

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

Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais

Fabício Pinheiro Povh

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

**Piracicaba
2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Fabrcio Pinheiro Povh
Engenheiro Agrônomo**

Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais

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

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

**Piracicaba
2007**

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

Povh, Fabrício Pinheiro

Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais / Fabrício Pinheiro Povh. - -
Piracicaba, 2007.
86 p. : il.

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

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

CDD 633.1

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

À Deus, por sempre me acompanhar e dar sustentação nos momentos difíceis.

OFEREÇO

Aos meus pais Osvaldo Povh e Nanci Pinheiro e
ao meu irmão Fábio Pinheiro Povh, pelo apoio, paciência e confiança.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

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

Ao professor e amigo **José Paulo Molin**, pela orientação, paciência e confiança, além das diversas oportunidades oferecidas durante o curso, e a toda sua família, pela amizade.

À **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)** por conceder a bolsa de estudos essencial à condução deste trabalho.

À **Máquinas Agrícolas Jacto S.A.** e a **Fundação ABC** que muito contribuíram para realização deste trabalho, e aos colegas da Fundação ABC **Volnei, Rudimar, Élder, Zé e Wagner**.

Ao grande amigo **Leandro Maria Gimenez**, por todo apoio, e não só pela ajuda essencial na condução dos trabalhos, mas também pelo praticamente auxílio moradia, companhia e pelos momentos de descontração durante minhas estadias em Castro.

Aos amigos que me ajudaram conduzir este trabalho, **Thiago Martins Machado (nerso) José Vitor Salvi (zé bigorna), Flávia Roncato Frasson e Anamari Viegas de Araujo Motomiya**, pela amizade e consideração.

Aos colegas da pós-graduação **Faulin (oreia), Marco (guarda), Marcos (vara), Rubén (peruano), Cassiano (jatobá), Leonardo (bagre), Tiago (carlinha), Daniel (mutuca), Étore (tóia), Marcelo (rascunho), Geraldo (cebim), Artur (coringa), Ricardo (sócrates), Fernando (lodo), Paulo (peloia)** e aos estagiários e ex-estagiários do **Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão (gMAP)**, o qual tive o grande prazer de participar, pelos bons momentos, troca de conhecimentos e convivência durante o mestrado.

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

Aos professores do departamento **Milan, Casimiro e Caetano** pela troca de experiências.

À minha família piracicabana, **Vilmo, Lúcia, Fernando, Tati, Cristina, Graziela, Conrado, Gabriel, Karina, Rafael, Rodrigo e Guilherme** por tornarem mais fácil minha adaptação em Piracicaba.

À minha grande amiga **Suzana Romeiro Araújo** pelo apoio, companhia e inspiração para escrever este trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
Referências.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Nitrogênio.....	14
2.2 Agricultura de precisão.....	16
2.3 Sensoriamento remoto.....	18
Referências.....	23
3 COMPORTAMENTO DO NDVI OBTIDO POR SENSOR ÓTICO ATIVO EM CEREAIS.....	28
Resumo.....	28
Abstract.....	28
3.1 Introdução.....	29
3.2 Material e Métodos.....	31
3.2.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo.....	33
3.2.2 Experimento 2 – Trigo: Fontes de N e épocas de aplicação do fertilizante.....	34
3.2.3 Experimento 3 – Trigo: Influência de variedades.....	35
3.2.4 Experimento 4 – Milho: Doses de nitrogênio.....	35
3.2.5 Experimento 5 – Triticale e Cevada: Doses de nitrogênio.....	36
3.3 Resultados e Discussão.....	36
3.3.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo.....	36
3.3.2 Experimento 2 – Trigo: Fontes de N e épocas de aplicação do fertilizante.....	43
3.3.3 Experimento 3 – Trigo: Influência de variedades.....	47
3.3.4 Experimento 4 – Milho: Doses de nitrogênio.....	50
3.3.5 Experimento 5 – Triticale e Cevada: Doses de nitrogênio.....	53
3.4 Conclusão.....	56
Referências.....	57
4 VARIABILIDADE ESPACIAL DO NDVI E APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM TAXA VARIÁVEL.....	60

Resumo.....	60
Abstract.....	60
4.1 Introdução.....	61
4.2 Material e Métodos.....	63
4.2.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo e doses de nitrogênio.....	63
4.2.2 Experimento 2 – Milho: Doses de nitrogênio.....	65
4.2.3 Experimento 3 – Trigo: Aplicação de N em taxa variável.....	66
4.3 Resultados e Discussão.....	74
4.3.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo e doses de nitrogênio.....	74
4.3.2 Experimento 2 – Milho: Doses de nitrogênio.....	79
4.3.3 Experimento 3 – Trigo – Aplicação de N em taxa variável.....	82
4.4 Conclusão.....	85
Referências.....	85

RESUMO

Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais

A produtividade de uma determinada cultura, anteriormente tida como principal objetivo de uma propriedade rural, hoje passa a dividir espaço com múltiplos objetivos. O impacto ambiental das culturas e sistemas produtivos, qualidade dos produtos, baixo custo de produção e, conseqüentemente o aumento da eficiência no uso do nitrogênio, já fazem parte desses objetivos. Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas constantemente para otimizar o manejo de fertilizantes na agricultura. Os sensores óticos são uma dessas ferramentas que tem potencial para contribuir para o manejo do nitrogênio. Este trabalho consistiu em avaliar o comportamento do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) gerado pelo sensor ótico ativo terrestre GreenSeeker Hand HeldTM (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA) nas culturas de milho, trigo, triticale e cevada sob diferentes condições. Este sensor emite radiação ativa em dois comprimentos de onda centralizados no vermelho (660 nm) e no infravermelho próximo (770 nm). Em uma primeira etapa foram realizados ensaios alterando classes de solo, doses de nitrogênio, fontes de nitrogênio e variedades. A análise estatística dos dados foi feita por regressão, correlação e teste de Tukey. Notou-se que o NDVI tem maior potencial para uso nas culturas de trigo, triticale e cevada, por serem culturas que possuem menos biomassa. Na cultura do milho, o NDVI saturou mesmo com baixas doses de N devido à grande quantidade de biomassa. Uma possibilidade é substituir a banda do vermelho pela banda do verde, ou testar outros índices de vegetação que tenham uma correlação mais linear com a quantidade de biomassa. A segunda etapa teve objetivo de mostrar a variabilidade espacial do NDVI nas culturas de trigo e milho e realizar a aplicação de nitrogênio em taxa variável na cultura do trigo, com base nas leituras de um sensor ótico ativo. Foram montados experimentos em faixas, com doses crescentes de N, e foram coletados dados do NDVI com o mesmo sensor ótico ativo, agora conectado a um receptor de GPS, possibilitando a geração de mapas do NDVI. Para o trigo, devido a maior correlação entre a biomassa com o NDVI do que o milho é possível identificar visualmente, no mapa, as faixas com doses diferentes, entretanto, é visível também a variabilidade dentro de cada faixa, mostrando que a absorção e aproveitamento do N pela cultura não é uniforme. Para a aplicação em taxa variável foi montado um experimento com faixas de 120 kg ha⁻¹ de N, que serviram de calibração para o sensor, e faixas com 18,4 e 52,4 kg ha⁻¹ de N que foram complementadas a partir das leituras do sensor ótico ativo. Os resultados mostram que, mesmo com uma considerável economia no consumo de fertilizantes nitrogenados, utilizando a tecnologia de aplicação em taxa variável, as produtividades foram semelhantes, ou seja, a produtividade dos tratamentos com aplicação em taxa variável não foram diferentes estatisticamente dos tratamentos com aplicação em taxa fixa.

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

ABSTRACT

Use of active optical sensor in cereal crops

The yield of a crop, until recently was the main objective of a farm, and today it begins to share importance with multiple objectives. The environmental impact of crops and productive systems, product quality, low production costs and, consequently the increase of the nitrogen use efficiency are already part of these objectives. New technologies have been developed constantly to optimize the fertilizer management in agriculture. Optical sensors are one of these tools that have potential to contribute to the nitrogen management. This work consisted in evaluating the NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) behavior, generated by the terrestrial active optical sensor GreenSeeker Hand HeldTM (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA) in corn, wheat, triticale and barley crops, under different conditions. This sensor emits active radiation in two wavelengths centered in the red (660 nm) and in the near infrared (770 nm). In the first stage several tests were conducted changing soil classes, nitrogen rates, nitrogen sources and varieties. Statistical analysis of the data was made by regression, correlation and Tukey test. It was noticed that the NDVI has more potential use in wheat, triticale and barley crops, because they produce less biomass. In corn, the NDVI saturated even under low nitrogen rates, due to its high level of biomass. One possibility is to substitute the red band for the green band, or test other vegetation indices that have a correlation more linear with the crop biomass. The second stage had the objective of showing the NDVI spatial variability in wheat and corn crops, and apply nitrogen on variable rates in wheat, based on the readings of the same active optical sensor. Field experiments in strips, with different nitrogen rates, were conducted and the data were collected with the sensor connected to a GPS receiver, allowing the generation of NDVI maps. For wheat, due its higher correlation between biomass and NDVI than the corn, it is possible to visually identify the strips with different nitrogen rates. However, it is also notable the variability inside each strip, showing that the nitrogen absorption and use by the crop is not uniform. For the variable rate application, an experiment was established with 120 kg ha⁻¹ strips, used as reference to the sensor calibration, and strips with 18,4 and 52,4 kg ha⁻¹ of nitrogen, that were complemented based on the active optical sensor readings. The results show that even with a considerable economy of nitrogen fertilizer consume, using the variable rate technology, yields were similar, i.e., the yield of the treatments with variable rate application were not different statistically of the treatments with uniform rate application.

Keywords: Precision agriculture; Remote sensing; Nitrogen

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o IBGE (2007), entre todos os cereais cultivados no Brasil, o milho encontra-se em primeiro lugar com uma área colhida de 12.602.652 ha e produção de 42.631.977 t e o trigo apresenta-se em terceiro lugar, logo depois do arroz, com uma área colhida de 1.558.241 ha e produção de 2.481.831 t na safra 2006. Já o triticale e a cevada possuem participações menores, com produções de 207.098 t e 201.102 t, e área colhida de 99.088 ha e 81.747 ha, respectivamente. 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). O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma cultura com história milenar, e no Brasil geralmente é cultivado em áreas de clima temperado, como os estados do sul do país, entretanto tem se expandido para os estados do Centro-Oeste e Sudeste.

O triticale (*X Triticosecale* Wittmack) é um cereal de inverno obtido pelo cruzamento artificial de trigo com centeio. A cultura vem sendo pesquisada no Brasil desde 1969, e a primeira cultivar foi lançada em 1985. A produção destina-se principalmente à alimentação animal, além de outros usos, como biscoitos, pães caseiros, massa para pizza e produtos dietéticos (EMBRAPA, 2007a). Já a cevada (*Hordeum vulgare* sp. *vulgare*) é um cereal de inverno que ocupa a quinta posição, em ordem de importância econômica, no mundo. O grão é utilizado na industrialização de bebidas (cerveja e destilados), na composição de farinhas ou flocos para panificação, na produção de medicamentos e na formulação de produtos dietéticos e de sucedâneos de café. A cevada é ainda empregada em alimentação animal como forragem verde e na fabricação de ração. No Brasil, a malteação é o principal uso econômico da cevada, já que o país produz apenas 30% da demanda da indústria cervejeira. A produção brasileira de cevada está concentrada na Região Sul, com registros de cultivo também nos estados de Goiás, de Minas Gerais e de São Paulo (EMBRAPA, 2007b).

O que estas culturas têm em comum é a adubação nitrogenada realizada por fertilizantes minerais, por não fixarem 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 em relação ao meio ambiente. O nitrogênio é um integrante da clorofila, um

pigmento que é o primeiro a absorver a energia luminosa necessária para a fotossíntese. Se o N é utilizado adequadamente, juntamente com os demais nutrientes, pode acelerar o desenvolvimento de culturas como milho e outras culturas de grãos. As plantas normalmente contêm de 1 a 5% de nitrogênio (TISDALE et al., 1993).

Plantas deficientes em nitrogênio apresentam-se amareladas e com crescimento reduzido. Em arroz e trigo o excesso de N pode causar acamamento. Se, por um lado, a falta de nitrogênio pode limitar seriamente as produções, por outro, o excesso pode reduzi-las. Mas, em grande parte dos casos, as recomendações emanadas de órgãos de pesquisa objetivam máximo lucro por área, mas 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).

Práticas como a agricultura de precisão pode 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 utilizam 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).

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 mudando as práticas agrícolas detectando a variabilidade e respondendo a

essa variabilidade com decisões em tempo real (INMAN et al., 2005). Sensores óticos, ativos ou passivos, já vêm sendo comercializados por fabricantes nos Estados Unidos e Europa. Entre suas possibilidades de uso, vêm sendo utilizados mais amplamente para um manejo mais eficiente do nitrogênio em diversas culturas, visando redução no consumo de fertilizantes sem afetar a produtividade.

Embasado neste contexto, propões-se avaliar um desses sensores óticos ativos visando atender os seguintes objetivos: 1) avaliar o comportamento do NDVI sob diferentes doses de nitrogênio para as culturas de cereais; 2) verificar a influência de diferentes variedades de trigo nas leituras do sensor; 3) gerar uma curva que permita estimar a produtividade da cultura do trigo antes do final da safra, em uma época que ainda seja possível a intervenção com fertilizantes nitrogenados; 4) realizar a aplicação de nitrogênio em taxa variável na cultura do trigo com base nas leituras de um sensor ótico ativo.

Referências

- 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.
- EMBRAPA. **Triticale**. 2007. Disponível em:
<<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/triticale/index.htm>>. Acesso em: 27 set. 2007a.
- EMBRAPA. **Cevada**. 2007. Disponível em:
<<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/cevada/index.htm>>. Acesso em: 27 set. 2007b.
- GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, New York, v. 53, p. 789-799, 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.
- IBGE. **Estatística agropecuária**. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/defaulttab.shtm>>. Acesso em: 27 set. 2007.
- INMAN, D.; KHOSLA, R.; MAYFIELD, T. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. **Sensor Review**, Bingley, v. 25, n. 3, p. 209-214, 2005.
- RAIJ, B.van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343 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.

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

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. Dois dos 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 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 meio ambiente e a conservação de energia têm estimulado programas de melhoramento de cultivares de milho, visando o uso eficiente de nitrogênio (EMBRAPA, 2005).

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 as plantas C_4 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 eficiência no uso do nitrogênio é a principal consideração na produção do trigo. Essa eficiência pode diminuir devido a perdas de nitrogênio por volatilização, desnitrificação e lixiviação, ou apenas porque o trigo não absorveu esse N, ou se absorveu não foi utilizado eficientemente (FISCHER et al., 1993).

A agricultura, anteriormente dominada pela produtividade, agora possui múltiplos objetivos. O 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).

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 estão 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 agora existe a possibilidade de manejo ao nível de planta. Essa escala ao nível de planta já existe desde o início da agricultura, mas foi deixada de lado com a substituição da mão-de-obra manual 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 hora, menor será o custo (BLACKMORE, 2004).

De acordo com Molin (2001), 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 para aumentar a eficiência na absorção e reduzir a variabilidade espacial da qualidade na safra atual.

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 utilizadas 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 localização da máquina no campo determina a dose a ser aplicada de acordo com o mapa. O mapa, geralmente criado em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), contém a localidade e as doses a serem aplicadas. Segundo Pierce e Nowak (1999) a aplicação em taxa variável 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 aplicações 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 eletromagnéticos 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 de dados, 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 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).

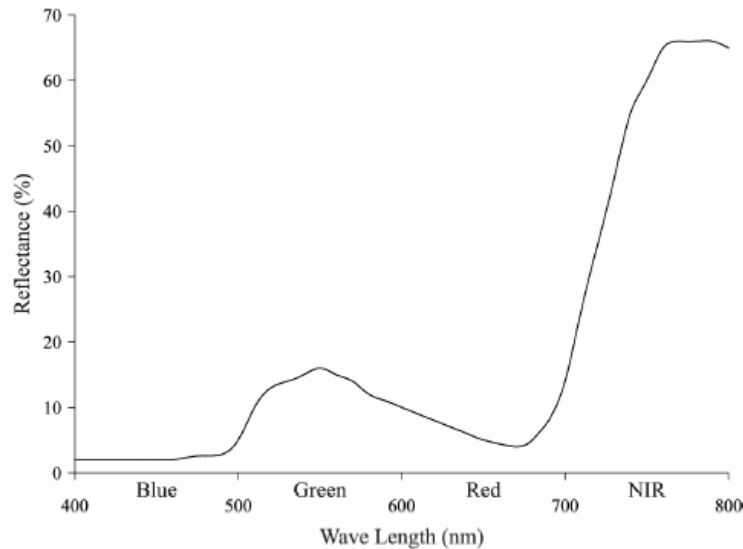


Figura 1 – Diagrama conceitual que ilustra a refletância de uma folha saudável
Fonte: Inman et al. (2005)

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 mesófilo 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 (KIM et al., 2005) e cana-de-açúcar (FRASSON, 2007). 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 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®) 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. (2004), 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, consideraram 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 o infravermelho próximo, normalizado sobre o 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. Em 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.

Referências

AYALA-SILVA, T.; BEYL, C.A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advances in Space Research**, Elmsford, v. 35, p. 305-317, 2005.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 161-173, 1991.

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.

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.

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.

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.

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 7**: informações técnicas da Comissão Centro-Sul Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale para a Safra 2005. Londrina: Embrapa Soja, 2005. 238 p.

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.

FRASSON, F.R. **Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar**. 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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.

GABRIELLE, B.; RECOUS, S.; TUCK, G.; BRADBURY, N.J.; NICOLARDOT, B. Ability of the SUNDIAL model to simulate the short-term dynamics of ¹⁵N 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**, New York, v. 53, p. 789-799, 2002.

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.

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

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.

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).

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

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, 2000. 1 CD-ROM.

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.

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.

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**, New York, v.27, p. 1431-1441, 2004.

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

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320 p.

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**, Newark, v. 67, p. 1-85, 1999.

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

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

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.

SAGE, R.F.; PEARCY, R.W. The nitrogen use efficiency of C₃ and C₄ plants: I - Leaf nitrogen, growth and biomass partitioning in *Chenopodium album* L. and *Amaranthus retroflexus* L. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 84, p. 954-958, 1987.

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.

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.

SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; NEEDHAM, D.E.; REED, S.; WASHMON, C.N. Real-time sensing and N fertilization with a field scale greenseeker™ applicator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 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.

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**, New York, v. 21, n. 11, p. 2287–2302, 1998.

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

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.

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.

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.

3 COMPORTAMENTO DO NDVI OBTIDO POR SENSOR ÓTICO ATIVO EM CEREAIS

Resumo

Diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para otimizar o manejo de fertilizantes na agricultura. Os sensores óticos são uma dessas ferramentas que tem potencial para contribuir para manejo do nitrogênio. Este trabalho consistiu em avaliar o comportamento do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) nas culturas de milho, trigo, tritcale e cevada sob diferentes condições, alterando classes de solo, doses de nitrogênio, fontes de nitrogênio e variedades. Os dados do NDVI foram coletados de duas a três vezes por ensaio com um sensor ótico ativo comercial. Fez-se a análise estatística dos dados por regressão, correlação e teste de Tukey para contrastar as variáveis analisadas, NDVI, dose de N, teor de N foliar, matéria seca e produtividade. Notou-se que o NDVI tem maior potencial para uso nas culturas de trigo, tritcale e cevada, por serem culturas que possuem menos biomassa. Na cultura do milho o NDVI saturou mesmo com baixas doses de N devido à grande quantidade de biomassa.

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

NDVI BEHAVIOR OBTAINED FROM AN ACTIVE OPTICAL SENSOR IN CEREALS

Abstract

Several technologies have been developed to optimize fertilizers management in agriculture. Optical sensors are one of these tools that have potential to contribute to the nitrogen management. This work consisted in evaluate the NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) behavior in corn, wheat, tritcale and barley crops under different conditions, changing soil classes, nitrogen rates, nitrogen sources and varieties. The NDVI data were collected from two to three times for each season with a commercial active optical sensor. Statistical analyses were conducted by regression, correlation and Tukey test to contrast the analyzed variables, NDVI, N rate, leaf N content, dry matter and yield. It was noticed that the NDVI has more potential use for wheat, tritcale and barley crops, because they produce less biomass. For corn the NDVI saturated even under low rates of nitrogen, due its high level of biomass.

Keywords: Vegetation index; Remote sensing; Precision agriculture

3.1 Introdução

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 topografia, amostragem de solo e dados históricos de produtividade (WELSH et al., 2003).

Mapas de produtividade podem fornecer uma base útil para a aplicação de doses variáveis de fertilizantes, pois integram fatores de solo, topografia, cultura a 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.

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

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).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta acurada para o monitoramento da cultura do trigo. 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). Araújo (2004) utilizou videografia aérea com uma câmera CCD

multiespectral montada em um avião e obteve boas correlações entre as imagens e a produtividade de trigo e soja na região dos Campos Gerais do Paraná.

A clorofila absorve a luz incidente nas bandas do azul e vermelho e reflete a luz na banda do verde. As quantidades de luz azul e vermelha absorvidas pela folha são proporcionais à quantidade de clorofila nas folhas. A refletância no infravermelho próximo é influenciada pelas células do mesófilo (INMAN et al., 2005).

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 à 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 agrônômica, 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).

Visando adaptar tais tecnologias para as condições brasileiras, para aplicação de nitrogênio em taxa variável, foi realizada uma bateria de ensaios em diferentes condições e localidades. Estes ensaios serviram para avaliar o potencial das leituras realizadas com um sensor ótico ativo nas culturas de milho, trigo, triticale e cevada, correlacionando o NDVI gerado pelo sensor com a produtividade, concentração de nitrogênio nas folhas, matéria seca e diferentes doses de nitrogênio.

3.2 Material e Métodos

O trabalho foi realizado na região dos Campos Gerais, na Região Centro-Sul do Estado do Paraná (BR), na área de atuação da Fundação ABC, com campos demonstrativos e experimentais instalados nos municípios de Arapoti, Castro, Ponta Grossa e Tibagi, no estado do Paraná e um campo demonstrativo e experimental em Itaberá, no Estado de São Paulo.

Essa região possui condições edafoclimáticas bastante favoráveis à produção de milho. De acordo com Gimenez (2006) a produtividade média de milho na região foi de 8,3 t ha⁻¹ contra apenas 3,4 t ha⁻¹ da média nacional, e a produtividade de trigo também foi superior à média nacional, com 3,0 t ha⁻¹ contra 1,9 t ha⁻¹.

O sensor ótico ativo utilizado foi o GreenSeeker Hand HeldTM (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA). É um sensor portátil (Figura 1), composto por uma caixa de controle (que contém uma bateria e uma placa que faz a interface do sensor com conectores externos), o sensor propriamente dito e um computador manual ou PDA (*Personal Digital Assistants*). A conexão entre a caixa de controle e o PDA é feita por um cabo serial (RS232) com baud rate de 38.400. O sensor possui dois LED's (*Light Emitting Diodes*) que emitem radiação ativa em dois

comprimentos de onda centralizados no vermelho (660 nm) e no infravermelho próximo (770 nm), com a largura de banda com aproximadamente 25 nm. A magnitude da luz refletida pelo alvo é medida por um fotodiodo detector, então a caixa de controle determina os valores de refletância para as duas bandas e calcula o índice de vegetação. Os dados de saída incluem cinco índices de vegetação, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), RVI (*Ratio Vegetation Index*), SA-NDVI (*Soil Adjusted*), IRVI (*Inverse Ratio*) e o WDR-NDVI (*Wide Dynamic Range*) (NTech Industries, 2007). Entretanto, o sensor trabalha com apenas dois índices por vez, e para este trabalho foram utilizados apenas os dados do NDVI. Os dados são coletados dinamicamente a uma distância de 0,80 a 1,2 m entre o sensor e o alvo.

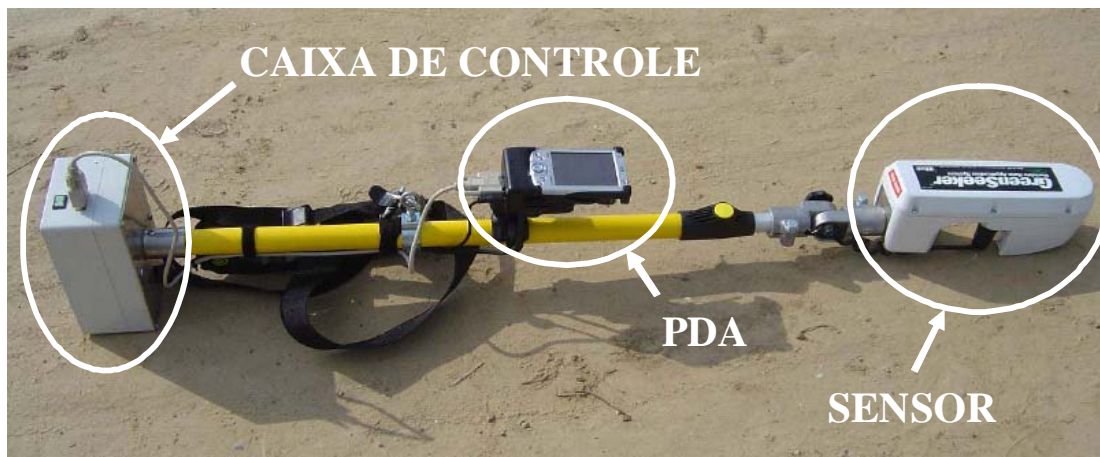


Figura 1 – Sensor ótico ativo GreenSeeker Hand Held™

A análise dos dados para todos os ensaios foi feita com o software Statistical Analysis System (SAS) (SAS, 2001). Calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) para os gráficos com teor de N foliar, matéria seca e produtividade, correlacionados com o NDVI, por serem variáveis mensuráveis e passíveis de erro. 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 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).

3.2.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo

O experimento foi realizado no Campo Demonstrativo e Experimental de Castro, PR (24° 51' 20" S, 49° 55' 52" W), durante a safra de inverno de 2006. Foram montados dois ensaios iguais em duas classes de solo distintas, Latossolo Bruno distrófico (LBd) e Cambissolo Húmico distrófico (CHd), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

A variedade de trigo utilizada foi a Coodetec CD 111. A semeadura foi realizada no dia 20/06/06 para uma população esperada de 350 plantas m⁻², com 120 kg ha⁻¹ de sementes com 90% de germinação, vigor de 82% e massa de mil sementes de 28 g. O espaçamento entre fileiras foi de 0,17 m.

A adubação de base foi de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O. As doses de nitrogênio aplicadas na semeadura, na forma de uréia, foram 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ e uma testemunha sem aplicação de nitrogênio. As parcelas com dimensões de 5 x 3 m foram dispostas em blocos inteiramente casualizados com cinco repetições.

Nos dias 11/08/06 e 04/09/06 (52 e 76 DAS) foram coletadas amostras da folha bandeira de cada tratamento, sendo 10 folhas coletadas por parcela para análise dos teores de nitrogênio no tecido. Devido à geada ocorrida na região no dia 05/09/06 (77 DAS), que comprometeu a produtividade, foram coletadas amostras para determinação da matéria seca dos tratamentos no dia 22/09/06, em áreas de 0,68 m², compostas por quatro linhas de um metro linear.

As leituras do NDVI foram realizadas manualmente (Figura 2) em três épocas (25/07/06, 11/08/06 e 04/09/06, correspondendo a 35, 52 e 76 DAS) e com duas leituras por parcela, utilizando o sensor ótico ativo. As parcelas foram colhidas integralmente, mas descontando a área colhida anteriormente para determinação da matéria seca.



Figura 2 – Coleta de dados com o sensor óptico ativo no Experimento 1

3.2.2 Experimento 2 – Trigo: Fontes de N e épocas de aplicação do fertilizante

O experimento foi realizado no Campo Demonstrativo e Experimental de Arapoti, PR (24° 11' 35" S, 49° 52' 35" W), durante a safra de inverno de 2006. O ensaio foi montado com a variedade de trigo OR1, com espaçamento de 0,17 m entre fileiras e densidade de 70 plantas por metro linear. As parcelas tinham dimensões de 5,78 x 6 m, dispostas em blocos casualizados com quatro repetições. A adubação de base foi de 200 kg ha⁻¹ da fórmula 10-20-20, e para os tratamentos foram aplicadas doses variadas de N obtidas de quatro fontes diferentes, e em duas épocas diferentes. As fontes de N utilizadas foram o nitrato de amônio e uréia (sólidos) e o uran (nitrato de amônio + uréia) e Nitro LL (nitrato de amônio + uréia + inibidor de urease (N-N-Butyl)-thiophosphoric triamide) + inibidor de nitrificação (N-methyl pirrolidone)) que são líquidos, com doses de 0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ aplicadas em pré-semeadura e no perfilhamento. A semeadura foi realizada no dia 23/05/06, e as leituras do NDVI foram realizadas em duas épocas, a primeira no dia 26/07/06 (64 DAS) e a segunda no dia 12/08/06 (81 DAS). Foram feitas duas leituras por parcela, utilizando o sensor óptico ativo. As parcelas foram colhidas integralmente para obtenção dos dados de produtividade.

3.2.3 Experimento 3 – Trigo: Influência de variedades

Este experimento foi realizado no Campo Demonstrativo e Experimental de Arapoti, PR (24° 11' 35" S, 49° 52' 35" W), durante a safra de inverno de 2006. O ensaio foi montado com sete das variedades de trigo mais cultivadas na região, sendo elas: Avante, Alcover, OR1, Ônix e Supera da OR melhoramento de sementes, Coodetec CD 111 e Embrapa BRS 208. A semeadura foi realizada no dia 18/05/06 com espaçamento de 0,17 m entre fileiras. Os demais tratamentos culturais foram os mesmos para todas as variedades. As parcelas tinham dimensões de 5 x 1,53 m, dispostas em blocos com três repetições. As leituras do NDVI foram realizadas em 26/07/06 (69 DAS) e 12/08/06 (86 DAS), com apenas uma leitura por parcela, utilizando o sensor óptico ativo. A colheita do experimento foi realizada durante o mês de outubro, de acordo com o ponto de colheita de cada variedade.

Com os dados obtidos neste ensaio foi gerado um gráfico exponencial entre o INSEY (*in-season estimate of yield*) e a produtividade. O INSEY foi calculado segundo a metodologia de RAUN et al. (2002), dividindo o NDVI de cada parcela pelo número de dias da semeadura até a leitura; neste caso foi utilizada a leitura realizada aos 86 DAS. A partir deste gráfico pode-se estimar o potencial produtivo da cultura sob várias condições de desenvolvimento, épocas de semeadura e datas de leituras.

3.2.4 Experimento 4 – Milho: Doses de nitrogênio

O experimento foi realizado no Campo Demonstrativo e Experimental de Ponta Grossa, PR (25° 00' 42" S, 50° 09' 19" W), durante a safra de verão de 2006/2007. O cultivar de milho utilizado foi o AG-8021; a semeadura foi feita no dia 22/09/06, após rotação de culturas Trigo – Soja – Aveia Preta – Milho. O espaçamento entre fileiras foi de 0,80 m, com população de 65.000 plantas ha⁻¹. A adubação de base foi de 127 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 116 kg ha⁻¹ de K₂O. As doses de nitrogênio aplicadas na semeadura, na forma de uréia, foram 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ e uma testemunha sem aplicação de nitrogênio. As parcelas tinham dimensões de 3,2 m x 5 m com cinco repetições de cada tratamento.

As leituras do NDVI foram realizadas em três épocas (25/10/06, 10/11/06 e 27/11/06, correspondendo a 33, 49 e 66 DAS) com quatro leituras por parcela, utilizando o sensor óptico

ativo, sendo as leituras feitas manualmente. As amostras foliares foram coletadas em duas épocas (49 e 66 DAS) com 10 folhas por parcela. Ao final do ciclo foram colhidas duas linhas de cinco metros dentro de cada parcela.

3.2.5 Experimento 5 – Triticale e Cevada: Doses de nitrogênio

O experimento foi instalado na safra 2006/07 no Campo Demonstrativo e Experimental de Itaberá, SP (24° 04' 02" S, 49° 09' 19" W). As cultivares utilizadas foram BRS-203 (triticale) e BRS-195 (cevada), com semeadura em 18/04/07 com espaçamento de 0,17 m entre fileiras e densidade de 70 plantas m⁻¹. A adubação de base foi 89 kg ha⁻¹ de uréia, 300 kg ha⁻¹ de Super Simples e 100 kg ha⁻¹ de KCl. Os tratamentos consistiram de cinco doses de N para o triticale, aplicadas em cobertura no perfilhamento, complementares aos 40 kg ha⁻¹ de N aplicados na semeadura. Para a cevada foram quatro doses de N aplicadas em pré-semeadura e no perfilhamento. As doses de N foram 0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ para o triticale e 0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ para a cevada, com quatro repetições.

Foi feita uma amostragem foliar aos 76 DAS para análise dos teores de N na folha índice (primeira folha abaixo da espiga), na qual foram coletadas 50 folhas por parcela. A coleta de dados com o sensor ótico ativo foi realizada aos 85 DAS, com duas leituras por parcela. As parcelas tinham dimensões de 3 x 5 m, e a colheita foi realizada com uma colhedora de parcelas na parcela inteira.

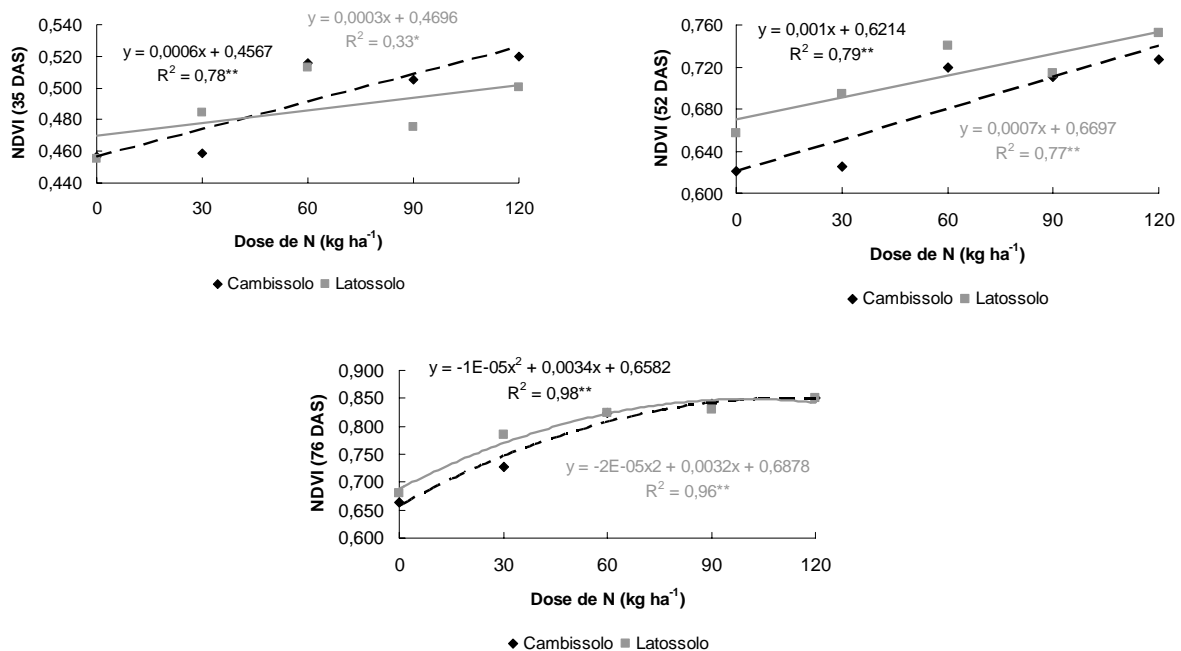
3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo

As análises de regressão entre a dose de nitrogênio aplicada na semeadura e o NDVI para as duas classes de solo estão apresentados na Figura 3. Com exceção das leituras realizadas no Latossolo, aos 35 DAS, com $R^2 = 0,33$, todas as demais leituras mostram regressão linear ou polinomial entre o NDVI e as doses de nitrogênio aplicadas no momento da semeadura, com R^2 acima de 0,75 resultados superiores aos encontrados por Wright et al. (2004), que encontraram R^2

= 0,63 para a análise de regressão entre o NDVI obtido pelo mesmo sensor e as doses de nitrogênio aplicadas em trigo.

Analisando as curvas da Figura 3, observa-se uma tendência no aumento da resposta do NDVI à dose aplicada em relação ao desenvolvimento da cultura. Aos 76 DAS a relação entre NDVI e doses de N apresentou uma regressão polinomial de segundo grau e atingiu coeficientes de determinação de 96 e 98%, respectivamente, para o Latossolo e o Cambissolo. Isto se deve ao fato de que para baixos índices de área foliar, a discriminação entre diferentes níveis de nitrogênio se torna mais difícil, devido à influência do solo exposto na entrelinha e presença de falhas na emergência das plantas, o que resulta em valores do NDVI mais baixos. Já com o desenvolvimento da parte aérea da cultura, é possível determinar com mais acurácia a variabilidade espacial do nitrogênio no trigo.



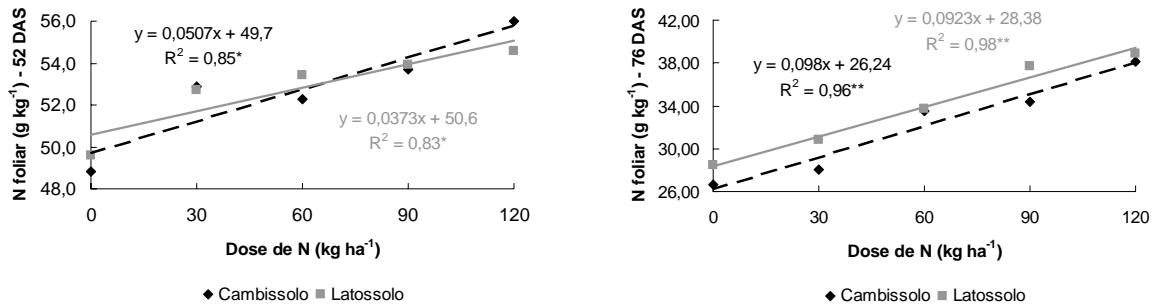
(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

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

Figura 3 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio aplicadas na semeadura de trigo e o NDVI em três épocas e para as duas classes de solo

As análises de regressão entre as doses de N aplicadas e os teores de N nas folhas, obtidos por amostragem foliar da folha bandeira, estão apresentadas na Figura 4. Para estes resultados também foram encontradas regressões significativas, com um R^2 de 0,96 e 0,98 para o

Cambissolo e o Latossolo, respectivamente. Aos 76 DAS, observa-se também que o Latossolo apresentou maiores valores de nitrogênio nas folhas.



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

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

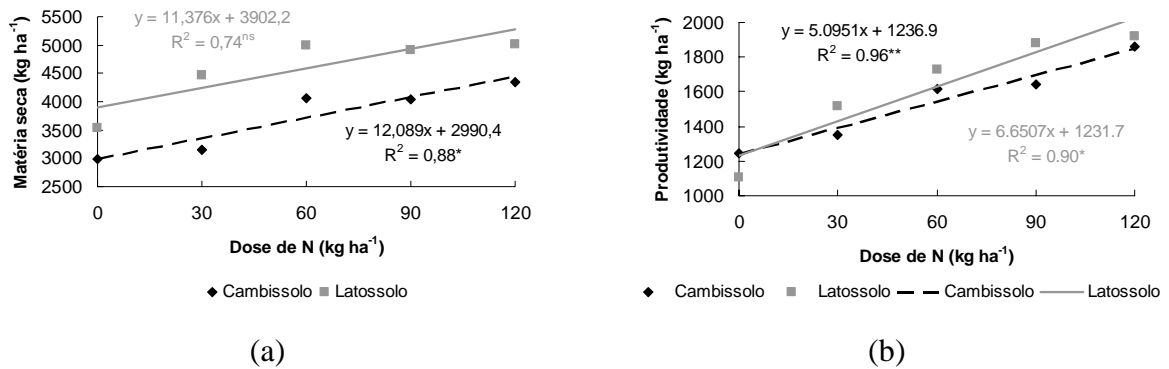
Figura 4 – Análise de regressão entre as doses de N aplicadas na semeadura de trigo e os teores de N nas folhas coletadas em duas épocas e para as duas classes de solo

O coeficiente de determinação da relação entre as doses de N aplicadas e a matéria seca (Figura 5), foram de 88% para o Cambissolo e 74% para o Latossolo, porém, este último não foi significativo. Já para a produtividade foram encontrados valores de R^2 acima de 90%. Os baixos valores de produtividade, apesar de estarem dentro da média nacional, ficaram abaixo da média da região devido à uma geada ocorrida quando a cultura se encontrava aos 77 DAS, no final do emborrachamento. A geada é um dos fenômenos mais relevantes para a cultura do trigo, sendo determinante da época de semeadura para a Região do Sul do País. Ocasionalmente causam danos como estrangulamento nos colmos, impedimento na circulação da seiva para os grãos e diminuição da síntese de fotoassimilados (JUNGES et al., 2007).

É notável também o maior acúmulo de matéria seca e maior resposta ao nitrogênio em relação à produtividade no Latossolo. Estes resultados provavelmente são devido às características distintas de cada classe de solo. De acordo com Bartholomeu et al. (1965), para sistemas de produção com clima, vegetação e topografia 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.

A Figura 6 mostra as correlações entre os teores de N foliar coletado em duas épocas e a matéria seca com a produtividade. Como o comportamento espectral de uma cultura está intimamente ligado à quantidade de nitrogênio nas folhas e a biomassa, os altos coeficientes de correlação encontrados nestes gráficos, mostram que estimando qualquer desses dois parâmetros, pode-se chegar a uma estimativa acurada da produtividade.

Para as correlações entre o NDVI coletado em duas épocas e os teores de N foliar (Figura 7a e 7b), com exceção da leitura aos 52 DAS no Cambissolo, que apresentou um NDVI não significativo ao nível de 5% de probabilidade com o teor de N foliar ($r = 0,71$), os resultados se mostraram superiores aos resultados obtidos por Wright et al. (2004) ($R^2 = 0,66$) com coeficiente de correlação que variou entre 0,88 e 0,95. Freeman et al. (2003) chegaram a um $R^2 = 0,57$ e 0,48 quando as leituras foram realizadas nas fases do trigo Feeks 9 (12 locais e duas safras) e Feeks 10,5 (14 locais e duas safras), respectivamente, utilizando a média do NDVI de todas as regiões. Moges et al. (2004) com leituras em Feeks 6 mostrou um $R^2 = 0,91$. Neste caso, o gráfico aos 76 DAS mostra que a correlação para o Cambissolo foi maior que para o Latossolo.

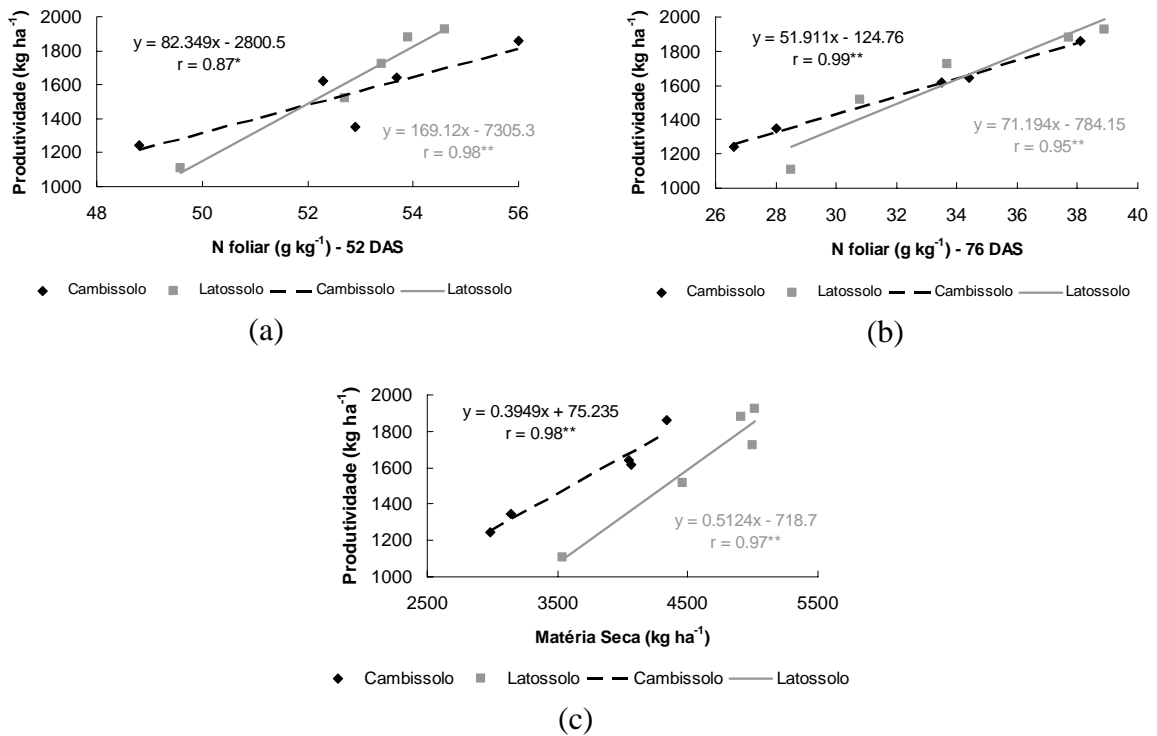


(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

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

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

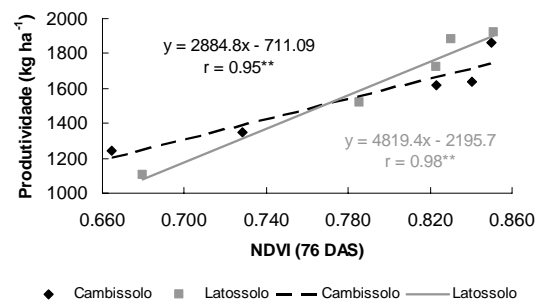
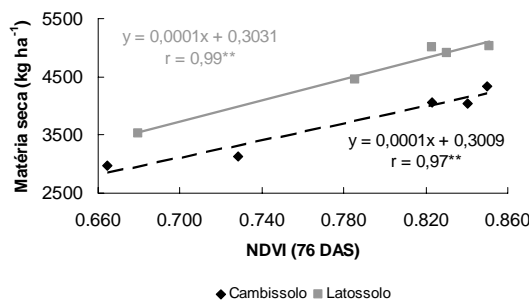
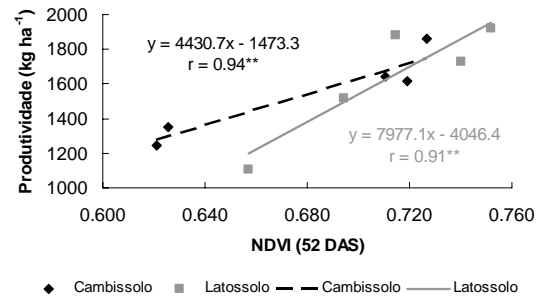
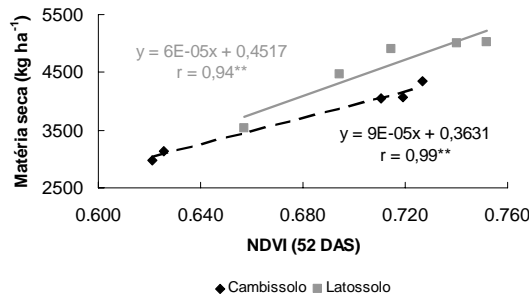
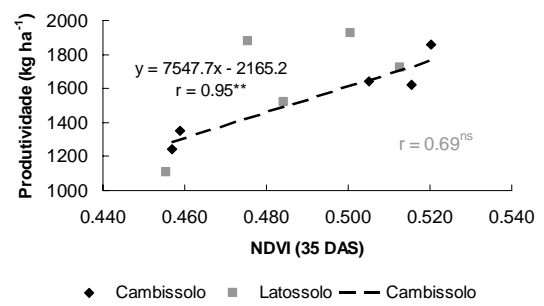
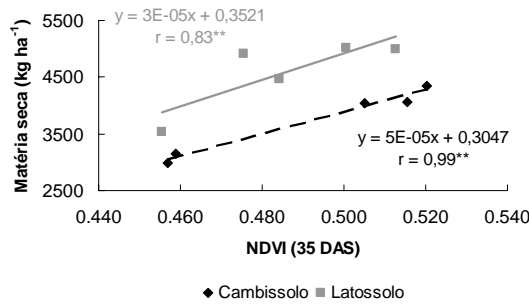
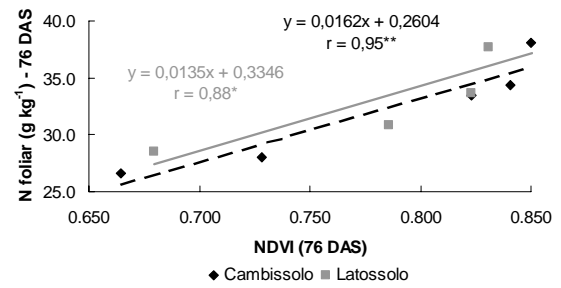
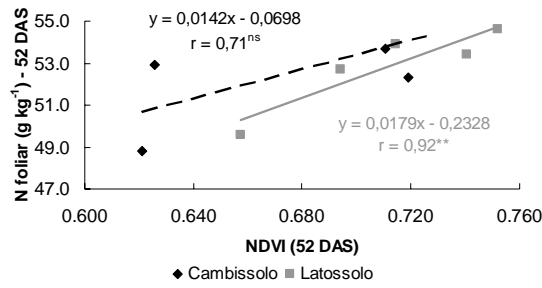
Figura 5 – Análise de regressão entre as doses de N aplicadas na semeadura de trigo e a matéria seca (a) e a produtividade (b) para as duas classes de solo



(*) 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 6 – Gráficos de correlação entre os teores de N foliar e a produtividade de trigo (a) e (b) em duas épocas e um gráfico de correlação entre a matéria seca e a produtividade (c) nas duas classes de solo



(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 7 – Gráficos de correlação entre o NDVI e os teores de N nas folhas bandeira (a) e (b); matéria seca (c), (d) e (e) e produtividade (f), (g) e (h) para a cultura do trigo

A correlação entre o NDVI e a produtividade (Figuras 7f, 7g e 7h) mostrou diferença entre as duas classes de solo somente na leitura realizada aos 35 DAS, quando a correlação para o Latossolo não foi significativa. Mas semelhante à matéria seca, a melhor época para estimar a produtividade seria aos 76 DAS, mostrando correlações de 95 e 98% para o Cambissolo e o Latossolo, respectivamente.

Com estes resultados, pode-se afirmar que o NDVI não é apenas dependente do teor de nitrogênio nas plantas, mas sim de qualquer fator externo que tenha influência sobre a biomassa. Um exemplo claro é que as leituras realizadas no início do ciclo da cultura, apresentam valores absolutos do NDVI mais baixos, que foram aumentando junto com o desenvolvimento das plantas de trigo. Aos 76 DAS, com menor influência do solo exposto nas entrelinhas e falhas, o sensor mostrou correlações mais significativas com as diferentes doses de N aplicadas.

Com 76 DAS, a cultura se encontrava em um estágio de desenvolvimento que tornou possível estimar seu estado nutricional em relação ao nitrogênio, a produção de biomassa e a produtividade, podendo assim determinar a variabilidade espacial da cultura e propor doses de fertilizantes a serem aplicadas para corrigir as deficiências. Entretanto, para a aplicação de fertilizantes em tempo real, se faz necessário ter a calibração do equipamento para diversos sistemas de produção, com diferentes culturas, variedades, solos, fontes de nitrogênio, entre outros, pois ficou evidente o diferente comportamento espectral da cultura entre as duas classes de solo estudadas.

Os resultados estão de acordo com os encontrados por Mahey et al. (1991), que obtiveram alta correlação entre o NDVI e a produtividade de trigo, mostrando o potencial de prever a produtividade da cultura utilizando dados de sensoriamento remoto. Também observaram que as correlações mais altas ocorreram depois de 75 DAS.

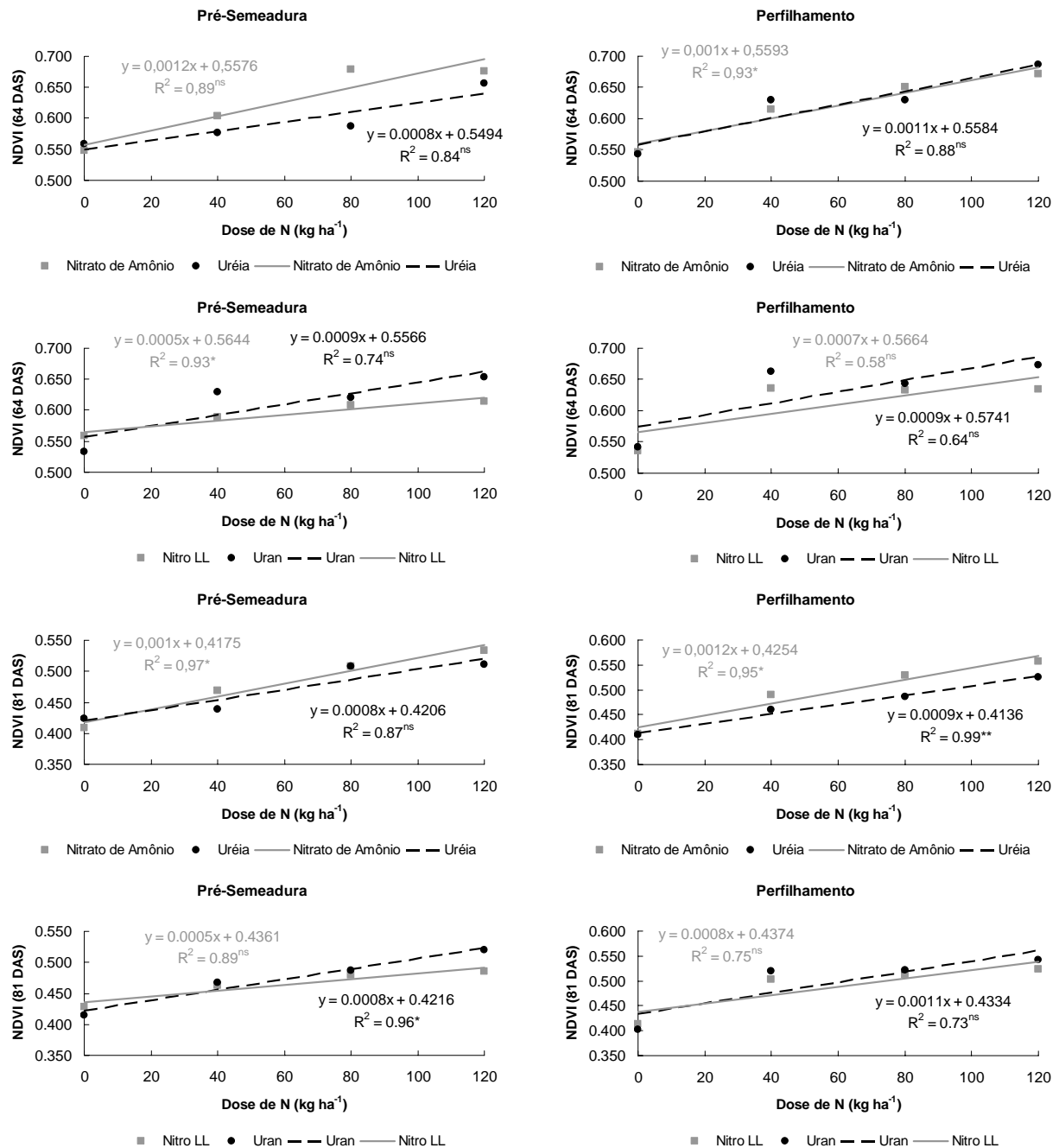
As diferenças nos valores do NDVI obtidos nas diferentes fases de desenvolvimento do trigo, devido à influência, não somente do conteúdo de nitrogênio nas plantas, mas também da biomassa, ao utilizar estes índices para uma recomendação de adubação, exige-se grande atenção. Isso porque outros fatores que dificultem ou reduzam a absorção de nitrogênio pelas plantas ou afetem seu desenvolvimento, como deficiência hídrica, volatilização, desnitrificação, lixiviação ou mesmo deficiências de outros nutrientes, além de muitos outros fatores, podem levar a aplicação de fertilizantes nitrogenados e não obter resposta em produtividade.

3.3.2 Experimento 2 – Trigo: Fontes de N e épocas de aplicação do fertilizante

Na Figura 8 são apresentados os gráficos de regressão entre as doses de N aplicadas em duas épocas (pré-semeadura e perfilhamento) com as leituras do NDVI realizadas também em duas épocas (64 e 81 DAS), para as quatro fontes de N. Para a leitura do NDVI sendo realizada aos 64 DAS houve apenas regressão significativa para o Nitro LL aplicado em pré-semeadura ($R^2 = 0,93$) e para o nitrato de amônio aplicado no perfilhamento ($R^2 = 0,93$). Na segunda leitura, aos 81 DAS, para os dois fertilizantes sólidos, apenas para a uréia aplicada em pré-semeadura não foi significativo, já para os dois fertilizantes líquidos, apenas o Nitro LL teve regressão significativa; isso ocorreu quando foi aplicado em pré-semeadura.

A Figura 9 mostra as análises de regressão entre as doses de N aplicadas em pré-semeadura e no perfilhamento com a produtividade. A baixa produtividade obtida pode ser explicada por uma estiagem ocorrida no início da safra, ocasionando em um déficit hídrico que pode ter prejudicado o desenvolvimento da cultura. A falta de água pode ser responsável também pelos resultados das análises de regressão entre as doses de N e produtividade, quando os fertilizantes foram aplicados em pré-semeadura, onde nenhum coeficiente de determinação (R^2) foi significativo. Mas quando os fertilizantes foram aplicados no perfilhamento, a regressão foi altamente significativa para o nitrato de amônio e o Nitro LL, com $R^2 = 0,99$ para ambos. Este resultado, provavelmente se deve ao fato da menor perda por volatilização destes dois fertilizantes em relação à uréia e ao uran.

A Figura 10 apresenta os gráficos de correlação entre as leituras do NDVI realizadas aos 64 e 81 DAS com a produtividade, para a aplicação das quatro fontes de N em pré-semeadura e no perfilhamento. Na primeira leitura, realizada aos 64 DAS, a correlação não foi significativa para as quatro fontes de N aplicadas em pré-semeadura, entretanto no perfilhamento a correlação foi altamente significativa para o nitrato de amônio e o uran. Já na segunda leitura, aos 81 DAS, apenas para o nitrato de amônio houve correlação significativa entre o NDVI e a produtividade quando aplicado em pré-semeadura. Quando as fontes de N foram aplicadas no perfilhamento, apenas para a uréia não houve correlação significativa.

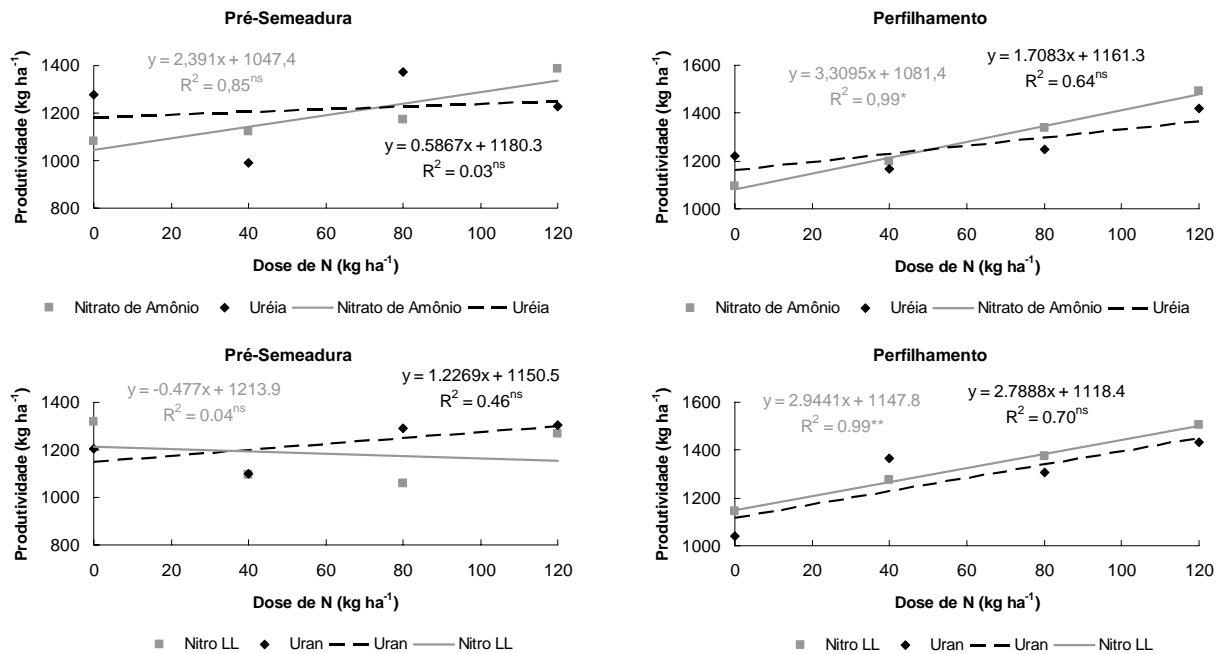


(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

(*) 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 8 – Análise de regressão entre as doses de N aplicadas em pré-semeadura e no perfilhamento do trigo e o NDVI com duas leituras (64 e 81 DAS) para as quatro fontes de N



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

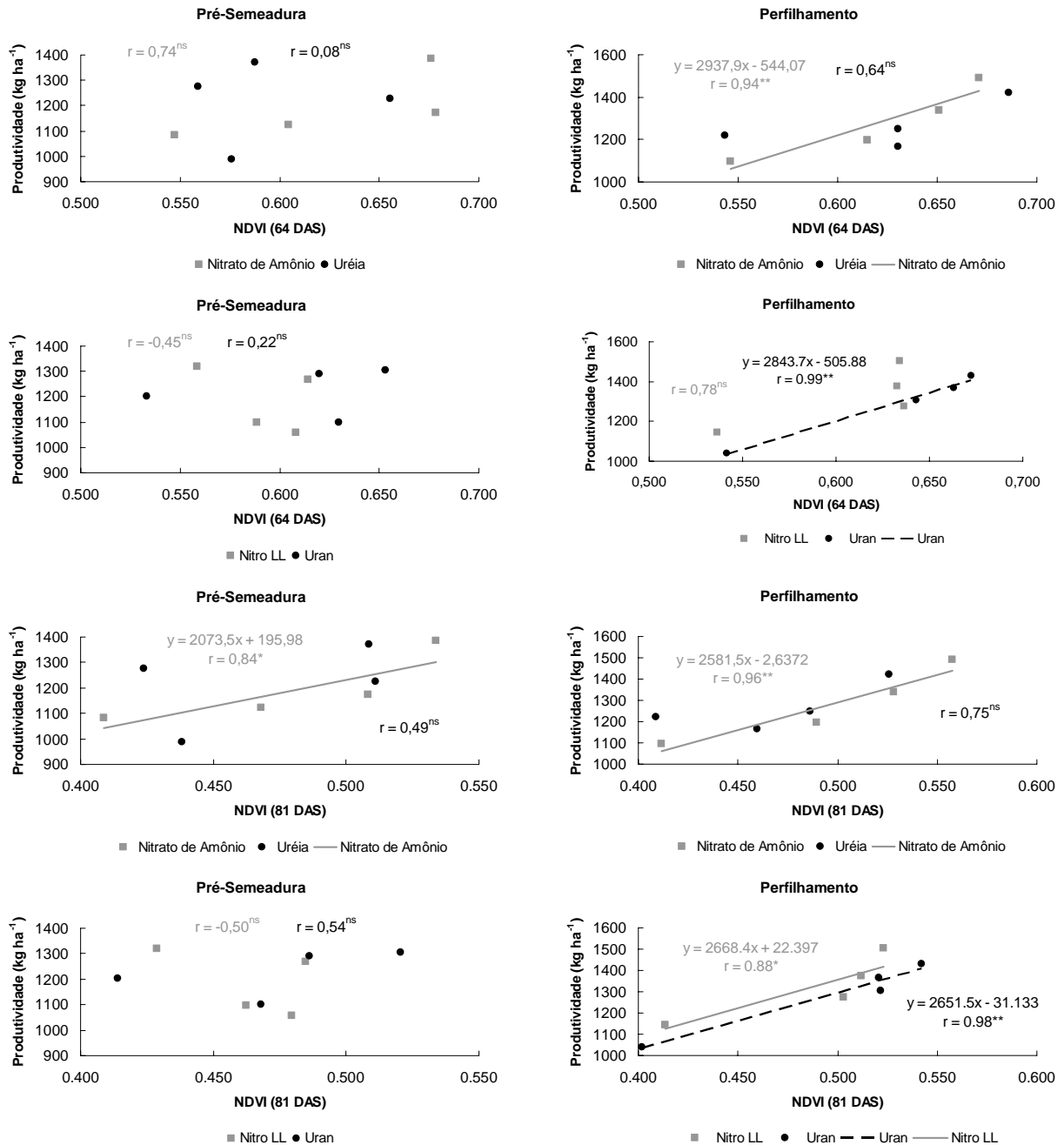
(*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

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

Figura 9 – Análise de regressão entre doses de N e produtividade de trigo em pré-semeadura e perfilhamento para as quatro fontes de N

Comparando as duas épocas de leitura do NDVI na aplicação em pré-semeadura, observa-se que na segunda leitura os valores do NDVI foram menores, pois o trigo já estava na fase final do florescimento e com reduzida área foliar. Entretanto, nesta fase, uma intervenção para uma nova aplicação de nitrogênio seria viável apenas se o objetivo fosse o aumento do teor de proteína nos grãos. Quando aplicado no perfilhamento, o comportamento das curvas das doses de N com o NDVI foram semelhantes para as duas leituras. No caso do Experimento 1, as regressões de doses de uréia com NDVI aplicadas em pré-semeadura foram altamente significativas a partir dos 52 DAS em dois solos diferentes. Deve-se salientar que a safra de 2006 foi atípica, devido à falta de chuva, o que pode ocasionar na redução da absorção do nitrogênio aplicado, implicando na queda de produtividade neste ano. Com esses resultados, pode-se afirmar que a leitura do NDVI do sensor pode estimar a produtividade independentemente da fonte de N utilizada, onde maior o NDVI maior a produtividade. Considerando essa correlação positiva, em uma leitura aos 64 dias após semeadura, em que a planta se encontra no estágio de alongamento, ainda é possível fazer uma aplicação de N visando o aumento de produtividade. Já aplicações tardias de N em cobertura, após a fase de emborrachamento, são ineficientes (EMBRAPA, 2000).

Sendo assim, o sensor se mostrou uma ferramenta com potencial para realizar o levantamento da variabilidade da cultura antes da colheita.



(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 10 – Gráficos de correlação entre o NDVI com duas leituras (64 e 81 DAS) e a produtividade de trigo para as aplicações de N em pré-semeadura e no perfilhamento e para as quatro fontes de N

3.3.3 Experimento 3 – Trigo: Influência de variedades

Os resultados de produtividade média e das leituras do NDVI, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados na Tabela 1. Foram encontradas diferenças entre as variedades, tanto nas leituras do NDVI (86 DAS) quanto na produtividade. Este fato vem reforçar a idéia da necessidade de uma calibração do sensor para diferentes variedades, por exemplo, o método utilizado por Raun et al. (2002). Essa calibração possivelmente reduziria efeitos não somente relativos às variedades, mas também a outros fatores particulares de cada lavoura, como o solo e clima.

Tabela 1 – Médias do NDVI e produtividade para cada uma das variedades

Variedades	NDVI (69 DAS)	NDVI (86 DAS)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
CD 111	0,829 A	0,741 A	3350 A
ÔNIX	0,822 A	0,737 A	3346 A
BRS 208	0,836 A	0,715 A	3066 A B
SUPERA	0,748 A	0,676 A B	2592 C
ALCOVER	0,803 A	0,654 A B	2950 B
OR 1	0,737 A	0,608 A B	2044 D
AVANTE	0,754 A	0,573 B	2278 D

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

A Figura 11 mostra o gráfico com os valores médios do NDVI e o coeficiente de variação das leituras, utilizando aproximadamente 110 valores do NDVI para cada variedade.

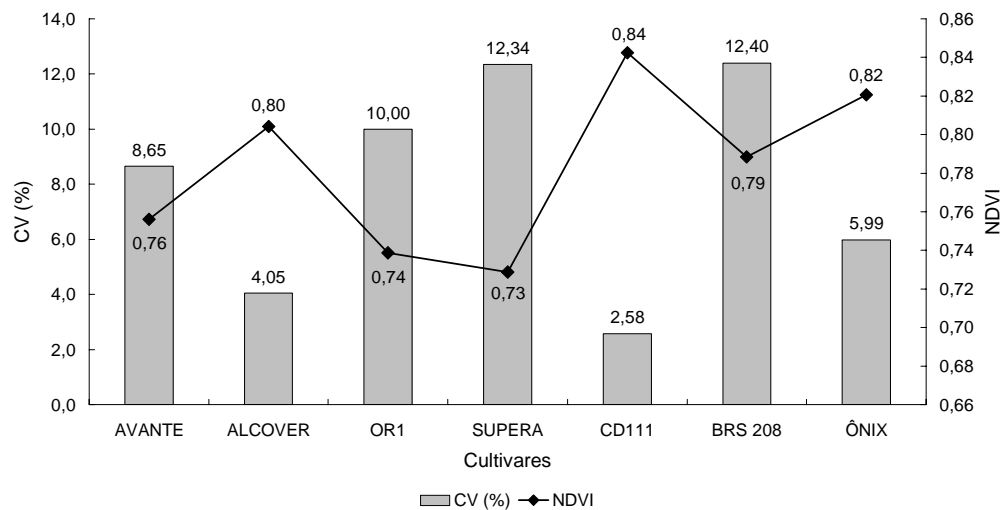


Figura 11 – Histograma com o coeficiente de variação e NDVI para as diferentes variedades de trigo

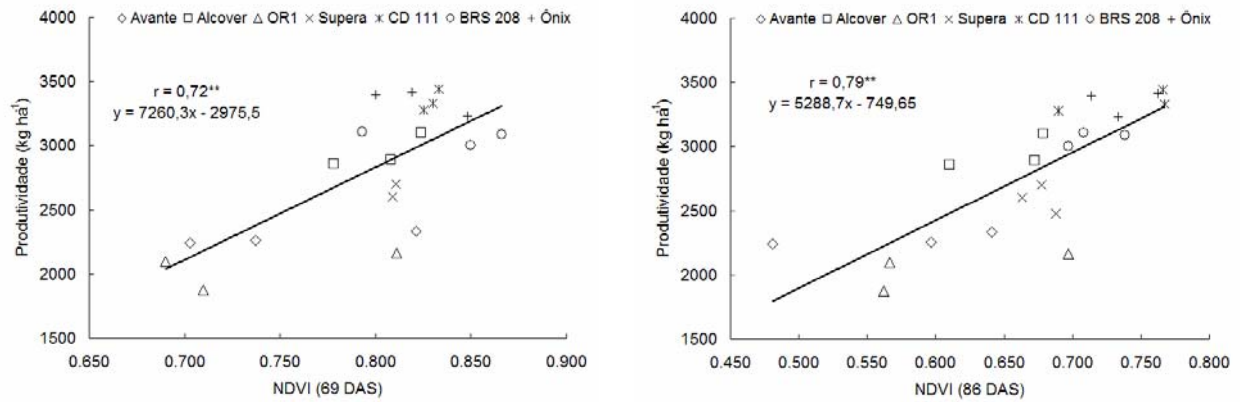
Com exceção da variedade BRS 208, há uma tendência entre os maiores valores do NDVI apresentarem um coeficiente de variação menor, provavelmente pelo melhor desenvolvimento da cultura e maior uniformidade de estande de plantas. Neste caso o CV se torna uma informação importante quando o objetivo é a aplicação de nitrogênio em taxa variável. Valores de CV mais altos poderiam indicar não apenas a variabilidade da cultura, com regiões de maiores necessidades de nitrogênio, mas também falhas de estande, o que ocasionaria a aplicação excessiva de N em áreas sem a presença de plantas ou com menor desenvolvimento. Seguindo a classificação de Pimentel-Gomes e Garcia (2002) a maioria das variedades apresentou baixo valor de CV (menor que 10%) e apenas duas variedades com CV médio (entre 10 e 20%).

A Figura 12 mostra o gráfico de correlação entre as leituras do NDVI realizadas em duas épocas (69 e 86 DAS) e a produtividade. Apesar da época da segunda leitura não permitir uma nova intervenção, esta foi avaliada por apresentar uma correlação maior com produtividade do que a primeira leitura, além de fornecer informações sobre a variabilidade espacial da produtividade.

Para a geração do gráfico de correlação foram utilizadas as leituras do NDVI de todas as sete variedades com suas respectivas produtividades. O fato de haver variedades com menores produtividades e baixos valores do NDVI e variedades com maiores produtividades e altos valores do NDVI, possibilitou a criação do modelo, uma vez que há uma regressão linear significativa. Através de modelos como este, espera-se estimar a produtividade antes do final da safra, em uma época onde seja possível intervir.

Gráficos semelhantes, gerados com as leituras do NDVI de diversas variedades e localidades vêm sendo utilizados por diversos autores para estimar a produtividade das culturas e recomendar as doses de nitrogênio (FREEMAN et al., 2003; MOGES et al., 2004; RAUN et al., 2001; INMAN et al., 2005).

A Figura 13 apresenta um gráfico exponencial entre o INSEY e a produtividade. O INSEY foi calculado dividindo os mesmos valores médios do NDVI utilizados na Figura 12 pelo número de dias desde a semeadura (86 dias).



(*) Significativo ao nível de 5% de probabilidade

(**) Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Figura 12 – Gráfico de correlação entre o NDVI e a produtividade de trigo

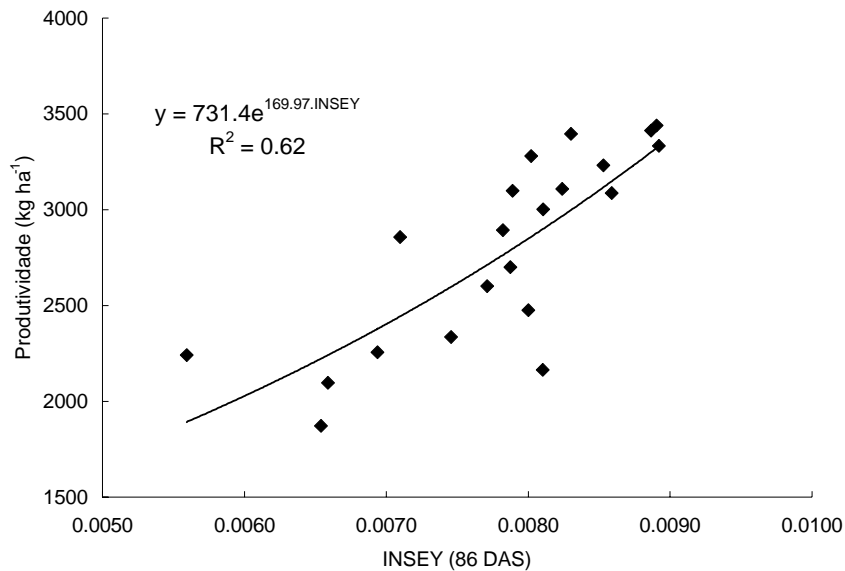


Figura 13 – Gráfico exponencial entre o INSEY calculado aos 86 DAS e a produtividade de trigo

A partir do gráfico da Figura 13 gerou-se um primeiro modelo para estimativa de produtividade na região dos Campos Gerais do Paraná, entretanto, para que este modelo se torne mais robusto deve ser alimentado com um maior número de leituras do NDVI em diferentes localidades, variedades e safras.

3.3.4 Experimento 4 – Milho: Doses de nitrogênio

A Figura 14 mostra os gráficos de dispersão entre as doses de nitrogênio e o NDVI obtido em três épocas (33, 49 e 66 DAS). Nenhum deles foi significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%. Ao contrário do trigo, não houve uma regressão positiva entre os dados. É possível observar que nas duas primeiras leituras, o NDVI obtido nas parcelas sem aplicação de N é mais baixo, enquanto que os valores do NDVI das quatro doses aplicadas são semelhantes. Na terceira leitura o sensor não foi capaz de identificar o tratamento sem aplicação de N.

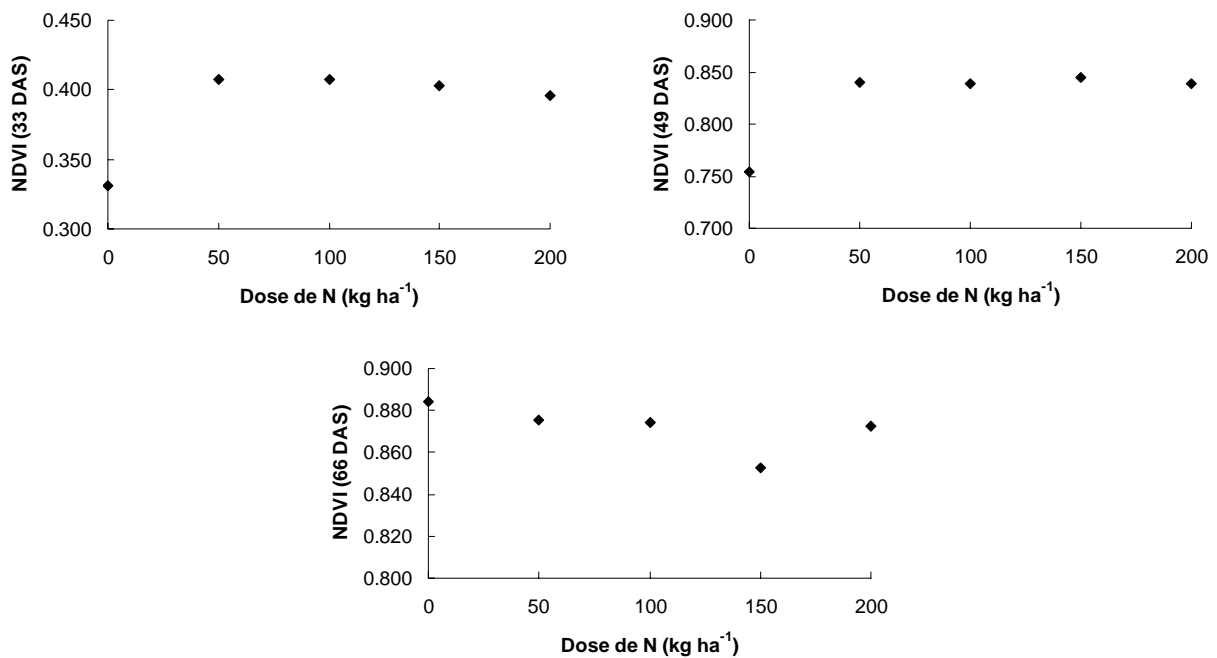
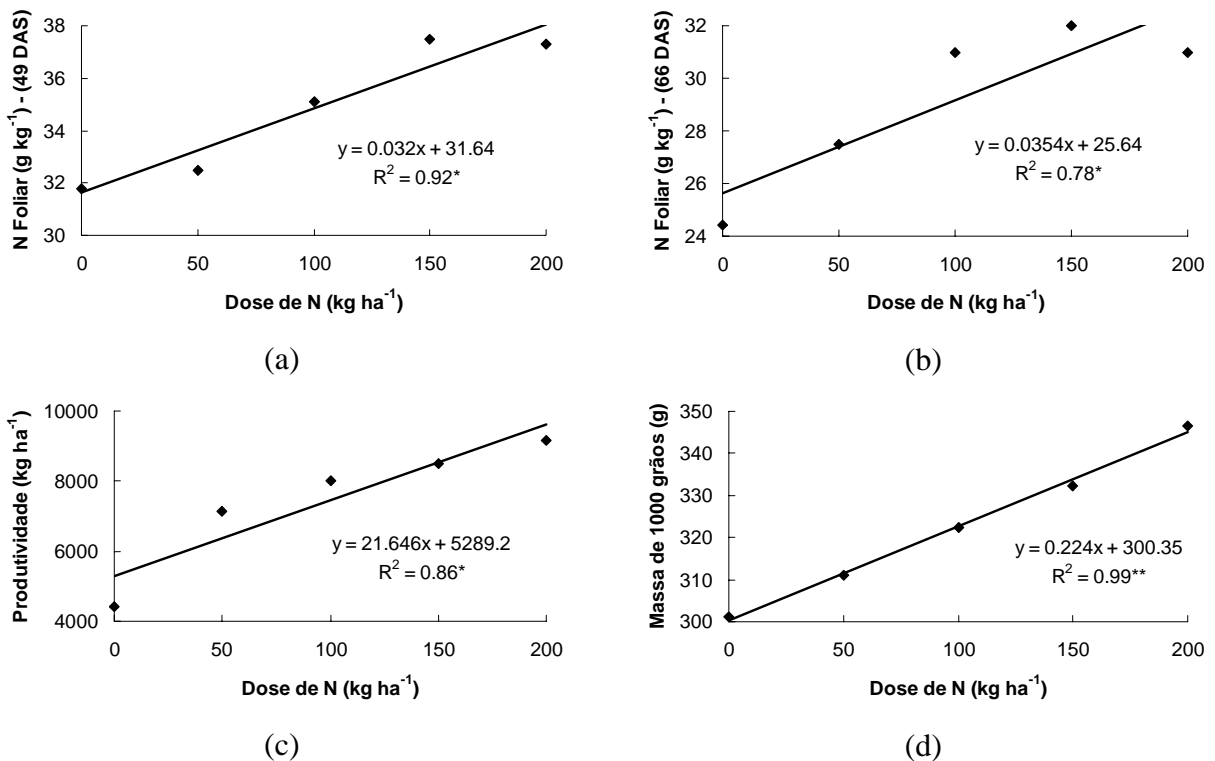


Figura 14 – Gráficos de dispersão entre as doses de nitrogênio aplicadas na semeadura de milho e as leituras do NDVI realizadas em três épocas

Este fato pode ser explicado pelo aumento de biomassa com o aumento das doses de N, nos quais mesmo os tratamentos com apenas 50 kg ha⁻¹ produziram biomassa suficiente para saturar o NDVI desde a primeira leitura. 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 (MYNENI et al., 1997).

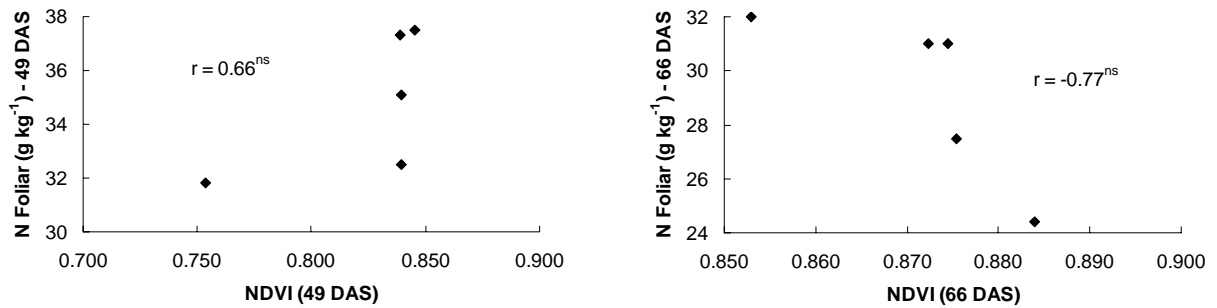
A Figura 15 apresenta as análises de regressão entre as doses de N e os teores de N foliar, produtividade e massa de mil grãos. Como as regressões foram significativas, esses resultados excluem a possibilidade da cultura não ter respondido à aplicação do fertilizante nitrogenado. Na Figura 15c é possível observar, ainda, que a produtividade não atingiu um patamar, ou seja, mesmo com uma produtividade de quase 10.000 kg ha⁻¹, com doses mais altas de N, possivelmente teriam sido obtidas produtividade mais elevadas.



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

Figura 15 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio e os teores de N foliar mensurados em duas épocas (a) e (b), produtividade (c), e massa de mil grãos (d) de milho

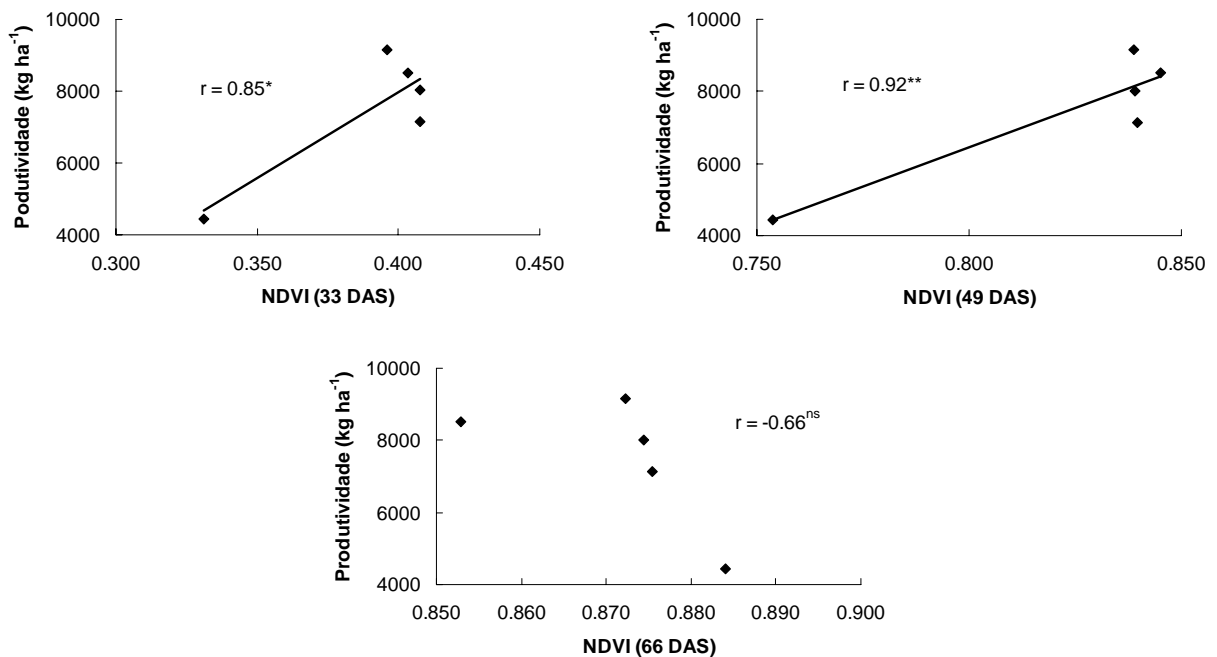
Na Figura 16 tem-se os gráficos de correlação entre o NDVI e os teores de N foliar obtidos em duas épocas (49 e 66 DAS), entretanto não houve correlação significativa para nenhuma das duas épocas.



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

Figura 16 – Gráficos de correlação entre o NDVI e os teores de N foliar em milho em duas épocas

Nos gráficos de correlação entre as três leituras do NDVI e a produtividade (Figura 17), apesar de serem significativos nas duas primeiras leituras, existe um grupo de quatro leituras do NDVI agrupadas em um lado do gráfico. Isso mostra que o sensor indica valores do NDVI semelhantes para quatro produtividades diferentes, não sendo possível gerar um modelo com estes dados como foi obtido para o trigo.



(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 17 – Gráficos de dispersão entre o NDVI coletado em três épocas e a produtividade de milho

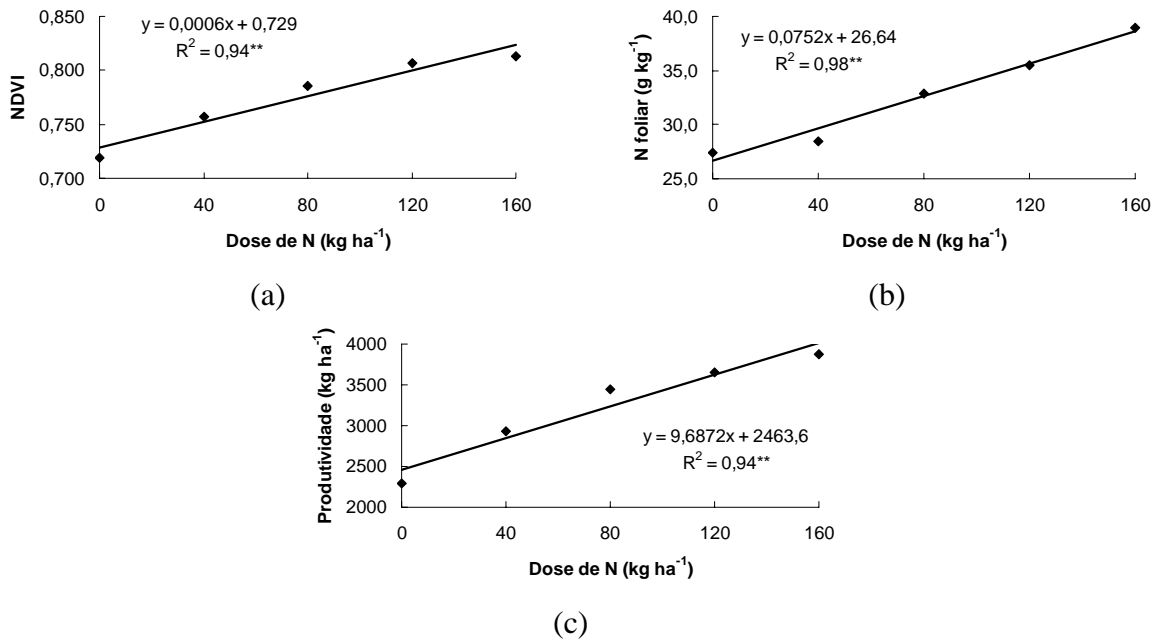
De acordo com Gitelson (2004), a vegetação verde tem forte absorção na região do vermelho do espectro (por volta de 670 nm); a refletância nesta faixa é baixa (3 a 5%). Na região do infravermelho próximo a vegetação apresenta uma alta reflexão da radiação incidente, atingindo entre 40 e 60%. Aumentando as doses de N, e conseqüentemente a biomassa da cultura, aumenta-se também a refletância no infravermelho próximo (HINZMAN et al., 1986). Além disso, o processo de normalização torna o NDVI insensível a variações na refletância no infravermelho próximo quando a refletância no infravermelho próximo é muito maior que a refletância no vermelho (GITELSON, 2004). Uma alternativa seria trabalhar com comprimentos de onda na banda do verde, por possuir refletância maior que a banda do vermelho e reduzir a diferença entre a refletância no visível e infravermelho próximo. Segundo Shanahan et al. (2001) o GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index* – calculado com a mesma equação do NDVI, porém, utilizando a banda do verde no lugar da banda do vermelho) apresenta maior correlação com a produtividade final em milho do que o NDVI em estádios de desenvolvimento mais avançados.

O índice de área foliar é geralmente definido como área foliar por área de solo (MYNENI et al., 1997). Alguns resultados de Gitelson (2004) mostram que o NDVI foi sensível às alterações no índice de área foliar somente no início do desenvolvimento da cultura, com índices de área foliar até 1,2. Em milho e soja, o NDVI atingiu valores máximos de 0,8 e manteve-se praticamente constante enquanto o IAF foi de 2 a 6. Quando o IAF > 2, tanto a refletância na banda do vermelho quanto o NDVI não apresentaram diferenças. Entretanto, a refletância na banda do infravermelho próximo continuou aumentando com o aumento do IAF.

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).

3.3.5 Experimento 5 – Triticale e Cevada: Doses de nitrogênio

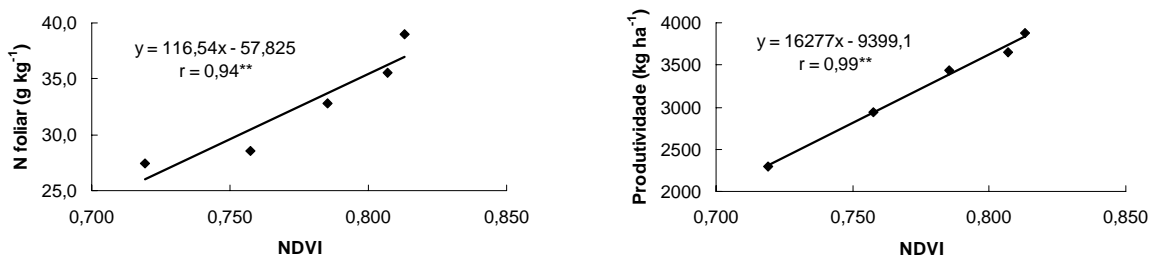
Assim como no trigo, o triticale mostrou altos valores de R^2 quando realizada a análise de regressão entre as doses de N e o NDVI, teores de N foliar e produtividade (Figura 18), com $R^2 > 0,94$. O gráfico entre dose de N e produtividade não atingiu um patamar, indicando que é possível que em doses mais altas pudessem ter sido obtidas maiores produtividades.



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

Figura 18 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio aplicadas e o NDVI (a), N foliar (b) e produtividade de triticale (c)

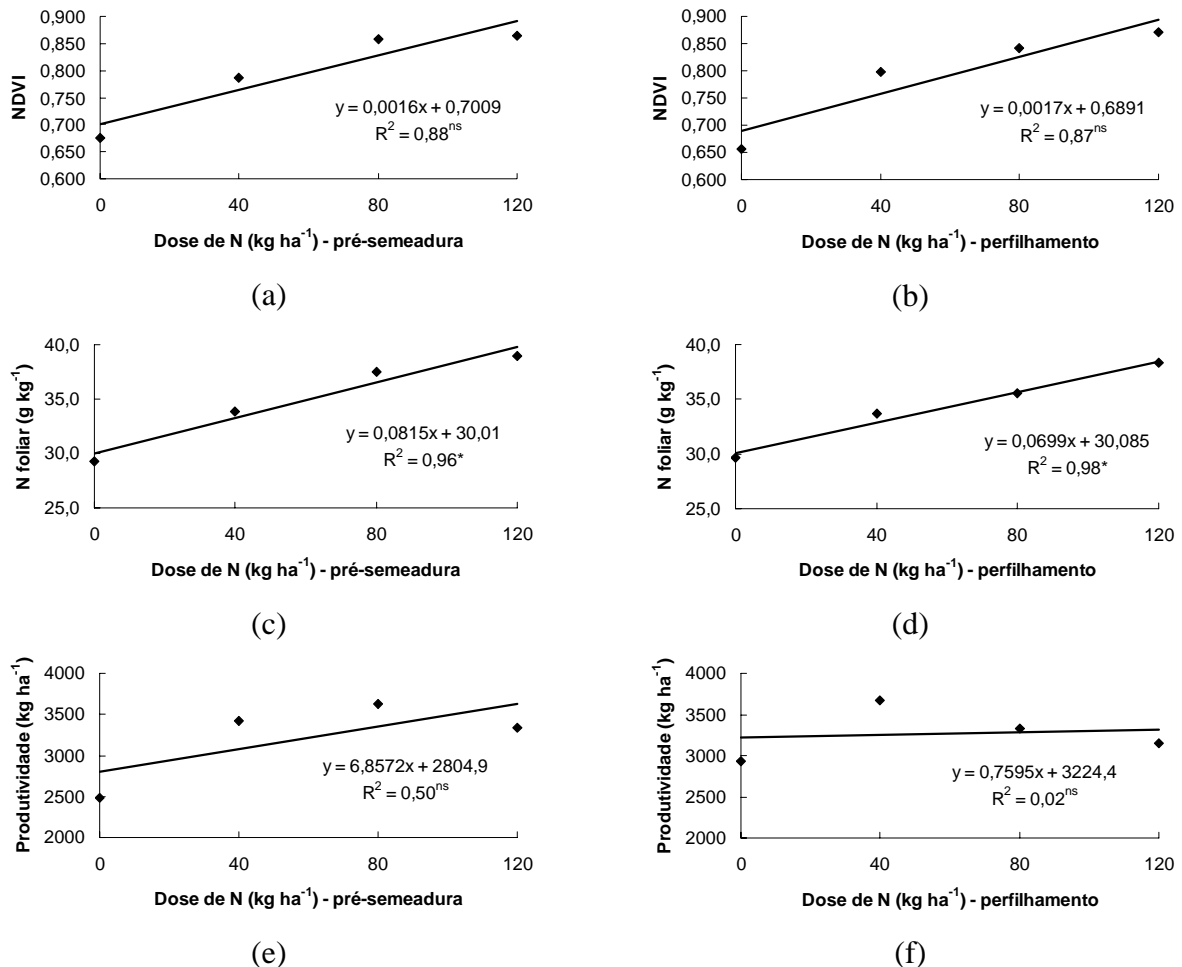
Na Figura 19 estão apresentados os gráficos de correlação entre o NDVI com os teores de N foliar e a produtividade para o triticale. Os altos valores de (r) indicam que é possível identificar diferentes níveis de adubação nitrogenada e produtividade na cultura do triticale, possibilitando utilizar o sensor para gerar um modelo de estimativa de produtividade e determinar as doses de N a serem aplicadas em taxa variável.



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

Figura 19 – Gráficos de correlação entre o NDVI e os teores de N foliar (a) e a produtividade (b) para o triticale

A cevada apresentou um comportamento diferente, não mostrando correlações significativas entre as doses de N com a produtividade e o NDVI, tanto aplicadas em pré-semeadura quanto no perfilhamento, devido à baixa resposta da cultura ao N neste ano. A Figura 20 apresenta as análises de regressão.

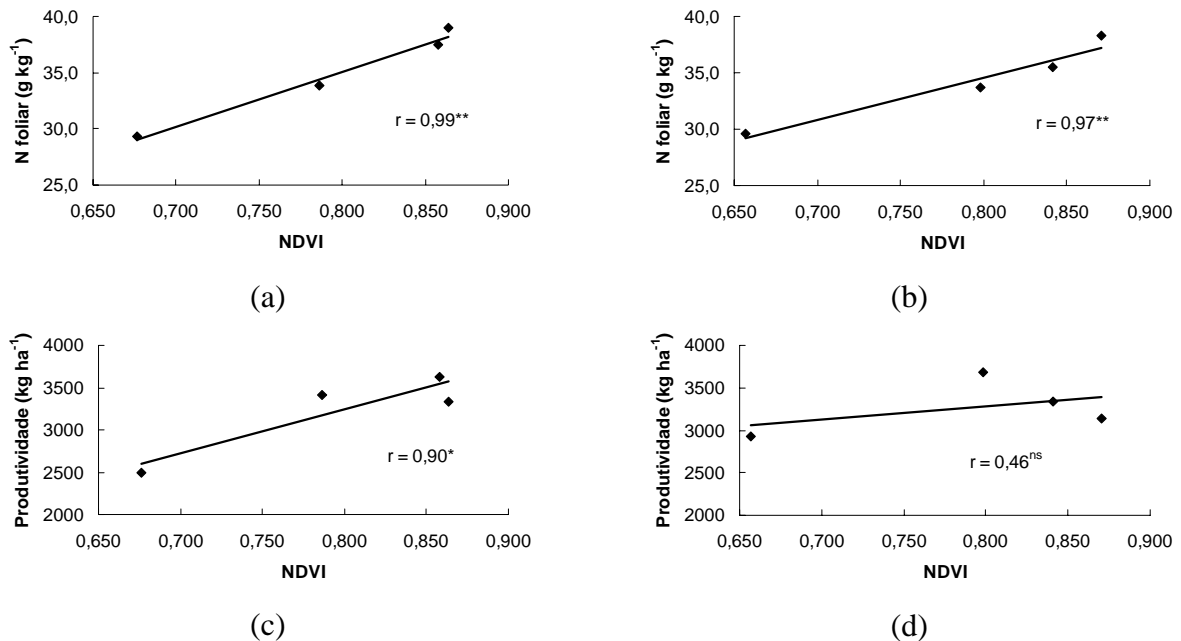


(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%.

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

Figura 20 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio aplicadas em pré-semeadura e no perfilhamento e o NDVI (a) e (b), N foliar (c) e (d) e produtividade (e) e (f) para a cevada

Entretanto, houve uma regressão significativa entre as doses de N e o teores de N da folha índice, com $R^2 > 0,96$. O mesmo ocorreu com a correlação entre o NDVI e o N foliar (Figura 21), ambas acima de 0,97. Kim et al. (2005) obtiveram regressões com R^2 entre 0,63 e 0,90 entre o NDVI e doses de N em cevada, para dois sistemas de irrigação.



(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 21 – Gráficos de correlação entre o NDVI e os teores de N foliar e a produtividade de cevada para as doses aplicadas em pré-semeadura (a) e (c) e no perfilhamento (b) e (d)

De acordo com Pauletti¹, outro ponto importante é que mesmo aumentando o teor de N na folha não ocorreu aumento de produtividade. Isto ocorre porque existe um nível crítico do nutriente na folha, acima do qual não é esperado significativo aumento de produtividade. Para definir o nível crítico de N na folha, deve-se conseguir o N foliar quando a produtividade atinge 90% da produtividade máxima. Portanto, com as correlações obtidas pode ser possível estimar o nível crítico de N na folha através do NDVI, independente da resposta ao N (informação pessoal).

3.4 Conclusão

Com este trabalho conclui-se, assim como outros autores, que o NDVI gerado pelo sensor utilizado é uma ferramenta que mostra resultados bastante satisfatórios, apresentando correlação e regressão com as quatro variáveis analisadas na cultura do trigo (nitrogênio aplicado, nitrogênio

¹ PAULETTI, V. Mensagem recebida de <vpauletti@fundacaoabc.org.br> em 5 nov 2007.

foliar, matéria seca e produtividade). Constatou-se a interferência das variedades nas leituras com o sensor, confirmando a necessidade de calibração deste nas áreas onde será utilizado, para determinar doses de nitrogênio.

Na cultura do milho o NDVI não é capaz de identificar as diferenças entre os tratamentos com doses de N devido ao maior acúmulo de biomassa. Uma possibilidade é substituir a banda do vermelho pela banda do verde, ou testar outros índices de vegetação que tenham uma correlação mais linear com a quantidade de biomassa.

Sendo assim, com os resultados atingidos, pode-se afirmar que o uso deste sensor possui grande potencial para o manejo de nitrogênio na cultura do trigo, sendo o próximo passo realizar aplicações de nitrogênio em taxa variável com base nas leituras do sensor e avaliar a produtividade final, e com isso confirmar seu potencial e solidificar o uso desta tecnologia.

Referências

- BARTHOLOMEU, W.V.; CLARK, F.E. **Soil nitrogen**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 615 p. (Agronomy Series, 10).
- 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 Agropecuária Oeste. Documentos, 28. Embrapa Agrobiologia. Documentos, 128).
- 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, p. 579-587, 2006.
- 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**. New York, v. 34, p. 1837-1852, 2003.
- GIMENEZ, L.M. **Diagnóstico da mecanização em uma região produtora de grãos**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- GITELSON, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 161, p. 165-173, 2004.
- GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D.C. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, p. 76-87, 2002.

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.

HINZMAN, L.D.; BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.19, p. 47-61, 1986.

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

JUNGES, A.H.; ALVES, G.; FONTANA, D.C. Estudo indicativo do comportamento do NDVI e EVI em lavouras de cereais de inverno da região norte do Estado do Rio Grande do Sul, através de imagens MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2007. 1 CD-ROM.

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).

MAHEY, R.K.; SINGH, R.; SIDHU, S.S.; NARANG, R.S. The use of remote sensing to assess the effects of water stress on wheat. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 27, p. 423-429, 1991.

MARTIN, K.L.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; TEAL, R.K.; TUBANA, 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, p. 384-389, 2007.

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**, New York, v. 27, p. 1431-1441, 2004.

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.

NTECH INDUSTRIES. **Model 505 GreenSeeker Hand Held™ Optical Sensor Unit:** operating manual. Disponível em: <<http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manuals.html>>. Acesso em: 27 set. 2007.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais:** exposição com exemplos a orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

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

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

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 32., 2000, Cruz Alta. **Anais ...** Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2000. 61 p.

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

SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; VARVEL, G.E.; WILLHELM, W.W.; TRINGE, J.M.; SCHLEMMER, M.R.; MAJOR, D.J. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 583-589, 2001.

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.

WELSH, J.P.; 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**, Cambridge, v. 84, p. 481-494, 2003.

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.

4 VARIABILIDADE ESPACIAL DO NDVI E APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM TAXA VARIÁVEL EM TRIGO

Resumo

O objetivo deste trabalho foi mostrar a variabilidade espacial do NDVI nas culturas de trigo e milho e realizar a aplicação de nitrogênio em taxa variável na cultura do trigo com base nas leituras de um sensor óptico ativo. Foram montados experimentos em faixas, com doses crescentes de N, e foram coletados dados do NDVI com um sensor óptico ativo conectado a um receptor GPS, e com isso foi possível gerar mapas do NDVI. Para o trigo, devido a maior correlação entre a biomassa com o NDVI do que o milho é possível identificar no mapa as faixas com doses diferentes, entretanto é visível também a variabilidade dentro de cada faixa, mostrando que a absorção e o aproveitamento do N pela cultura não são uniformes. Para a aplicação em taxa variável foi montado um experimento com faixas de 120 kg ha⁻¹ de N, que serviram de calibração para o sensor, e faixas com 18,4 e 52,4 kg ha⁻¹ de N que foram complementadas a partir das leituras do sensor óptico ativo. Os resultados mostram que mesmo com uma alta economia no consumo de fertilizantes nitrogenados, utilizando a tecnologia de aplicação em taxa variável, as produtividades foram semelhantes, ou seja, o resultado foi a economia de N mantendo o mesmo nível de produtividade.

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

NDVI SPATIAL VARIABILITY AND NITROGEN APPLICATION WITH VARIABLE RATE TECHNOLOGY IN WHEAT

Abstract

The objective of this work was to show the spatial variability of the NDVI in wheat and corn crops and make the nitrogen application with variable rate in wheat based in the readings of an active optical sensor. Experiments were established in strips, with rising rates of nitrogen, and NDVI data were collected with an active optical sensor connected to a GPS receiver, and then was possible to generate NDVI maps. For wheat, due to its higher correlation with biomass and NDVI than corn, it is possible to identify strips with different rates in the map. However, it is clear also, the variability inside each strip, showing that the absorption and use of N by the crop is not uniform. For the variable rate application an experiment was established with strips of 120 kg N ha⁻¹, that were used for calibration of the sensor, and strips with 18.4 and 52.4 kg N ha⁻¹ that were complemented from the readings of the active optical sensor. The results showed that even with a high economy in the nitrogen fertilizer consumption, using the variable rate technology the yields were similar, i.e. the result was the economy of N, maintaining the same level of yield.

Keywords: Precision Agriculture; Remote sensing; Cereals

4.1 Introdução

O manejo tradicional do nitrogênio para os sistemas de produção de cereais ao redor do mundo tem mostrado baixa eficiência no uso do nitrogênio, 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 de cultura (SOLARI, 2006).

Molin et al. (2006) conseguiram um aumento de 4% na produtividade de milho com aplicação de um fertilizante formulado em taxa variável na cultura do milho, mesmo com uma redução de 14% no consumo total de fertilizante em uma área de 71,3 ha. A recomendação em taxa variável foi feita em cima da variabilidade espacial do fósforo, obtida com amostragens de solo em grade.

A determinação 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 perto de 33% na produção de cereais.

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).

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 óticos 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 ótico usa a planta como indicador (RAUN et al., 2001). Tudo começou 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 ótico (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 óticos 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).

O objetivo deste trabalho foi visualizar a variabilidade espacial do NDVI nas culturas de milho e trigo com experimentos em faixas, e realizar a aplicação de nitrogênio em taxa variável baseado nas leituras de um sensor ótico ativo em trigo.

4.2 Materiais e Métodos

Os ensaios foram realizados na região dos Campos Gerais, região Centro-Sul do Estado do Paraná (BR), nos Campos Demonstrativos e Experimentais da Fundação ABC em Castro e Ponta Grossa, e na Fazenda Manzanilha, localizada no município de Tibagi, PR.

O sensor ótico ativo utilizado foi o GreenSeeker Hand HeldTM (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA) com o índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Após a coleta de dados, as informações foram inseridas em um SIG (Sistema de Informações Geográficas) para a geração dos mapas do NDVI.

4.2.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo e doses de nitrogênio

O experimento foi realizado no Campo Demonstrativo e Experimental de Castro, PR (24° 51' 20" S, 49° 55' 52" W), durante a safra de inverno de 2006. Foram montados dois ensaios iguais em duas classes de solo distintas, Latossolo Bruno distrófico (LBd) e Cambissolo Húmico distrófico (CHd), de acordo com a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

A variedade de trigo utilizada foi a Coodetec CD 111. A semeadura foi feita no dia 20/06/06 para uma população esperada de 350 plantas m⁻², com 120 kg ha⁻¹ de sementes com 90% de germinação, vigor 82% e peso de mil sementes de 28 g. O espaçamento entre fileiras foi de 0,17 m.

A adubação de base foi de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O. As doses de nitrogênio aplicadas na semeadura, na forma de uréia, foram 25, 70, e 120 kg ha⁻¹ e uma testemunha sem aplicação de nitrogênio. O experimento foi instalado em faixas com dimensões de 5,6 m x 700 m no Latossolo e 5,6 m x 400 m no Cambissolo, com três repetições de cada tratamento e apenas uma faixa sem a aplicação de nitrogênio.

As leituras do NDVI foram realizadas em três épocas (25/07/06, 11/08/06 e 04/09/06, correspondendo a 35, 52 e 76 DAS) com apenas uma passada do sensor por faixa. A frequência de coleta do sensor quando acoplado a um receptor GPS é governada pela frequência do receptor, sendo coletado um valor por segundo. O sensor estava preso a uma barra de pulverização, conectado a um receptor GPS de navegação e a velocidade do trator foi em média 1,0 m s⁻¹ (Figura 1).

A colheita foi realizada com uma colhedora de parcelas aos 156 DAS, sendo que foram colhidas quatro parcelas por faixa. Cada parcela foi georreferenciada e consistiu em nove fileiras de cinco metros.

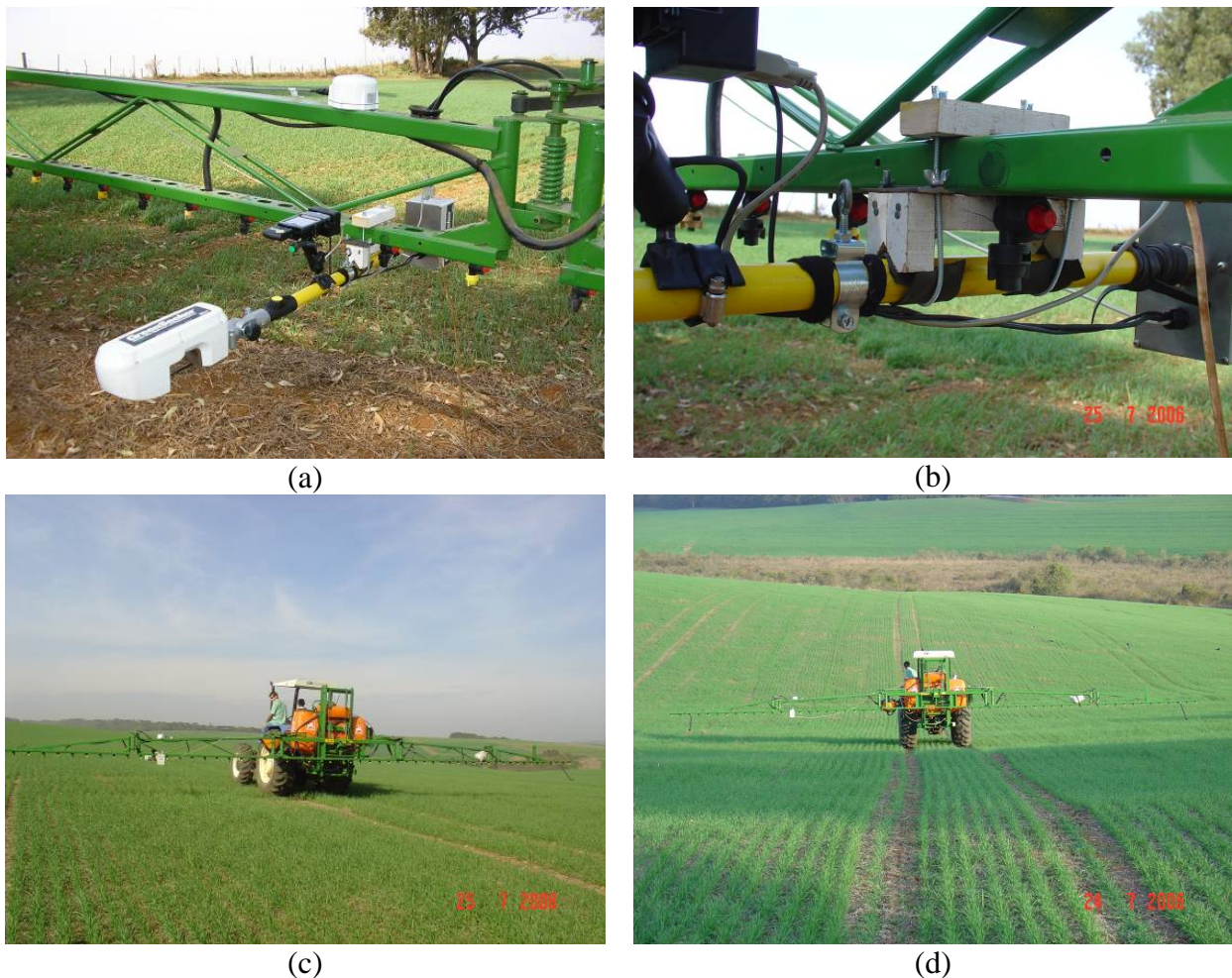


Figura 1 – Detalhe do acoplamento do sensor à barra de pulverização (a) e (b) e coleta dos dados (c) e (d) em trigo

4.2.2 Experimento 2 – Milho: Doses de nitrogênio

O experimento foi realizado no Campo Demonstrativo e Experimental de Ponta Grossa, PR (25° 00' 42" S, 50° 09' 19" W), durante a safra de verão de 2006/2007. A cultivar de milho utilizada foi o AG-8021, a semeadura foi feita no dia 22/09/06, após rotação de culturas Trigo – Soja – Aveia Preta – Milho, para uma população esperada de 65.000 plantas ha⁻¹. O espaçamento entre fileiras foi de 0,80 m.

O experimento foi realizado em faixas com dimensões de 4,5 m x 150 m, e três repetições de cada tratamento. Os tratamentos foram doses de nitrogênio 0, 48, 98, 148 e 198 kg ha⁻¹. No tratamento sem nitrogênio, foi aplicado, em pré-semeadura, 711 kg ha⁻¹ do fertilizante fosfatado Super Simples. Aos demais tratamentos foram aplicados 400 kg ha⁻¹ da fórmula 12-32-00 + 1%

Zn. A adubação de potássio foi feita com 200 kg ha^{-1} de KCl aplicado a lanço em todas as faixas. A dose de nitrogênio foi complementada com a aplicação de uréia em pré-semeadura, a qual foi aplicada a lanço e depois incorporada ao solo.

As leituras do NDVI foram realizadas em três épocas (25/10/06, 10/11/06 e 27/11/06, correspondendo a 33, 49 e 66 DAS). O sensor foi passado na área manualmente com um receptor de GPS acoplado, sendo realizadas duas passadas por faixa nas duas primeiras leituras e apenas uma passada por faixa na última leitura, devido à dificuldade de tráfego na área em função da altura das plantas de milho.

A colheita foi realizada manualmente aos 166 DAS, sendo colhidos três pontos por faixa. Cada ponto era composto por duas fileiras de cinco metros. Estes pontos foram georreferenciados para possibilitar a comparação com os valores do NDVI coletados nas faixas. As fotos do experimento podem ser vistas na Figura 2.



Figura 2 – Fotos do experimento de milho aos 33 (a) e 66 DAS (b)

4.2.3 Experimento 3 – Trigo: Aplicação de N em taxa variável

O experimento foi realizado na Fazenda Manzanilha ($25^{\circ} 28' 55''$ S, $50^{\circ} 21' 07''$ W), localizada no município de Tibagi, PR, durante a safra de verão de 2006/2007. Os tratamentos foram dispostos em faixas, nas quais as faixas com doses fixas de nitrogênio tinham dimensões de 6×600 m e as faixas com doses em taxa variável tinham 11×600 m, com quatro tratamentos e quatro repetições. A semeadura foi realizada no dia 28/05/07, com a variedade de trigo Safira.

A adubação de base foi 230 kg ha^{-1} da fórmula 08-30-20 + 2% B para todos os tratamentos. Os tratamentos estão apresentados na Tabela 1 e o croqui da área pode ser visto na Figura 3.

Tabela 1 - Tratamentos utilizados, com as doses de N em kg ha^{-1}

Tratamentos	N Semeadura	N Antecipado	N Perfilho	N Emborrachamento	N Total
1	18,4	0	0	Sensor	18,4
2	18,4	34	0	Sensor	52,4
3	18,4	0	102	0	120
4	18,4	34	68	0	120

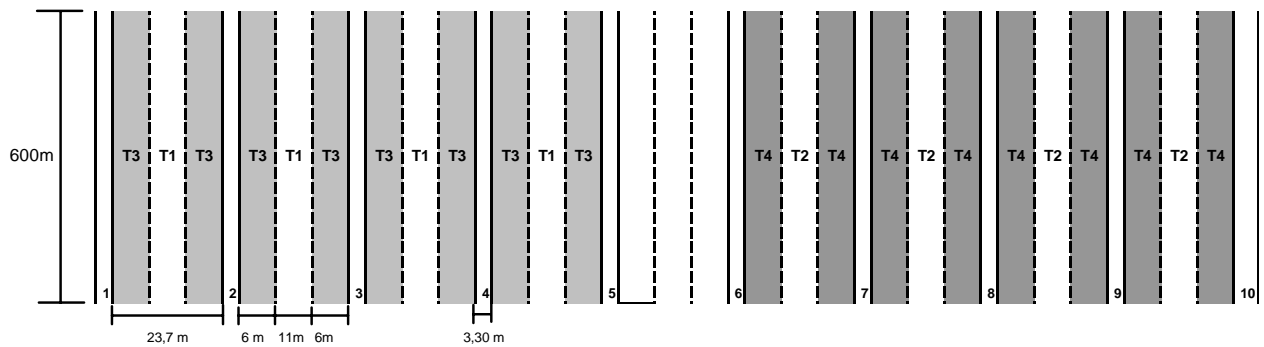


Figura 3 – Croqui do experimento para aplicação de N em taxa variável

Todos os tratamentos receberam $18,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de N a partir da adubação de base; os tratamentos 2 e 4 receberam uma complementação de 34 kg N ha^{-1} antecipado, a partir da fórmula 34-04-00 em cobertura, porém no mesmo dia da sementeira. Nos tratamentos 3 e 4 foram aplicados mais 102 e 68 kg N ha^{-1} , respectivamente, no perfilhamento (31 DAS), utilizando o NitroLL (nitrato de amônio + uréia + inibidor de urease (N-N-Butyl)-thiophosphoric triamide) + inibidor de nitrificação (N-methyl pirrolidone)) como fonte de nitrogênio. Os tratamentos 3 e 4 foram utilizados como referência, pois ambos receberam 120 kg ha^{-1} de N, e nos tratamentos 1 e 2 foram aplicadas doses de N em taxa variável no emborrachamento (86 DAS), com base nas leituras do sensor, também utilizando o NitroLL.

A leitura com o sensor óptico ativo foi realizada 79 DAS com o auxílio de uma motocicleta e um receptor de GPS L1. As fotos da área e os detalhes da coleta de dados podem ser vistas na Figura 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4 – Fotos da área de trigo (a) e (b) e detalhes da coleta dos dados (c) e (d).

Após a coleta, os dados foram inseridos em um Software SIG (Sistema de Informações Geográficas) para a geração dos mapas de pontos do NDVI.

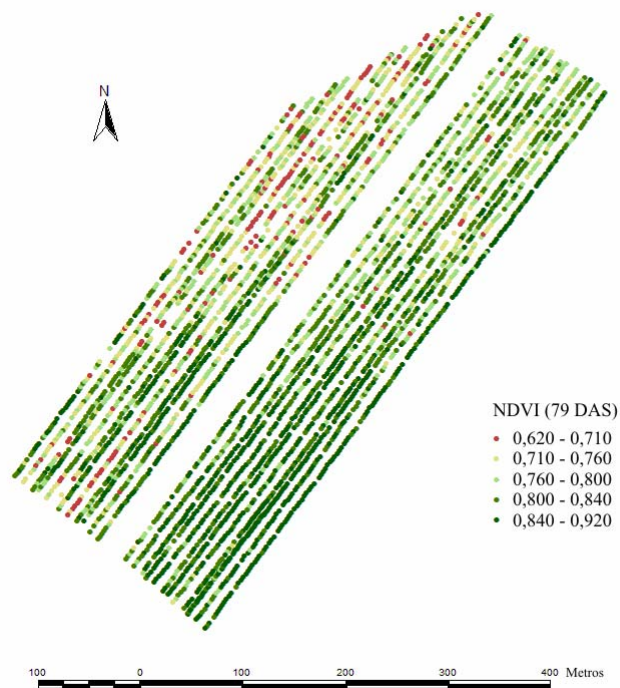


Figura 5 – Mapa de pontos do NDVI em trigo coletado aos 79 DAS

Ao gerar os mapas do NDVI constatou-se que mesmo nas faixas com 120 kg ha^{-1} de N havia variabilidade espacial, então se optou por adaptar a metodologia proposta por Raun et al. (2002), e não utilizar uma média do NDVI da faixa rica em nitrogênio para estimar o potencial produtivo de toda a área, mas sim dividir os valores do NDVI em três níveis de acordo com a topografia do terreno. O mapa de altitude (Figura 6) gerado a partir dos dados obtidos com o receptor de GPS, foi a informação disponível que melhor explicou a variabilidade do NDVI. Sendo assim, foram utilizadas três médias do NDVI do tratamento 3 e mais três médias do tratamento 4, totalizando seis valores médios do NDVI que foram utilizados como referência de potencial produtivo.

Após a divisão da altitude em três intervalos, foi calculada a média das leituras do NDVI obtido nas seis regiões e o INSEY (eq. 1) para cada uma delas, dividindo o NDVI pelo número de dias desde a semeadura (79 DAS).

$$\text{INSEY} = \text{NDVI} / \text{n}^{\circ} \text{ de dias após a semeadura} \quad (1)$$

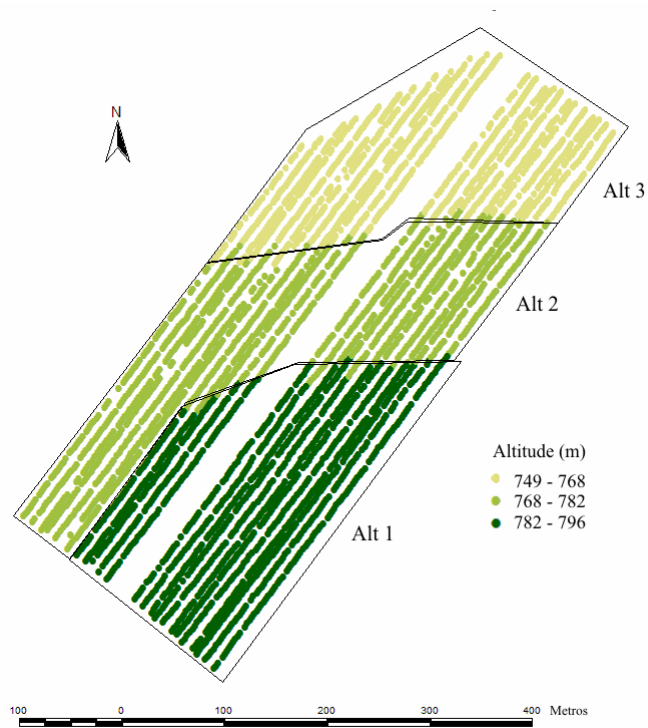


Figura 6 – Mapa de altitude da área de trigo em três intervalos

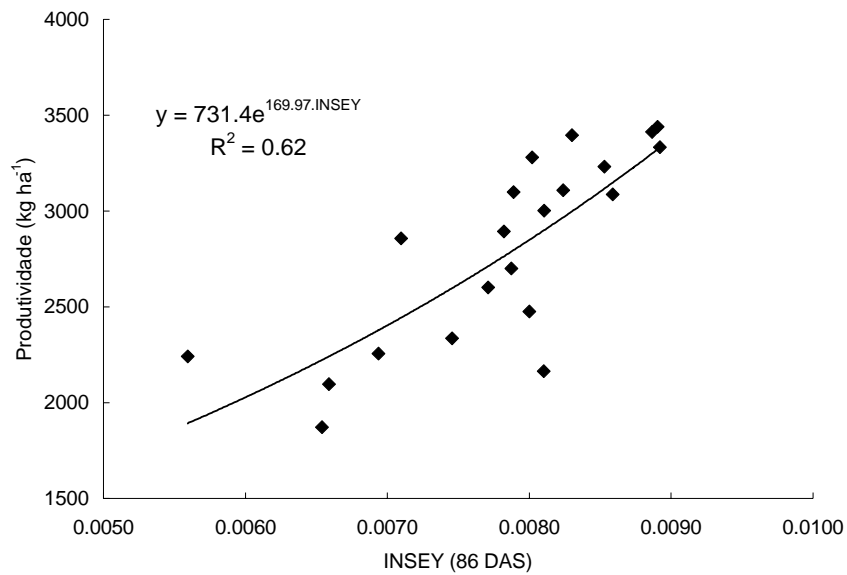


Figura 7 – Gráfico exponencial entre o INSEY e a produtividade de sete variedades de trigo

O potencial produtivo (YP_N) de cada região é feito utilizando a eq. (2), que foi obtida no gráfico da Figura 7.

$$YP_N = 731,4.e^{169,97.INSEY} \quad (2)$$

Em que:

YP_N = potencial produtivo das regiões com 120 kg ha⁻¹ de N (*yield potential*);

INSEY = estimativa de produtividade.

Em seguida é calculado o índice de resposta (RI – *Response Index*) (eq. 3), dividindo o NDVI médio das faixas ricas em N pelo NDVI de cada ponto coletado em campo, ou seja, cada ponto da lavoura terá seu RI.

$$RI = NDVI_{rica} / NDVI_{campo} \quad (3)$$

Em que:

$NDVI_{rica}$ = NDVI das fixas com 120 kg ha⁻¹ de N;

$NDVI_{campo}$ = NDVI de cada ponto coletado em campo em que será aplicado o N;

RI = índice de resposta (*response index*).

Então se divide o potencial produtivo (YP_N) de cada região pelo índice de resposta de cada ponto para se obter o potencial produtivo antes da aplicação do N (YP_0) (eq. 4).

$$YP_0 = YP_N / RI \quad (4)$$

Em que:

YP_0 = potencial produtivo de cada ponto em que será aplicado o N;

YP_N = potencial produtivo das regiões com 120 kg ha⁻¹ de N (*yield potential*);

RI = índice de resposta (*response index*).

Ao se determinar o potencial produtivo de cada ponto na lavoura, é possível calcular a dose de N que será aplicada pela eq. 5.

$$\text{Dose de N (kg ha}^{-1}\text{)} = [(\text{YP}_N - \text{YP}_0) \cdot 0,028] \cdot 0,7 \quad (5)$$

Os valores de YP_N e YP_0 são inseridos na equação, em kg ha^{-1} ; o valor 0,028 indica que serão aplicados 28 kg de N por 1.000 kg de grãos a serem produzidos (PAULETTI, 2004), e o valor 0,7 é utilizado como 70% de eficiência. Resumindo o cálculo da dose, identifica-se a diferença de produtividade entre a faixa rica e o restante da área e então se aplica a quantidade de N necessário para se atingir a mesma produtividade, ou seja, o objetivo é economizar fertilizante e não aumentar a produtividade. A partir do cálculo das doses foi gerado um mapa de aplicação de N (Figura 8).

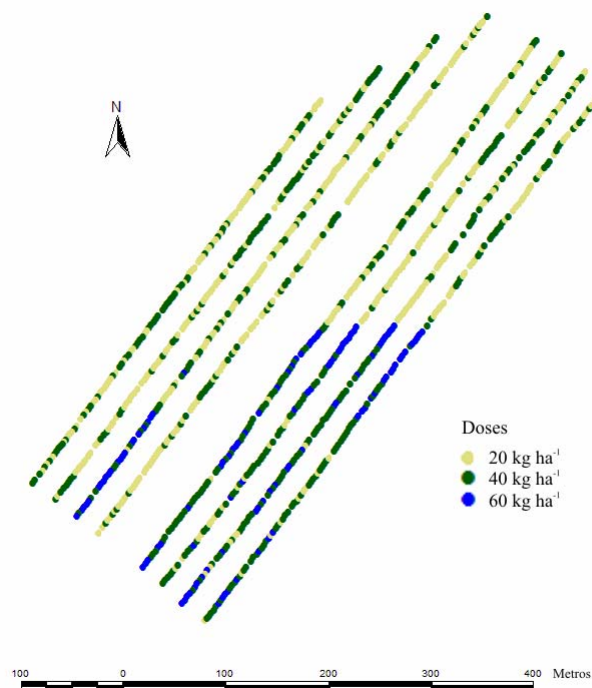


Figura 8 – Mapa de aplicação com as doses de nitrogênio para a área de trigo

As doses recomendadas variaram de 0 a 60 kg ha^{-1} de N, entretanto as doses foram simplificadas em três intervalos e foram aplicadas as doses máximas para cada intervalo. Por exemplo, a dose de 20 kg ha^{-1} representa as doses de 0 a 20 kg ha^{-1} e assim por diante. Isso foi feito, por não haver a disponibilidade de um equipamento capaz de realizar a aplicação de uma fonte de N sólido em taxa variável, com garantia da largura de aplicação no momento da

realização do experimento. Então foi utilizado um pulverizador montado em um trator para a aplicação do nitrogênio líquido NitroLL (Figura 9). A variação da dose de N foi em função da velocidade do trator, ou seja, para cada uma das três doses foi determinada uma velocidade de deslocamento do trator. O pulverizador foi calibrado para aplicar as doses de 20 kg ha^{-1} ($2,5 \text{ m s}^{-1}$), 40 kg ha^{-1} ($1,25 \text{ m s}^{-1}$) e 60 kg ha^{-1} ($0,8 \text{ m s}^{-1}$). As marchas do trator e a rotação do motor para atingir as três velocidades foram encontradas demarcando um trecho de 50 m com uma trena e marcando o tempo que o trator levava para se deslocar nos 50 m, com três repetições para cada velocidade.



Figura 9 – Detalhes da aplicação do fertilizante líquido com o pulverizador na área de trigo (a) e (b)

O croqui de como foi realizada a aplicação pode ser visto na Figura 10. A colheita das faixas foi realizada com uma colhedora John Deere 9650 STS com uma plataforma de 9,0 m e equipada com monitor de colheita AgLeader PF3000 Advantage, o que possibilitou a geração do mapa de colheita. Também foram colhidas parcelas de nove fileiras de cinco metros dentro das faixas para se obter a produtividade real em 96 pontos do talhão, sendo oito pontos para cada tratamento e em cada altitude. A análise estatística foi realizada pela comparação das médias de produtividade obtida com aplicação em taxa fixa e em taxa variável, por meio da análise da variância, verificando-se a significância pelo teste F de Snedecor com nível de 5%.

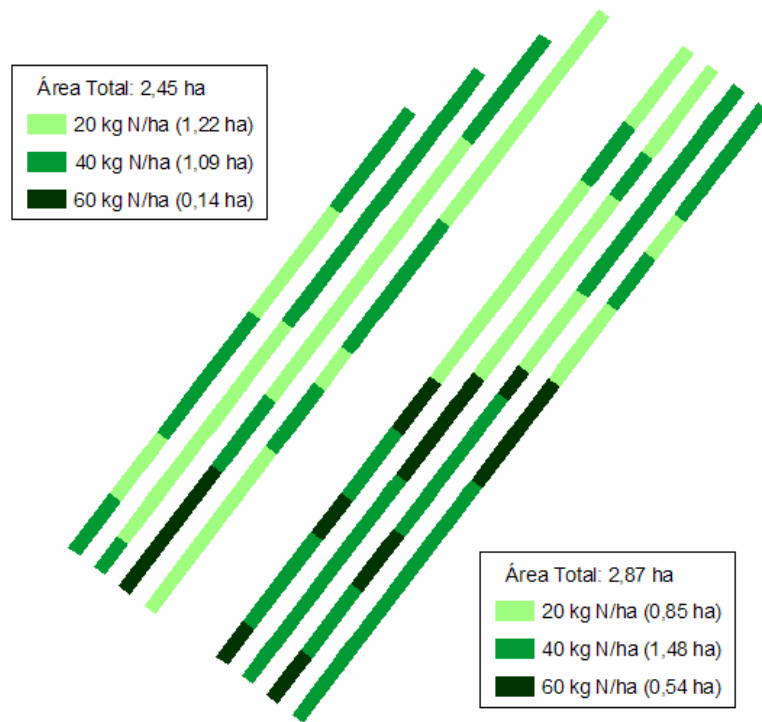
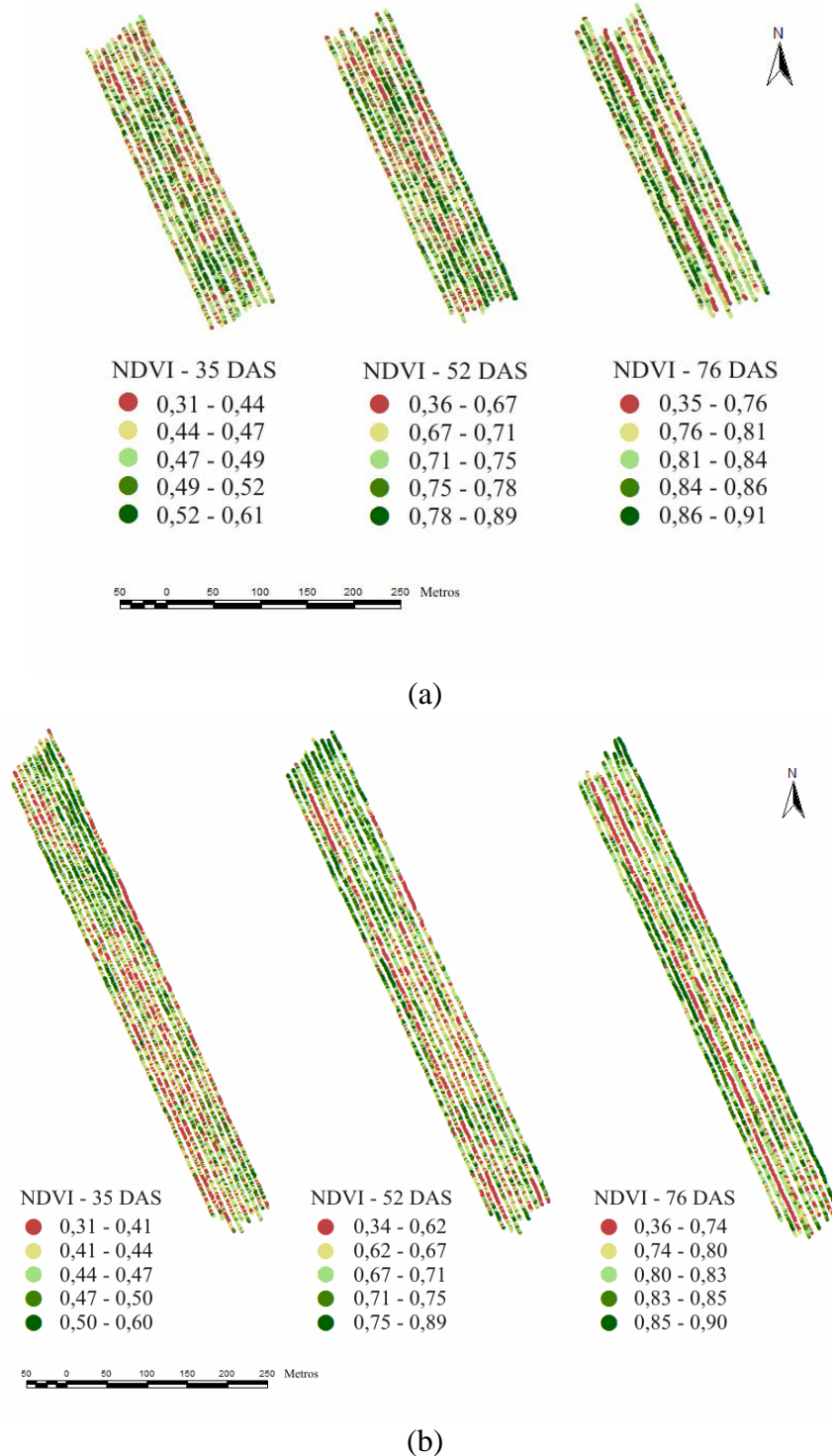


Figura 10 – Croqui da aplicação do fertilizante nitrogenado com a área aplicada de cada dose no experimento com trigo

4.3 Resultado e Discussão

4.2.1 Experimento 1 – Trigo: Classes de solo e doses de nitrogênio

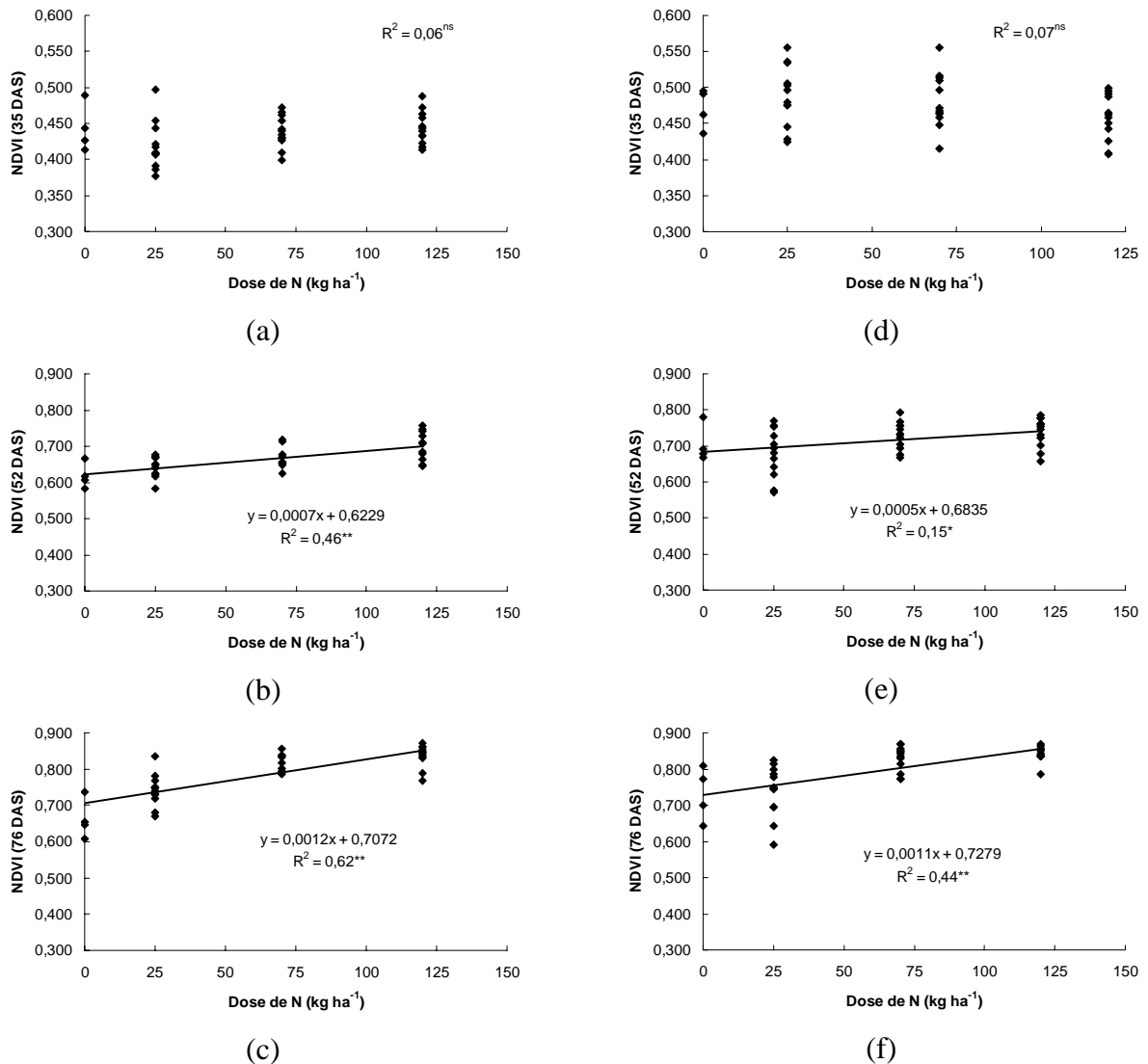
Na Figura 11 estão os mapas do NDVI gerados no SIG nas três épocas de coleta de dados para as duas classes de solo. Para ambos os solos, nas duas primeiras leituras, pode-se observar que existe um efeito regional, com manchas de valores do NDVI mais altos e baixos cruzando as faixas, independente das doses utilizadas. Nos experimentos em parcelas concluiu-se que a melhor época para o uso do sensor foi aos 76 DAS. Os mapas gerados confirmam esses resultados, pois aos 76 DAS se observa com mais nitidez as faixas de doses com valores diferentes do NDVI. Mas ainda existe uma variabilidade natural dentro de cada faixa, mostrando que a absorção do nitrogênio não é uniforme dentro do talhão.



Da esquerda para a direita nas duas classes de solo as doses de N em kg ha^{-1} são: 70, 120, 25, 70, 0, 120, 25, 70, 25 e 120.

Figura 11 – Mapas do NDVI em trigo referentes às três leituras com o sensor nas duas classes de solo, (a) CHd e (b) LBd.

A partir dos pontos onde foram colhidas as parcelas dentro das faixas, foram gerados gráficos entre as doses de N e o NDVI (Figura 12). Apesar da variação dos dados do NDVI em cada dose, os coeficientes de determinação (R^2) foram aumentando com as leituras até atingir 0,62 e 0,44, respectivamente, para o Cambissolo e o Latossolo aos 76 DAS.



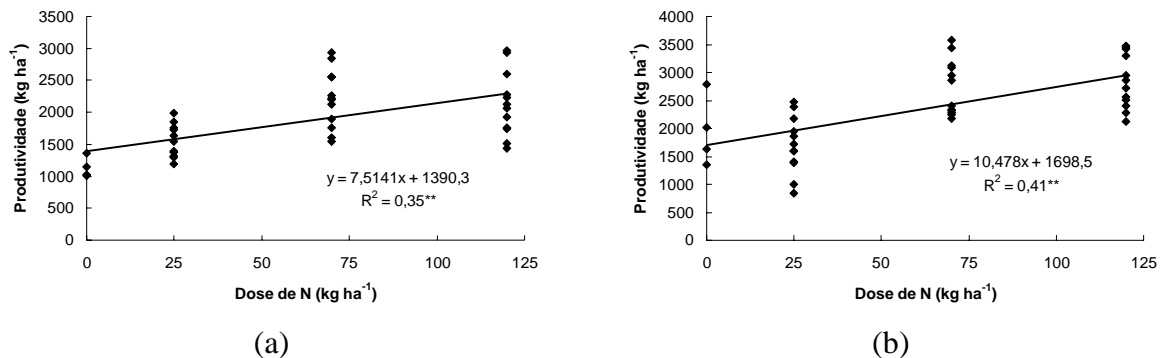
(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%

(*) 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 12 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio aplicadas na semeadura de trigo e o NDVI em três épocas e para o CHd (a), (b) e (c) e o LBd (d), (e) e (f)

Na Figura 13 estão os gráficos entre as doses de N e a produtividade, em que mesmo com baixos valores de R^2 , estes foram altamente significativos. Ao contrário do ensaio de parcelas, em que a área do experimento é relativamente pequena, no experimento em faixas, a intenção é realmente mostrar que existe variabilidade e que a cultura não vai responder da mesma forma ao longo da área, mesmo com doses uniformes. Na Tabela 2 encontra-se a estatística descritiva para os valores do NDVI obtidos nas faixas.



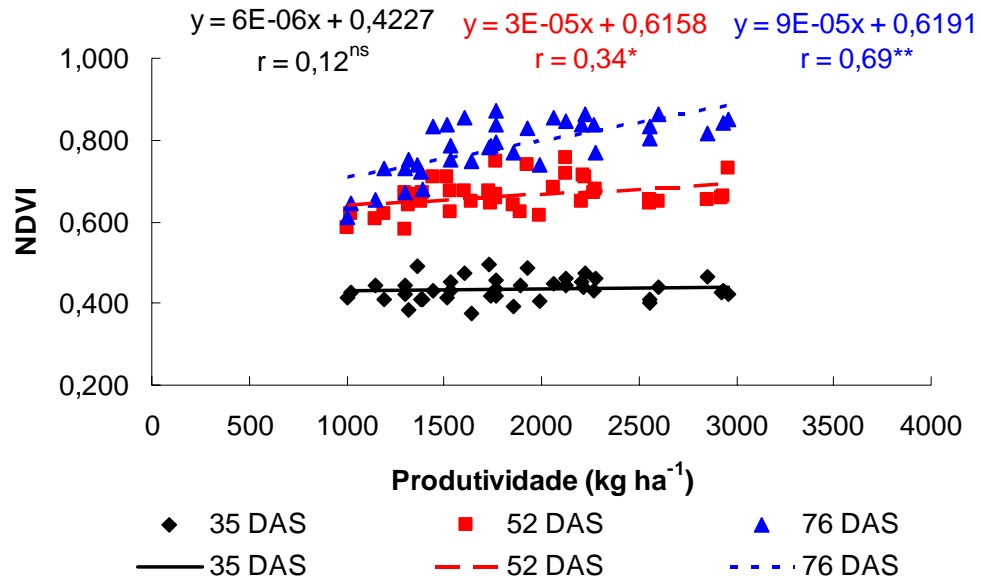
(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%

Figura 13 – Análise de regressão entre as doses de N aplicadas na sementeira e a produtividade de trigo para o CHd (a) e o LBd (b)

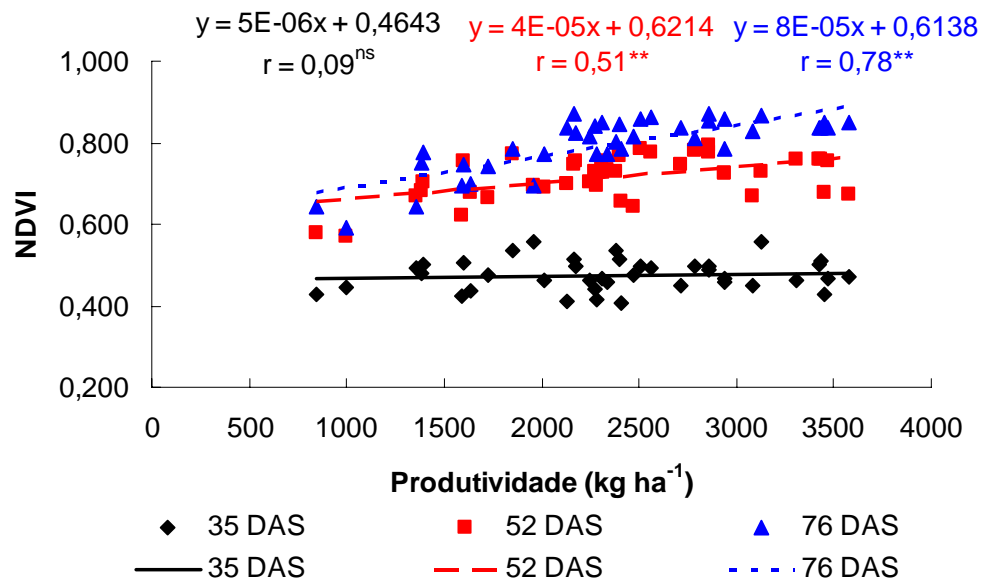
Tabela 2 – Estatística descritiva dos valores do NDVI obtidos nas faixas

CAMBISSOLO					LATOSSOLO				
35 DAS					35 DAS				
Dose (kg ha ⁻¹)	0	25	70	120	Dose (kg ha ⁻¹)	0	25	70	120
N ^o de dados	203	641	615	653	N ^o de dados	421	1359	1260	1229
Média (NDVI)	0,460	0,450	0,460	0,450	Média (NDVI)	0,470	0,480	0,480	0,460
Mín	0,330	0,310	0,320	0,320	Mín	0,360	0,310	0,310	0,310
Máx	0,570	0,600	0,580	0,570	Máx	0,550	0,610	0,600	0,590
DP	0,050	0,050	0,050	0,050	DP	0,030	0,050	0,040	0,050
CV (%)	10,9	11,1	10,9	11,1	CV (%)	6,4	10,4	8,3	10,9
52 DAS					52 DAS				
Dose (kg ha ⁻¹)	0	25	70	120	Dose (kg ha ⁻¹)	0	25	70	120
N ^o de dados	249	723	695	731	N ^o de dados	472	1446	1358	1346
Média (NDVI)	0,620	0,660	0,690	0,720	Média (NDVI)	0,700	0,690	0,740	0,730
Mín	0,340	0,410	0,420	0,430	Mín	0,440	0,360	0,360	0,450
Máx	0,840	0,860	0,870	0,890	Máx	0,820	0,850	0,880	0,890
DP	0,090	0,070	0,070	0,070	DP	0,050	0,070	0,050	0,060
CV (%)	14,5	10,6	10,1	9,7	CV (%)	7,1	10,1	6,8	8,2
76 DAS					76 DAS				
Dose (kg ha ⁻¹)	0	25	70	120	Dose (kg ha ⁻¹)	0	25	70	120
N ^o de dados	198	615	613	606	N ^o de dados	467	1393	1270	1380
Média (NDVI)	0,660	0,760	0,820	0,840	Média (NDVI)	0,760	0,760	0,840	0,840
Mín	0,360	0,480	0,570	0,580	Mín	0,480	0,350	0,540	0,580
Máx	0,840	0,880	0,950	0,900	Máx	0,870	0,900	0,900	0,910
DP	0,090	0,070	0,050	0,040	DP	0,060	0,080	0,040	0,040
CV (%)	13,6	9,2	6,1	4,8	CV (%)	7,9	10,5	4,8	4,8

Na Figura 14 estão os gráficos de correlação entre a produtividade e o NDVI, em que mais uma vez, aos 76 DAS foram obtidas as melhores correlações, com valores de (r) de 0,69 e 0,78 para o Cambissolo e Latossolo, respectivamente.



(a)



(b)

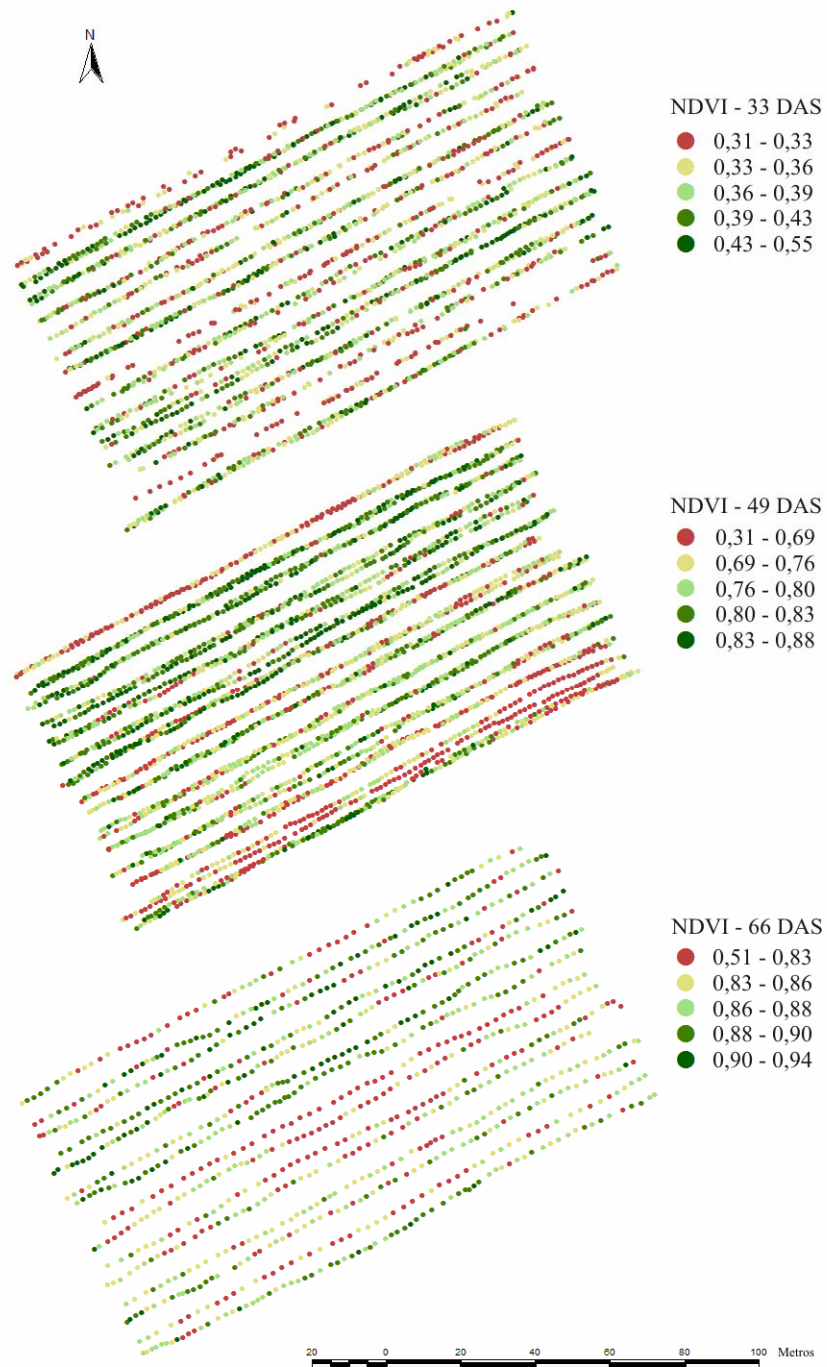
(ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste t de Student com nível de significância de 5%

(*) 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 14 – Gráficos de correlação entre o NDVI e a produtividade de trigo em três épocas para o CHd (a) e o LBd (b)

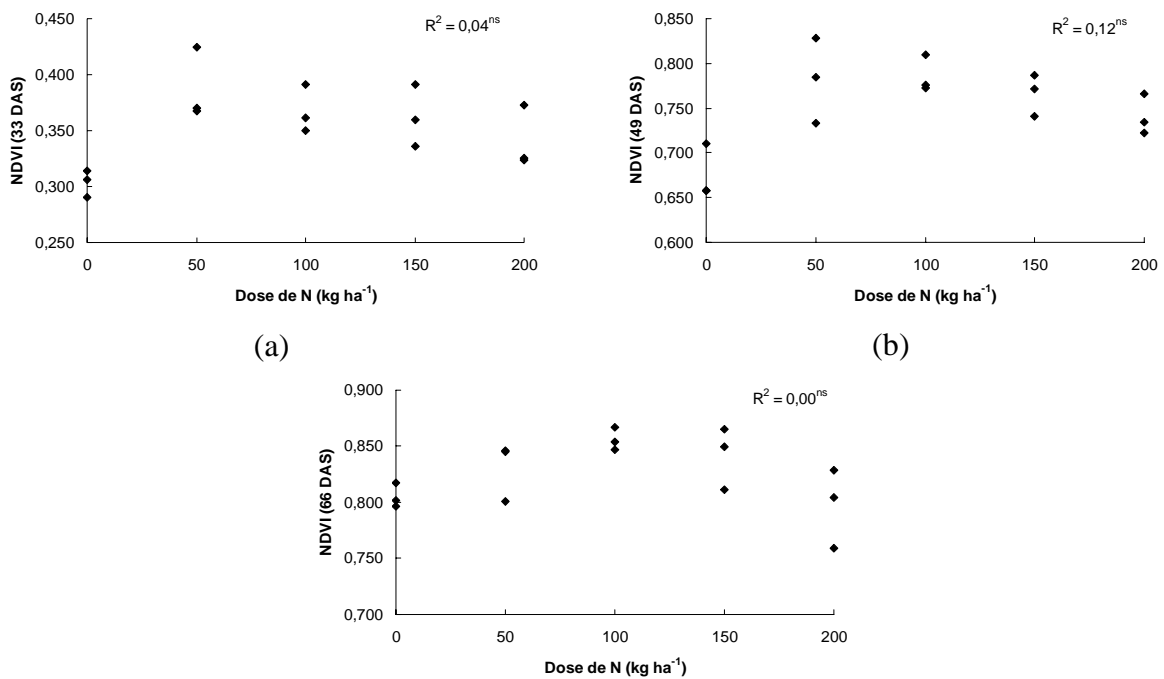
4.2.2 Experimento 2 – Milho: Doses de nitrogênio



Da cima para baixo as doses de N são: 0, 48, 98, 148, 198, 98, 48, 0, 198, 98, 48, 148, 198, 0 e 148
 Figura 15 – Mapas do NDVI referentes às três leituras

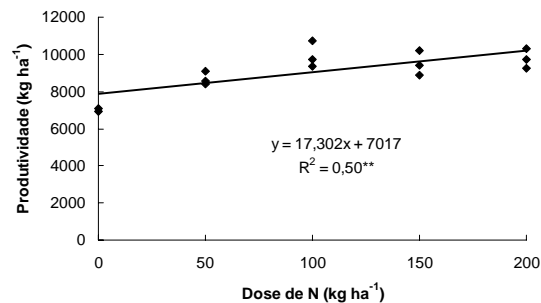
Os mapas do NDVI obtidos para a cultura do milho (Figura 15) possibilitam identificar visualmente as faixas sem aplicação de N, conforme visto também na Figura 2, faixas que no campo eram facilmente identificadas. Os gráficos de dispersão da Figura 16, comprovam que na primeira e segunda leituras, os valores do NDVI obtidos nas faixas sem N se agrupam abaixo dos demais, entretanto com valores muito baixos de R^2 e não significativos pelo teste F.

A Figura 17 mostra que a cultura respondeu em produtividade às doses de N aplicadas com nível de significância de 1% pelo teste F.



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

Figura 16 – Análise de regressão entre as doses de nitrogênio aplicadas na semeadura e o NDVI em três épocas para a cultura do milho



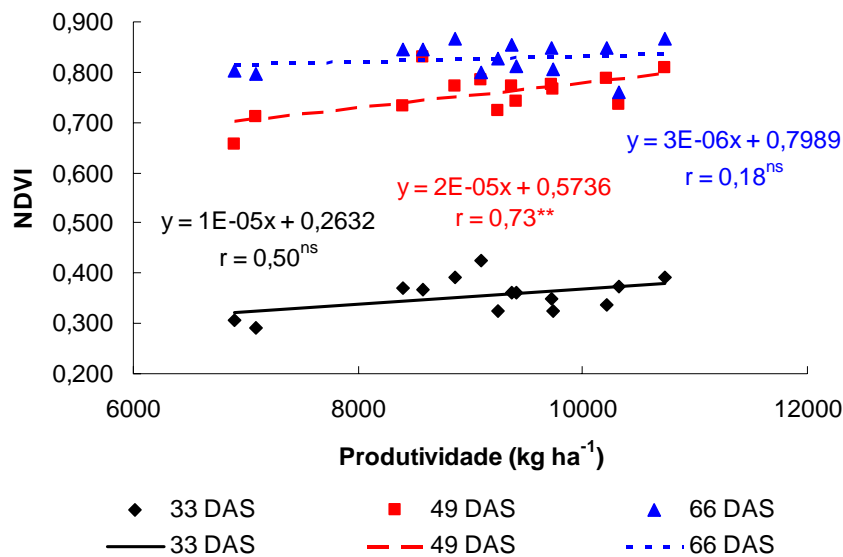
(**) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%

Figura 17 – Análise de regressão entre as doses de N aplicadas na semeadura e a produtividade de milho

Na Tabela 3 estão apresentados os dados da estatística descritiva, em que foram encontrados baixos valores de CV, com máximo de 12,5% na leitura realizada aos 33 DAS na faixa com 48 kg ha⁻¹ de N.

Tabela 3 – Estatística descritiva para os valores do NDVI em milho

33 DAS					
Dose (kg ha ⁻¹)	0	48	98	148	198
Nº de dados	240	525	502	456	373
Média	0,330	0,400	0,380	0,380	0,370
Mín	0,310	0,310	0,310	0,310	0,310
Máx	0,450	0,550	0,540	0,510	0,510
DP	0,020	0,050	0,040	0,040	0,040
CV (%)	6,1	12,5	10,5	10,5	10,8
49 DAS					
Dose (kg ha ⁻¹)	0	48	98	148	198
Nº de dados	591	615	613	613	599
Média	0,680	0,790	0,790	0,770	0,750
Mín	0,310	0,400	0,540	0,420	0,410
Máx	0,840	0,870	0,880	0,860	0,870
DP	0,070	0,070	0,050	0,080	0,090
CV (%)	10,3	8,9	6,3	10,4	12,0
66 DAS					
Dose (kg ha ⁻¹)	0	48	98	148	198
Nº de dados	173	206	206	210	219
Média	0,820	0,870	0,860	0,870	0,850
Mín	0,510	0,670	0,540	0,730	0,570
Máx	0,910	0,930	0,940	0,930	0,930
DP	0,060	0,040	0,060	0,030	0,060
CV (%)	7,3	4,6	7,0	3,4	7,1



(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 1%

Figura 18 – Gráfico de correlação entre o NDVI coletado em três épocas e a produtividade de milho

Apesar de não haver regressão entre as doses de N e o NDVI, a Figura 18 mostra que houve uma correlação com nível de significância de 1% entre o NDVI obtido aos 49 DAS e a produtividade, com um $r = 0,73$, o que pode ser um caminho para a determinação de doses de N para a cultura do milho com o uso de sensores óticos. Esse resultado deve ser explorado por meio de novos experimentos que mostrem não ser este um resultado isolado.

4.2.3 Experimento 3 – Trigo – Aplicação de N em taxa variável

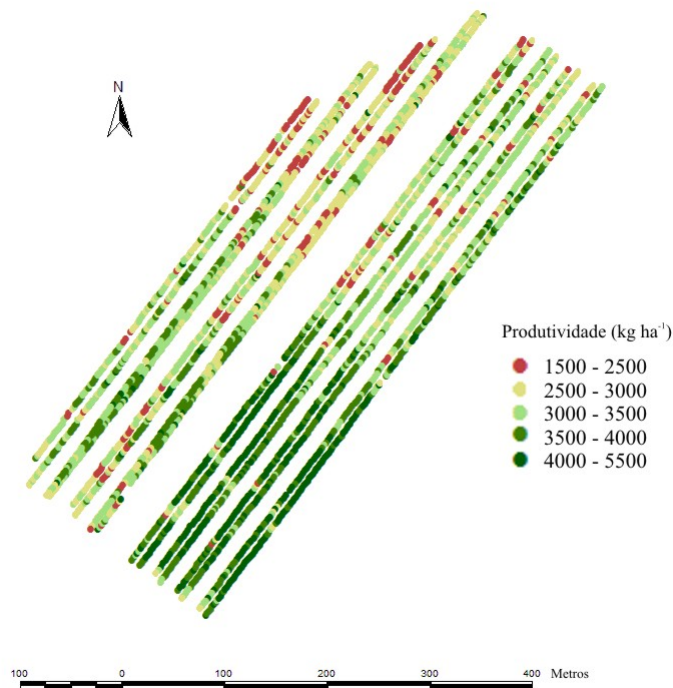
A Tabela 4 mostra a estatística descritiva dos valores do NDVI obtidos aos (79 DAS), que foram utilizados para o cálculo da dose. Tanto para o tratamento 3 (T3) quanto para o tratamento 4 (T4), que foram as faixas ricas em N (120 kg ha^{-1}), a média do NDVI nas três altitudes foi diferente, em que no T3 o NDVI foi 0,85, 0,81 e 0,79, respectivamente para as altitudes 1, 2 e 3, e no T4 as médias do NDVI foram 0,85, 0,83 e 0,82 para as mesmas altitudes. Isso mostra que se tivesse sido utilizada a média geral do NDVI como potencial a ser atingido, o T3 teria uma média de 0,81 e o T4 teria a média de 0,84, e com isso não teria sido explorado todo o potencial da metodologia, pois teriam sido aplicados menores doses de N nas regiões com mais potencial e mais N nas regiões de menor potencial. Isso implica na utilização de não apenas uma faixa rica no talhão a ser aplicado o N, mas uma quantidade que possa representar de maneira mais significativa a variabilidade do potencial produtivo dentro do próprio talhão.

A Figura 19 apresenta o mapa de colheita obtido com a colhedora equipada com o monitor de produtividade. Apesar de cada faixa de 11 m, onde foi aplicado o N em taxa variável, ter uma faixa de 6 m de cada lado, somente foi colhido uma dessas faixas de 6 m, que continha 120 kg ha^{-1} de N. No mapa de colheita é possível ver as faixas sempre aos pares, onde as faixas da esquerda são as faixas de taxa fixa e as faixas da direita são as de taxa variável.

Com o mapa é possível observar que a região da altitude 1, que possuía os valores do NDVI mais elevado, comprovou ser a região de maior potencial produtivo, onde foram aplicadas as doses mais altas em taxa variável.

Tabela 4 – Estatística descritiva do NDVI coletado antes da aplicação de N em taxa variável

T1	Altitude 1 18.4 kg ha ⁻¹	T3	Altitude 1 120 kg ha ⁻¹	T2	Altitude 1 52.4 kg ha ⁻¹	T4	Altitude 1 120 kg ha ⁻¹
Média	0,76	Média	0,85	Média	0,84	Média	0,85
Mín	0,62	Mín	0,76	Mín	0,68	Mín	0,75
Máx	0,87	Máx	0,89	Máx	0,89	Máx	0,92
DP	0,05	DP	0,03	DP	0,03	DP	0,03
CV (%)	6,58	CV (%)	3,53	CV (%)	3,57	CV (%)	3,53
	Altitude 2 18.4 kg ha ⁻¹		Altitude 2 120 kg ha ⁻¹		Altitude 2 52.4 kg ha ⁻¹		Altitude 2 120 kg ha ⁻¹
Média	0,76	Média	0,81	Média	0,79	Média	0,83
Mín	0,65	Mín	0,67	Mín	0,68	Mín	0,74
Máx	0,85	Máx	0,90	Máx	0,87	Máx	0,89
DP	0,04	DP	0,05	DP	0,04	DP	0,03
CV (%)	5,26	CV (%)	6,17	CV (%)	5,06	CV (%)	3,61
	Altitude 3 18.4 kg ha ⁻¹		Altitude 3 120 kg ha ⁻¹		Altitude 3 52.4 kg ha ⁻¹		Altitude 3 120 kg ha ⁻¹
Média	0,74	Média	0,79	Média	0,78	Média	0,82
Mín	0,62	Mín	0,67	Mín	0,68	Mín	0,74
Máx	0,83	Máx	0,88	Máx	0,86	Máx	0,87
DP	0,05	DP	0,04	DP	0,03	DP	0,03
CV (%)	6,76	CV (%)	5,06	CV (%)	3,85	CV (%)	3,66



Nota: Em cada par de faixas, a da esquerda representa a colheita da taxa fixa e da direita representa a taxa variável
 Figura 19 – Mapa de colheita de trigo obtido pelo monitor de produtividade

Entretanto, para evitar possíveis erros provenientes do monitor de produtividade (MENEGATTI; MOLIN, 2003), as análises estatísticas foram realizadas com os dados obtidos das colheitas das parcelas dentro de cada faixa, por representar a produtividade real em cada ponto. Alguns dos pontos de colheita das parcelas são visíveis no mapa de colheita, onde existem pontos de produtividades mais baixas na região de altitude 1, que apresentou as produtividades mais altas. A razão é que a colheita com a colhedora foi realizada no dia seguinte à colheita das parcelas, ficando a área das parcelas sem plantas de trigo.

Na Tabela 5 estão apresentadas os dados de produtividades médias obtidas pela colheita de oito pontos para cada tratamento e em cada altitude, totalizando 96 pontos amostrais. A variação mostra quanto as parcelas com aplicação em taxa variável produziram a mais ou a menos que a taxa fixa. Em dois locais a produtividade foi mais baixa, e nos outros quatro foi mais alta, entretanto a análise estatística mostra que não houve diferença estatística pelo teste F de Snedecor com nível de significância de 5%, e com um coeficiente de variação não superior a 15,4%.

Tabela 5 – Dados de produtividade de trigo (kg ha^{-1}) obtidos nas parcelas dentro de cada altitude

	Altitude 1 120 kg ha^{-1}	T1 VRT	Variação	Altitude 1 120 kg ha^{-1}	T2 VRT	Variação
Média	3284	3257	-27	3457	3601	143
CV	8,6	9,9		11,0	3,0	
Pr > F	0,8638 ^{ns}			0,3212 ^{ns}		
	Altitude 2 120 kg ha^{-1}	VRT		Altitude 2 120 kg ha^{-1}	T2 VRT	
Média	3010	3150	140	2953	2921	-32
CV	10,3	9,2		8,4	4,5	
Pr > F	0,3664 ^{ns}			0,7532 ^{ns}		
	Altitude 3 120 kg ha^{-1}	VRT		Altitude 3 120 kg ha^{-1}	T2 VRT	
Média	2622	2682	60	2887	3045	158
CV	13,8	15,4		6,9	6,8	
Pr > F	0,7632 ^{ns}			0,1706 ^{ns}		

(ns) não significativo pelo teste F de Snedecor com nível de significância de 5%

Partindo do fato de que não houve diferença estatística entre as produtividades obtidas com aplicação de N em taxa fixa e em taxa variável, foi avaliada a economia do fertilizante. A área ocupada pelos tratamentos 1 e 2 foram 2,45 e 2,87 ha (Figura 10), respectivamente. No tratamento 1, em que já haviam sido aplicados $18,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, para atingir 120 kg ha^{-1} , seriam necessários

mais 248,9 kg, e em taxa variável foram aplicados 76,4 kg, resultando em uma economia de 69,3%. Já o tratamento 2, que apresentava um potencial maior de produtividade e já haviam sido aplicados 52,4 kg ha⁻¹ de N, seriam necessários mais 188,8 kg para atingir os 120 kg ha⁻¹, e foram aplicados 108,6 kg, atingindo uma economia de 42,5%. Portanto, a economia de N é maior em áreas com menor potencial produtivo.

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 (MULLEN et al., 2003). 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).

4.4 Conclusão

Existe variabilidade espacial do NDVI mesmo em áreas onde foram aplicadas doses fixas de nitrogênio, mostrando que as culturas respondem aos fertilizantes de maneira desuniforme dentro de um mesmo talhão.

A metodologia utilizada para a aplicação de nitrogênio em taxa variável, utilizando a cultura como indicador, se mostrou eficiente na determinação das doses de nitrogênio a serem aplicadas, apresentando maior economia de fertilizante em áreas com menor potencial produtivo. Mesmo com uma alta economia, a produtividade dos tratamentos com aplicação em taxa variável não foram diferentes estatisticamente dos tratamentos com aplicação em taxa fixa.

Referências

ARAÚJO, J.C. **Determinação de zonas de manejo e estimativa da produtividade de culturas de grãos por meio de videografia aérea digital multiespectral**. 2004. 118 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 88, p. 97-185, 2005.

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

MENEGATTI, L.A.A.; MOLIN, J.P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 367-374, 2003.

MOLIN, J.P.; MASCARIN, L.S.; VIEIRA JÚNIOR, P.A. Avaliação de intervenções em unidades de aplicação localizada de fertilizantes e de populações de milho. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 528-536, 2006.

MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; SOLIE, J.B. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 347-351, 2003.

PAULETTI, V. **Nutrientes: teores e interpretações**. 2.ed. Castro: Fundação ABC, 2004. 86 p.

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, p. 357-363, 1999.

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

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

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.

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? **Field Crops Research**. Amsterdam, v.66, p. 151-164, 2000.

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.

SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; NEEDHAM, D.E.; REED, S.; WASHMON, C.N. Real-time sensing and N fertilization with a field scale GreenSeeker applicator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2002, Minneapolis. **Proceedings ...** Minneapolis: USDA, 2002. Disponível em: <http://nue.okstate.edu/Papers/Minnesota_2002_Solie.htm>. Acesso em: 10 nov. 2006.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)