

Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais

Fabrcio Pinheiro Povh⁽¹⁾, José Paulo Molin⁽¹⁾, Leandro Maria Gimenez⁽²⁾,
Volnei Pauletti⁽²⁾, Rudimar Molin⁽²⁾ e José Vitor Salvi⁽¹⁾

⁽¹⁾Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Avenida Pádua Dias, n 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. E-mail: fppovh@gmail.com, jpmolin@esalq.usp.br, jvsalvi@esalq.usp.br ⁽²⁾Fundcao ABC, Rodovia PR-151, Km 288, CEP 84165-980 Castro, PR. E-mail: mecaniza@fundacaoabc.org.br, vpauletti@fundacaoabc.org.br, molin@fundacaoabc.org.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar, com um sensor ótico ativo, o comportamento do ndice de vegetao por diferença normalizada (NDVI – “normalized difference vegetation index”), nas culturas de trigo, triticale, cevada e milho. Cinco experimentos foram conduzidos no Paraná e São Paulo, com variao de classes de solo, doses e fontes de N, e variedades de trigo. As seguintes variáveis foram avaliadas: NDVI, teor de N foliar, matéria seca e produtividade das culturas. Análises de regressões foram realizadas entre as doses de N aplicadas e NDVI, teor de N foliar, matéria seca e produtividade. Análises de correlao entre as variáveis foram realizadas. O trigo, triticale e cevada apresentaram resposta às aplicaes de doses crescentes de N, pelo aumento nas leituras do NDVI, no teor de N foliar e na produtividade. Medido pelo sensor ótico ativo utilizado, o NDVI apresenta alto potencial para manejo do N nas culturas do trigo, triticale e cevada, e baixo potencial para a cultura do milho. Há interferência das variedades de trigo nas leituras do sensor tico ativo.

Termos para indexao: agricultura de precisão, índice de vegetao, nitrogênio, sensoriamento remoto.

Behavior of NDVI obtained from an active optical sensor in cereals

Abstract – The objective of this work was to evaluate the behavior of the normalized difference vegetation index (NDVI), with an active optical sensor, in wheat, triticale, barley and corn crops. Experiments were conducted in Paraná and So Paulo, comparing different soil classes, N rates and sources, and wheat varieties. The following variables were determined: NDVI, N foliar content, dry mass and crop yield. Regression analyses were performed between NDVI and applied N rates, N foliar content, dry mass and yield. Correlation analyses among the variables were performed. Wheat, triticale and barley crops showed response to increasing N rates by the increase in the NDVI readings, to N foliar content and to yield. Measured by the used active optical sensor the NDVI shows high potential for N management wheat, triticale and barley crops, and low potential for corn crops. There is interference of wheat varieties in the active optical sensor’s readings.

Index terms: precision agriculture, vegetation index, nitrogen, remote sensing.

Introduo

Assume-se, geralmente, que o manejo da fertilidade do solo tem o potencial de aumentar ou manter a produtividade das culturas, com a aplicao de doses variadas de fertilizantes e corretivos da acidez do solo (Heermann et al., 2002). Um dos fatores mais significativos que pode ser variado pelo produtor, para influenciar na economia dos sistemas produtivos,  a aplicao de fertilizantes nitrogenados. Inúmeros trabalhos têm sido realizados, para se determinarem 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 aplicao de doses variáveis de fertilizantes, pois integram fatores de solo, topografia, cultura e de clima. 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.

A produtividade obtida atualmente em lavouras comerciais pelos produtores está muito aquém do potencial, por que não  possível, nem economicamente viável, remover todos os fatores limitantes ao desenvolvimento das culturas, como o fornecimento de doses ótimas de fertilizantes, competio com

plantas daninhas e danos causados por pragas e doenças. Conseqüentemente, a interação entre clima e manejo resulta em variações, de ano para ano, na produtividade e na necessidade de N (Cassman et al., 2002).

Dados históricos de produtividade podem ser úteis para a aplicação de outros nutrientes como fósforo (P) e potássio (K), para utilização de estratégias de reposição de nutrientes, pressupondo-se que esses nutrientes não estejam em deficiência (Welsh et al., 2003). Entretanto, um estudo que comparou a recomendação de N com base no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e na produtividade do milho, com leituras feitas 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, pois torna possível observar os padrões de toda a área (Wright et al., 2004); enquanto a maioria dos métodos de determinação de teores de N – medidores de clorofila e análise foliar, como exemplos – utiliza pequena quantidade de amostras da planta, para determinar a condição nutricional da cultura na lavoura.

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

Em condições de maior cobertura do solo com plantas, ocorre um pico de absorção na banda do vermelho. Quando isso ocorre, o NDVI se torna insensível às alterações de biomassa que, posteriormente, refletem-se na produtividade (quando o valor do NDVI é alto, a variação de produtividade em um valor específico do NDVI pode também ser alta). Pequenas diferenças do NDVI reduzem a habilidade do sensor em prever com maior acurácia a produtividade e a absorção de N, especialmente quando a cobertura de solo já é alta nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (Freeman et al., 2003).

Para adaptar essa técnica às condições brasileiras, em aplicação de N em taxa variável, foram realizados diversos ensaios, em diferentes condições e localidades.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as relações das leituras realizadas com um sensor ótico ativo com doses de N, concentração de N nas folhas, produção de matéria seca e produtividade de grãos nas culturas de trigo, triticale, cevada e milho.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado na região dos Campos Gerais, no Centro-Sul do Estado do Paraná, na área de atuação da Fundação ABC, em campos demonstrativos e experimentais instalados nos municípios de Arapoti, Castro, Ponta Grossa e Tibagi, e num campo demonstrativo e experimental em Itaberá, SP.

O sensor ótico ativo utilizado foi o GreenSeeker Hand Held. É um sensor portátil, com dois tipos de LED (“light emitting diodes”), que emitem radiação ativa em dois comprimentos de onda centralizados no vermelho (660 nm) e no infravermelho próximo (770 nm), com largura de banda de aproximadamente 25 nm. Os dados de saída incluem cinco índices de vegetação, entretanto, para este trabalho, foram utilizados apenas os dados do NDVI. Os dados foram coletados dinamicamente à distância de 0,80 a 1,2 m entre o sensor e o alvo.

No total, foram realizados cinco experimentos. O experimento 1 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 implantados 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 (Embrapa, 2006). A semeadura da variedade de trigo Coodetec CD 111 foi realizada no dia 20 de junho de 2006, com espaçamento entre fileiras de 0,17 m, para uma população esperada de 350 plantas m⁻². A adubação de base foi de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de K₂O. As doses de N aplicadas em pré-semeadura, na forma de uréia, foram 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹. Houve também um tratamento testemunha, sem aplicação de N. As parcelas com dimensões de 5x3 m foram dispostas em blocos ao acaso com cinco repetições. Aos 52 e 76 dias após a semeadura (DAS) foram coletadas amostras de dez folhas-bandeira em cada parcela, para análise dos teores de N no tecido. Em conseqüência da geada ocorrida no final do emborrachamento, aos 77 DAS, que comprometeu a produtividade, foram coletadas amostras para determinação do rendimento de matéria seca nos tratamentos, aos 94 DAS, em áreas de 0,68 m², compostas por quatro linhas de 1 m linear. Duas

leituras do NDVI por parcela, com o sensor ótico ativo, foram realizadas manualmente aos 35, 52 e 76 DAS. Nas parcelas foram colhidas nove fileiras de 3 m, para a obtenção dos dados de produtividade.

O experimento 2 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. A semeadura da variedade de trigo OR1, com espaçamento de 0,17 m entre fileiras e densidade de 70 plantas por metro linear, foi realizada no dia 23 de maio de 2006. As parcelas tinham dimensões de 5,78x6 m, dispostas em blocos ao acaso, com quatro repetições. A adubação de base foi de 20 kg ha⁻¹ de N e 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de K₂O. Os tratamentos consistiram da combinação de quatro fontes e quatro doses de N. As fontes foram: nitrato de amônio e uréia na forma de grânulos, e uran (nitrato de amônio + uréia) e nitro LL [uréia formaldeído + inibidor de urease (N-N-butil triamida tiofosfórica) + inibidor de nitrificação (N-metil pirrolidona)] na forma líquida, nas doses 0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N. Todas as fontes e doses de N foram aplicadas em pré-semeadura e no perfilhamento, tendo-se adicionado mais uma variável ao experimento (época de aplicação). As duas leituras do NDVI foram realizadas aos 64 DAS e aos 81 DAS, com o sensor ótico ativo. Foram colhidas plantas da área de 6,12 m² em cada parcela, em nove linhas de 4 m, para obtenção dos dados de produtividade.

O experimento 3 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. A semeadura das variedades de trigo Avante, Alcover, OR1, Ônix, Supera, Coodetec CD 111 e Embrapa BRS 208 foi realizada no dia 18 de maio de 2006, com espaçamento de 0,17 m entre fileiras. As parcelas tinham dimensões de 5x1,53 m, dispostas em blocos ao acaso, com três repetições. Os demais tratamentos culturais foram os mesmos para todas as variedades. As leituras do NDVI foram realizadas aos 69 e 86 DAS, com apenas uma leitura por parcela, com o sensor ótico ativo. O trigo foi colhido durante o mês de outubro, de acordo com o ponto de colheita de cada variedade. Com os dados obtidos nesse ensaio, foi gerado um gráfico exponencial entre o INSEY ("in-season estimate of yield") e a produtividade. O INSEY foi calculado conforme Raun et al. (2002), pela divisão do NDVI de cada parcela pelo número de dias da semeadura até a data da leitura; nesse caso, foi utilizada a leitura realizada aos 86 DAS.

O experimento 4, realizado com triticales e cevada, foi instalado em 2007 no Campo Demonstrativo e Experimental de Itaberá, SP (24°4'2"S, 49°9'19"W). As cultivares utilizadas foram BRS-203 (triticales) e BRS-195 (cevada), com semeadura em 18 de abril de 2007, espaçamento de 0,17 m entre fileiras e densidade de 70 plantas por metro linear. A adubação de base foi 40 kg ha⁻¹ de N (uréia), 300 kg ha⁻¹ de super simples e 100 kg ha⁻¹ de KCl. Para o triticales, os tratamentos consistiram das doses 0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N, aplicadas em cobertura no perfilhamento. Para a cevada, os tratamentos foram as doses 0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N, aplicadas em duas épocas, em pré-semeadura e no perfilhamento, tendo-se considerado a época de aplicação como mais uma variável. Tanto para o triticales quanto para a cevada, o delineamento foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Para ambas as culturas, a amostragem foliar foi aos 76 DAS, para análise dos teores de N na folha-índice (primeira folha abaixo da espiga); nessa amostragem foram coletadas 50 folhas por parcela. A leitura com o sensor ótico ativo foi realizada aos 85 DAS, com duas leituras por parcela. As parcelas tinham dimensões de 3x5 m. Para a determinação da produtividade em cada parcela, a colheita foi realizada em nove linhas de 3,5 m para o triticales e 18 linhas de 4 m para a cevada.

O experimento 5 foi realizado no Campo Demonstrativo e Experimental de Ponta Grossa, PR (25°0'42"S, 50°9'19"W), durante a safra de verão de 2006/2007. O híbrido de milho utilizado foi o AG-8021, semeado no dia 22 de setembro de 2006, após rotação das culturas trigo-soja-aveia-preta-milho. O espaçamento entre fileiras foi de 0,80 m, com população de 65 mil plantas por hectare. A adubação de base foi 127 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 116 kg ha⁻¹ de K₂O. As doses de N aplicadas em pré-semeadura foram 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹, na forma de uréia, com uma testemunha sem aplicação de N. As parcelas tinham dimensões de 3,2x5 m, com cinco repetições de cada tratamento. As quatro leituras do NDVI por parcela foram realizadas aos 33, 49 e 66 DAS, com o sensor ótico ativo manual. Amostras de dez folhas foram coletadas, por parcela, aos 49 e 66 DAS. Ao final do ciclo foram colhidas duas linhas de 3 m por parcela, para determinação da produtividade.

A análise dos dados, para todos os ensaios, foi feita com o uso do SAS (SAS Institute, 1998). Calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) do NDVI com o teor de N foliar, a matéria seca e a produtividade, e

aplicou-se o teste t de Student, a 5 e 1% de probabilidade. Para os gráficos com a variável dose de N aplicado, foram obtidas equações de regressão com a análise de variância pelo teste F, para as funções linear e polinomial, teste das hipóteses a 5 e 1% de probabilidade e cálculo dos coeficientes de determinação (R^2).

Resultados e Discussão

No Experimento 1, com exceção das leituras realizadas no Latossolo, aos 35 DAS, com $R^2 = 0,33$, todas as demais leituras mostraram regressão linear ou polinomial entre o NDVI e as doses de N, aplicadas no momento da semeadura do trigo, com R^2 significativos e maiores de 0,75 (Tabela 1), resultados superiores aos obtidos por Wright et al. (2004), que encontraram $R^2 = 0,63$ com o mesmo sensor, nutriente e cultura. Há tendência de aumento das leituras do NDVI, em resposta ao aumento das doses aplicadas de N e em relação ao desenvolvimento da cultura. Aos 76 DAS, a relação entre NDVI e doses de N apresentou regressão polinomial de segundo grau e atingiu coeficientes de determinação de 96 e 98%, respectivamente, para o Latossolo e o Cambissolo. Nos estádios iniciais da cultura, com baixos índices de área foliar, a discriminação entre diferentes níveis de N se torna mais difícil em razão da influência do solo exposto na entrelinha e da presença de falhas na emergência das plantas. Com o maior desenvolvimento da parte aérea e o melhor fechamento da cultura, é possível se determinar com mais acurácia a variação de biomassa entre os tratamentos.

As regressões entre doses de N aplicadas e teores de N na folha-bandeira foram significativas, com valores de R^2 de 0,96 e 0,98, no Cambissolo e no Latossolo, respectivamente (Tabela 1). O coeficiente de

determinação da relação entre as doses de N aplicadas e a matéria seca foi de 88%, para o Cambissolo, e de 74% para o Latossolo, porém, este último não foi significativo. Quanto à 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, em consequência da geada ocorrida quando a cultura se encontrava aos 77 DAS, no final do emborrachamento.

Houve maior acúmulo de matéria seca e maior produtividade no Latossolo, em relação ao Cambissolo. Esses resultados, provavelmente, são consequências das características distintas dos solos. De acordo com Bartholomeu et al. (1965), para sistemas de produção com clima, vegetação e topografia similares, o conteúdo de N no solo é dependente das propriedades texturais desse solo. Solos argilosos geralmente apresentam teores mais altos de N do que os arenosos. A retenção desse nutriente no solo também é afetada pelo tipo de argila presente. Além da textura, a matéria orgânica também influencia a retenção do nutriente pois, no solo, é a principal fonte de N.

Como o comportamento espectral de uma cultura está intimamente ligado à quantidade de N nas folhas e à biomassa, altos coeficientes de correlação foram encontrados entre os teores de N foliar com a matéria seca e a produtividade (Tabela 2). Esses resultados mostram que, ao se estimar qualquer desses dois parâmetros, pode-se chegar a uma avaliação acurada da produtividade. Nas correlações entre as leituras do NDVI, aos 52 e 76 DAS, e os teores de N foliar, à exceção da leitura aos 52 DAS no Cambissolo que não foi significativa ($r = 0,71$), o coeficiente de correlação variou entre 0,88 e 0,95, superior ao resultado obtido por Wright et al. (2004) ($r = 0,66$). Freeman et al. (2003) obtiveram valores de $r = 0,57$ e 0,48, quando as leituras

Tabela 1. Leituras de NDVI, teor de N foliar ($g\ kg^{-1}$), matéria seca (MS, $kg\ ha^{-1}$), produtividade ($kg\ ha^{-1}$) e coeficiente de determinação (R^2) das regressões, em consequência das quantidades de N aplicadas ($kg\ ha^{-1}$) na semeadura de trigo em Cambissolo e Latossolo.

Variável	DAS ⁽¹⁾	Cambissolo					R^2	Latossolo					R^2
		Doses de nitrogênio						Doses de nitrogênio					
		0	30	60	90	120		0	30	60	90	120	
NDVI	35	0,457	0,459	0,515	0,505	0,520	0,78**	0,456	0,484	0,513	0,475	0,500	0,33*
NDVI	52	0,621	0,626	0,719	0,711	0,727	0,79**	0,657	0,694	0,740	0,715	0,752	0,77**
NDVI	76	0,665	0,728	0,823	0,841	0,850	0,98**	0,680	0,786	0,823	0,831	0,851	0,96**
N foliar	52	48,8	52,9	52,3	53,7	56,0	0,85*	49,6	52,7	53,4	53,9	54,6	0,83*
N foliar	76	26,6	28,0	33,5	34,4	38,1	0,96**	28,5	30,8	33,7	37,7	38,9	0,98**
MS	-	2.982	3.140	4.067	4.047	4.342	0,88*	3.536	4.459	5.002	4.909	5.018	0,74 ^{ns}
Produtividade	-	1.243	1.348	1.619	1.641	1.861	0,96**	1.107	1.518	1.726	1.880	1.923	0,90*

⁽¹⁾Dias após a semeadura. ^{ns}Não-significativo. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

foram realizadas nos estádios de desenvolvimento de trigo 'Feeks 9' (12 locais e duas safras) e 'Feeks 10,5' (14 locais e duas safras), respectivamente, com a média do NDVI de todas as regiões. Moges et al. (2004) obtiveram em 'Feeks 6' o valor de $R^2 = 0,91$. Neste trabalho, aos 76 DAS, a correlação entre NDVI e N foliar no Cambissolo foi maior que no Latossolo. Semelhantemente à matéria seca, a melhor época para se estimar a produtividade seria aos 76 DAS, que mostrou correlações de 95 e 98% para o Cambissolo e o Latossolo, respectivamente.

Assim, pode-se afirmar que o NDVI não é apenas dependente do teor de N nas plantas, mas sim de qualquer fator externo que tenha influência sobre a biomassa. Um exemplo claro é o de que as leituras realizadas no início do ciclo da cultura apresentam valores absolutos do NDVI mais baixos, os quais foram aumentando com o desenvolvimento das plantas de trigo (Tabela 1). Aos 76 DAS, com menor influência do solo exposto nas entrelinhas e das falhas de semeadura, as leituras do NDVI pelo sensor mostraram correlações maiores com as diferentes doses de N aplicadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Mahey et al. (1991), o que demonstra o potencial de se prever

a produtividade da cultura com dados de sensoriamento remoto. As variações nos valores do NDVI, obtidos nas diferentes fases de desenvolvimento do trigo, relativas à influência não somente do conteúdo de N nas plantas, mas também da biomassa, indicam que utilizar esses índices para recomendação de adubação exige grande atenção. Isso porque outros fatores que dificultam ou reduzem a absorção de N pelas plantas ou ainda afetam seu desenvolvimento podem levar a uma recomendação incorreta de fertilizantes nitrogenados e a não se obter resposta em produtividade.

No Experimento 2, as leituras do NDVI, aos 64 DAS, apresentaram regressão significativa com o nitro LL, aplicado em pré-semeadura ($R^2 = 0,93$), e com o nitrato de amônio, aplicado no perfilhamento ($R^2 = 0,93$) (Tabela 3). Na leitura do NDVI, aos 81 DAS, o nitrato de amônio aplicado em pré-semeadura e no perfilhamento apresentou R^2 significativo, entretanto, apenas a uréia aplicada no perfilhamento foi significativa. Dos fertilizantes líquidos, apenas o nitro LL apresentou regressão significativa, quando aplicado em pré-semeadura.

A baixa produtividade média (aproximadamente 1.200 kg ha⁻¹), obtida no experimento 2, pode ser

Tabela 2. Correlação de Pearson (r) entre as leituras de NDVI, teor de N foliar (g kg⁻¹), matéria seca (MS, %) e produtividade (kg ha⁻¹) em culturas em Cambissolo e Latossolo⁽¹⁾.

Variáveis	Cambissolo				Latossolo			
	N foliar		MS	Produtividade	N foliar		MS	Produtividade
	52 DAS	76 DAS			52 DAS	76 DAS		
NDVI (35 DAS)	-	-	0,99**	0,95**	-	-	0,83**	0,69 ^{ns}
NDVI (52 DAS)	0,71 ^{ns}	-	0,99**	0,94**	0,92**	-	0,94**	0,91**
NDVI (76 DAS)	-	0,95**	0,97**	0,95**	-	0,88*	0,99**	0,98**
Produtividade	0,87*	0,99**	0,98**	-	0,98**	0,95**	0,97**	-

⁽¹⁾DAS: dias após a semeadura. ^{ns}Não-significativo. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 3. Leituras de NDVI, produtividade (kg ha⁻¹) e coeficiente de determinação das regressões (R^2), em consequência das quantidades de N aplicadas (kg ha⁻¹) em pré-semeadura e no perfilhamento do trigo.

Fonte	Variáveis	DAS ⁽¹⁾	Pré-semeadura					Perfilhamento				
			Doses de nitrogênio			R^2	Doses de nitrogênio			R^2		
			0	40	80		120	0	40		80	120
NA	NDVI	64	0,547	0,604	0,678	0,676	0,89 ^{ns}	0,546	0,615	0,651	0,671	0,93*
NA	NDVI	81	0,409	0,468	0,508	0,534	0,97*	0,412	0,490	0,528	0,558	0,95*
NA	Produtividade		1,082	1,123	1,174	1,384	0,85 ^{ns}	1,095	1,197	1,338	1,490	0,99**
Uréia	NDVI	64	0,559	0,576	0,588	0,656	0,84 ^{ns}	0,544	0,630	0,630	0,686	0,88 ^{ns}
Uréia	NDVI	81	0,424	0,438	0,509	0,511	0,87 ^{ns}	0,409	0,460	0,486	0,526	0,99 ^{ns}
Uréia	Produtividade		1,275	989	1,371	1,226	0,03 ^{ns}	1,221	1,165	1,248	1,421	0,64 ^{ns}
Nitro LL	NDVI	64	0,559	0,588	0,608	0,614	0,93*	0,536	0,636	0,633	0,634	0,58 ^{ns}
Nitro LL	NDVI	81	0,429	0,462	0,479	0,485	0,89 ^{ns}	0,414	0,503	0,512	0,523	0,75 ^{ns}
Nitro LL	Produtividade		1,318	1,097	1,059	1,267	0,04 ^{ns}	1,144	1,276	1,375	1,503	0,99**
Uran	NDVI	64	0,533	0,630	0,620	0,653	0,74 ^{ns}	0,542	0,663	0,643	0,672	0,64 ^{ns}
Uran	NDVI	81	0,414	0,468	0,486	0,520	0,96*	0,402	0,521	0,522	0,542	0,73 ^{ns}
Uran	Produtividade		1,203	1,100	1,289	1,304	0,46 ^{ns}	1,039	1,367	1,306	1,431	0,70 ^{ns}

⁽¹⁾Dias após a semeadura. ^{ns}Não-significativo. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

explicada pela falta de chuva nos estádios iniciais da cultura, o que ocasionou o déficit hídrico que prejudicou o desenvolvimento das plantas. A falta de água pode ser responsável, também, pelos resultados não significativos do R^2 das regressões entre as doses de N aplicadas em pré-semeadura e a produtividade. Entretanto, quando o N na forma de nitrato de amônio e de nitro LL foi aplicado no perfilhamento, a regressão foi altamente significativa com $R^2 = 0,99$ (Tabela 3). Esse resultado, provavelmente, se deve ao fato da menor perda por volatilização desses dois fertilizantes, em relação à uréia e ao uran.

As correlações entre as leituras do NDVI, aos 64 DAS, e a produtividade, nas quatro fontes de N aplicadas em pré-semeadura, não foram significativas; entretanto, quando aplicados no perfilhamento, a correlação foi significativa quanto ao nitrato de amônio e ao uran (Tabela 4). Na leitura aos 81 DAS, houve correlação significativa em pré-semeadura apenas para o nitrato de amônio. Quando as fontes de N foram aplicadas no perfilhamento, houve correlação significativa quanto ao nitrato de amônio, ao nitro LL e ao uran.

Deve-se salientar que a safra de 2006 foi atípica, em consequência da falta de chuva, o que pode ter ocasionado a redução da absorção do N aplicado e a queda de produtividade naquele ano. Com esses resultados, pode-se afirmar que a leitura do NDVI, realizada pelo sensor, pode estimar a produtividade independentemente da fonte de N utilizada, assim, quanto maior o NDVI maior a produtividade. Considerando-se essa correlação positiva, em uma leitura aos 64 DAS, em que a planta se encontra no estágio de alongamento do colmo, ainda é possível fazer uma aplicação de N, a fim de se aumentar a produtividade. No entanto, aplicações tardias de N em cobertura, após a fase de emborrachamento, são ineficientes (Ceretta, 2000). Assim, o sensor mostrou ser uma ferramenta com potencial para se identificar a diferença de biomassa entre tratamentos, com doses distintas de N.

No Experimento 3, com variedades de trigo, foram encontradas diferenças nas leituras do NDVI, aos 86 DAS, e na produtividade entre as variedades

(Tabela 5). Este fato demonstra a necessidade de uma calibração do sensor para diferentes variedades, por exemplo, o método utilizado por Raun et al. (2002). O fato de haver variedades com menor produtividade e baixos valores do NDVI e variedades com maior produtividade e altos valores do NDVI possibilitou a geração de uma equação exponencial (Figura 1), que pode ser utilizada para se estimar a produtividade com base nas leituras do sensor, antes do final da safra. Gráficos semelhantes gerados com as leituras do NDVI de diversas variedades e localidades vêm sendo utilizados por diversos autores, para se estimar a produtividade das culturas e recomendar as doses de N (Raun et al., 2001; Freeman et al., 2003; Moges et al., 2004; Inman et al., 2005).

Assim como no trigo, as regressões entre as doses de N aplicadas no tritcale, com as leituras do NDVI aos 85 DAS, os teores de N foliar e a produtividade foram significativas, com $R^2 \geq 0,94$ (Tabela 6). Os altos valores de R^2 indicam que é possível identificar diferentes níveis de adubação nitrogenada e produtividade na cultura do tritcale. As correlações entre o NDVI, N foliar e produtividade foram significativas a 1% de probabilidade com $r = 0,94^{**}$ e $r = 0,99^{**}$, respectivamente.

A cevada apresentou regressões significativas entre as doses de N, com as leituras de NDVI aos 86 DAS, e com os teores de N da folha-índice (Tabela 7), tanto nas aplicações de N realizadas em pré-semeadura quanto no perfilhamento. Apresentou também regressão significativa com a produtividade apenas quando a aplicação de N foi realizada em pré-semeadura. Kim et al. (2005) obtiveram regressões com R^2 entre 0,63 e 0,90, entre o NDVI e doses de N em cevada, em dois sistemas de irrigação. As correlações obtidas para a cevada, entre o NDVI e os teores de N foliar, para o N aplicado em pré-semeadura e no perfilhamento, foram, respectivamente, 0,99 e 0,97, ambas significativas a 1% de probabilidade. As correlações entre o NDVI e a produtividade, quanto ao N aplicado em pré-semeadura e no perfilhamento, foram respectivamente 0,90 e 0,46, e somente a correlação para a aplicação de N em pré-semeadura foi significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Correlação de Pearson (r) entre as leituras de NDVI, realizadas em duas épocas, e a produtividade (kg ha^{-1}) de trigo⁽¹⁾.

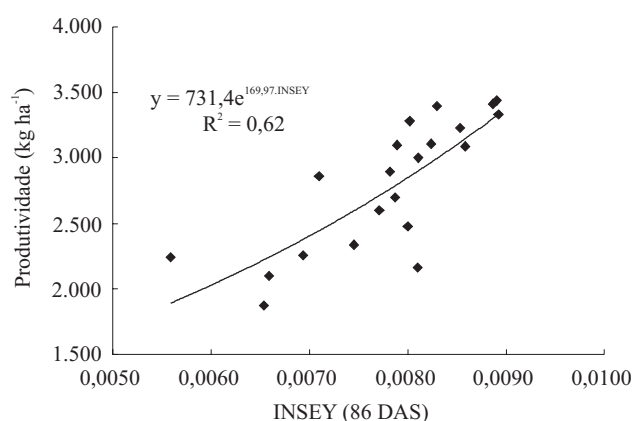
Fonte	Variáveis	Pré-semeadura		Perfilhamento	
		NDVI (64 DAS)	NDVI (81 DAS)	NDVI (64 DAS)	NDVI (81 DAS)
NA	Produtividade	0,74 ^{ns}	0,84*	0,94 ^{**}	0,96 ^{**}
Uréia	Produtividade	0,08 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,75 ^{ns}
Nitro LL	Produtividade	-0,45 ^{ns}	-0,50 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,88*
Uran	Produtividade	0,22 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,99 ^{**}

⁽¹⁾DAS: dias após a semeadura. ^{ns}Não-significativo. * e ^{**}Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 5. Médias das leituras do NDVI e a produtividade (kg ha⁻¹) de sete variedades de trigo⁽¹⁾.

Variedade	NDVI (69 DAS)	NDVI (86 DAS)	Produtividade
CD 111	0,829a	0,741a	3.350a
ÔNIX	0,822a	0,737a	3.346a
BRS 208	0,836a	0,715a	3.066ab
SUPERA	0,748a	0,676ab	2.592c
ALCOVER	0,803a	0,654ab	2.950b
OR 1	0,737a	0,608ab	2.044d
AVANTE	0,754a	0,573b	2.278d

⁽¹⁾Médias seguidas por letras iguais, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; DAS: dias após a semeadura.

**Figura 1.** Gráfico exponencial entre o INSEY (“in season estimate of yield”) obtido com os valores de NDVI aos 86 dias após a semeadura e a produtividade de trigo.**Tabela 6.** Leituras de NDVI, teor de N foliar (g kg⁻¹), produtividade (kg ha⁻¹) e coeficientes de determinação (R²) das regressões, em consequência das quantidades de N aplicadas (kg ha⁻¹) em pré-semeadura em triticale.

Variável	Doses de nitrogênio					R ²
	0	40	80	120	160	
NDVI	0,719	0,758	0,785	0,807	0,813	0,94**
N foliar	27,5	28,5	32,9	35,5	39,0	0,98**
Produtividade	2.292	2.937	3.440	3.648	3.874	0,94**

**Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 7. Leituras de NDVI, teor de N foliar (g kg⁻¹), produtividade e coeficientes de determinação (R²) das regressões, em consequência das quantidades de N aplicadas (kg ha⁻¹) em pré-semeadura e no perfilhamento em cevada.

Variável	Pré-semeadura					Perfilhamento				
	Doses de nitrogênio				R ²	Doses de nitrogênio				R ²
	0	40	80	120		0	40	80	120	
NDVI	0,676	0,786	0,858	0,864	0,99*	0,657	0,798	0,841	0,871	0,99*
N foliar	29,3	33,9	37,5	39,0	0,99*	29,6	33,7	35,5	38,3	0,98**
Produtividade	2.487	3.419	3.627	3.332	0,99**	2.928	3.677	3.331	3.144	0,02 ^{ns}

^{ns}Não-significativo. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

No Experimento 5, com a cultura do milho, o sensor mostrou um comportamento diferente dos outros cereais estudados (Tabela 8). A regressão entre doses de N e o NDVI foi significativa apenas na primeira leitura, entretanto, nota-se que os valores de NDVI, a partir da dose 50 kg ha⁻¹ foram semelhantes. Este fato pode ser explicado pelo aumento de biomassa com o aumento das doses de N, pois 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 à alta quantidade de biomassa e para certos índices de área foliar (IAF) (Gitelson et al., 2002). Myneni et al. (1997) mostraram um gráfico com a saturação do NDVI, de acordo com o aumento do IAF de diferentes culturas.

As análises de regressão entre as doses de N, os teores de N foliar e a produtividade do milho foram significativas (Tabela 8), o que demonstra que a cultura respondeu à aplicação do fertilizante nitrogenado. As correlações entre o NDVI, medido aos 49 e 66 DAS, com os teores de N foliar não foram significativas. Os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as três leituras do NDVI e a produtividade, apesar de serem significativos nas duas primeiras leituras, tiveram valores do NDVI semelhantes para quatro produtividades diferentes, e não foi possível gerar um modelo com estes dados, como foi obtido para o trigo. De acordo com Gitelson (2004), a vegetação verde tem forte absorção na região do vermelho do espectro (por volta de 670 nm); a reflectância nesta faixa é baixa (3 a 5%). Na região do infravermelho próximo, a vegetação apresenta alta reflexão da radiação incidente, atingindo entre 40 e 60%. Aumentando-se as doses de N e, conseqüentemente, a biomassa da cultura, aumenta-se também a reflectância no infravermelho próximo (Hinzman et al., 1986). Além disso, o processo de normalização torna o NDVI insensível a variações na reflectância no infravermelho próximo, quando esta é muito maior que no vermelho (Gitelson, 2004).

Tabela 8. Leituras de NDVI, teor de N foliar (g kg⁻¹), produtividade (kg ha⁻¹) e coeficientes de determinação (R²) das regressões, em consequência das quantidades de N aplicadas (kg ha⁻¹) em pré-semeadura em milho.

Variável ⁽¹⁾	Doses de nitrogênio					R ²
	0	50	100	150	200	
NDVI (49 DAS)	0,754	0,840	0,839	0,845	0,839	0,88**
NDVI (66 DAS)	0,884	0,875	0,874	0,853	0,872	0,11 ^{ns}
N foliar (49 DAS)	31,8	32,5	35,1	37,5	37,3	0,92**
N foliar (66 DAS)	24,4	27,5	31,0	32,0	31,0	0,78**
Produtividade	4.429	7.151	8.019	8.509	9.161	0,86**

⁽¹⁾DAS: dias após a semeadura. ^{ns}Não-significativo. **Significativo a 1% de probabilidade.

Trabalhar com comprimentos de onda na banda do verde seria uma alternativa, pois esta banda possui reflectância maior que a do vermelho e reduz a diferença entre a reflectância 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 com uso da 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 (IAF) 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 IAF somente no início do desenvolvimento da cultura, com valores até 1,2. Em milho e soja, o NDVI atingiu valor máximo de 0,8 e manteve-se praticamente constante, enquanto o IAF foi de 2 a 6. Quando o IAF foi maior que 2, tanto a reflectância na banda do vermelho, quanto o NDVI não apresentaram diferenças. Entretanto, a reflectância 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 (R² < 0,12), mas esta aumentou em V6 e V7 (R² = 0,29) e atingiu valores máximos entre V8 e V12 (0,55 < R² < 0,66) (Martin et al., 2007).

Conclusões

1. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), medido pelo sensor ótico ativo utilizado, apresenta alto potencial para manejo do N nas culturas do trigo, triticale e cevada, e baixo potencial para a cultura do milho.

2. Há interferência das variedades de trigo nas leituras do sensor ótico ativo.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão de bolsa e fomento; a Máquinas Agrícolas Jacto S.A., por disponibilizar o sensor ótico; à Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária, por disponibilizar as áreas experimentais e auxiliar na condução dos experimentos.

Referências

- BARTHOLOMEU, W.V.; CLARK, F.E. (Ed.). **Soil nitrogen**. Madison: ASA, 1965. 615p. (Agronomy Series, 10).
- CERETTA, C.A. Dinâmica do nitrogênio em sistemas de produção na região sul do Brasil. In: WORKSHOP NITROGÊNIO NA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 2000, Dourados. **Anais**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2000. v.1. p.32-50.
- CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. **AMBIO**, v.31, p.132-140, 2002.
- 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**, v.98, p.579-587, 2006.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- 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**, v.34, p.1837-1852, 2003.
- GITELSON, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v.161, p.165-173, 2004.
- GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, 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**, 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**, 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**, v.25, p.209-214, 2005.
- KIM, Y.; EVANS, R.G.; WADDELL, J.T. Evaluation of in-field optical sensor for nitrogen assessment of barley in two irrigation systems. In: PACIFIC NORTHWEST SECTION MEETING, 2005, Lethbridge, Alberta. [**Anais**]. St. Joseph: Asae, 2005. (Paper Number 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**, v.27, p.423-429, 1991.
- MARTIN, K.L.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; TEAL, R.K.; TUBACA, 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**, v.99, p.384-389, 2007.
- 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**, v.27, p.1431-1441, 2004.
- 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**, v.33, p.481-486, 1995.
- MYNENI, R.B.; RAMAKRISHNA, R.; 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**, v.35, p.1380-1393, 1997.
- 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.
- 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**, 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**, v.94, p.815-820, 2002.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT: user's guide**. Cary: SAS Institute, 1998. 398p.
- 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**, v.93, p.583-589, 2001.
- 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**, 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**, v.41, p.287-300, 2004.

Recebido em 3 de dezembro de 2007 e aprovado em 14 de julho de 2008