir de V12 encontrou problemas de saturação do NDVI (SOLARI, 2006).

4.4 Discussões gerais

No manejo tradicional, quando o nitrogênio é aplicado em doses uniformes em áreas com variabilidade espacial, o resultado típico são áreas com doses acima ou abaixo do ideal. Entretanto, o custo do nitrogênio é relativamente mais barato do que uma possível perda de potencial produtivo devido a deficiência de nitrogênio. Por exemplo, considerando o custo no nitrogênio como R\$ 1,76 kg⁻¹, para uma dose de R\$ 180 kg ha⁻¹, o total gasto é de R\$ 316,80 ha⁻¹, que representa 950 kg de grãos de milho por hectare se o preço de venda for R\$ 20,00 saca⁻¹. Que representa uma quantidade facilmente perdida quando se erra a recomendação de nitrogênio. E ao contrário do que às vezes se observa em trigo, o milho é menos afetado com redução de produtividade quando se utiliza uma dosagem acima do ideal. Portanto, os agricultores tendem a aplicar nitrogênio em doses em que a maior parte do talhão recebe a quantidade adequada ou acima do ideal.

A produtividade esperada, muitas vezes utilizada para recomendação de fertilizantes nitrogenados, é a produtividade por hectare que se espera produzir. Mas o que se espera produzir

e o que realmente será produzido são distintos. Raun et al. (2001) exemplifica que a North Dakota State University recomenda utilizar a máxima produtividade dos últimos cinco anos como produtividade esperada, pois geralmente é em torno de 30% maior que a média. A produtividade esperada também pode ser feita adicionando 5 a 10% à média de produtividade dos últimos 5 a 7 anos (RICE et al., 1994). Um exemplo de recomendação para milho é usar 24,9 kg de nitrogênio por tonelada de grãos esperada. Entretanto, as práticas de manejo e o clima têm muita influência na produtividade. O clima pode variar significativamente de um ano para outro, o que pode causar grandes diferenças no potencial produtivo (SOLARI, 2006).

A eficiência no uso do nitrogênio em nível mundial é estimada em 33% (RAUN; JOHNSON, 1999). Um aumento de 20% nessa eficiência resultaria em economias de US\$ 4,7 bilhões. E a melhor maneira de economizar nitrogênio é encontrar formas mais eficientes de uso do nutriente (SMIL, 1997). Ping et al. (2008) mostraram que a aplicação em taxa variável de nitrogênio em cereais tem mostrado um aumento na eficiência do uso de nitrogênio quando comparado à aplicação em taxa fixa, e uma redução de 10 a 20% na dose aplicada, mas com pequenos ganhos financeiros e ambientais, considerando os custos extras e a complexidade do manejo envolvido. Segundo Isik e Khanna (2002) as áreas com maior potencial para se beneficiar da aplicação de N em taxa variável são aquelas com baixo potencial produtivo, alta variabilidade espacial e boa resposta ao nitrogênio. Scharf et al. (2002) reportou que o EONR (*Economically Optimum Nitrogen Rate*) para milho variou de 55 a 220 kg N ha⁻¹ em uma mesma gleba.

Quando o nitrogênio é aplicado em doses acima do necessário para atingir o máximo potencial produtivo, o carbono orgânico do solo tende a aumentar no longo prazo (RAUN et al., 1998a), mas o NUE diminui. Aumentar o carbono orgânico do solo com altas doses de nitrogênio poderia ajudar com o sequestro de carbono, que se acredita ser responsável pelo aquecimento global (SMIT et al., 1988), mas a perda do nutriente via desnitrificação também aumentariam.

De acordo com Bartholomeu et al. (1965), para sistemas de produção com clima e vegetação constantes, o conteúdo de N no solo é dependente das propriedades texturais deste solo. Solos argilosos geralmente apresentam teores mais altos de nitrogênio do que solos arenosos, e a retenção desse nutriente no solo também é afetada pelo tipo de argila presente. Além da textura, tem-se a influência da matéria orgânica, pois no solo é a principal fonte de N, e assim, segundo Ceretta (2000), a dinâmica do N está intimamente associada à dinâmica da matéria orgânica. Portanto, ignorar a variabilidade do solo pode resultar em aplicações de

fertilizantes nitrogenados onde o nitrogênio não é o fator limitante, reduzindo a eficiência no uso do nitrogênio e aumento o risco ambiental (INMAN et al., 2007).

Russele et al. (1983) mostraram que o N absorvido pela cultura do milho pode ser melhor quando a dose é parcelada quando comparada a uma única dose no dia da semeadura. As melhores produtividades foram obtidas quando o N foi aplicado de V8 a V16 quando comparado à aplicações em V4. Em alguns casos o N poderia ser aplicado até em VT ou R1. Tais resultados comprovam a possibilidade de uso dos sensores em estádios mais avançados para a recomendação do nitrogênio.

Pensando no uso de sensores, vários autores encontraram boas correlações em estádios mais tardios. Teal et al. (2006) encontraram melhores correlações entre o NDVI e a produtividade entre V7 e V9. Clay et al. (2006) mostraram que a recomendação de N baseada em coleta de NDVI nos estádios V8 a V9 foram mais acuradas que modelos baseados apenas na produtividade. Além disso, ao utilizar os sensores se tem o benefício de quantitativamente identificar a variabilidade espacial da cultura (MARTIN et al., 2007). Em estádios iniciais de desenvolvimento (V3 a V5), tanto a produtividade quanto a biomassa tiveram baixa correlação com o NDVI ($R^2 < 0,12$), mas esta aumentou em V6 e V7 ($R^2 = 0,29$) e atingiu valores máximos entre V8 e V12 ($0,55 < R^2 < 0,66$) (MARTIN et al., 2007). Os autores sugerem que o estádio de V8 provavelmente é o mais apropriado para avaliar o potencial produtivo na cultura do milho.

Segundo Inman et al. (2007) o NDVI coletado pelo sensor GreenSeeker (*Red Sensor* – utiliza do comprimento de onda de 670 nm) nos estádio V6 a V8 mostraram uma relação significativa com a produtividade e concluem que o sensor tem potencial para estimar a produtividade. Teal et al. (2006) encontraram resultados semelhantes para o NDVI e a produtividade com o sensor GreenSeeker em V8 com R^2 de 0,77. Martin et al. (2007) mostraram que o coeficiente de variação calculado a partir dos valores de NDVI teve boas correlações com a produtividade e biomassa desde V3 a VT. Freeman et al. (2007) encontraram que o NDVI coletado entre V8 e V10 e utilizado em conjunto com a altura das plantas pode estimar a produção de biomassa e nitrogênio extraído, e que com essas informações seria possível gerar recomendações de nitrogênio em taxa variável. Os resultados de Thomason et al. (2007) são que o NDVI coletado entre V5 e V9 teve R^2 de 0,81 com biomassa e 0,90 com o IAF.

De acordo com Shaver et al. (2010) as variáveis como condições de vento e espaçamento entre fileiras podem afetar as leituras de NDVI. Os sensores GreenSeeker e Crop Circle foram

capazes de diferenciar aplicações de N e espaçamento entre fileiras em V8, V10 e V12. Os melhores coeficientes de determinação entre as doses de N e o NDVI foram obtidos em V10 e V12 para ambos os sensores e em todos os espaçamentos. Em V8 os valores de R^2 foram menores que em V10 e V12, com R^2 de 0,60, 0,86 e 0,88 para o sensor Crop Circle, e nos estádios V8, V10 e V12 foram 0,39, 0,85 e 0,82 para o sensor GreenSeeker. As doses de N e os estádios de desenvolvimento do milho afetaram os dois sensores, com o NDVI aumentando com as doses de N e o avanço de desenvolvimento da cultura. Os dados obtidos com o sensor Crop Circle não foram afetados pelo espaçamento entre fileiras em V10 e V12, mantendo o R^2 acima de 0,80. Mas para o estádio V8 os valores de R^2 foram menores para ambos os sensores, entretanto os dados obtidos com o sensor Crop Circle, mesmo em V8, apresentaram altos valores de R^2 .

Para Kappes et al. (2009) a aplicação de nitrogênio em V10 proporcionou maior produtividade de grãos quando comparado com as aplicações em estádios anteriores. A detecção da deficiência de N em estádio mais avançados pode permitir o ajuste da dose de N de acordo com o desenvolvimento da cultura, reduzindo a potencial perda por lixiviação ou desnitrificação (JOHNSON; RAUN, 2003). Quando a cultura começa a fechar em V6, as folhas de plantas maiores cobrem as folhas das plantas menores, cobrindo as entrelinhas. Nessa fase duas coisas acontecem. Primeiro, a presença de solo exposto diminui e a quantidade de massa verde aumenta, e como consequência o NDVI também aumenta. Em segundo, a capacidade de detectar diferenças entre plantas diminui, e a possibilidade de detectar a variabilidade entre plantas desaparece (RAUN et al., 2005).

Encontrar correlações significativas entre algum índice de vegetação e a produtividade, ou detectar deficiências de nitrogênio em V10 ou V12, não é tão importante como encontrar as mesmas correlações em V6. No Brasil ainda não é muito comum o uso de aplicadores de fertilizantes auto-propelidos, que permitiriam a aplicação mais tardia, portanto, após V6 o agricultor tem pouco tempo disponível até atingir o limite de altura permitido para o tráfego do trator.

Segundo Hatfield et al. (2000) existem três tipos de variabilidade: natural (solo e relevo); aleatória (precipitação, temperatura e radiação) e manejo (aplicação de corretivos e fertilizantes, semeadura, população de plantas, etc.). As maiores causas para a baixa eficiência no uso do nitrogênio são: baixa sincronia entre o fornecimento de nitrogênio pelo solo e a demanda da

cultura; aplicações uniformes de nitrogênio em áreas espacialmente variáveis com necessidades de nitrogênio variáveis; falha na consideração da variabilidade temporal e climática. É necessária a avaliação dos resultados em uma maior quantidade de solos, clima e condições geográficas para desenvolver algoritmos que traduzam as leituras do sensor em recomendações apropriadas de nitrogênio (SOLARI et al., 2008).

Clima, solo e manejo afetam a resposta da cultura ao nitrogênio, e por causa disso a dose ótima varia tanto espacialmente quanto de um ano para outro (MAMO et al., 2003; SCHARF et al., 2005; SCHIMIDT et al., 2007). Devido ao fato que as mensurações são mais confiáveis após V6, e que as leituras são afetadas por vários outros fatores além do nitrogênio, o potencial de produção do milho é determinado pela radiação solar, temperatura, umidade e fornecimento de nutrientes durante o enchimento de grãos, bem depois que todo o nitrogênio já foi aplicado (YANG et al., 2006).

Os sensores ópticos não levam em consideração a produtividade potencial. A luz refletida por uma cultura em uma zona de alta produtividade pode apresentar um teor adequado de nitrogênio no momento da aplicação, mas ainda pode faltar nitrogênio antes da maturação. Em uma área de produtividade mais baixa, a luz refletida pode sugerir uma necessidade maior do nutriente, e aplicar uma dose acima do que seria realmente necessário para atingir o seu potencial, às vezes limitado por outros fatores (LOWENBERG-DEBOER, 2004). Tais fatos se justificam porque as culturas integram os efeitos acumulativos tanto do clima quanto das práticas culturais durante a safra. Geralmente plantas com mais nitrogênio disponível tem maiores concentrações de N nas folhas, mais clorofila e maiores taxas fotossintéticas.

A disponibilidade de N no solo varia significativamente considerando áreas de 1 m², assim como a absorção de N e disponibilidade, a lixiviação também tem se mostrado altamente variável (RAUN et al., 1998b). Uma forma mais completa de se estimar a demanda de N seria utilizar várias ferramentas como sensores de solo e planta, que poderiam ao mesmo tempo analisar o fornecimento de N pelo solo e os teores de N na planta em tempo real, e fazer recomendações espacialmente variáveis com base na necessidade real da cultura (SOLARI, 2006).

Inman et al. (2007) analisando duas áreas diferentes também encontraram grandes diferenças entre elas, uma área com produtividade <12 t ha⁻¹, e outra com produtividades >17 t ha⁻¹. Sugeriram levar em consideração condições climáticas entre a data de semeadura e a coleta dos dados, o que poderia levar a uma melhor relação entre o INSEY e a produtividade, porque

essa relação entre a produtividade e o INSEY varia entre áreas e entre anos diferentes. E mesmo quando se junta coletas de dados de diferentes áreas ou anos, com moderada correlação, os resultados sugerem que qualquer modelo desenvolvido por agrupamento de experimentos podem não ser muito confiáveis devido às suas diferenças. Estas diferenças são um dos principais problemas ao se desenvolver um modelo para ser amplamente utilizado para estimar a produtividade utilizando sensores ópticos.

Os mesmos autores ressaltaram que os sensores ópticos têm potencial para estimar o potencial produtivo em milho, entretanto ainda há muito espaço para evoluir. Outros pesquisadores já conseguiram melhorar a eficiência no uso do nitrogênio em trigo com sucesso. Uma opção seria integrar a diagnose da necessidade de N e recomendação em modelos simples, o que poderia ser muito útil para aumentar a eficiência no uso de nitrogênio e como consequência, maior rentabilidade da cultura (GREGORET et al., 2011). Liu et al. (2006) incluíram as variáveis que afetam a disponibilidade de N como a matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica (CTC), e variáveis que estão relacionadas à demanda de N pela cultura, como a radiação solar. Além dessas variáveis, a variabilidade da distribuição de chuvas e a água armazenada no solo na época de semeadura podem alterar a produtividade e consequentemente decisões de manejo. Em certas condições, a quantidade de água disponível na semeadura pode, por vezes, ser mais importante que a precipitação durante o ciclo da cultura para determinar a produtividade (MOELLER et al., 2009).

O nitrogênio no solo varia espacialmente com os teores de argila e matéria orgânica (PIERCE; NOWAK, 1999). Mamo et al. (2003) comentam sobre a interação entre a resposta de nitrogênio e umidade do solo, que também tem uma relação com o teor de argila. Shahandeh et al. (2011) encontraram dificuldade em associar as produtividades com as condições de solo e mostrar o benefício da aplicação em taxa variável de nitrogênio em relação à aplicação em taxa fixa ao longo dos anos. O nitrogênio tem uma dinâmica espacial e temporal e sua disponibilidade para as plantas depende de muitos fatores. Previsão de precipitações ao longo da safra, junto com a avaliação de NO_3 residual, argila e outros fatores podem ser utilizados para recomendar o N em taxa variável. Mas segundo Maine et al. (2009) a taxa variável é modestamente mais lucrativa que a aplicação uniforme, mas os benefícios da taxa variável variam amplamente de ano para ano. Em alguns anos a aplicação uniforme de N é mais lucrativa.

A biomassa estimada pelo NDVI a partir de um sensor óptico, necessita de precauções antes de aplicar esta metodologia para estimar doses de nitrogênio. O potencial produtivo (YP_0) é definido como o potencial possível de ser atingido sem a aplicação de fertilizantes (RAUN et al., 2002). Já é conhecido que o potencial produtivo pode variar de um ano para outro por causa da variabilidade temporal, como a temperatura, precipitação, umidade, entre outros, causando variações consideráveis entre anos diferentes. Consequentemente, o potencial produtivo é específico para cada safra. E mesmo que a metodologia do YP_0 resulte em uma boa estimativa da produtividade nas áreas sem adição de nitrogênio, a diferença no valor do índice de resposta calculado com NDVI e a produtividade, ainda pode levar a um erro na recomendação de nitrogênio, gerando doses abaixo ou acima da dose que seria considerada ótima. A metodologia do INSEY, que é uma estimativa da biomassa produzida por dia, funciona bem em determinadas situações, entretanto, precisa ser mais robusta e ser acompanhada por modelos de previsão de risco (TUBAÑA et al., 2008).

O uso das faixas de referência em áreas onde será utilizada a aplicação de nitrogênio em taxa variável, que possuem solos com variabilidade e o impacto que essa variabilidade tem nas faixas de referência, ainda não é bem entendido (BAUSCH; BRODAHL, 2011). Ignorando a variabilidade do solo dentro da faixa de referência e aplicando um valor obtido pela faixa inteira para normalizar os dados do talhão, indicou as plantas de milho localizadas em um solo mais arenoso como deficientes em nitrogênio. O uso da condutividade elétrica como um substituto do mapeamento de textura do solo, evitou o erro de classificação dos níveis de suficiência do milho na faixa de referência. A classificação da condutividade elétrica em clusters, com um número de classes que represente as diferenças de textura do solo, foi uma boa estratégia para classificar os níveis de suficiência das plantas de milho fora da faixa de referência (INMAN et al., 2007).

Farahani et al. (2004) dizem que um único mapa de condutividade elétrica do solo poderia ser suficiente para definir zonas estáveis. Concluíram que a condutividade elétrica do solo foi uma ferramenta de baixo custo para determinar áreas que teriam potencial para se beneficiar das práticas de manejo e uso de insumos nas diferentes zonas. Shaner et al. (2008) concluíram que a condutividade elétrica do solo fornece informações mais detalhadas para o manejo sítio-específico quando comparado com mapas de textura realizados com levantamento a campo, e que foi possível prever a textura do solo e a matéria orgânica, como documentado em outros estudos.

A condutividade elétrica do solo é afetada pela textura, que indiretamente está relacionada à umidade, profundidade e pela salinidade do solo (KITCHEN et al., 2003).

A natureza espacialmente variável da dose ótima de nitrogênio necessária justifica o desenvolvimento de sistemas que dependem do sensoriamento do teor de clorofila ou da quantidade de biomassa. As doses de nitrogênio podem ser reduzidas onde as condições do solo são favoráveis ao desenvolvimento das plantas e aumentadas onde as condições do solo são naturalmente desfavoráveis. Segundo Raun et al. (2011) a produtividade e a resposta ao nitrogênio influenciam diretamente na demanda por fertilizantes nitrogenados. Se estes fatores não fossem relacionados, justificaria usar a combinação de ambos para determinar a demanda de nitrogênio. Falhas no entendimento da independência da resposta da cultura ao nitrogênio e o potencial produtivo levaram a uma confusão na determinação de qual teoria seria mais adequada para fazer recomendações de nitrogênio.

Johnson e Raun (2003) foram os primeiros a discutir o uso do $RI_{colheita}$ para prever a demanda por doses de nitrogênio adicionais. O $RI_{colheita}$ é calculado dividindo a produtividade máxima de parcelas com aplicação de fertilizantes pela produtividade das parcelas sem fertilizantes. Este valor era então utilizado para estimar a resposta da cultura ao nitrogênio adicionado para aquele ano específico. Mas com o passar dos anos as alterações nos valores de RI levaram a concluir que seria uma variável imprevisível. E que nem todos os nutrientes poderiam seguir o mesmo conceito de porcentagem de suficiência que Bray (1954) descreveu para o fósforo. Além disso, nutrientes móveis como o nitrogênio poderiam seguir a lei do nutriente limitante, e não da suficiência.

Quanto maior a produtividade esperada apenas com o nitrogênio fornecido pelo solo, sem aplicações complementares de N (baixo RI), em geral, menores serão as doses de N necessárias para atingir produtividades máximas. Se o RI para uma determinada área é baixo ($RI < 1,1$) significando que o NDVI dos locais sem aplicação de N são semelhantes aos locais com N, provavelmente a resposta da cultura a uma aplicação complementar de N será baixa. Mas se o RI é alto ($RI > 1,1$), provavelmente a cultura responderá à adubação, então doses adicionais de N devem ser aplicadas (MULLEN et al., 2003).

Raun et al. (2011) com os ensaios de longo prazo, calcularam o $RI_{colheita}$ dividindo os valores de produtividades dos tratamentos com doses de nitrogênio pelos tratamentos testemunhas. Os tratamentos com maiores produtividades nem sempre corresponderam aos

tratamentos de maior dose. Em alguns anos, as produtividades máximas foram observadas com doses baixas de nitrogênio. Em três ensaios de longa duração, não houve relação entre o índice de resposta e a produtividade.

Os resultados desses autores indicam que a resposta ao nitrogênio e a produtividade são independentes. Se elas são independentes, e precisam ser estimadas, precisam ser determinadas separadamente. Qualquer prática que combine as duas sem considerar sua independência pode criar grandes erros de recomendação (RAUN et al., 2011). Um exemplo onde essa independência não foi considerada foi no uso do conceito de suficiência para recomendar nitrogênio, onde VARVEL et al. (2007) utilizaram valores normalizados de um medidor de clorofila e valores relativos ou normalizados de produtividade. Mas se a resposta ao N e a produtividade são independentes, e ambas variam significativamente de ano para ano, utilizar o índice de suficiência (SI), desconsidera que a variação em ambas é dependente do ambiente. Ao utilizar o conceito do SI, a dose de N final é fixada a uma porcentagem de suficiência e não ao potencial produtivo que poderia ser atingido em determinado ano. Saber o potencial produtivo é essencial para o cálculo da demanda de N (RAUN et al., 2011).

Se o teto de produção se altera de um ano para outro, assim como a demanda por nitrogênio, a solução óbvia para melhorar a eficiência na recomendação do nitrogênio é ter a capacidade de estimar tanto a resposta ao N quanto o potencial produtivo. Uma vez que foram identificados independentemente, o próximo passo é combinar os dois em um algoritmo significativo que consiga estimar a dose adicional de N necessária para atingir a produtividade máxima (RAUN et al., 2011).

Apesar dessa amplitude de resultados dificultar a geração de um algoritmo capaz de recomendar a melhor dose de nitrogênio em anos diferentes, o mesmo resultado implica que sabendo que existe uma diferença tão ampla na demanda por nitrogênio, aplicar a mesma dose todos os anos não parece a melhor opção. Sendo assim Raun et al. (2011) advertem que a faixa de referência é necessária todos os anos, pois sem ela teria sido impossível determinar que a demanda por nitrogênio flutuou ao longo do tempo. Além disso, não seria possível estimar o IR porque as faixas de referência são indispensáveis para determinar a resposta do nitrogênio. Ainda comenta que recentes abordagens que sugerem que as faixas de referência não são necessárias, e que os valores de resposta podem ser estimados virtualmente são um motivo para se preocupar. O motivo para manter o uso das faixas de referência é que a única forma de se calcular com certo

nível de confiança a resposta da cultura à aplicação de nitrogênio, é com comparações pareadas entre a dose de campo e uma faixa imediatamente adjacente com doses não limitantes. Entretanto, Holland e Schepers (2011) defendem o uso do conceito de faixas virtuais, afirmando que é uma metodologia confiável e com menor esforço para os agricultores e operadores das máquinas para calibrar os sensores ópticos. E assim ir além das limitações e aborrecimentos do estabelecimento da faixa de referência no campo.

O estudo de Raun et al. (2011) mostrou que a resposta ao N e produtividade não se mostraram relacionadas em três ensaios de longa duração. Não houve correlação entre a produtividade e o ano em dois dos três campos, e não houve correlação entre a resposta ao N e o ano em nenhum dos três campos. A independência da resposta ao N e da produtividade mostra porque as doses de N não podem ser baseadas em apenas um desses dois fatores, mas devem ser combinados para alcançar doses mais realistas.

Outro ponto que pode ser limitante ao uso de sensores ópticos terrestres, é o tempo necessário para adquirir os dados em um talhão inteiro. Uma alternativa seria o uso de imagens (satélite ou aérea), que poderia adquirir os dados de um talhão inteiro em menor tempo. Entretanto, dependendo da região e da dependência de condições climáticas (nuvens), as imagens de satélite podem ser mais limitantes do que imagens aéreas, que hoje podem ser coletadas com VANT's (Veículos Aéreos Não Tripulados) com custo relativamente baixo e com menor tempo entre a coleta e o uso efetivo da imagem. Entretanto, esta nova abordagem não permite a aplicação de nitrogênio em tempo real.

Após toda a discussão sobre os fatores necessários para gerar uma recomendação, é difícil acreditar que os sensores por si só, podem determinar todas as informações necessárias para uma recomendação correta. Em muitos casos, o potencial produtivo e informações sobre o solo, além de outras informações importantes podem ser necessárias para determinar doses mais adequadas. Isso levanta outra discussão com relação à qualidade da aplicação de nitrogênio em tempo real, e que são necessários mais estudos para comprovar sua eficácia para uso em escala comercial no Brasil. Em outros países a pesquisa se mostra rica em resultados sobre a melhora na eficiência do uso do nitrogênio ao sincronizar a aplicação com a demanda da cultura, mas a adoção pelos agricultores é muito menor. A principal barreira tem sido o custo/benefício e/ou tecnologias mais práticas (CASSMAN et al., 2002).

5 CONCLUSÃO

Com este trabalho conclui-se, assim como outros autores, que o NDVI gerado pelo sensor óptico utilizado é uma ferramenta que mostra resultados bastante promissores para a gestão da adubação nitrogenada na cultura do milho. Foi possível identificar regressões significativas entre as doses de nitrogênio e o NDVI gerado a partir da refletância da cultura do milho para os dois espaçamentos entre fileiras avaliados. É possível definir com clareza que os estádios de V7 e V8 seriam os ideais para a utilização do sensor, com base nos resultados obtidos e por razões práticas.

A população de plantas afeta as leituras do sensor principalmente nos estádios iniciais da cultura, mas a partir de V6 essa influência começa a diminuir. Entretanto, o uso de semeadura em taxa variável para a cultura de milho não deve se mostrar um obstáculo para o uso de sensores ópticos, pois as unidades de manejo que devem ser utilizadas para implantar a faixa de referência de nitrogênio são as mesmas onde pode haver alteração na população de plantas.

A aplicação do fungicida não afetou a produtividade e nem as leituras do sensor. Não foi possível avaliar o feito da irrigação e estresses hídricos, pois nos dois anos de ensaio com irrigação não foi necessário aplicar nenhuma lâmina de água.

A resposta da cultura do milho às doses de nitrogênio foi diferente nos três anos avaliados, comprovando a dificuldade de gerar um modelo simples de recomendação de nitrogênio utilizando sensores. Foram encontrados altos valores de economia de nitrogênio e aumento de eficiência do seu uso. Entretanto, existe a necessidade de incorporar outras informações na geração dos modelos, como teor de matéria orgânica e disponibilidade hídrica.

As pesquisas realizadas no Brasil com a cultura do milho utilizando sensores para aplicação de nitrogênio são escassas e necessitam ser expandidas a uma variação mais ampla de condições, para se encontrar critérios e resultados mais confiáveis para gerar um modelo de recomendação.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Roma:FAO, 1998. 301 p. (FAO Irrigation Paper 56.)
- ANDRADE, F.; CIRILO, A.G.; UHART, S.A.; OTEGUI, M.E. **Ecofisiologia del cultivo de maíz**. Buenos Aires:Editorial La Barrosa y Dekalb Press, 1996. 292 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.
- AZEVEDO, J.A. de; SILVA, E.M. da. **Tensiômetro**: dispositivo prático para controle da irrigação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 33p.
- BAUSCH, W. C.; BRODAHL, M. K. Strategies to evaluate goodness of reference strips for in-season, field scale, irrigated corn nitrogen sufficiency. 2011. **Precision Agriculture**, Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/j861th1803g48tq2/> >. Acesso em: 07 ago. 2011.
- BAUSCH, W.C.; DUKE, H.R. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1869-1875, 1996.
- 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.
- BARTHOLOMEU, W.V.; CLARK, F.E. **Soil nitrogen**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 615 p. (Agronomy Series, 10).
- 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.
- BLACKMORE, S. From precision farming to phytotechnology. In: AUTOMATION TECHNOLOGY FOR OFF-ROAD EQUIPMENT, Kyoto. **Proceedings ...** St. Joseph: ASAE, 2004. 4 p. (ASAE Paper, 701P1004).
- 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.
- BRAY, R.H. A nutrient mobility concept of soil-plant relationships. **Soil Science**, Philadelphia, v. 78, p. 9-22, 1954.
- CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D. T. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. **Ambio**, Stockholm, v. 31, n. 2, p. 132-140, 2002.

CERETTA, C.A. **Dinâmica do nitrogênio em sistemas de produção na região Sul do Brasil**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2000. 163 p. Embrapa Agrobiologia. Documentos, 128);(Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 28).

CHAN, C.W.; SCHUELLER, J.K.; MILLER, W.M.; WHITNEY, J.D.; CORNELL, J.A. Error sources affecting variable rate application on nitrogen fertilizer. **Precision Agriculture**, New York, v. 5, p. 601-616, 2004.

CLAY, D.E.; KIM, K-I.; CHANG, J.; CLAY, S.A.; DALSTED, K. Characterizing Water and Nitrogen Stress in Corn Using Remote Sensing. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 3, p. 579-587, 2006.

EHLERT, D.; SCHMERLER, J.; VOELKER, U. Variable rate nitrogen fertilisation of winter wheat based on a crop density sensor. **Precision Agriculture**, New York, v. 5, p. 263-273, 2004.

EMBRAPA. Sistemas de produção 1: cultivo do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_2ed/index.htm>. Acesso em: 08 nov. 2007.

FAGERIA, N.; BALIGAR, V. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. **Advances In Agronomy**, New York, v. 88, p. 97-185, 2005.

FAO. FAOSTAT, 2011. Disponível em : <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

FARAHANI, H. J.; BUCHLEITER, G. W. Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy fields in Colorado. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 47, n. 1, p. 79-90, 2004.

FARIA, R.T.; COSTA, A.C.S. da. **Tensiômetro** - construção, instalação e utilização - um aparelho simples para se determinar quando irrigar. IAPAR, 1987. 24 p.

FIELD, C.; MERINO, J.; MOONEY, H.A. Compromises between water use efficiency and nitrogen use efficiency in Five species of California evergreens. **Oecologia**, Berlin, v.60, n.3, p.384-389, 1983.

FISCHER, 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.

FLEMING, K.L.; WESTFALL, D.G.; BAUSCH, W.C. Evaluating management zone technology and grid soil sampling for variable rate nitrogen application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 2000. 1 CD-ROM.

FRANÇA, S. **Efeitos da disponibilidade de nitrogênio e água na fotossíntese, crescimento e produção do milho, em diferentes sistemas de cultura**. 2003. 157 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FREEMAN, K.W.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; MULLEN, R.W.; STONE, M.L.; SOLIE, J. B. Late-season Prediction Of Wheat Grain Yield And Grain Protein. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 34, n. 13, p. 1837-1852, 2003.

GABRIELLE, B.; RECOUS, S.; TUCK, G.; BRADBURY, N.J.; NICOLARDOT, B. Ability of the SUNDIAL model to simulate the short-term dynamics of ^{15}N applied to winter wheat and oilseed rape. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 137, p. 157-168, 2001.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; FILHO, R.A. 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.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 53, p. 789-799, 2002.

GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, p. 76-87, 2002.

GREGORET, M.C.; ZORITA, M. D.; DARDANELLI, J.; BONGIOVANNI, R. G. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. **Precision Agriculture**, New York, v. Online, 19 p., 2011.

HABOUDANE, D.; MILLER, J.R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P.J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 81, p. 416-426, 2002.

HARMELL, R.D.; KENIMER, A.L.; SEARCY, S.W.; TORBERT, H.A. Runoff water quality impact of variable rate sidedress nitrogen application. **Precision Agriculture**, New York, v. 5, p. 247-261, 2004.

HATFIELD, J. **Precision agriculture and environmental quality**: Challenges for research and education. Ames, IA. : National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service, USDA, 2000. 18 p.

HEEGE, H.J.; REUSCH, S.; THIESSEN, E. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. **Precision Agriculture**, New York, v. 9, n. 3, p. 115-131, 2008.

HEERMANN, D.F.; HOETING, J.; THOMPSON, S.E.; DUKE, H.R.; WESTFALL, D.G.; BUCHLEITER, G.W.; WESTRA, P.; PEAIRS, F.B.; FLEMING, K. Interdisciplinary irrigated precision farming research. **Precision Agriculture**, New York, v. 3, p. 47-61, 2002.

HOLLAND, K.; SCHEPERS, J.S. Active-crop sensor calibration using the virtual-reference concept. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 8., 2011. , Prague. **Proceedings...** Prague., 2011. 1 CD-ROM.

HONG, S.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; SCHLEMMER, M.R. Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 38, n. 15-16, p. 2209-2226, 2007.

HURTADO, S.M.C.; RESENDE, A.V.; SILVA, C.A.; CORAZZA, E.J.; SHIRATSUCHI, L.S. Variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada de cobertura em lavoura de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 300-309, 2009.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; REICH, R.M.; WESTFALL, D.G. Active remote sensing and grain yield in irrigated maize. **Precision Agriculture**, New York, v. 8, p. 241-252, 2007.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G.; REICH, R. Nitrogen Uptake across Site Specific Management Zones in Irrigated Corn Production Systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 1, p. 169-176, 2005.

ISIK, M.; KHANNA, M. Variable-rate nitrogen application under uncertainty: implication for profitability and nitrogen use. **Journal of Agricultural and Resource Economics**. Bozeman, v. 27, p. 61-76, 2002.

JMP, Version 7. SAS Institute Inc., Cary, NC, 2007.

JOHNSON, G.V.; RAUN, W.R. Nitrogen Response Index as a Guide to Fertilizer Management. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 26, n. 2, p. 249-262, 2003.

JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, Washington, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

JORGENSEN, J.R.; JORGENSEN, R.N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. **Precision Agriculture**, New York, v. 8, p. 63-73, 2007.

KAPPES, C.; CARVALHO, M.A.C.; YAMASHITA, O.M.; SILVA, J.A.N. Influência do nitrogênio no desempenho produtivo do milho cultivado na segunda safra em sucessão à soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 3, p. 251-259, 2009.

LOWENBERG-DEBOUER, J. **The Management Time Economics of On-the-go Sensing for Nitrogen Application**. West Lafayette, IN:SSMC Newsletter, Purdue University, , 2004. 5 p.

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. 10 p. (ASAE Paper, PNW05-1004).

KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T.; LUND, E. D.; SUDDUTH, K. A.; BUCHLEITER, G. W. Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting Soil–Crop Systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 483-495, 2003.

LIU, W.T.H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Editora Uniderp, 2007. 908 p.

LIU, Y.; SWINTON, S.M.; MILLER, N.R. In site-specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, Milwaukee, v. 88, n. 2, p. 471-483, 2006.

LONG, D.S.; ENGEL, R.E.; CARLSON, G.R. Grain protein mapping for precision N management of dryland wheat. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA;SSSA, 1998. 1 CD-ROM.

MACHADO, S.; BYNUM, E.D.; ARCHER, T.L.; LASCANO, R.J.; WILSON, L.T.; BORDOVSKY, J. Spatial and temporal variability of corn growth and grain yield. **Crop Science**, Madison, v. 42, p. 1564-1576, 2002.

MAINE, N.; LOWENBERG-DEBOER, J.; NELL, W.T.; ALEMU, Z.G. Impact of variable-rate application of nitrogen on yield and profit: a case study from South Africa. **Precision Agriculture**, New York, v. 11, n. 5, p. 448-463, 2009.

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

MAMO, M.; MALZER, G.L.; MULLA, D.J.; HUGGINS, D.R.; STROCK, J. Spatial and Temporal Variation in Economically Optimum Nitrogen Rate for Corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 4, p. 958-964, 2003.

MARTIN, K.L.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; TEAL, R.K.; TUBAÑA, B.; ARNALL, D.B.; CHUNG, B.; WALSH, O.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; RAUN, W.R. Expression of Variability in Corn as Influenced by Growth Stage Using Optical Sensor Measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 2, p. 384-389, 2007.

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., 2001, Quebec. **Proceedings ...** Ontario: Canadian Aeronautics and Space Institute, 2001. 1 CD-ROM.

MELCHIORI, R.J.M. Estado actual del manejo sitio específico de nitrógeno en argentina. In: CURSO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MÁQUINAS PRECISAS, 7., 2007, Manfredi. **Anais ...** Buenos Aires: INTA, 2007. p. 77-84.

MOGES, S.M.; RAUN, W.R.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; JOHNSON, G.V.; SOLIE, J.B. Evaluation of Green, Red, and Near Infrared Bands for Predicting Winter Wheat Biomass, Nitrogen Uptake, and Final Grain Yield. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 27, n. 8, p. 1431-1441, 2004.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: O autor, 2003. 83 p.

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

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, Cambridge, v.19, p. 205-224, 1965.

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.

MOELLER, C.; ASSENG, S.; BERGER, J.; MILROY, S.P. Plant available soil water at sowing in Mediterranean environments—Is it a useful criterion to aid nitrogen fertiliser and sowing decisions? **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, n. 1, p. 127-136, 2009.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320 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**. São José dos Campos. 2000. 179 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; SOLIE, J. B. Identifying an In-Season Response Index and the Potential to Increase Wheat Yield with Nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 2, p. 347-351, 2003.

MYNENI, R.B.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed Par Using Radiative Transfer Models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 35, n. 6, p. 1380-1393, 1997.

MYNENI, R.B.; HALL, F.G.; SELLERS, P.J.; MARSHAK, A. L. The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 33, n. 2, p. 481-486, 1995.

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.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, New York, v. 67, p. 1-85, 1999.

PING, J.L.; DOBERMANN, A. Processing of yield map data. **Precision Agriculture**, New York, v. 6, p. 193-212, 2005.

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

RAIJ, B.van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343 p.

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 3, p. 357-363, 1999.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L. Independence of yield potential and crop nitrogen response. **Precision Agriculture**, New York, v. 12, n. 4, p. 508-518, 2011.

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; PHILLIPS, S.B.; WESTERMAN, R.L. Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma. **Soil Tillage Research**. Wageningen, v. 47, p. 323-330, 1998a.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; WHITNEY, R.W.; LEES, H.L.; SEMBIRING, H.; PHILLIPS, S.B. Microvariability in soil test, plant nutrient, and yield parameters in bermudagrass. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 683-690, 1998b.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-Season Prediction of Potential Grain Yield in Winter Wheat Using Canopy Reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 1, p. 131-138, 2001.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; STONE, M.L.; JOHNSON, G.V.; MULLEN, R.W. Growth Stage, Development, and Spatial Variability in Corn Evaluated Using Optical Sensor Readings. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 28, n. 1, p. 173-182, 2005.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; THOMASON, W.E.; LUKINA, E.V. Improving Nitrogen Use Efficiency in Cereal Grain Production with Optical Sensing and Variable Rate Application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 4, p. 815-820, 2002.

REYNS, P.; MISSOTTEN, B.; RAMON, H.; BAERDEMAEKER, J. A Review of Combine Sensors for Precision Farming. **Precision Agriculture**, New York, v. 3, p. 169-182, 2002.

RICE, C.W.; HAVLIN, J.L.; Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. p. 1-14. In: HAVLIN, J.L.; JACOBSEN, J.L. (Soil Science Society of America and American Society of Agronomy) **Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations**. Madison, WI.:SSSA Spec. Publ. 40. SSSA, 1994. 220 p.

RITCHIE, S.W.; HANAWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames, IA, USA: Iowa State Extension Service; Iowa State University, 1986. 21 p. (Specialty Report 48)

RODRIGUEZ, D.; SADRAS, V.O.; CHRISTENSEN, L.K.; BALFORD, R. Spatial assessment of the physiological status of wheat crops as affected by water and nitrogen supply using infrared thermal imagery. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 56, p. 983-993, 2005.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317.

RUSSELE, M.P.; HAUCK, R.D.; OLSON, R.A. Nitrogen accumulation rates of irrigated corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 593-598, 1983.

SAGE, R.F.; PEARCY, R.W. The Nitrogen Use Efficiency of C3 and C4 Plants. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 84, p. 954-958, 1987.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide (Release 6.4). Cary, 1998. 398 p.

SCHÄCHTL, J.; HUBER, G.; MAIDL, F.X.; STICKSEL, E.; SCHULZ, E.; HASCHBERGER, P. Laser-induced chlorophyll fluorescence measurements for detecting the nitrogen status of wheat (*Triticum aestivum* L.) canopies. **Precision Agriculture**, New York, v. 6, p. 143-156, 2005.

SCHARF, P.C.; WIEBOLD, W.J.; LORY, J.A. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 435-441, 2002.

SCHARF, P.C.; KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DAVIS, J.G.; HUBBARD, V.C.; LORY, J.A. Field-Scale Variability in Optimal Nitrogen Fertilizer Rate for Corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 2, p. 452-461, 2005.

SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E.; WATTS, D.G. Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. **Journal of Contaminant Hydrology**. Amsterdam, v. 20, p. 227-239, 1995.

SCHMIDT, J.P.; HONG, N.; DELLINGER, A.E.; BEEGLE, D.B.; LIN, H. Hillslope Variability in Corn Response to Nitrogen Linked to In-Season Soil Moisture Redistribution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 1, p. 229-237, 2007.

SCHRÖDER, J.J.; NEETESON, J.J.; OENEMA, O.; STRUIK, P.C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 66, p. 151-164, 2000.

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, v. 31, n. 1/2, p. 149-164. 2000.

SHAHANDEH, H.; WRIGHT, A.L.; HONS, F.M. Use of soil parameters and texture for spatially-variable nitrogen fertilization. **Precision Agriculture**, New York, v. 12, p. 146-163, 2011.

SHANER, D.L.; KHOSLA, R.; BRODAHL, M.K.; BUCHLEITER, G.W.; FARAHANI, H.J. How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 5, p. 1472-1480, 2008.

SHAVER, T.M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G. Evaluation of Two Ground-Based Active Crop Canopy Sensors in Maize: Growth Stage, Row Spacing, and Sensor Movement Speed. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, n. 6, p. 2101-2108, 2010.

SMIL, V. Global population and the nitrogen cycle. **Scientific American**. New York, v. 277, n. 1, p. 76-81, 1997.

SMIT, B.; LUDLOW, L.; BRKLACICH, M. Implications of a global climatic warming for agriculture: A review and appraisal. **Journal of Environmental Quality**. Madison, v. 17, p. 519-527, 1988.

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

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active Sensor Reflectance Measurements of Corn Nitrogen Status and Yield Potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 571-579, 2008.

SOLIE, J.B.; 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 greenseekerTM applicator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2002, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 2002. 1 CD-ROM.

STAFFORD, J.V. An investigation into the within-field spatial variability of grain quality. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., 1999, Odense. **Proceedings ...** Sheffield: Sheffield Academic Press, 1999. p. 353-361.

STEVEN, M.D. Correcting the effects of field of view and varying illumination in spectral measurements of crops. **Precision Agriculture**, New York, v. 5, p. 55-72, 2004.

STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; WHITNEY, R.W.; RAUN, W.R.; LEES, W.L. **Sensors for detection of nitrogen in winter wheat**. St. Joseph: ASAE, 1996. (ASAE Paper, 96-1757). Disponível em: <<http://biosystems.okstate.edu/Home/mstone/papers/N-Sens/N-Sens.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2007.

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.

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

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.

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**, Philadelphia, v. 21, n. 11, p. 2287-2302, 1998.

TEAL, R.K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, W.R. In-Season Prediction of Corn Grain Yield Potential Using Normalized Difference Vegetation Index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 6, p. 1488-1494, 2006.

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).

THENKABAIL, P.S.; SMITH, R.B.; PAUW, E. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 71, p. 158-182, 2000.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HALVIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan, 1993. 634 p.

THOMASON, W.E.; PHILLIPS, S.B.; RAYMOND, F.D. Defining useful limits for spectral reflectance measures in corn. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 30, p. 1263-1277, 2007.

TUBAÑA, B.S.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; CHUNG, B.; SOLIE, J.B.; GIRMA, K.; RAUN, W.R. Adjusting Midseason Nitrogen Rate Using a Sensor-Based Optimization Algorithm to Increase Use Efficiency in Corn. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 31, n. 8, p. 1393-1419, 2008.

TUCKER, C.J.; HOLBEN, B.N.; ELGIN, J.H. Jr.; 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.

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. An Algorithm for Corn Nitrogen Recommendations Using a Chlorophyll Meter Based Sufficiency Index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 3, p. 701-706, 2007.

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. 84, p. 173-185, 2006.

WELSH, J.; WOOD, G.A.; GODWIN, R.J.; TAYLOR, J.C.; EARL, R.; BLACKMORE, S.; KNIGHT, S.M. Developing Strategies for Spatially Variable Nitrogen Application in Cereals, Part I: Winter Barley. **Biosystems Engineering**, Cranfield, v. 84, n. 4, p. 495-511, 2003.

WOOD, C.W.; REEVES, D.W.; HIMELRICK, D.G. Relationship between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review. In: WHEAT SYMPOSIUM, 8., 1993, Christchurch. **Proceedings ...** Palmerston North: Agronomy Society of New Zealand, 1993. p. 1-9.

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.

YANG, C.; EVERITT, J. H.; BRADFORD, J. M. Airborne hyperspectral imagery and linear spectral unmixing for mapping variation in crop yield. **Precision Agriculture**, New York, v. 8, n. 6, p. 279-296, 2007.

ZHANG, J.; BLACKMER, A.M.; ELLSWORTH, J.W.; KYVERYGA, P.M.; BLACKMER, T.M. Luxury Production of Leaf Chlorophyll and Mid-Season Recovery from Nitrogen Deficiencies in Corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 658-664, 2008.