



## Índices de vegetação no milho em função da hora do dia e da taxa de nitrogênio aplicada

Eduardo G. Souza<sup>1</sup>, Teoferson Rocha<sup>1</sup>, Miguel A. Uribe-Opazo<sup>1</sup> & Lúcia H. P. Nóbrega<sup>1</sup>

### RESUMO

Métodos têm sido propostos visando à melhoria da administração de nitrogênio (N) e, simultaneamente, ao aumento de produtividade com a proteção do meio ambiente, diminuindo a concentração de nitratos no solo e na água, em que um deles, a agricultura de precisão, consiste na aplicação localizada dos insumos agrícolas em função da necessidade específica local. Neste contexto, a medição da reflectância espectral foliar da planta se apresenta como método promissor para o sensoriamento instantâneo da deficiência de N em milho, através do cálculo de índices de vegetação; entretanto, não são bem conhecidas as características da interação das plantas com a radiação solar. Avaliou-se, neste trabalho, o comportamento dos índices de vegetação em relação à hora do dia e da taxa de nitrogênio aplicada. Seis índices diferentes foram estudados: relação infravermelho próximo/vermelho (IVP/V), relação infravermelho próximo/verde (IVP/Verde), índice de vegetação de diferença normalizada (IVDN), índice verde de vegetação da diferença normalizada (IVVDN), índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e índice aperfeiçoado de vegetação ajustado ao solo (IAVAS). Quando analisados apenas os dados coletados em torno do meio dia solar, os índices que apresentaram a menor dispersão dos resultados foram o IVDN e o IAVAS, enquanto para dados tomados durante todo o dia os índices que indicaram melhor explicação da variabilidade foram o IVAS e o IAVAS.

**Palavras-chave:** agricultura de precisão, reflectância, sensoriamento remoto, *Zea mays* L.

## Vegetation indices in the maize as a function of hour of the day and the applied rate of nitrogen

### ABSTRACT

Methods have been proposed seeking to improve the application of nitrogen (N) simultaneously with yield increase and environmental protection, reducing the nitrate concentration in the soil and in the water. One of these methods, precision agriculture consists of the site-specific application of the agricultural inputs as a function of the local need. In this context, the measurement of the spectral leaf reflectance shows itself as a promising method for the instantaneous remote sensing of deficiency of N in corn through the calculations of vegetation indexes. However, the characteristics of the interaction of the plants with the solar radiation are not well known. This work evaluated the behavior of the vegetation indexes in relation to the hour of the day and the applied nitrogen rate. Six different indexes were studied: relationship near-infrared/red (NIR/red), relationship near-infrared/green (NIR/green), normalized difference vegetation index (NDVI), green normalized difference vegetation index (GNDVI), soil adjusted vegetation index (SAVI) and optimized soil adjusted vegetation index (OSAVI). When only the data collected around the half solar day were analyzed, the indexes that presented the lowest dispersion results were NDVI and OSAVI. For data collected during the whole day the indexes that presented better explanation of the variability were SAVI and OSAVI.

**Key words:** precision agriculture, reflectance, remote sensing, *Zea mays* L.

<sup>1</sup> CCET/UNIOESTE, Grupo de Pesquisa GROSAP, 85814-110 Cascavel, PR. C.P. 006. Fone (45) 3220 3199. Emails: [godoy@unioeste.br](mailto:godoy@unioeste.br); [teoferson@ig.com.br](mailto:teoferson@ig.com.br); [mopazo@unioeste.br](mailto:mopazo@unioeste.br); [lhpn@unioeste.br](mailto:lhpn@unioeste.br)

## INTRODUÇÃO

A globalização da economia exige que a agricultura brasileira desenvolva tecnologias que possibilitem a competição de produtos nacionais no mercado mundial por meio do aumento da produtividade, o qual é, normalmente, obtido pelo uso dos insumos agrícolas que, por outro lado, podem ser biológicos (variedades de espécies cultivadas), mecânicos (mecanização agrícola), quantidade de água (sistemas de irrigação) e químicos (herbicidas, fungicidas, inseticidas, corretivos e fertilizantes). O uso de insumos químicos agrícolas tem sido identificado como o principal fator de contaminação de água e do solo; portanto, esses insumos, ao mesmo tempo em que auxiliam no aumento da produtividade, apresentam perigo para o solo e mananciais de água; assim, a agricultura de precisão (AP) busca o aumento da eficiência da aplicação de insumos agrícolas visando aumentar lucros e diminuir o impacto ambiental, pois consiste na aplicação localizada dos insumos em função da necessidade específica local e se fundamenta na existência da variabilidade espacial dos fatores produtivos e, portanto, da própria quantidade produzida pela cultura (Balastreire et al., 1997). Molin (1997) considerava que a AP seria o próximo desafio a ser vencido pelo agricultor brasileiro.

Por outro lado, Scharf & Lory (2002) afirmaram que as necessidades de nitrogênio (N) são frequentemente diferentes das taxas realmente aplicadas pelos agricultores e também muito variáveis de uma área para outra. Em uma mesma área, a carência de N apresenta grande variabilidade espacial. A aplicação da real necessidade de N tem o potencial de aumentar a produtividade em áreas previamente fertilizadas abaixo da recomendação e de reduzir a aplicação desnecessária de N em áreas previamente fertilizadas acima da recomendação e o fluxo de N para os lençóis freáticos.

Tradicionalmente, análise de solo, análise foliar e experimentos de campo de longo prazo, foram usados para avaliar a disponibilidade de N do solo (Kitchen & Goulding, 2001). Desde o início da década de 90, medidores portáteis de clorofila estiveram disponíveis para monitorar a taxa de N nas plantas pela medição da transmitância da radiação em uma folha, nos comprimentos de onda de 650 nm e 940 nm (Blackmer et al., 1994; Wood et al., 1993; Malavolta et al., 2004; Neves et al., 2005).

A medição da reflectância espectral é considerada uma abordagem promissora e não invasiva para o sensoriamento instantâneo da deficiência de N em milho (Tumbo et al., 2002; Dellinger et al., 2008). O problema é que esta característica das plantas é influenciada por fatores como elevação solar (ângulo zenital), estágio vegetativo da planta e nebulosidade do dia, entre outros; além disto, seu comportamento sob condições consideravelmente diferentes das que se encontram ao redor do meio-dia solar e céu claro, não é bem conhecido (Tumbo et al., 2002; Souza et al., 2006). Davis (1957) mostrou que a reflectância da grama varia com a elevação solar, encontrando valores que decresciam de 43% (amanhecer) para 22% (meio-dia solar) e novamente aumentavam até 48% (pôr-do-sol). Gardener (1983) declarou que um importante tópico no uso da reflectância para estimar o desenvolvimento da parte aérea das plan-

tas, é o efeito das mudanças na irradiação solar no decorrer do dia, nas características de reflectância das plantas e nos índices de vegetação; ressalta-se, porém, que até a presente data este fato não foi totalmente esclarecido.

Segundo Graeff & Claupein (2003), a necessidade de se levantar amostragens extensivas na lavoura pode se eliminar pelo uso de técnicas de sensoriamento remoto. O conhecimento do comportamento da reflectância é, portanto, imprescindível para possibilitar o desenvolvimento de sistemas de aplicação localizada de N em tempo real, baseado em reflectância, haja vista que o sistema tem que estar preparado para trabalhar sob céu nublado e a qualquer hora do dia mas, na maioria dos estudos já realizados, usaram-se dados adquiridos ao redor de meio-dia solar e com céu claro (Bausch & Duke, 1996; Blackmer et al., 1996; Gao & Li, 2000; Raun et al., 2002). Este tipo de sistema tem potencial para reduzir os custos de insumos, aumentar a produtividade e reduzir perdas de N no ambiente (Tumbo et al., 2002; Scharf & Lory, 2002).

Bausch & Duke (1996) mostraram que a reflectância do milho ao verde e infravermelho-próximo (IVP), medida com um radiômetro, é sensível à taxa de N e pode ser utilizada para prever a quantidade de N necessária pela planta (Scharf & Lory, 2002). Blackmer et al. (1996) concluíram que, para a faixa espectral de 400 a 1000 nm, a radiação refletida a 550 e 710 nm proporcionou a melhor detecção da deficiência de N.

Em razão da geometria tridimensional e complexa da parte aérea de uma planta, a radiação retornada por ele é uma mistura de múltiplos componentes refletidos e/ou transmitidos (Daughtry et al., 2000). A luminosidade global e a assinatura espectral da planta são fortemente dependentes da geometria de iluminação e do azimute. Jackson et al. (1979) estudaram a dependência da reflectância espectral do trigo em função da configuração da parte aérea, da elevação de sol e do azimute e concluíram que a configuração da parte aérea foi a variável mais significativa na reflectância da radiação visível e da IVP.

Índices de vegetação (IV) são úteis para minimizar variações devido a fatores desconhecidos e maximizar a sensibilidade da variável de interesse, tal como a concentração de clorofila na folha da planta de milho (Daughtry et al., 2000; Zhao et al., 2005); os referidos índices tiram proveito da baixa reflectância nos comprimentos de onda visíveis e da alta reflectância nos comprimentos de onda do IVP, que são característicos de vegetação viva. Tumbo et al. (2002) encontraram forte coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,94$ ) entre a relação IVP/verde e a concentração de clorofila em milho, no estágio vegetativo V6.

Dentro do cenário acima exposto propôs-se, neste trabalho, avaliar o comportamento de alguns índices de vegetação em relação à hora do dia e da taxa de nitrogênio aplicada.

## MATERIAL E MÉTODOS

Milho (*Zea mays* L.) foi cultivado em vasos dentro de uma casa de vegetação, usando-se substrato com baixa taxa de N, composto de 10% de solo preparado para cultivo em vasos (potting soil), 30% de turfa e 60% de areia (em volume). Plantas cultivadas em estufa foram utilizadas para permitir com-

parações de plantas que receberam diferentes níveis de N; os níveis de N escolhidos foram 90, 180 e 270 kg ha<sup>-1</sup>; o plantio ocorreu em 3 de março de 2001 e nitrato de amônia (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) foi aplicado para prover 50, 100 e 150% da taxa recomendada de N, 180 kg ha<sup>-1</sup>, e estabelecer uma faixa de taxas de clorofila na folha. Para converter a taxa recomendada de N de kg ha<sup>-1</sup> a kg planta<sup>-1</sup>, uma população de 58.400 plantas ha<sup>-1</sup> foi adotada. Em cada tratamento se usaram dez vasos, cada um constituindo uma repetição, que recebeu 5 kg de substrato com o pH ajustado entre 6 e 7. Semearam-se quatro sementes por vaso, na profundidade de 2,5 cm, mas só uma planta foi mantida após o desbaste; o NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> foi aplicado em até três vezes, com aplicações espaçadas uma semana; cada aplicação foi de 4,6 g vaso<sup>-1</sup>, mas cada tratamento recebeu um número diferente de aplicações. Tratamento 1 (N1 = 90 kg ha<sup>-1</sup>) recebeu aplicação apenas na 1ª semana; no tratamento 2 (N2 = 180 kg ha<sup>-1</sup>) as aplicações foram nas 1ª e 2ª semanas e tratamento 3 (N3 = 270 kg ha<sup>-1</sup>) recebeu aplicações nas 1ª, 2ª e 3ª semanas; todos os tratamentos receberam macronutrientes (P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu e B) em quantidades suficientes para assegurar que esses elementos não limitassem o desenvolvimento da planta. Para as medidas espectrais, os vasos com as plantas de milho foram transportados a um campo experimental da Universidade de Columbia, MI - EUA (latitude 38 57' N e longitude 92 19' O) e os dados espectrais foram obtidos nos dias 12, 14, 15 e 19 de maio de 2001, em milho com estágio vegetativo de V12 a V15. Uma planta de milho de cada um dos três tratamentos foi selecionada aleatoriamente e utilizada para medir a reflectância espectral. Todos os dados foram tomados na mesma planta, cercada de plantas de mesmo tratamento. As plantas de milho foram organizadas em linhas direcionadas Norte-Sul e espaçadas 20 cm (Figura 1).

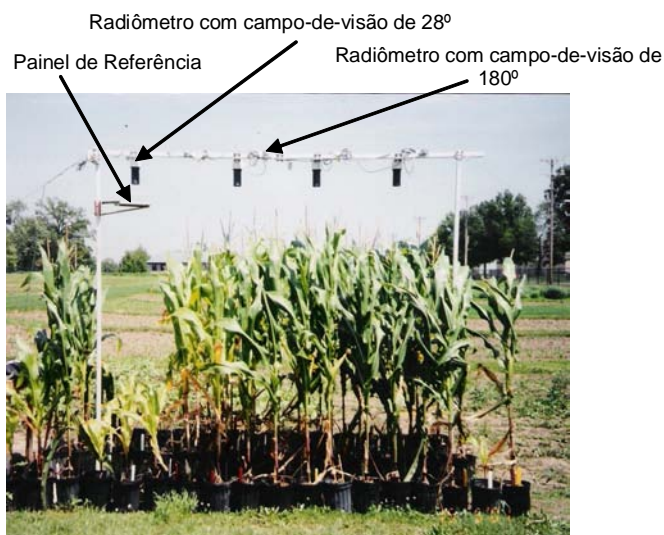


Figura 1. Disposição dos instrumentos no experimento de campo

Dados espectrais foram obtidos a cada dois segundos, das 7 às 19 h, sendo suavizados (alisados) por meio de uma média móvel de 60 medições. Devido ao forte aumento na reflectância quando a elevação de sol se aproxima de 0° grau,

só dados com elevação de sol maior que 20° graus foram analisados. Empregou-se um radiômetro Crop Circle (Holland Scientific, Lincoln, NE, EUA) para medir a reflectância espectral e irradiância global, e se usou, para calibração dos radiômetros, um painel de reflectância Spectralon (Labsphere Inc., North Sutton, NH, EUA); a reflectância espectral foi medida em larguras de banda de 10 nm centradas em 460 nm (azul), 550 nm (verde), 680 nm (vermelho) e 800 nm (IVP). Todos os radiômetros utilizados possuem sensores passivos, visto que não possuem sua própria fonte de radiação.

Três radiômetros foram posicionados sobre as plantas de milho, um para cada tratamento de N, em uma posição estacionária de aproximadamente 25 cm sobre a parte aérea do milho; um quarto radiômetro foi colocado 25 cm acima de um painel de referência e, como os radiômetros possuem um campo-de-visão de 28°, obteve-se um círculo de visão de 12,5 cm de diâmetro. Este campo-de-visão estreito assegurou que as medidas representassem, com precisão, as propriedades espectrais da planta e fossem minimizadas as interferências de cenas de fundo; antes dos testes, os radiômetros foram normalizados sobre um painel de referência Spectralon.

A irradiação global foi calculada usando-se um radiômetro de 180° de campo-de-visão voltado para cima, que possui quatro sensores com a mesma largura de banda (10 nm), e também centrados nos mesmos comprimentos de onda dos outros radiômetros; os valores das reflectâncias (R460, R550, R680 e R800) foram calculados utilizando-se dois métodos:

1. Método do receptor plano: calculou-se a reflectância (PR) a partir da irradiação global incidente em uma superfície horizontal ( $E$ , W m<sup>-2</sup>), medida com o radiômetro voltado para cima, e das radiações refletidas pelo alvo ( $I_T$ , W m<sup>-2</sup>):

$$PR = \frac{\pi * I_T}{E} \quad (1)$$

ou

$$PR_i = \frac{\pi * RAD(ji)}{RAD(Vi)} \quad (2)$$

em que:

FRI – reflectância pelo método do receptor plano na banda  $i$ ;

RAD ( $ji$ ) – radiação medida no radiômetro  $j$  (1, 2, e 3) na banda  $i$ ;

RAD ( $Vi$ ) – radiação medida pelo radiômetro voltado para cima na banda  $i$ .

2. Método do painel de referência (também chamado método da reflectância relativa): calculou-se a reflectância relativa (RR) utilizando-se a radiação refletida por um painel de referência Spectralon ( $I_{PR}$ , W m<sup>-2</sup>) posicionado horizontalmente e a radiação refletida pelo alvo ( $I_T$ , W m<sup>-2</sup>):

$$RR = \frac{I_T}{I_{PR}} \quad (3)$$

ou

$$RRi = \frac{RAD(ji)}{RAD4(i)} \quad (4)$$

em que:

RRi – reflectância relativa na banda i;

RAD (ji) – radiação medida no radiômetro j (1, 2, e 3) na banda i;

RAD 4 (i) – radiação medida no radiômetro 4 (sobre o painel de referência) na banda i.

Com base em resultados reportados por Daughtry et al. (2000) e Tumbo et al. (2002), selecionaram-se seis índices de vegetação (Tabela 1); para a avaliação da influência da taxa de N nos IV estudados se utilizaram gráficos box-plot e somente os dados correspondentes ao período entre 12 h e 30 min e 13 h e 30 min (horário de verão) e de maior irradiância, ao invés de se trabalhar com dados de todo o dia, visando restringir a influência da hora do dia na reflectância para se poder analisar a influência da taxa de N no IV; outrossim, analisou-se o comportamento dos referidos índices em função da hora do dia e se utilizou a taxa de N de 180 kg ha<sup>-1</sup> (taxa de N usualmente adotada no estado do Missouri (EUA) para a cultura do milho); neste caso, foram utilizados todos

os dados levantados; enfim, a análise estatística se constituiu de análise exploratória seguida de modelagem.

Na elaboração dos melhores modelos de regressão múltipla empregou-se o método de seleção automática de variáveis para frente (forward). O coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e o coeficiente de determinação ajustado foram utilizados para avaliar os melhores modelos. Após análise exploratória dos dados optou-se por ajustar os dados dos índices de vegetação em função da hora do dia, utilizando-se o modelo:

$$IV = a + b * T + b * T^2 + c * T^3 + d * T^4 + \varepsilon \quad (11)$$

em que:

IV - variável resposta: índice de vegetação (IVP/V, IVP/Verde, IVDN, IVVDN, IVAS e IAVAS);

T - hora do dia;

a, b, c, d, e - parâmetros do modelo a serem estimados pelo método de mínimos quadrados;

e - erro aleatório.

O coeficiente de variação (CV) foi considerado baixo quando  $CV \leq 10\%$  (homocedasticidade), médio quando  $10\% < CV \leq 20\%$ , alto quando  $20\% < CV \leq 30\%$ , e muito alto quando  $CV > 30\%$  (heterocedasticidade) (Gomes & Garcia, 2002).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A reflectância relativa na banda 550 nm apresentou comportamento aproximadamente linear em relação à reflectância pelo método do receptor plano na mesma banda (Figura 2). O

**Tabela 1.** Índices de vegetação adotados

Índice de vegetação	Fórmula
Relação infravermelho próximo/vermelho	IVPV = R800 / R680
Relação infravermelho próximo/verde	IVP/Verde = R800 / R550
Índice de vegetação da diferença normalizada	IVDN = (R800 - R680) / (R800 + R680)
Índice verde de vegetação da diferença normalizada	IVVDN = (R800 - R550) / (R800 + R550)
Índice de vegetação ajustado ao solo	IVAS = (1,5 * (R800 - R680)) / (R800 + R680 + 0,5)
Índice aperfeiçoado de vegetação ajustado ao solo	IAVAS = (1,16 * (R800 - R680)) / (R800 + R680 + 0,16)

**Tabela 2.** Estatística descritiva dos índices de vegetação: relação infravermelho próximo/vermelho (IVPV), relação infravermelho próximo/verde (IVP/Verde), índice de vegetação de diferença normalizada (IVDN), índice verde de vegetação da diferença normalizada (IVVDN), índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e índice aperfeiçoado de vegetação ajustado ao solo (IAVAS). Dia 12/05/2001

Índice	n	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo	DP	Média	C. V.
90 kg ha <sup>-1</sup>									
IVPV	30	6,24	7,07	7,51	8,12	8,56	0,63	7,56	8,28%
IVP/Verde	30	3,44	3,49	3,56	3,62	3,75	0,09	3,57	2,45%
IVDN	30	0,72	0,75	0,76	0,78	0,79	0,02	0,77	2,30%
IVVDN	30	0,55	0,55	0,56	0,57	0,58	0,01	0,56	1,48%
IVAS	30	0,42	0,44	0,45	0,47	0,49	0,02	0,45	3,97%
IAVAS	30	0,56	0,58	0,59	0,61	0,63	0,02	0,59	3,10%
180 kg ha <sup>-1</sup>									
IVPV	30	7,57	9,08	9,61	10,2	12,5	1,16	9,62	12,1%
IVP/Verde	30	4,83	5,43	5,94	6,06	6,75	0,48	5,81	8,21%
IVDN	30	0,77	0,8	0,81	0,82	0,85	0,02	0,81	2,61%
IVVDN	30	0,66	0,69	0,71	0,72	0,74	0,02	0,70	3,04%
IVAS	30	0,39	0,39	0,41	0,42	0,45	0,02	0,42	5,22%
IAVAS	30	0,56	0,57	0,57	0,59	0,61	0,02	0,58	2,80%
270 kg ha <sup>-1</sup>									
IVPV	30	10,7	11,4	13,2	14,3	15,6	1,51	13,0	11,6%
IVP/Verde	30	6,13	6,82	7,27	7,69	7,97	0,55	7,19	7,69%
IVDN	30	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,02	0,86	1,84%
IVVDN	30	0,72	0,74	0,76	0,77	0,78	0,02	0,75	2,28%
IVAS	30	0,5	0,52	0,52	0,53	0,56	0,01	0,53	2,57%
IAVAS	30	0,67	0,67	0,68	0,68	0,7	0,01	0,68	1,16%

n: Número de elementos amostrais. DP: Desvio padrão amostral.

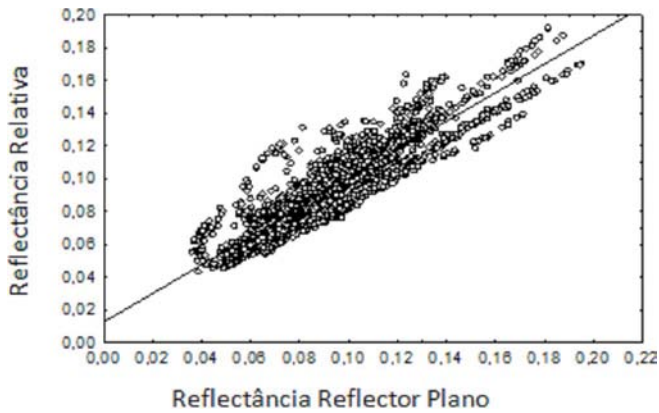


Figura 2. Reflectância relativa na banda 550 nm em função da reflectância pelo método do receptor plano na mesma banda ( $R^2 = 0,84$ )

elevado coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,84$ ) confirmou a efetividade de ambos os métodos na conversão dos dados brutos em reflectância. De agora em diante, serão reportados apenas os dados do receptor plano e se referirá à reflectância pelo método do receptor plano simplesmente como reflectância. Este método de conversão foi selecionado porque seria o mais recomendado para uso um aplicador de fertilizante de taxa-variável em tempo real.

A estatística descritiva dos dados de 12/05/2005 está apresentada na Tabela 2; verifica-se, pela análise dos dados, que os índices apresentaram aumento de seus valores médios com o aumento de N aplicado, com exceção aos índices ajustados ao solo (IVAS e IAVAS) em que ocorre diminuição de 90 para 180 kg ha<sup>-1</sup> e, posteriormente, aumento, ao pular de 180 para 270 kg ha<sup>-1</sup>; esta mesma tendência foi observada para os

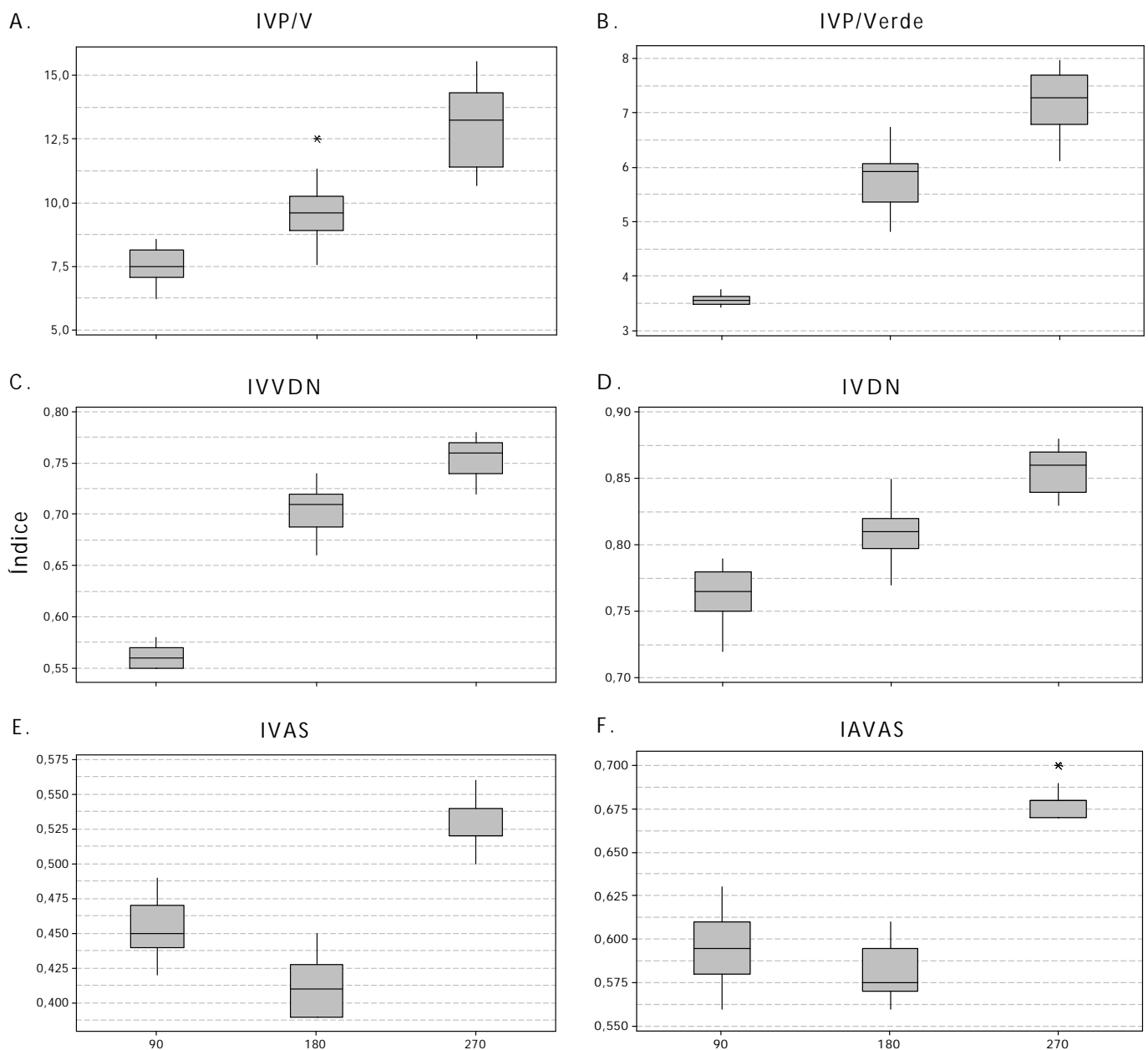


Figura 3. Gráficos box-plot para os índices de vegetação: relação infravermelho próximo/vermelho (IVP/V) (A), relação infravermelho próximo/verde (IVP/Verde) (B), índice de vegetação de diferença normalizada (IVDN) (C), índice verde de vegetação da diferença normalizada (IVVDN) (D), índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) (e) e índice aperfeiçoado de vegetação ajustado ao solo (IAVAS) (F). Dia 12/05/2001

**Tabela 3.** Estatística descritiva para os dados agrupados dos índices de vegetação. Dias 12, 14, 15 e 19/05/2001

Índice	n	Mínimo	1° Quartil	Mediana	3° Quartil	Máximo	DP	Média	C.V.
90 kg ha <sup>-1</sup>									
IVP/V	119	6,24	7,84	8,39	8,87	9,87	0,75	8,35	9,00%
IVP/Verde	119	3,44	3,8	4,08	4,32	4,67	0,34	4,05	8,49%
IVDN	119	0,72	0,77	0,79	0,8	0,82	0,02	0,78	2,31%
IVVDN	119	0,55	0,58	0,61	0,62	0,65	0,03	0,6	4,59%
IVAS	119	0,42	0,45	0,46	0,47	0,52	0,02	0,46	4,02%
IAVAS	119	0,56	0,6	0,61	0,62	0,65	0,02	0,61	2,54%
180 kg ha <sup>-1</sup>									
IVP/V	119	7,57	9,41	10,11	10,76	12,52	0,96	10,03	9,53%
IVP/Verde	119	4,83	5,54	5,94	6,62	6,97	0,63	5,99	10,50%
IVDN	119	0,77	0,81	0,82	0,83	0,85	0,02	0,82	2,07%
IVVDN	119	0,66	0,69	0,71	0,74	0,75	0,03	0,71	3,70%
IVAS	119	0,39	0,42	0,48	0,49	0,53	0,04	0,46	8,13%
IAVAS	119	0,56	0,59	0,63	0,64	0,66	0,03	0,62	4,77%
270 kg ha <sup>-1</sup>									
IVP/V	119	10	11,19	12,36	13,36	15,58	1,35	12,3	10,95%
IVP/Verde	119	5,82	6,7	7,57	7,82	8,47	0,72	7,28	9,82%
IVDN	119	0,81	0,82	0,84	0,85	0,88	0,02	0,84	2,10%
IVVDN	119	0,71	0,74	0,77	0,77	0,79	0,02	0,76	2,94%
IVAS	119	0,5	0,55	0,57	0,58	0,64	0,03	0,56	4,74%
IAVAS	119	0,67	0,69	0,7	0,71	0,75	0,02	0,7	2,39%

n: Número de elementos amostrais. DP: Desvio padrão amostral.

outros dias. Os coeficientes de variação (CV) variam de 1,2% para o IAVAS (baixo) a 12,1% para o IVP/V (médio), caracterizando, então, relativa homogeneidade dos dados.

Apresentam-se, na Figura 3, os gráficos box-plot referentes aos dados coletados no período entre 12 h e 30 min e 13 h e 30 min, do dia 12 de maio de 2001, para as taxas de N 90, 180 e 270 kg ha<sup>-1</sup>. Observa-se que os índices IVP/V, IVP/Verde e IVDN apresentaram tendência de crescimento quase linear.

As médias dos CV dos índices de vegetação para o dia 12/05/2001, foram: IVP/V 10,7%, IVP/Verde 6,1%, IVDN 2,2%, IVVDN 2,3%, IVAS 3,9% e IAVAS 2,4%. Os menores CVs

(IVDN, IVVDN e IAVAS) foram considerados baixos caracterizando, assim, boa homogeneidade dos dados. O maior CV foi novamente apresentado pelo IVP/V.

Vê-se, na Tabela 3, a estatística descritiva dos dados agrupados dos quatro dias por taxa de N aplicado. Novamente, os índices apresentam aumento de seus valores médios com o aumento da taxa de N aplicado. Os CV variam de 2,1% para o IVDN (baixo) a 11,0% para o IVP/V (médio), caracterizando relativa homogeneidade dos dados.

As médias dos CV dos índices de vegetação dos dados agrupados foram: IVP/V 9,8%, IVP/Verde 9,6%, IVDN 2,2%, IVVDN 3,7%, IVAS 5,6% e IAVAS 3,2%. Repetindo-se o ob-

**Tabela 4.** Equações de ajuste e os coeficientes de determinação. Dia 12/05/2001

Taxa de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Índice de Vegetação	Parâmetros da Equação de Ajuste					R <sup>2</sup>
		Constante	t	t <sup>2</sup>	t <sup>3</sup>	t <sup>4</sup>	
90	IVP/V	-251,349	89,359	-11,210	0,609	-0,012	42,0%
	IVP/Verde	-57,0336	21,0999	-2,6921	0,1492	-0,0030	65,2%
	IVDN	-5,70825	2,21361	-0,27550	0,01486	-0,00029	39,4%
	IVVDN	-4,56411	1,77984	-0,22643	0,01252	-0,00025	64,3%
	IVAS	-2,44643	1,25307	-0,17169	0,00947	-0,00018	88,7%
	IAVAS	-5,47589	2,20185	-0,28009	0,01507	-0,00029	85,1%
180	IVP/V	6,811050	-	-	0,004686	-0,000278	22,2%
	IVP/Verde	-3,27364	0,87946	-	-	-0,00009	57,1%
	IVDN	0,752880	-	-	0,000097	-0,000006	24,4%
	IVVDN	0,196936	0,049456	-	-	-0,000005	56,1%
	IVAS	2,342453	-0,289490	0,010867	-	-	84,2%
	IAVAS	1,792729	-0,180752	0,006728	-	-	80,3%
270	IVP/V	-	-	-	-	-	-
	IVP/Verde	273,0822	-84,6909	9,7947	-0,4904	0,0090	71,6%
	IVDN	-	-	-	-	-	-
	IVVDN	10,95870	-3,28258	0,38362	-0,01942	0,00036	69,3%
	IVAS	2,846020	-0,349318	0,013117	-	-	91,7%
	IAVAS	2,082327	-0,211669	0,007954	-	-	87,5%

aonde: t - hora do dia; — - dados perdidos. Todos os estimadores são significativos pelo teste T a taxa de 5% de probabilidade. R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinação.

servado no dia 12/05/2001, o menor CV foi constatado para o IVDN, mas a segunda menor média do coeficiente de variação foi do IAVAS. Caracterizou-se, assim, novamente, boa homogeneidade dos dados; mais essa vez, o maior CV foi apresentado pelo IVP/V.

A Figura 4 apresenta o comportamento dos índices de vegetação em função da hora do dia para a taxa de N de 180 kg ha<sup>-1</sup> para o dia 12/05/2001; verifica-se, ainda, que os índices IVP/V, IVP/Verde, IVDN e IVVDN apresentaram comportamento aproximadamente linear, enquanto os índices IVAS e IAVAS mostram comportamento parabólico, com os maiores valores no início da manhã e no final da tarde. Como já observado, o índice com maior dispersão foi o IVP/V; na Tabela 4 são apresentadas as equações de ajuste e os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) dos índices de vegetação, no dia de 12/05/2001. O menor R<sup>2</sup> foi apresentado pelo IVP/V (22,2%), considerado baixo, pois o modelo só explica 22,2% das variações da variável resposta IVP/V, correspondendo os 77,8%, a outros fatores não controlados ou não considerados; já o R<sup>2</sup> do modelo ajustado IVAS foi de 91,7%, considerado alto, visto que 91,7% das variações de IVAS são explicados pelo mode-

lo ajustado; as médias dos R<sup>2</sup> dos índices de vegetação dos dados agrupados foram: IVP/V 51%, IVP/Verde 47%, IVDN 51%, IVVDN 50%, IVAS 94% e IAVAS 89%; em média, o menor R<sup>2</sup> foi apresentado pelo IVP/Verde (47%), considerado baixo e o maior, pelo IVAS (94%), reconhecidamente alto.

## CONCLUSÕES

1. Os índices de vegetação (IV) relação infravermelho próximo/vermelho (IVP/V), relação infravermelho próximo/verde (IVP/Verde), índice de vegetação de diferença normalizada (IVDN) e índice verde de vegetação da diferença normalizada (IVVDN) apresentaram aumento de seus valores médios com o aumento da taxa de N aplicada.

2. Para o índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) e o índice aperfeiçoado de vegetação ajustado ao solo (IAVAS) ocorreu diminuição ao se pular de uma taxa de N de 90 para 180 kg ha<sup>-1</sup> e, posteriormente aumento, ao sair de 180 para 270 kg ha<sup>-1</sup>.

3. Quando analisados apenas os dados coletados em torno do meio dia solar, os IV que apresentaram a menor dispersão dos resultados foram o IVDN (CV = 2,2%) e o IAVAS (CV = 3,2%)

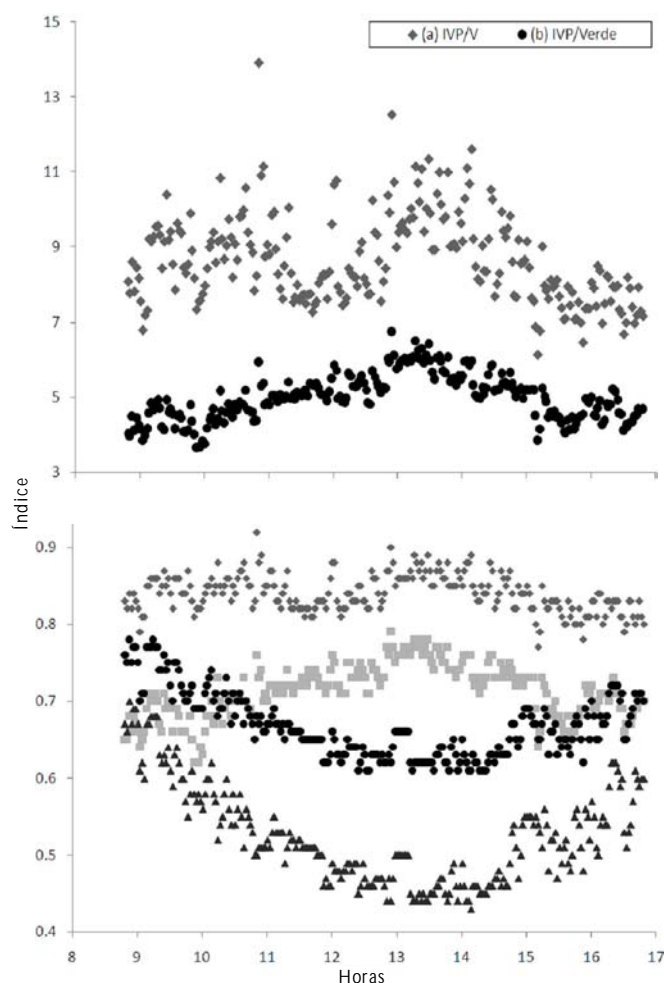
4. Para dados tomados durante todo o dia, os IV que mostraram melhor explicação da variabilidade foram o IVAS (R<sup>2</sup> = 0,88) e o IAVAS (R<sup>2</sup> = 0,84), que puderam ser modelados estatisticamente por uma função polinomial de ordem quatro com um alto R<sup>2</sup>.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro propiciado pela University of Missouri, Columbia-MO, EUA, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq; agradecem, também, o apoio técnico disponibilizado por Larry Mueller, nos trabalhos de campo.

## LITERATURA CITADA

- Balastreire, L. A.; Elias, A. I.; Amaral, J. R. Agricultura de precisão: Mapeamento da produtividade da cultura de milho. *Revista de Engenharia Rural*, v.8, p.97-111, 1997.
- Bausch, W. C.; Duke, H. R. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. *Transactions of the ASAE*, v.39, p.1869-1875, 1996.
- Blackmer, T. M.; Schepers, J. S.; Varvel, G. E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy Journal*, v.86, p.934-938, 1994.
- 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*, v.88, p.1-5, 1996.
- Daughtry, C. S. T.; Walthall, C. L.; Kim, M. S.; Brown de Colstoun, E.; McMurtrey III, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v.74, p.229-239, 2000.



**Figura 4.** Comportamento da relação infravermelho próximo/vermelho (IVP/V) (A), da relação infravermelho próximo/verde (IVP/Verde) (B), do índice de vegetação de diferença normalizada (IVDN) (c), do índice verde de vegetação da diferença normalizada (IVVDN) (d), do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) (e) e do índice aperfeiçoado de vegetação ajustado ao solo (IAVAS) (f) para o dia 12/05/2001, com uma taxa de N de 180 kg ha<sup>-1</sup>

- Davis, P. A. Exploring the atmosphere's first mile. The great plains turbulence field program. In: O'Neill, Nebraska; Lettau, H. H.; Davidson, B. (ed.). Symposium Publications Division, 1957, New York. Anais... New York: Pergamon Press, 1957. p.377-383.
- Dellinger, A. E.; Schmidt, J. P.; Beegle, D. B. Developing Nitrogen Fertilizer Recommendations for Corn Using an Active Sensor. *Agronomy Journal*, v.100, n.6, p.1546-52, 2008.
- Gao, B.; Li, R. Quantitative improvement in the estimates of NDVI values from remotely sensed data by correcting thin cirrus scattering effects. *Remote Sensing of Environment*, v.74, p.494-502, 2000.
- Gardener, B. R. Techniques for remotely monitoring canopy development and estimating grain yield of moisture stressed corn. Lincoln: University of Nebraska, 1983. 187p. Dissertação Mestrado
- Gomes, F. P.; Garcia, C. H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- Graeff, S.; Claupein, W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements. *European Journal of Agronomy*, v.19, p.611-618, 2003.
- Jackson, R. D.; Pinter, P. J.; Idso, S. B.; Reginato, R. J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. *Applied Optics*, v.18, p.3730-3733, 1979.
- Kitchen, N. R.; Goulding, K. W. On farm technologies and practices to improve nitrogen use efficiency. In: Follett, R. F.; Hatfield, J. L. Nitrogen in the environment: sources, problems, and management. Amsterdam: Elsevier Science, Netherlands, 2001, cap.13, p.335-369.
- Malavolta, E.; Nogueira, N. G. L.; Heinrichs, R.; Higashi, E. N.; Rodriguez, V.; Guerra, E.; Oliveira, S. C.; Cabral, C. P. Evaluation of nutritional status of the cotton plant with respect to nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.35, p.1007-1019, 2004.
- Molin, J. P. Agricultura de precisão - mais um desafio para o agricultor brasileiro. *Revista Plantio Direto*, v.39, p.26-27, 1997.
- Neves, O. S. C.; Carvalho, J. G.; Martins, F. A. D.; Pádua, T. R. P.; Pinho, P. J. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, p.517-521, 2005.
- Raun, W. R.; Solie, J. B.; Johnson, G. V.; Stone, M. L.; Lukina, E. V.; Thomason, W. E.; Schepers, J. S. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal*, v.94, p.815-820, 2002.
- Scharf, P. C.; Lory, J. A. Calibration of remotely sensed corn color to predict nitrogen need. *Agronomy Journal*, v.94, p.397-404, 2002.
- Souza, E. G.; Scharf, P. C.; Sudduth, K. A.; Hipple, J. D. Using a field radiometer to estimate instantaneous sky clearness. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.369-373, 2006.
- Tumbo, D. S.; Wagner, D. G.; Heinemann, P. H. Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels. *Transactions of the ASAE* v.45, n.3, p.815-823, 2002.
- Wood, C. W.; Reeves, D. W.; Himelrick, D. G. Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: A review. *Proceeding of Agronomy Society of New Zealand*, v.23, p.1-9, 1993.
- Zhao, D.; Reddy, R. K.; Kakani, V. G.; Read, J. J.; Koti, S. Selection of optimum reflectance ratios for estimating leaf nitrogen and chlorophyll concentrations of field-grown cotton. *Agronomy Journal*, v.97, p.89-98, 2005.