

Estimativa do índice de área foliar do feijoeiro por dados do sensor MODIS simulados

Priscylla Ferraz Câmara Monteiro ¹

Rubens Angulo Filho ²

Alexandre Cândido Xavier ³

Rodrigo Otávio Câmara Monteiro ⁴

¹ Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária - FEPAGRO
Caixa Postal 20 – 95200-970 - Vacaria - RS, Brasil
priscylla-monteiro@fepagro.rs.gov.br

² Universidade de São Paulo – USP/ESALQ
Caixa Postal 9 – 13418-900 - Piracicaba – SP, Brasil
ruangulo@usp.br

³ Universidade Federal do Espírito Santo – UFES,
Caixa Postal 16 – 29500-000 – Alegre – ES, Brasil
xavier@cca.ufes.br

⁴ Instituto Federal do Rio Grande do Sul – IFRS
Av. Osvaldo Aranha 540 – 95700-000 – Bento Gonçalves – RS, Brasil
rodrigo.monteiro@bento.ifrs.edu.br

Abstract: The leaf area index is a major biophysical variable of agricultural crops, being related to evapotranspiration and grain yield. On small scales, the only way to get the LAI is using remote sensing data, and one of the main sensors used for monitoring the vegetation is MODIS. This study aims to evaluate the individual bands in the red and infrared bands and vegetation indices (VI) SR (simple ratio), NDVI index (Normalized Difference Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index) in LAI bean estimation. Field canopy reflectance and LAI measurements were acquired at R6 stage over 48 irrigated bean plots. The vegetation indices were obtained from the MODIS bands simulation. Relationships individual bands / IV with LAI were performed through regression analysis. As a general results can be mentioned: the LAI ranged from 1,38 m² m⁻² to 8,30 m² m⁻²; the potential curve regression model showed the best fit relations individual bands / IV and LAI, with the exception of the red band and LAI (linear model); through bootstrap analysis to assess differences between the R² averages relations individual bands / IV and LAI, verified that the Ivp, SR, NDVI and EVI have the same potential to estimate the LAI (95% probability), the red band and SAVI showed less potential to predict the LAI.

Palavras-chave: remote sensing, spectral reflectance, spectroradiometry, agriculture, sensoriamento remoto, reflectância espectral, espectroradiômetro, agricultura.

1. Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão, e o Paraná, o maior Estado produtor, respondendo por aproximadamente 22% da produção nacional. Considerando os números das três safras, estima-se que a área total de feijão alcance 3,79 milhões de hectares, ou seja, um acréscimo de 5% em relação à safra passada, contribuindo para um aumento de 14,3% na produção nacional, alcançando 3,8 milhões de toneladas (CONAB, 2012).

As estimativas de produtividade agrícola são realizadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) de forma subjetiva, dificultando a análise da veracidade dos dados envolvidos. Desta maneira, o sensoriamento remoto passa a ser uma importante ferramenta, apresentando um grande potencial na agricultura, tanto na identificação de culturas e áreas ocupadas por estas (Sanches et al., 2005), na discriminação de variedades agrícolas (Galvão et al., 2009), como também na estimativa de parâmetros biofísicos utilizados em modelos de produtividade agrícola (Doraiswamy et al., 2004; Rizzi, Rudorff, 2007). O índice de área foliar (IAF) é uma variável relevante na estimativa da produtividade agrícola, pois reflete as condições de crescimento impostas pelo efeito conjunto das variáveis agrometeorológicas e de cultivo, ao longo do ciclo da cultura (Doraiswamy et al., 2004).

A relação entre sensoriamento remoto e os parâmetros biofísicos pode ser feito tanto através das bandas simples quanto pela aplicação de índices de vegetação (IV). Dentre os IV usualmente utilizados, destaca-se o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) (Rouse et al., 1974) sendo amplamente utilizados na estimativa de biomassa, do IAF e da produtividade (Asrar et al., 1984, Turner et al., 1999, Xavier e Vettorazi, 2004).

Portanto, a hipótese deste trabalho é mostrar que diferentes IV, gerados a partir do sensor MODIS, podem ser utilizados para estimar o IAF da cultura do feijão com a mesma precisão.

Neste contexto, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar o potencial dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI e bandas do vermelho e do infravermelho próximo, gerados a partir de dados simulados dos sensores MODIS, a bordo do satélite Terra, na estimativa do índice de área foliar da cultura do feijão.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido em condições de campo, em uma área experimental de agricultura irrigada, localizada no Município de Piracicaba – SP, a 22° 42' 30" de latitude Sul e 47° 38' 39" de longitude Oeste, a uma altitude média de 547 metros, durante o período de setembro a dezembro de 2007.

A cultivar de feijão Pérola, lançada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa foi selecionada por apresentar alta produtividade e resistência a diversas doenças. A semeadura foi realizada manualmente no dia 04 de setembro de 2007, em sulcos de 0,05 m de profundidade, sendo distribuídas quantidades superiores de sementes por metro linear, com o objetivo de se assegurar o estande inicial pré-estabelecido. O desbaste foi realizado 15 dias após a semeadura, tendo-se deixado apenas 14 plantas por metro linear. O espaçamento utilizado foi de 0,50 m entre fileiras de plantio.

O experimento foi conduzido em blocos casualizados, com parcelas subdivididas, sendo que nas parcelas foram alocados os tratamentos relacionados com os níveis de irrigação (179,5; 256,5; 357,5; e 406,2 mm de água) e nas subparcelas os tratamentos relacionados às doses de nitrogênio (0, 80 e 160 kg de N ha⁻¹), totalizando assim 12 tratamentos em cada bloco, dispostos em 48 parcelas experimentais.

De acordo com recomendações de adubação, um terço da dose total de N (sulfato de amônio) foi aplicada na semeadura e as outras duas doses remanescentes foram aplicadas no dia 17 de Setembro e no dia 6 de Outubro de 2007, ou seja, aos 7 e aos 27 dias após a emergência (DAE), correspondente aos estádios V2 e V4, respectivamente. As adubações de potássio e fósforo foram de 90 e 100 kg ha⁻¹, respectivamente.

A aplicação de água foi realizada com o auxílio de um sistema de irrigação por aspersão disposto no campo segundo o sistema de “aspersão em linha” (“line source sprinkler system”), de acordo com a metodologia desenvolvida por Hans et al. (1976).

As medições do IAF foram realizadas com o equipamento LAI-2000 (Plant Canopy Analyzer - LI-COR Biosciences Inc., Lincoln, NE, 2006). Para estimar o IAF, as medidas de radiação difusa, acima e abaixo do dossel do feijão, foram coletadas no início da manhã, em todas as parcelas dentro da área experimental e, em seis estádios fenológicos: 1) 01/outubro/2007 (V3); 10/outubro/2007 (V4); 01/novembro/ 2007 (R6); 19/novembro/2007 (R8); 24/novembro/2007 (R9 – maturação fisiológica) e 01/dezembro/2007 (R9 – maturação de colheita), de acordo com a descrição dos estádios fenológicos dada por Fancelli (2009).

A colheita foi realizada em duas etapas, aos 92 e aos 102 dias após a semeadura (DAS). Os dados de produtividade foram adquiridos ao final do ciclo da cultura. Para evitar o efeito da bordadura foi colhida apenas a parte central de cada parcela, eliminando uma linha de cada lado e 0,5 m em cada extremidade. Deste modo, a área colhida correspondeu a 7 m². A massa de grãos colhida na área útil da parcela foi corrigida para 13% de teor de umidade.

Dentre todos os estádios analisados os maiores valores de reflectância na faixa do infravermelho próximo, concomitantemente com os menores valores de reflectância na região do vermelho, foram observados no estágio R6 sendo resultado da maior quantidade de biomassa verde das plantas e, portanto, com alto potencial de absorção da radiação na faixa do visível e de alto poder de reflexão da radiação na faixa do infravermelho próximo por parte das folhas. Portanto, o estágio R6 foi caracterizado como o melhor estágio da cultura para estimar as variáveis biofísicas (Monteiro et al., 2012).

Para a obtenção dos dados espectrais utilizou-se o SPECTRON SE-590 que opera nos comprimentos de onda (λ) de 350 a 1100 nm. Para cada parcela foram coletados 2 pares de espectros (amostra e referência), ou seja, quatro medidas de radiância, sendo dois da cultura e dois da placa de referência (sulfato de Bário), obtendo-se ao final de cada leitura um fator de reflectância de cada parcela. Estas medidas foram realizadas a uma altura de aproximadamente 3,0 m do dossel e alcance de 0,9 m com um campo de visada instantâneo de 15° (IFOV – *Instantaneous Field of View*) o que resultou em uma área amostrada de 0,49 m². As medidas radiométricas foram coletadas entre as 11:00 e 13:00 horas, período em que o solo encontrava-se quase totalmente iluminado possibilitando a leitura das 48 parcelas, que gastava-se em média uma hora e vinte minutos. Os dados originais de reflectância foram agrupados em bandas estreitas de largura de 2,7 nm cada, a partir da média de reflectância dos dados originais, resultando em 252 bandas.

Os valores do fator de reflectância nas faixas espectrais correspondentes a banda do vermelho, do azul e do infravermelho próximo do MODIS, do satélite Terra, respectivamente, foram utilizados para o cálculo dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI (Equações 1, 2, 3 e 4).

Índices de vegetação:

$$SR = \frac{IVP}{V} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (2)$$

$$SAVI = (1 + L) \frac{IVP - V}{IVP + V + 0,5} \quad (3)$$

$$EVI = 2,5 \frac{IVP - V}{IVP + 6V - 7,5A + 1} \quad (4)$$

em que: Ivp (reflectância na região do infravermelho próximo), Ver (reflectância na região do vermelho) e A (reflectância na região do azul) são as bandas referentes ao sensor MODIS, simuladas considerando-se a média de reflectância das bandas estreitas que coincidem com estas respectivas bandas do satélite Terra.

A partir dos dados de radiometria de campo foi realizada a simulação das bandas individuais do Ver e Ivp, para o sensor MODIS, conforme a função de resposta espectral normalizada de cada banda dos sensores (Miura et. al, 2006).

Os modelos de regressão (Equações 5 e 6) utilizados para estudar a relação entre os dados de sensoriamento remoto e as variáveis biofísicas foram:

$$\text{Linear: } Y = a + bX \quad (5)$$

$$\text{Potencial: } Y = aX^b, \quad (6)$$

em que Y é a variável dependente (IAF) e X, a variável independente, podendo ser as bandas individuais do vermelho ou do infravermelho próximo e os IV SR, NDVI, SAVI e EVI para o sensor MODIS.

A equação do tipo potência foi utilizada devido à natureza assintótica que as relações IAF-IV podem apresentar (Jensen, 2009). A análise da melhor relação entre as variáveis biofísicas e os dados de sensoriamento remoto foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e P (nível observado de significância).

Para testar se uma determinada variável independente explicou melhor a variação da variável dependente, construíram-se intervalos de confiança para a diferença das médias de R^2 das relações, utilizando a técnica de Bootstrap para o nível de 5% de confiança.

3. Resultados e Discussão

A análise da variância revelou diferenças estatísticas no parâmetro de desenvolvimento da cultura (IAF) entre as lâminas de irrigação ($p < 0,01$), porém, não apresentou diferença entre as doses de nitrogênio ($p < 0,05$), como também na interação entre os fatores. Os valores de IAF foram semelhantes para o manejo do nitrogênio. Já o fator água influenciou as variações do IAF, encontrando-se os maiores valores nas plantas que receberam maiores quantidades de água, concordando com os resultados apresentados por Stone e Moreira (2001). O valor máximo de IAF foi de $8,30 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos 59 DAS e o menor IAF foi de $1,39 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Monteiro et al., 2010).

Na Figura 1 são apresentadas as relações das bandas Ver e Ivp do sensor MODIS com o IAF. A relação entre o IAF e a banda do Ver é negativa (Figuras 1a), com esta banda explicando 71% da variação. Como a banda Ver está diretamente associada à quantidade de energia absorvida pelos pigmentos das folhas para realizar a fotossíntese e, também ao teor de clorofila nas folhas (Jacquemoud et al., 1996), quanto maior a quantidade de biomassa verde, maior será a absorção da radiação. As relações entre IAF e Ivp (Figuras 1b) foram positivas devido à baixa absorção da radiação nesta região espectral. Esta região do espectro eletromagnético tem alto poder de reflexão da radiação por parte das folhas e, assim, quanto maior a quantidade de biomassa verde, maior será o espalhamento múltiplo da radiação e maior será a reflectância.

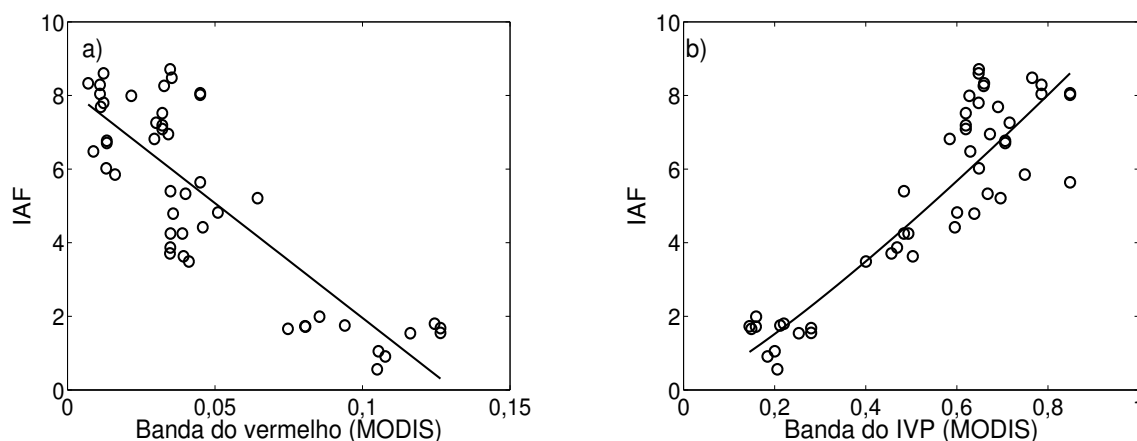


Figura 1. Diagrama de dispersão entre as bandas do sensor MODIS (vermelho e infravermelho próximo) e a variável biofísica (IAF) no estádio R6 da cultura do feijão.

Na Tabela 1 são apresentados os valores de R^2 obtidos na estimativa do IAF do feijão, por meio das bandas do Ver e do Ivp, para o sensor MODIS, assim como o seu respectivo tipo de modelo de regressão, linear ou potencial. A banda do Ivp apresentou melhor resultado na estimativa do IAF. Apesar de os dois modelos de regressão serem significativos ($p < 0,05$), o modelo de regressão potencial apresentou maior valor do coeficiente de determinação (R^2) (Tabela 1).

Tabela 1. Resultado entre as relações das bandas com o IAF, no estádio R6 da cultura do feijão, para o sensor MODIS considerando os modelos de regressão do tipo linear e potencial

Sensor	Modelo de Regressão	Bandas	a	b	r	R^2	p-valor
IAF							
MODIS	Linear	V	8,19	-62,37	0,843	0,71	<0,01
	Potencial	IVP	10,48	1,20	0,914	0,85	<0,01

Na Tabela 2, são apresentados os valores de R^2 obtidos na estimativa do IAF, por meio dos IV (SR, NDVI, SAVI e EVI) para o estádio R6 de desenvolvimento da cultura, para o sensor MODIS, assim como o seu respectivo tipo de modelo de regressão, linear ou potencial. O EVI aparece como melhor índice na estimativa do IAF, com R^2 de 0,86, seguido pelo SAVI e NDVI ($R^2 = 0,85$).

Tabela 2. Resultado entre as relações dos IV/bandas com o IAF, no estádio R6 da cultura do feijão.

Sensor	Modelo de Regressão	IV	a	b	r	R^2	p-valor
MODIS	potencial	SR	1,13	0,52	0,904	0,82	<0,01
	potencial	NDVI	7,16	1,45	0,924	0,85	<0,01
	potencial	SAVI	8,03	1,01	0,925	0,85	<0,01
	potencial	EVI	3,80	0,85	0,929	0,86	<0,01

Para as relações entre os IV e o IAF, o modelo potencial foi o que melhor se ajustou, com todas as relações significativas, concordando com outros estudos (Turner et al., 1999; Xavier e Vettorazzi, 2004). Tal fato ocorre devido ao fato de que valores mais elevados de IAF tendem a saturar os IV bandas. O EVI seria menos propenso a saturação (Huete et al. 1997), todavia não foi o que se observou neste trabalho, talvez devido aos altos valores de IAF atingidos.

Na Figura 2 está apresentada a melhor relação para estimativa do IAF utilizando-se o índice de vegetação EVI, que melhor estimou esta variável. Como era de se esperar, as relações são positivas, uma vez que estes respondem crescentemente à biomassa verde sendo esta, por sua vez, associada positivamente à produtividade (Asrar et al. 1984).

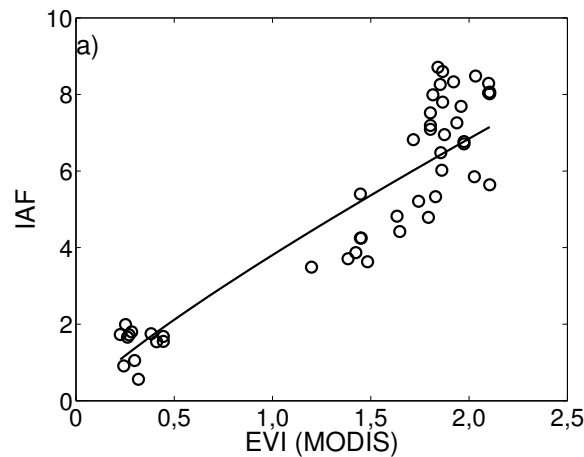


Figura 2. Diagrama de dispersão entre o melhor IV e o IAF do feijão com o sensor MODIS no estágio R6 de desenvolvimento da cultura.

O maior valor de R^2 encontrado nas relações entre o IAF e os IV foi com o EVI. Com a finalidade de se verificar se este índice foi melhor para se estimar esta variável biofísica, este foi utilizado como referência para, por meio da técnica de bootstrap, compará-los com os demais IV e bandas Ver e Ivp. A comparação se deu por meio da construção do IC confiança (95% de confiança) para a diferença média da população dos R^2 da referência e dos R^2 dos outros IV (Martinez e Martinez, 2008).

Para o IAF tendo como referência o EVI/MODIS, os IC são apresentados na Figura 3. Graficamente, quando as barras de erro contêm o zero, significa dizer que não podemos afirmar que o EVI apresenta melhores relações que o IV/banda considerado para estimar a variável biofísica. Observa-se que o EVI para estimar o IAF sempre foi superior do que quando se utiliza apenas a banda Ver ou o SAVI. Por outro lado, com 95% de confiança, não se pode afirmar que o Ivp, SR e NDVI, apresentarão melhores resultados que o EVI.

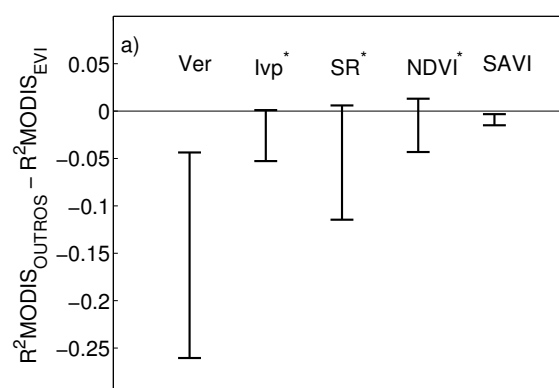


Figura 3. Intervalo de confiança (95% de confiança) por bootstrap para a diferença entre as médias de R^2 EVI e índices para estimativa do IAF.

4. Conclusões

Neste trabalho foram avaliados os índices de vegetação SR, SAVI, NDVI e EVI e, bandas do Ver e Ivp do sensor MODIS para estimativa do IAF do feijoeiro. Os dados MODIS foram simulados de dados de radiometria de campo. De maneira geral as bandas individuais e os índices de vegetação foram eficientes na estimativa desta variável ($R^2 > 0,71$).

Verificou-se, por análise bootstrap, que a banda correspondente a Ivp e os índices de vegetação SR, NDVI e EVI, tiveram a mesma capacidade de prever o IAF (95% de probabilidade).

Referências Bibliográficas

- Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v. 76, p. 300-306, 1984.
- Companhia Nacional de Abastecimento. **Comparativo da área, produção e produtividade safra 2006/2007 e safra 2008/2009**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 05 fev. 2012.
- Doraiswamy, P.C.; Hatfield, J.L.; Jackson, T.J.; Akhmedov, B. Prueger, J.; Stern, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 4, p. 548-559, 2004.
- Fancelli, A.L. **Feijão: tópicos especiais de manejo**. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2009. 372 p.
- Galvão, L.S.; Roberts, Dar A.; Formaggio, A.R.; Numata, I.; Breunig, F.M. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, p. 846-856, 2009.
- Hans, R.J.; Keller, J.; Rasmussen, V.P.; Wilson, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, p. 426-429, 1976.
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K. and Van Leeuwen, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.
- Jacquemoud, S.; Ustin, S. L.; Verdebout, J.; Schmuck, G.; Andreoli, G.; Hosgood, B. Estimating leaf biochemistry using the prospect leaf optical properties model. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, p. 194-202, 1996.
- Jensen, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.
- Martinez, W.L.; Martinez, A.R. **Computational Statistics Handbook with MATLAB**. 2.ed. Chapman & Hall, New York, NY, USA. 792 p. 2008.
- Miura, T; Huete, A. R.; Yoshioka H. An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v.100, n. 2, p. 223-236, 2006.
- Monteiro, P.F.C.; Angulo Filho, R.; Monteiro, R.O.C. Efeitos da irrigação e da adubação nitrogenada sobre as variáveis agrônomicas da cultura do feijão. **Irriga**, v. 15, n.4, p. 386-400, 2010.
- Monteiro, P.F.C.; Angulo Filho, R.; Xavier, A.C.; Monteiro, R.O.C. Assessing biophysical variable parameters of bean crop with hyperspectral measurements. **Scientia Agricola**, v. 69, n.2, p. 87-94, 2012.
- Rizzi, R.; Rudorff, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônomo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.
- Sanches, I.D.A.; Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R. Culturas Agrícolas em Imagens Multitemporais do Satélite Landsat. **Agric**, São Paulo, São Paulo, v.52, n.1, p. 83-96, jan./jun. 2005. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/publicacoes/pdf/asp-1-05-6.pdf>> . Acesso em: 7. Mar. 2011.

Stone, L.F.; Moreira, J.A.A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura, sob diferentes lâminas de irrigação e preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 473-481, mar. 2001.

Turner, D.P., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Fassnacht, K.S., and Briggs, J.M. Relationships between leaf area index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, p. 52-68, 1999.

Xavier, A.C., Vettorazzi, C.A.. Monitoring leaf area index at watershed level Through NDVI from LANDSAT-7/ETM+ data. **Scientia Agricola** (Piracicaba, Braz.), v. 61, n. 3, p. 243-252, 2004.