

## Análise de dados hiperespectrais na estimativa da produtividade de trigo

Alexandre Cândido Xavier<sup>1</sup>  
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff<sup>2</sup>  
Mauricio Alves Moreira<sup>2</sup>  
Brummer Seda Alvarenga<sup>3</sup>  
José Guilherme de Freitas<sup>4</sup>  
Marcus Vinicius Salomon<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Espírito Santo – UFES,  
Caixa Postal 16 - 29500-000 - Alegre – ES, Brasil  
{xavier@cca.ufes.br}

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{bernardo, mauricio}@dsr.inpe.br

<sup>3</sup> Geoambiente Sensoriamento Remoto Ltda  
Av. Shishima Hifumi, 2911 - 12244-000 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{brummer}@geoambiente.com.br

<sup>4</sup> Instituto Agronômico Campinas – IAC,  
Caixa Postal 28 - 13020-902 - Campinas - SP, Brasil  
{jfreitas@iac.sp.gov.br; salomonmv@hotmail.com}

**Abstract.** The main aim of this work was to analyze the narrow band normalized difference vegetation index (NB\_NDVI) and linear combination between two narrow bands to estimate wheat (*Triticum aestivum* L.) grain yield. Field canopy reflectance measurements were acquired at six wheat growth stages over 80 plots with four wheat cultivars growing under five different nitrogen levels. Seven hundred and seventeen narrow bands between 350 nm and 2,500 nm with bandwidth of 3 nm were used. The results showed that linear combination between two narrow bands was better than NB\_NDVI to predict grain yield. Best two narrow bands combinations were those for bands within the red and near-infrared wavelengths, respectively. Heading was the best growth stage to estimate grain yield.

**Palavras-chave:** remote sensing, hyperspectral vegetation indices, sensoriamento remoto, índices de vegetação hiperespectrais.

### 1. Introdução

O sensoriamento remoto hiperespectral permite obter medidas radiométricas de um alvo em um grande número de estreitas bandas espectrais. Como exemplo de um sensor hiperespectral podemos citar o Hyperion a bordo do satélite EO-1 da NASA (EO-1 User Guide, 2003). Os dados radiométricos coletados por estes sensores podem ser transformados em índices de vegetação hiperespectrais que estão relacionados com aspectos biofísicos da vegetação. Dentre os vários índices desenvolvidos para se relacionar com variáveis biofísicas, destacam-se o índice de vegetação da diferença normalizada de duas bandas estreitas quaisquer (NB\_NDVI; *narrow band-normalized difference vegetation index*) e a combinação linear entre duas bandas estreitas (Thenkabail et al., 2000). Thenkabail et al. (2004) ao utilizarem dados hiperespectrais e dados simulados do sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper plus*) a bordo do satélite Landsat-7 para classificar diversas coberturas vegetais, relatam que a eficiência da classificação dos dados hiperespectrais foi superior de 4% a 43% em relação àquela obtida com os dados do ETM+. Xavier et al. (2006) comparando vários índices de

vegetação hiperespectrais e multiespectrais observaram que os índices hiperespectrais foram mais eficientes para estimar a produtividade de grãos e a altura de plantas de trigo.

Vários trabalhos estão sendo realizados para determinar as melhores bandas na estimativa de variáveis biofísicas por meio de dados hiperespectrais (e.g. Ruiliang Pu et al., 2003). Para tanto se faz uso da análise de regressão de todas as combinações possíveis entre duas bandas estreitas, segundo determinado índice de vegetação hiperespectral, para se estimar uma determinada variável biofísica. Os resultados são então apresentados por meio de mapas mostrando os valores de coeficientes de determinação para cada combinação de banda, sendo então possível escolher as melhores combinações entre bandas estreitas, assim como a largura da banda (Thenkabail et al., 2000).

O objetivo deste trabalho é o de mapear as melhores combinações de reflectância de bandas estreitas, medidas em seis estádios fenológicos, segundo o modelo NB\_NDVI e a combinação linear entre duas bandas estreitas quaisquer, para estimar a produtividade de trigo.

## 2. Material e Métodos

Os dados radiométricos e biofísico foram coletados sobre dosséis de trigo (*Triticum aestivum*, L), num experimento instalado na área experimental do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), em Campinas, São Paulo (coordenadas centrais de 22° 51' 47" S e 47° 04' 42" W). O experimento foi em quatro blocos ao acaso, com cinco níveis de adubação nitrogenada (0, 30, 60, 90 e 120 kg de N ha<sup>-1</sup>) e quatro cultivares (IAC-362, IAC-364, IAC-370 e IAC-373), num total de 80 canteiros. O espaçamento foi de 0,15 m entre linhas com aproximadamente 80 sementes viáveis por metro linear. As adubações de fósforo e potássio foram de 40 e 90 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os micronutrientes boro e zinco foram aplicados nas proporções de 0,5 e 1,0 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A irrigação foi realizada por aspersão, para manter a umidade do solo próximo à capacidade de campo.

A produtividade de grãos foi adquirida ao final do ciclo da cultura. Para evitar o efeito da bordadura apenas a parte central de cada canteiro foi colhida, eliminando uma linha de cada lado e 0,5 m em cada extremidade. Deste modo, a área colhida correspondeu a 1,36 m<sup>2</sup>. Após a colheita o trigo foi trilhado e seco até que o teor de umidade na semente atingisse 13%. Para maiores detalhes consultar Xavier et al. (2006).

Os dados espectrais foram coletados por meio do espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR (*Analytical Spectral Device Inc.*, 2003) na região do espectro eletromagnético de 350 a 2500 nm, em seis estádios fenológicos (**Tabela 1**). Para cada canteiro foi coletada uma medida de reflectância a uma altura de aproximadamente 1,2 m com um campo de visada instantâneo de 25° (IFOV, *Instantaneous Field of View*) o que resultou na medição de uma área do dossel de 0,22 m<sup>2</sup>. Os dados originais de reflectância foram agrupados em bandas estreitas de largura de 3 nm, a partir da média de reflectância dos dados originais, resultando em 717 bandas estreitas.

Tabela 1 – Período analisado e seu respectivo estágio fenológico

<b>Data da Medição</b>	<b>Descrição do estágio fenológico</b>	<b>Estádio</b>
02/jul/2003	Plantas recém-emergidas, com uma ou mais folhas	Afilhamento I
23/jul/2003	Afilhos formados	Afilhamento II
13/ago/2003	Início do período de emborrachamento	Alongamento
24/ago/2003	Um quarto do processo de espigamento completo	Espigamento I
19/set/2003	Final de florescimento, grão aquoso.	Espigamento II
01/out/2003	Grãos duros	Maturação

Foram utilizados dois modelos para avaliação da produtividade de trigo: i) o primeiro foi uma regressão linear tendo como variável independente NB\_NDVI, que é diferença normalizada entre duas bandas estreitas quaisquer (Thenkabail et al., 2000); e ii) o segundo um modelo de regressão linear baseado em duas bandas estreitas, como segue abaixo:

$$i) B = a_0 + a_1 NB\_NDVI_{ij}, \text{ em que } NB\_NDVI_{ij} = \frac{NB_i - NB_j}{NB_i + NB_j}$$

$$ii) B = a + a_1 NB_i + a_2 NB_j$$

em que: B é a produtividade do trigo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); NB é a reflectância de cada banda estreita  $i, j$  ( $i=j=1, \dots, n$ , sendo  $n=717$ , número de bandas estreitas). O total de combinações avaliadas para cada modelo em cada estádio foi de  $n*n$ ,  $717*717 = 514.089$ . Para cada estádio e modelo foi gerado um mapa de isolinhas de  $R^2$  segundo  $\lambda \times \lambda$ , sendo  $\lambda$  o centro do comprimento de onda de cada uma das 717 bandas. Por meio destes dados foram escolhidas as regiões espectrais e o modelo que apresentou os melhores resultados, assim como o melhor estádio fenológico, tendo em vistas aqueles que geraram os maiores valores de  $R^2$  e maior frequência de ocorrência destes valores.

### 3. Resultados

O comportamento espectral do trigo nos diferentes estádios fenológicos é apresentado na **Figura 1**. Tendo como finalidade apenas apresentar o padrão espectral médio de cada estádio, cada curva na **Figura 1** é representada pela média das 80 medidas radiométricas. As diferenças entre as curvas são devidas aos diferentes estádios fenológicos da cultura que são basicamente caracterizados por: *i*) no estádio Afilhamento I, plantas com baixo desenvolvimento, logo menor quantidade de biomassa verde, o que resulta em maiores valores de reflectância na faixa do visível quando comparado aos demais estádios, com exceção do estádio de maturação; na faixa do infravermelho próximo, menores valores de reflectância devido à baixa quantidade de folhas; no infravermelho médio não é observado, com grande destaque, os picos de reflectância, localizados nos comprimentos de onda de 1.675 nm e 2.235 nm, característicos de vegetação com maior quantidade de biomassa verde; *ii*) nos estádios Afilhamento II, Alongamento e Espigamento I, o trigo é caracterizado com a máxima quantidade de biomassa verde, logo, apresentaram menores valores de reflectância na faixa do visível, resultado da absorção da radiação pelos pigmentos da folha; maiores reflectâncias na faixa infravermelho próximo, devido à maior quantidade de folhas com os picos em 915 nm, 1.085 nm e 1.245 nm e as bandas de absorção devido à umidade das folhas em 985 nm e 1.215 nm; na região do infravermelho médio, observa-se de forma bem definida os picos de reflectância devido à lignina em aproximadamente 1.675 nm e 2.235 nm; *iii*) por fim, na Maturação, em que a planta já se encontrava senescente, maiores valores de reflectância na região do visível são observados, principalmente nos comprimentos de onda do verde e do vermelho; há uma queda de reflectância na faixa do infravermelho médio, quando comparado aos demais estádios, devido à perda da estrutura foliar interna; na região do infravermelho médio os picos de reflectância são menos notáveis.

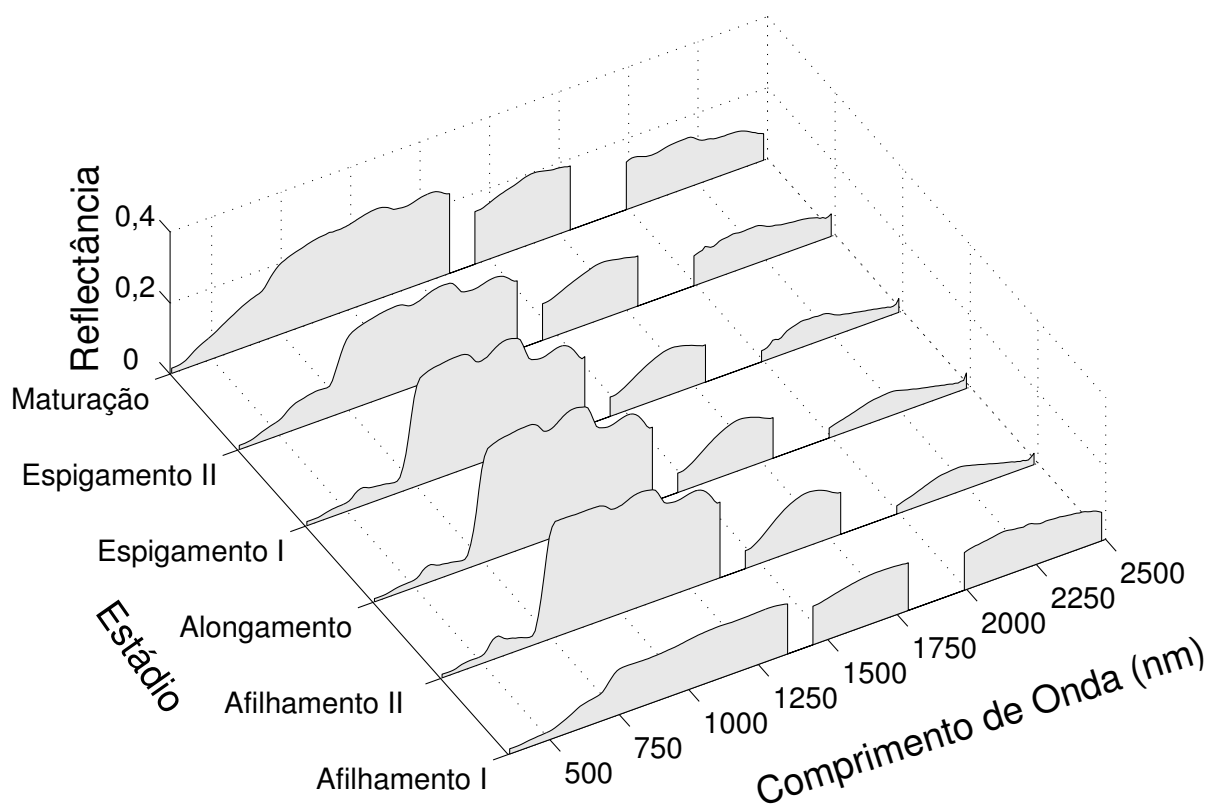


Figura 1 – Reflectância média do trigo ao longo de seu ciclo de crescimento e desenvolvimento.

Na **Figura 2** são apresentados os mapas de isolinhas de  $R^2$  segundo o índice NB\_NDVI e a combinação linear de duas bandas para todas as combinações de bandas estreitas nos comprimentos de onda  $\lambda_i$  e  $\lambda_j$  com largura de banda de  $(\Delta\lambda)$  3 nm, na estimativa da produtividade do trigo com base nas medidas radiométricas obtidas nos diferentes estádios. Na parte superior dos mapas de isolinha de cada estádio são apresentados os  $R^2$  calculados a partir do NB\_NDVI, enquanto na parte inferior, são apresentados os  $R^2$  pela combinação linear de duas bandas. Os resultados dos estádios Afilhamento I e II foram excluídos uma vez que os valores de  $R^2$  para os dois modelos foram considerados baixos ( $R^2 < 0,50$ ). Este resultado é causado, provavelmente, pela baixa resposta espectral da vegetação frente à resposta do solo, pois neste estádio a quantidade de biomassa verde é baixa e o solo tem grande influência na resposta espectral. Nos demais estádios, geralmente, os maiores valores de  $R^2$  localizam-se entre os comprimentos de onda de 600 e 1.200 nm, região espectral correspondente: ao comprimento de onda do vermelho, com alta absorção da radiação pelos pigmentos da planta; à região da borda do vermelho ( $\lambda \sim 705$  nm a  $\lambda \sim 735$  nm), com rápido aumento da reflectância, sendo sensível ao estresse da vegetação (Thenkabail et al., 2004); e à região do infravermelho próximo, caracterizado pela resposta da reflectância devida à estrutura das folhas e quantidade de folhas.

Na região do infravermelho médio ( $\lambda \sim 1.300$  nm a  $\lambda \sim 2.500$  nm), sensível ao conteúdo de água das folhas, também são observadas regiões com  $R^2$  maior que 0,50, todavia com menores valores quando comparadas às regiões citadas anteriormente. Comportamentos semelhantes aos relatados aqui podem ser observados em Thenkabail et al. (1999), para estudo de diversas variáveis biofísicas de algumas culturas agrícolas, e por Ruiliang Pu et al. (2003), para o índice de área foliar de florestas na região da Patagônia, Argentina.

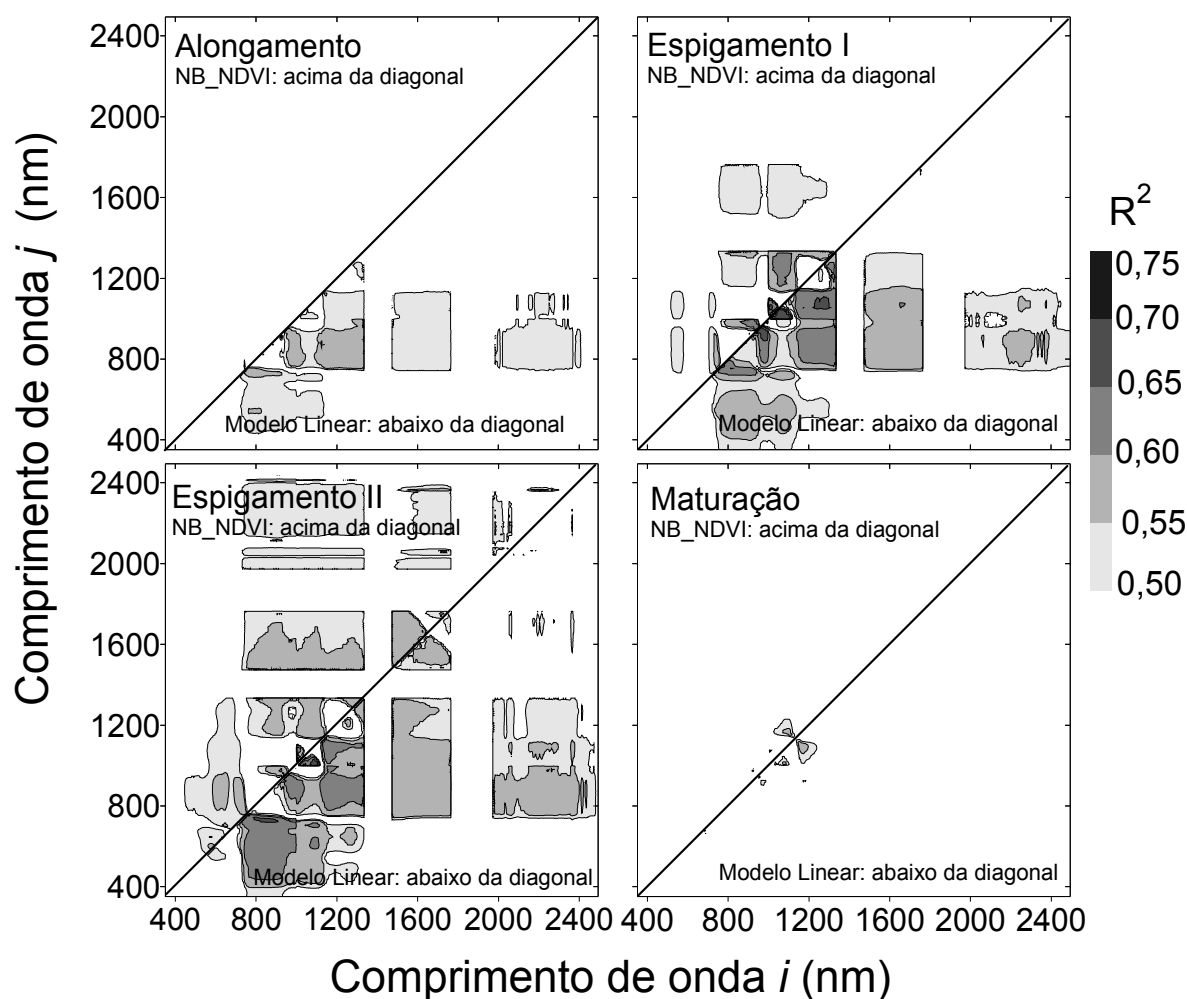


Figura 2 – Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação para estimativa da produtividade de trigo por meio dos modelos NB\_NDVI e de regressão linear baseado em duas bandas estreitas.

Na **Tabela 2**, para NB\_NDVI e para a combinação linear entre duas bandas estreitas, são apresentadas as respectivas freqüências de ocorrência de valores de  $R^2$  superior a 0,50 e sua percentagem em relação ao total de combinações possíveis (514.089) nos estádios da cultura analisados. Como já foi dito anteriormente, nos estádios Afilhamento I e II não foram observados relações de  $R^2$  maior que 0,50, logo com freqüência nula. Para os demais estádios, a combinação linear de duas bandas apresentou maiores valores de freqüência de resultados com  $R^2$  superior a 0,50 quando comparadas à freqüência de  $R^2$  calculados por meio do NB\_NDVI. Isto é, mais combinações entre duas bandas estreitas, a partir do modelo linear, apresentam a possibilidade de explicar mais de 50% da variação da produtividade de trigo. Nos estádios de Alongamento e Maturação, com exceção da combinação entre duas bandas no estádio de Alongamento, a freqüência é muito pequena (~0%). Os estádios de Espigamento I e II foram os que apresentaram maiores combinações com  $R^2$  maior que 0,50, sendo o melhor resultado no Espigamento II, onde foram observadas 181.838 combinações com o modelo linear de duas bandas estreitas de  $R^2$  superior a 0,50, ou seja, 35% do total de combinações possíveis com este modelo para este estádio. Neste mesmo estádio, utilizando-se o NB\_NDVI, observou-se 160.164 (31%), ou seja, este modelo apresentou 4% a menos de combinações que resultaram em  $R^2$  maior que 0,50 quando comparado com o modelo de duas bandas.

Tabela 2 – Número e percentagem de combinações de bandas em relação ao número total de combinações que apresentou  $R^2$  maior que 0,50, segundo modelos NB\_NDVI e combinação linear entre duas bandas.

Estádio	# de pares de banda com $R^2 > 0,50$ utilizando-se o modelo NB_NDVI*	# de pares de banda com $R^2 > 0,50$ utilizando-se combinação linear de duas bandas*
Afilhamento I	0 (0)	0 (0)
Afilhamento II	0 (0)	0 (0)
Alongamento	148 (0)	95.404 (19)
Espigamento I	49.184 (10)	152.366 (30)
Espigamento II	160.164 (31)	181.838 (35)
Maturação	1.370 (0)	2.112 (0)

\*Entre parênteses percentagem em relação ao número total de combinações (514.089).

#### 4. Conclusões

Neste trabalho foi feita uma análise de dados hiperespectrais obtidos em diferentes estádios fenológicos do trigo para estimar a produtividade de grãos de trigo. Foram utilizados os índices hiperespectrais NB\_NDVI e a combinação linear de entre duas bandas estreitas. Os melhores resultados para se estimar a produtividade de trigo foram obtidos utilizando a combinação linear entre duas bandas. As regiões espectrais com maior potencial para serem utilizadas nos modelos aqui estudados para estimar a produtividade foram as regiões do vermelho e do infra-vermelho próximo. O melhor estágio para se coletar dados hiperespectrais com o objetivo de estimar a produtividade do trigo foi o Espigamento II.

#### Referências

Analytical Spectral Device Inc. FieldSpec® FR Portable Spectroradiometer. [online]. 2003. <[www.asdi.com/asdi\\_t2\\_pr\\_sp\\_fsp.html](http://www.asdi.com/asdi_t2_pr_sp_fsp.html)>. Acesso em: 14 fev. 2003.

Thenkabail, P.S.; Smith, R.B.; De-Pauw, E. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v.71, p.158-182, 2000.

Thenkabail P.S.; Enclona E.A.; Ashton M.S.; Van Der Meer B. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis. **Remote Sensing of Environment**, v.91, p.354-376, 2004. Earth Observation-1. User Guide v. 2.3. University of Cincinnati, 2003.

Ruiliang Pu, P. G.; Biging, G. S.; Larrieu, M. R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p. 1355-1362, 2003.

Xavier, A. C.; Rudorff, B. F. T.; Moreira, M. A.; Alvarenga, B. S.; Freitas, J. G.; Salomon, M. V. Hyperspectral field reflectance measurements to estimate wheat grain yield and plant height. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 2, p.130-138, 2006.