

Avaliação de Índices de Vegetação e de Índice de Área Foliar na caracterização espectral de dosséis de trigo (*Triticum aestivum*, L. - IAC-370)

Flávio Fortes Camargo ¹
Marcos Adami ¹
Fábio Marcelo Breunig ¹
Luiz Rogério Mantelli ¹
Mauro Corrêa da Costa ¹
Flávio Jorge Ponzoni ¹
José Guilherme de Freitas ²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fortes, adami, breunig, mantelli, costa, flavio}@dsr.inpe.br

² Instituto Agronômico de Campinas
Caixa Postal 28 - 13001 - Campinas - SP, Brasil
jfreitas@cec.iac.br

Abstract. The potential of vegetation indices in the spectral characterization and in the Leaf Area Index (LAI) estimation of winter wheat crop canopies (*Triticum aestivum*, L. - IAC-370) submitted to different nitrogen fertilization levels were evaluated. A field campaign was carried out during the 2006 wheat winter growing season in Campinas, São Paulo State, Brazil. Field canopy reflectance measurements were performed at two wheat growth stages over seventy two plots and three different levels of nitrogen (N) fertilizer (0, 60, and 120 kg of N ha⁻¹). Discriminant analysis was applied to contrast the vegetation indices and LAI values obtained from the different levels of N fertilization. Significant differences between LAI values confirmed the potential of this biophysical variable to discriminate the N treatments. The correlation between the vegetation indices and the LAI values was low in general. The best correlations were established considering the GNDVI.

Palavras-chave: remote sensing, nitrogen, vegetation indices, leaf area index, sensoriamento remoto, nitrogênio, índices de vegetação, índice de área foliar.

1. Introdução

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais absorvidos pelas plantas sendo o responsável pela produção de matéria seca (Werner et al., 2001) e de fitomassa (Greenwood et al., 1991). Sabe-se que a presença de nitrogênio no sistema solo-planta desenvolve funções metabólicas fundamentais, responsáveis pelo estímulo do crescimento e do perfilhamento, pelo retardamento da senescência e pela alteração na partição de carbono em proveito da parte aérea dos vegetais (Whitehead, 2000). Liu et al. (2004) argumentam que maior concentração de N tende a ocasionar maior presença de ligninas e fibras nas plantas. Por outro lado, a carência de N provoca a diminuição de clorofila, diminuição da fitomassa e do Índice de Área Foliar (IAF). Verifica-se, também, o retardo no crescimento de brotos, raízes e cumes. Esses efeitos se relacionam com a redução da atividade fotossintética.

Desta forma, o desenvolvimento estrutural de um dossel vegetal é estreitamente influenciado pela atividade fotossintética, a qual, por sua vez, é dependente da disponibilidade de N no solo e na atmosfera. Esse desenvolvimento estrutural pode ser caracterizado pelo IAF que é um dos parâmetros biofísicos comumente utilizados para monitorar as condições de crescimento das culturas agrícolas e pode ser correlacionado à disponibilidade de N no ambiente. De acordo com Panhwar (2004), o IAF se relaciona positivamente com os processos de perfilhamento e de acumulação de matéria seca.

O conteúdo de N nas plantas pode ser avaliado através de métodos indiretos. Um dos métodos mais simples consiste na observação do vigor da coloração verde das plantas e, por conseguinte, na verificação da ocorrência de clorose ou amarelamento das folhas, que indica a falta de N (Wright et al, 2002).

Com base neste conhecimento, pode-se utilizar dados de sensores remotos em níveis de campo, aéreo e orbital para avaliar e estimar o conteúdo de N nas plantas. Sabe-se que a diminuição da concentração dos pigmentos clorofilados, ocasionada pela carência em N, interfere na reflectância espectral na região do espectro visível. Os pigmentos que mais influenciam a reflectância nesta região são as clorofilas *a* e *b*, com os picos de absorção localizados nos comprimentos de onda de 420, 435, 649, 665 nm; e os carotenóides com pico de absorção em 480 nm (Blackmer et al., 1996). Wright et al. (2003) em um estudo que avaliou cultivos de trigo submetidos a diferentes concentrações de N (0 Kg ha⁻¹; 70 Kg ha⁻¹; 170 Kg ha⁻¹ e 221 Kg ha⁻¹), observaram que os maiores valores de reflectância no espectro visível se relacionavam com os tratamentos submetidos a menores taxas de adubação nitrogenada e que a adição de N implica na diminuição da reflectância espectral no visível e no aumento da reflectância espectral entre 700 e 1300 nm.

Com relação aos índices de vegetação (IV), estes foram idealizados a partir da forma característica da resposta espectral da vegetação verde, combinando a baixa reflectância nos comprimentos de onda do visível com a alta reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo do espectro eletromagnético com o objetivo de melhorar a relação desses dados com os parâmetros biofísicos da vegetação (Daughtry et al., 2000).

Desse modo, os objetivos deste trabalho são avaliar o potencial de um conjunto de IV na caracterização espectral de dosséis de trigo panificável (*Triticum aestivum*, L. - IAC-370) submetidos a diferentes níveis de adubação de N e, também, avaliar o potencial destes na estimativa do IAF.

2. Material e Métodos

2.1. Delineamento experimental

O experimento foi instalado na Fazenda Santa Elisa (22° 51' 53" S e 47° 04' 52" W), do Centro Experimental Central do Instituto Agronômico Campinas (IAC), em Campinas-SP, numa altitude de 672 metros. O solo no experimento é identificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 1999). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa (clima mesotérmico com verões quentes e estação seca de inverno). O trigo nessa região, de acordo com o zoneamento tritícola, deve ser cultivado sob regime de irrigação por aspersão.

O delineamento estatístico de blocos ao acaso foi adotado para o genótipo de trigo (*Triticum aestivum*, L.). Aplicou-se três dosagens de nitrogênio, 0, 60 e 120 kg N.ha⁻¹, que foram denominadas N0, N60 e N120, respectivamente. Seguindo as recomendações técnicas, foi aplicado 1/3 da dosagem de N no plantio e o restante foi feito em cobertura, no dia 20/07/2006, utilizando-se a uréia como fonte de N. As parcelas têm 5,0 m de comprimento e 1,2 m de largura. O solo foi preparado de maneira convencional. A adubação de base foi feita com fósforo (P) e potássio (K), de acordo com a análise do solo, com o formulado 0-20-20 de N-P-K, na dosagem de 200 kg.ha⁻¹.

2.2. Medidas de Fator de Reflectância e Índice de Área Foliar

As missões de campo para coleta de dados foram realizadas quinzenalmente, sendo que as medidas radiométricas foram coletadas às 11:00 horas e a medida de índice de área foliar (IAF) foi coletada no início da manhã, em cada missão. O equipamento utilizado para coletar

as medidas radiométricas foi o espectrorradiômetro portátil de campo FieldSpec Pro FR (Analytical Spectral Device Inc., 2006). O aparelho é constituído por um *notebook* e pelo espectrorradiômetro propriamente dito que opera na faixa de 350 a 2500 nm. O *Field of View* (FOV) utilizado foi de 25°, posicionado ao nadir e a uma distância de 76 cm do alvo, o que perfaz um *Geometric Instantaneous Field of View* (GIFOV) de 891,84 cm². Para a coleta dos dados de radiometria no campo, seguiu-se o seguinte roteiro: a) otimização da relação sinal-ruído em função da variação da radiância medida na placa de referência (Spectralon); b) leitura da radiância da placa de referência; c) posicionamento do sensor sobre o alvo e tomada da medida da radiância. Destas medidas obteve-se o Fator de Reflectância Direcional-Cônico (ρ), que é a razão entre a radiância espectral da amostra (cultura) e da placa-padrão, medidas nas mesmas condições de iluminação e observação (Milton, 1987). O aplicativo RS2 faz a interface entre o espectrorradiômetro e o *notebook* e foi utilizado também para a calibração do sistema e para converter as medidas de radiância do trigo, com base na placa de referência, em ρ para cada parcela. Devido à absorção atmosférica da radiação e outras interferências, as bandas de 1350 a 1450 nm, 1750 a 2020 nm e 2350 a 2500 nm foram desconsideradas.

Para realizar as medidas do IAF foi utilizado o aparelho *Plant Canopy Analyzer*, modelo LAI-2000 (LI-COR Biosciences Inc., 2006). A determinação do IAF é realizada a partir de medidas da radiação solar, preferencialmente difusa, que chega acima e abaixo do dossel da cultura. Além do IAF, o LAI-2000 estima também a Distribuição Angular Foliar (DAF) do dossel. Estas estimativas são realizadas de forma não destrutiva, o que permite acompanhar o desenvolvimento da cultura. As datas das missões, estádios fenológicos do trigo e os ângulos de elevação e azimute solar são apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1. Datas da realização do trabalho de campo, estádios fenológicos do trigo e ângulos de elevação e azimute solar no horário de início das coletas.

Data	Estádios Fenológicos	11:00 h	
		Elevação	Azimute
21/07/06	Alongamento do colmo	43,01	24,23
04/08/06	Espigamento	45,99	26,02

2.3. Índices de Vegetação

Os IV são agrupados em 3 categorias: os intrínsecos, os relacionados à linha do solo e os ajustados atmosféricamente. Os IV utilizados neste trabalho tomaram como base os trabalhos de Daughtry et al. (2000) e Kimura et al. (2004).

Os IV intrínsecos consideram apenas medidas de reflectância do visível e do infravermelho próximo. Dentre estes índices, o *Ratio Vegetation Index* (RVI) e *Green Vegetation Index* (GVI) são obtidos através da razão simples entre as bandas do infravermelho próximo (IVP) e vermelho (**Equação 1**) e entre as bandas do IVP e verde (**Equação 2**), respectivamente. As equações abaixo representam os índices mencionados (Daughtry et al., 2000).

$$RVI = \frac{\rho_{800}}{\rho_{680}} \quad (1)$$

$$GVI = \frac{\rho_{800}}{\rho_{550}} \quad (2)$$

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) foi concebido para reduzir os efeitos de diferença de iluminação, sombra, atenuação atmosférica e variação topográfica (Huete et al., 2002). Uma variante do NDVI é o *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI). Ambos os índices são descritos pelas **Equações 3 e 4** (Daughtry et al., 2000).

$$NDVI = \frac{(\rho_{800} - \rho_{680})}{(\rho_{800} + \rho_{680})} \quad (3)$$

$$GNDVI = \frac{\rho_{800} - \rho_{550}}{\rho_{800} + \rho_{550}} \quad (4)$$

O *Normalized Difference Water Index* (NDWI) foi definido por Gao (1996), e é dado pela **Equação 5**.

$$NDWI = \frac{\rho_{864} - \rho_{1245}}{\rho_{864} + \rho_{1245}} \quad (5)$$

Em 864 nm a absorção de REM em função do conteúdo de água foliar é insignificante, porém, em 1245 nm este tipo de absorção ocorre. Neste sentido, NDWI é adequado na detecção de mudanças no conteúdo de água líquida em plantas (Gao, 1996).

O *Modified Chlorophyll Absorption in the Reflectance Index* (MCARI) é dado pela **Equação 6**, proposta por Daughtry et al. (2000).

$$MCARI = \left[(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0,2(\rho_{700} - \rho_{550}) \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \right) \right] \quad (6)$$

O MCARI consiste em uma modificação do CARI (*Chlorophyll Absorption in the Reflectance Index*) e relaciona a banda a absorção de clorofila em 670 nm aos espectros de maior reflectância em 550 nm e 700 nm (Daughtry et al., 2000).

Os IV ajustados à linha do solo usam coeficientes que tomam por base a relação linear entre a reflectância do visível e do infravermelho próximo para reduzir o efeito de fundo (Daughtry et al., 2000). O *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) foi definido a partir da relação linear entre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo para reduzir a influência do solo na reflectância do dossel e é expresso pela **Equação 7** (Baret, et al., 1989; Rondeaux et al., 1996).

$$SAVI = \frac{(1+L).(\rho_{800} - \rho_{680})}{(\rho_{800} + \rho_{680} + L)} \quad (7)$$

O *Optimized Soil Adjusted Vegetation Index* (OSAVI) é uma variação do SAVI, indicado para o monitoramento de cultivos agrícolas (Rondeaux et al., 1996). A partir da avaliação de vários coeficientes em diferentes índices, Rondeaux et al., (1996) obtiveram o melhor ajuste com o valor de 0,16. A vantagem do OSAVI em detrimento dos demais índices dependentes da linha do solo é que sem conhecer a linha do solo, ele pode ser determinado, ou seja, não demanda um conhecimento *a priori* do tipo do solo (Steven, 1998). O OSAVI é dado pela **Equação 8** (Rondeaux et al., 1996; Steven, 1998).

$$OSAVI = \frac{(\rho_{800} - \rho_{680})}{(\rho_{800} + \rho_{680} + 0,16)} \quad (8)$$

Dentre os IV ajustados à atmosfera o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) responde melhor a variações na estrutura e na arquitetura dos dosséis e na fisiologia da planta. O EVI foi desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação a partir da redução do efeito da atmosfera e do sinal de fundo. O EVI é dado pela **Equação 9** (Huete et al., 2002).

$$EVI = G \cdot \frac{(\rho_{800} - \rho_{680})}{(\rho_{800} + C_1 \cdot \rho_{680} - C_2 \cdot \rho_{469} + L)} \quad (9)$$

Os valores de C_1 e C_2 são coeficientes de resistência de aerossóis, dados por 6 e 7,5 respectivamente. O G é um fator de ganho, dado por 2,5 (Huete et al., 2002).

3. Resultados e discussão

Os IAF observados na data de 21/07/06 variaram entre 1,10 e 6,13 e na data de 04/08/06 as observações de IAF variaram entre 1,69 e 6,99. Os resultados da análise de discriminantes indicam que o IAF é diferente, com 5% de significância ($\alpha=5\%$), para cada tratamento de N nas duas datas.

Com relação aos índices de vegetação, a análise de discriminantes ($\alpha=5\%$) indicou que, na primeira data, o MCARI não diferenciou os tratamentos N0 e N60. Na última data o NDVI não discriminou os tratamentos N60 e N120. A **Tabela 2** apresenta os resultados obtidos pela análise de discriminantes entre os IV e os tratamentos, onde se verifica que os demais IV diferenciaram os tratamentos.

Tabela 2 – Resultado da análise de discriminantes entre tratamentos, por índice de vegetação, para as datas de 21/07/06 e de 04/08/06.

Índices de Vegetação	21/07/06			04/08/06		
	N120*	N60*	N0*	N120*	N60*	N0*
RVI	a	b	c	a	b	c
GVI	a	b	c	a	b	c
NDVI	a	b	c	a	a	c
GNDVI	a	b	c	a	b	c
NDWI	a	b	c	a	b	c
MCARI	a	b	b	a	b	c
SAVI	a	b	c	a	b	c
OSAVI	a	b	c	a	b	c
EVI	a	b	c	a	b	c

*Índices de vegetação com a mesma letra não apresentaram diferença significativa ($\alpha=5\%$).

Com base nestes resultados procedeu-se a análise das relações entre os IV e o IAF. O primeiro índice abordado foi o RVI que apresentou um R^2 de 0,3465 (**Figura 1a**). Na **Figura 1b**, o GVI apresentou um aumento de relação, visto que o R^2 atingiu o valor de 0,4367. Para o NDVI o R^2 foi de 0,3562 e apresentou uma distribuição que tende a uma curva exponencial (**Figura 1c**). O GNDVI apresentou um R^2 de 0,4742, que foi o melhor obtido dentre os índices analisados. O resultado da relação entre IAF e o GNDVI é ilustrado na **Figura 1d**. Verifica-se uma boa semelhança entre o GVI e o GNDVI, visto que ambos consideram a faixa espectral no verde. A relação entre IAF e NDWI resultou em R^2 de 0,3265, conforme a **Figura 1e**. O MCARI foi o que apresentou o menor valor de R^2 (0,035), conforme pode ser visto na **Figura 1f**. Para este índice a inclinação da reta não foi significativa ($\alpha=5\%$). Para o SAVI o valor do R^2 foi 0,3846, ilustrado na **Figura 1g**. Segundo Rondeaux et al. (1996) o OSAVI reduz a influencia do solo quando comparado com o SAVI. O resultado obtido para este índice foi um R^2 de 0,3925, que é pouco diferente do SAVI, entretanto apresentou um menor espalhamento, conforme pode ser observado na **Figura 1h**. A curva obtida para este índice apresenta forma exponencial. A regressão entre o EVI e o IAF, observada na **Figura 1i**, obteve um R^2 de 0,3901, que é semelhante aos índices ajustados à linha do solo.

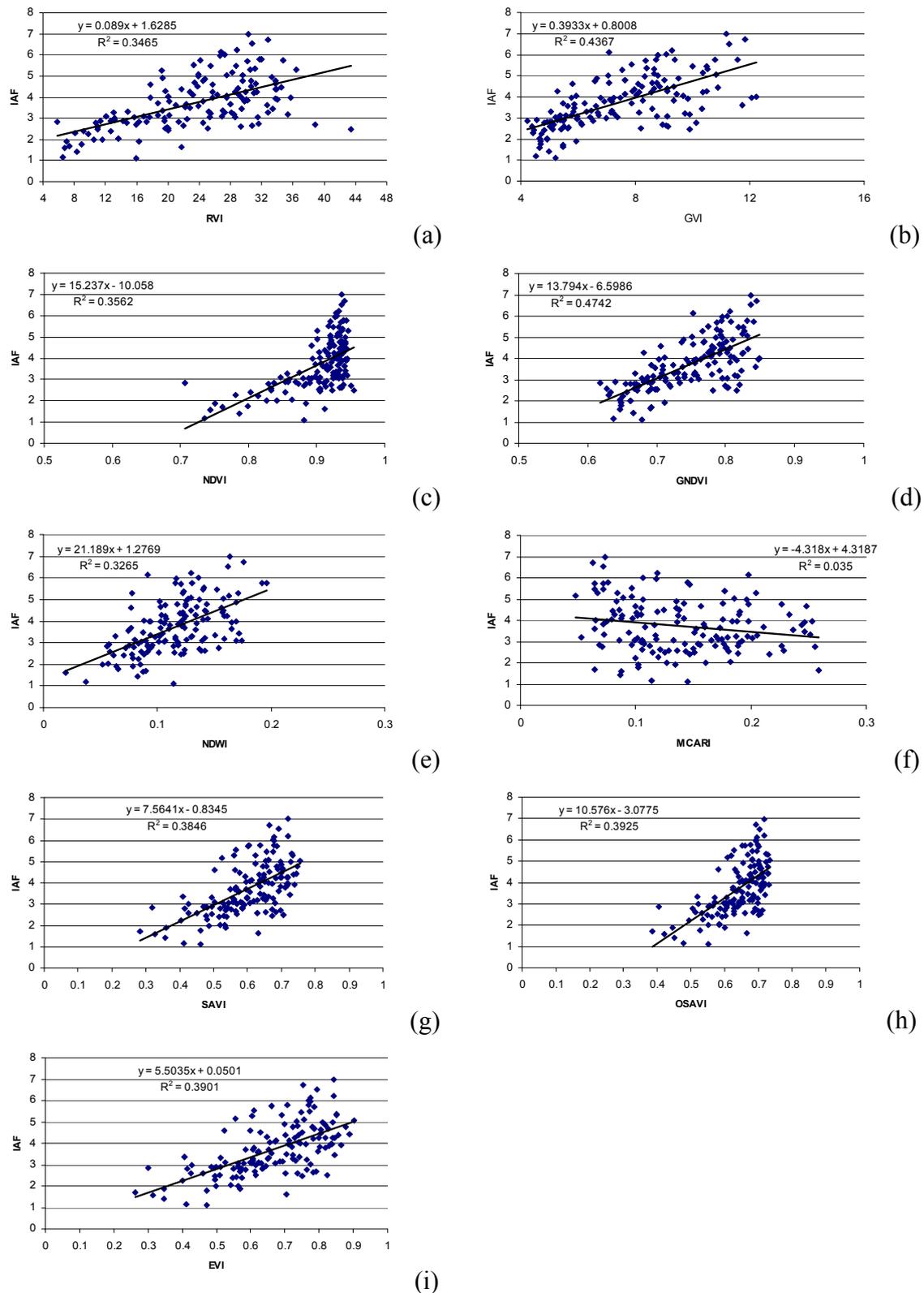


Figura 1 – Diagramas de dispersão gerados entre o IAF e os IV

Cabe destacar que os baixos valores de R^2 encontrados neste trabalho podem estar associados a maior espalhamento dos IV conforme ocorre o aumento do IAF, possivelmente devido à saturação, visto que a saturação da curva entre IV e IAF ocorre com um IAF de aproximadamente 3 (Rizzi, 2004).

4. Conclusões

O IAF se apresentou adequado na discriminação dos diferentes tratamentos, conforme apontaram os resultados da análise de discriminantes.

Com exceção do NDWI e do MCARI, os demais IV se mostraram adequados para a diferenciação entre os tratamentos, indicando que os mesmos são capazes de diferenciar vegetações em diferentes estados nutricionais.

O GNDVI foi o IV que melhor estimou o IAF, com um R^2 de 0,47 e o pior resultado foi gerado pelo MCARI. Acredita-se que estas relações entre os IV e o IAF tenham ocorrido devido aos valores médios de IAF estarem acima de 3, ponto teórico onde ocorre a saturação da curva de relação entre os IV e o IAF.

5. Referências

- Analytical Spectral Device INC. (ASD) FieldSpec® FR Portable Spectroradiometer. 2006. Disponível em: <http://www.asdi.com/products_specifications-FSP.asp>. Acesso em: 03 ago 2006.
- Baret, F. Guyot, G. Major, D.J. TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium**. v. 3, 1989. p. 1355-1358.
- Blackmer, T. M., Schepers, J. S., Varvel, G. E., and Walter-Shea, E. A. Nitrogen deficiency detection using shortwave. radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy**. v. 88, n. 1, 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 Environment**. v. 74 , p. 229-239, 2000.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412p.
- Gao, B. -C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**. v. 58, p. 257– 266, 1996.
- Greenwood, D. J.; Gastal, F.; Lemaire, G.; Draycott, A.; Millard, P.; Neetson, J. J. Growth rate and % N of field grown crops: theory and experiments. **Annals of Botany**, London, v.67, n. 2, p. 181-190, 1991.
- Huete, A.; Didan, K.; Muira, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferrerra, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, p. 195-213, 2002.
- Kimura, Reiji; Okada, Shuhei; Miura, Hiroyuki; Kamichika, Makio. Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field. **Agricultural Water Management**. 69, p. 83 - 100, 2004.
- LI-COR Biosciences Inc. **LAI-2000**, 2006. Disponível em: <www.licor.com/LAI>. Acesso em: 03 ago 2006.
- Liu, Liangyun; Wang, Jihua; Huang, Wenjiang; Zhao, Chunjiang; Zhang, Bing; Tong, Qingxi. Estimating winter wheat plant water content using red edge parameters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 17, p. 3331 - 3342, 2004.
- Milton, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**. v.8, n.12, p. 1807-1827, 1987.
- Panhwar, F. The role of nitrogen fertiliser in agriculture. **ChemLin**. p. 1-19, 2004. Disponível em:<http://www.chemlin.de/publications/documents/nitrogen_fertilizer.pdf>. Acesso em: 06 ago 2006.
- Rizzi, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 214p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Acessado em 25 de ago. 2006. Online. Disponível na biblioteca digital URLib: <http://iris.sid.inpe.br:1912/rep-/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.02.14.17>
- Rondeaux, G., Steven, M., and Baret, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing Environment**. v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996.

Steven, Michael. The sensitivity of the OSAVI vegetation index to observational parameters. **Remote Sensing of Environment**. v. 63, n. 1, p. 49-60, 1998.

Werner, J.C.; Colozza, M.T.; Monteiro, F.A. Adubação de pastagens. In: Simpósio sobre Manejo de Pastagens, 18., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2001. p.129-156.

Whitehead, D.C. **Nutrient elements in grasslands: soil-plant-animal relationships**. Wallingford: CAB, 2000. 369 p.

Wright, D.L.; Ramsey, R.D.; Rasmussen, V.P.; Ellsworth, J. Midseason Nitrogen Application Using Remote Sensing. **The 6th International Conference on Precision Agriculture and other Natural Resource Management Conference Proceedings**, 2002, Minneapolis, USA. Disponível em: <http://www.gis.usu.edu/ArcWebpage/inside_table/2002Presentations/2002wright.pdf> Acesso em: 15 set. 2006.

Wright, D.L., R.D. Ramsey, D.J. Baker, and V.P. Rasmussen. 2003. A comparison of Two Geospatial Technologies in Non-uniform Wheat Fields: Yield Monitors and Remote Sensing. IN: **American Society of Photogrammetry and Remote Sensing conference Proceedings**, 2003, Anchorage, USA, Disponível em: <http://www.gis.usu.edu/ArcWebpage/inside_table/2003Presentations/0225.pdf> Acesso em: 15 set. 2006.