

Avaliação de três métodos de estimativa de índice de área foliar aplicados à cana-de-açúcar

Luciana Miura Sugawara¹
Marcos Adami¹
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹
Viviane Gomes Cardoso de Faria¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lmiura, adami, bernardo, vivian}@dsr.inpe.br

Abstract. Remote sensing satellite images have the potential to monitor agricultural crops throughout the growing season and are, therefore, an important tool to provide relevant information for agricultural crop forecasting models. Leaf area index (LAI) is one of the most important variables to monitor the development of agricultural crops and can be estimated from remote sensing data. This work aims to compare three LAI computing methods using MODIS surface reflectance data. In 2006, 2117 samples were selected over planted sugarcane areas in Sao Paulo state. In 2007, these same areas were selected again – this time over first ratoon sugarcane areas. After that, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was calculated from MODIS/Terra surface reflectance 8-day composite (MOD09Q1) and linked to LAI via three different mathematical functions. For the two years of sugarcane growing season, NDVI ranged from 0 to 0.99. Larger NDVI values were observed throughout the rainy season. The harvest event varied for the sugarcane sampled fields in both years; however, the start point of the growing season was almost the same for both years. Different LAI values were obtained for each LAI computing method; however, these differences were merely mathematical. Methods 1 and 3 had good performance to estimate LAI whereas method 2 overestimates LAI values. Prior to the use of MODIS/Terra 8-day composite it is essential to detect and eliminate or minimize images noise.

Palavras-chave: remote sensing, MODIS, LAI, NDVI, sugarcane, sensoriamento remoto, MODIS, IAF, NDVI, cana-de-açúcar.

1. Introdução

O acompanhamento das culturas agrícolas ao longo de sua estação de crescimento possibilita a estimativa da produtividade antes da colheita (González-Sanpedro et al., 2008). Esta estimativa pode ser realizada com o uso de modelos agronômicos, onde os dados de sensoriamento remoto têm grande potencial para a obtenção de diversas variáveis de entrada (Rudorff e Batista, 1990; Berka et al., 2003; Rizzi e Rudorff, 2007). A obtenção destas variáveis deve estar aliada ao conhecimento dos aspectos fenológicos, das necessidades climáticas e do manejo da cultura, que são informações imprescindíveis na modelagem da produtividade agrícola (Dorigo et al., 2007).

O índice de área foliar (IAF) é um parâmetro biofísico que pode ser utilizado como medida de crescimento das plantas nos modelos agronômicos (Goel, 1988; Teruel et al., 1997; Doraiswamy et al., 2004; González-Sanpedro et al., 2008). O conhecimento da variação do IAF ao longo do ciclo de uma cultura agrícola permite avaliar a capacidade ou a velocidade com que a parte aérea do vegetal (área foliar) ocupa a área do solo disponível àquele vegetal (Lucchesi, 1987). O aumento da área foliar propicia um aumento na capacidade da planta de aproveitar a energia solar para a realização da fotossíntese e, desta forma, pode ser utilizado para avaliar a produtividade (Lucchesi, 1987). Além disso, o IAF pode ser utilizado na estimativa da evapotranspiração e das emissões biogênicas (González-Sanpedro et al., 2008).

Dentre os sensores remotos, o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo da plataforma Terra, destaca-se para o uso em fins agrícolas pelo fato de adquirir imagens quase diárias de todo o globo terrestre, embora com resolução espacial moderada de 250m (Justice e Townshend, 2002). O sensor MODIS trouxe um novo conceito em termos do fornecimento de produtos derivados das imagens originais para a área de

sensoriamento remoto. Exemplo disso é o produto MOD09Q1, que é o resultado de um mosaico dos melhores *pixels* das imagens adquiridas diariamente pela plataforma Terra, num período de 8 dias (Latorre et al., 2007).

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas com grande destaque na economia brasileira. O fato de esta cultura ser semi-perene, facilita o seu acompanhamento ao longo da estação de crescimento com o uso de dados obtidos por meio de sensoriamento remoto. Após o primeiro corte (cana planta), a cultura rebrota e pode ser colhida novamente (cana soca). O ciclo da cana soca se repete até que a cultura não seja mais rentável economicamente, quando então a cultura passa pelo processo de reforma e uma nova muda é plantada (Segato et al., 2006).

Segundo Teruel et al. (1997), o IAF da cana-de-açúcar variou de acordo com o estágio da cultura, onde o valor máximo alcançado na cana planta sem restrição hídrica foi entre 6 e 7, enquanto que no primeiro e no segundo ciclo da cana soca o IAF máximo foi entre 4 e 4,5. Na presença de deficiência hídrica leve, o IAF não diminuiu significativamente na cana-planta e nem na cana-soca. Porém, com alta deficiência hídrica, o IAF da cana-planta reduziu para valores em torno de 4 e o da cana-soca para valores próximos a 3. Os autores comentaram que a redução do IAF ocorrida da cana-planta para a cana-soca pode ser em função de um menor perfilhamento, menor disponibilidade de nutrientes e da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas na lavoura.

Uma das maneiras de relacionar o IAF aos dados de sensoriamento é por meio de índices de vegetação. O índice de vegetação mais difundido é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Sellers, 1989; Cohen et al., 2003; Dorigo et al., 2007), proposto por Rouse et al. (1974).

Xavier e Vetorazzi (2004), Picoli (2006) e Begue et al. (no prelo) obtiveram relações entre o NDVI e o IAF para a cana-de-açúcar. Xavier e Vetorazzi (2004) avaliaram a relação do NDVI calculado a partir de dados de imagem do satélite Landsat, sensor ETM+, com medidas de IAF tomadas em campo, principalmente da cana-de-açúcar. Os autores obtiveram coeficiente de determinação (r^2) igual a 0,72 para esta relação. Picoli (2006) determinou o IAF em duas etapas: primeiramente calculou a fração da cobertura do solo (F_c) a partir do NDVI, com o uso do método proposto por Choudhury et al. (1994), ajustado para a cana-de-açúcar. Em seguida, obteve o IAF pelo algoritmo recomendado por Norman et al. (2003), onde o F_c é relacionado ao IAF. Begue et al. (no prelo) obtiveram uma relação exponencial entre o NDVI gerado a partir de dados de imagens SPOT 4 e 5 e o IAF da cana-de-açúcar medido em campo. O r^2 obtido foi de 0,94, ou seja, 94% da variação do IAF são explicados pela equação ajustada neste trabalho.

O objetivo deste trabalho é comparar os resultados das estimativas de IAF obtidas por três métodos com o uso de dados de reflectância de superfície do produto MOD09Q1.

2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi realizado no estado de São Paulo, localizado entre as latitudes $s19^{\circ}46'$ e $s25^{\circ}19'$ e as longitudes $o44^{\circ}09'$ e $o53^{\circ}07'$ (Figura 1).

As imagens reflectância de superfície das bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo) do sensor MODIS, em composições de 8 dias com resolução espacial de 250m (produto MOD09Q1), foram obtidas para os anos de 2006 e 2007 no endereço <<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>>. Em cada ano foram obtidas 46 composições de 8 dias, num total de 92 composições de 8 dias para o período analisado.

O mapa das áreas de cultivo de cana-de-açúcar gerado pelo projeto Canasat (Rudorff e Sugawara, 2007) foi utilizado como base para a coleta de amostras, a fim de garantir que somente áreas cultivadas com cana-de-açúcar fossem consideradas neste estudo, totalizando 2117 amostras, distribuídas no estado de São Paulo (Figura 1). Nestas amostras foram

coletados os valores dos *pixels* cuja resposta espectral fosse 100% em função da cultura de cana-de-açúcar. No ano de 2006 as lavouras encontravam-se no estágio de cana planta e em 2007, estas mesmas lavouras encontravam-se no primeiro ciclo da cana soca.

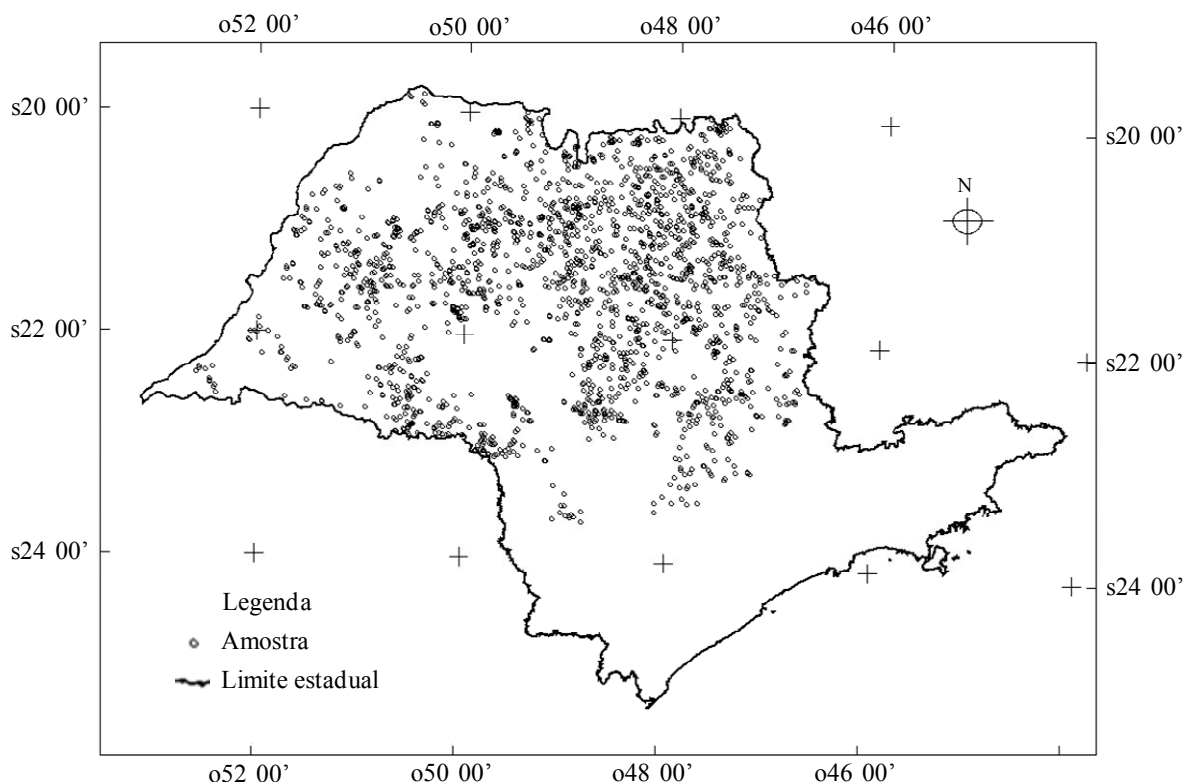


Figura 1. Distribuição das amostras coletadas sobre as áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Em seguida, o NDVI foi calculado a partir das amostras das imagens reflectância de superfície, por:

$$NDVI = \frac{(\rho B_2 - \rho B_1)}{(\rho B_1 + \rho B_2)} \quad (2.1)$$

em que ρB_1 é a reflectância de superfície da banda 1 e ρB_2 é a reflectância de superfície da banda 2.

De posse dos valores de NDVI das amostras, três métodos de cálculo do IAF foram avaliados:

i) Método 1, onde o cálculo do IAF é feito em duas etapas. Na primeira etapa se obtém o Fc (Equação 2.2), conforme foi determinado por Choudhury et al. (1994). Em seguida, o Fc é relacionado ao IAF por meio de uma relação matemática (Equação 2.3).

$$Fc = 1 - \left(\frac{NDVI_{\max} - NDVI}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^\xi \quad (2.2)$$

em que $NDVI_{\max}$ é o valor máximo do NDVI da imagem, $NDVI_{\min}$ é o valor mínimo do NDVI da imagem, $NDVI$ é o valor de cada amostra (Equação 2.1) e, ξ é o valor ajustado por Picoli (2006) para a cana-de-açúcar, que é igual a 0,9.

Na segunda etapa, o IAF foi determinado de acordo com o Fc obtido pela Equação 2.2, dado por (Norman et al., 2003):

$$IAF = -2\ln(1 - Fc) \quad (2.3)$$

ii) Método 2, onde o cálculo do IAF é efetuado pela equação ajustada por Begue et al. (no prelo), onde:

$$\text{IAF} = 0,0211e^{7,9336 \cdot \text{NDVI}} \quad (2.4)$$

iii) Método 3, onde o IAF é obtido pela equação ajustada por Xavier e Vetorazzi (2004), dado por:

$$\text{IAF} = 1,4560\text{NDVI}^{5,5249} \quad (2.5)$$

Em seguida, foi realizada a análise gráfica do comportamento do NDVI e do IAF para os três métodos avaliados.

3. Resultados e Discussão

Os valores de NDVI nas amostras variaram entre 0 e 0,99 ao longo dos dois anos avaliados (Figura 2). Entre os meses de janeiro e abril (estação chuvosa), foi possível observar que o NDVI foi maior em relação aos outros meses do ano, o que mostra que é neste período que esta cultura alcança o seu pleno desenvolvimento. Desta forma, isto pode indicar que é neste período em que deve ser efetuado o acompanhamento das lavouras de cana-de-açúcar para estimar a sua produtividade agrícola.

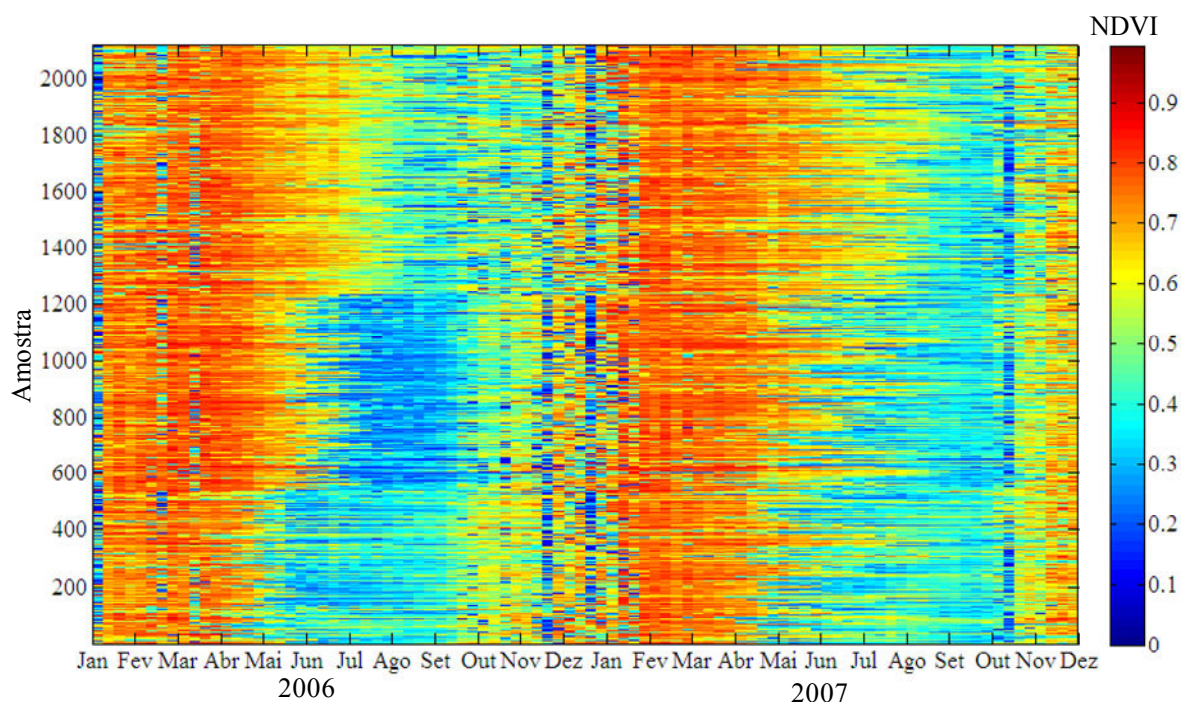


Figura 2. Comportamento temporal do NDVI sobre as amostras ao longo dos anos de 2006 e 2007.

O início da colheita de cana-de-açúcar acontece em abril, como pode ser observado na Figura 2, onde a queda acentuada dos valores de NDVI, de valores superiores a 0,75 para valores inferiores a 0,40, indica que a cana-de-açúcar foi colhida. No ano de 2006, a época preferencial para a colheita da cana-de-açúcar foi de abril a setembro. No ano seguinte, a época preferencial de colheita foi a partir de maio, prolongando-se até o mês de outubro (Figura 2). Embora a cana-de-açúcar seja colhida em diferentes datas ao longo do período seco do ano, o aumento do NDVI após a colheita só ocorre no início do período chuvoso (setembro/outubro) (Figura 2). Ou seja, a cultura só se desenvolve com o aumento da água disponível no solo.

Do início da estação chuvosa até janeiro, existe uma grande chance de ocorrência de cobertura de nuvens, mesmo nas imagens em composições de imagens de 8 dias. A cobertura

de nuvens é responsável pelo aparecimento de ruídos na série temporal mostrada na Figura 2, representada pelos baixos valores de NDVI, que aparecem em uma data específica na maioria das amostras. Antes de utilizar estas imagens nas diversas aplicações, é preciso aplicar um método para avaliar estes ruídos. Após a presença de ruídos ser detectada, o analista deve optar pela eliminação das imagens excessivamente ruidosas ou pela aplicação de um filtro para minimizar o efeito destes ruídos.

As variações dos IAFs calculados pelos três métodos seguem a variação temporal do NDVI ao longo dos dois anos, como podem ser observados na Figura 3. Os gráficos da Figura 3 estão em escalas diferentes, em função dos limites destas variáveis. Os valores médios de IAF foram semelhantes nos dois anos avaliados; entretanto, há uma defasagem no tempo no comportamento médio dos valores de IAF. Esta defasagem no tempo está relacionada às diferenças nas datas de colheita nos anos de 2006 e 2007 (Figura 2). Em 2006, os menores valores médios de IAF ocorreram de julho a setembro, enquanto que, em 2007, os valores médios mínimos ocorreram de agosto a outubro (Figura 3).

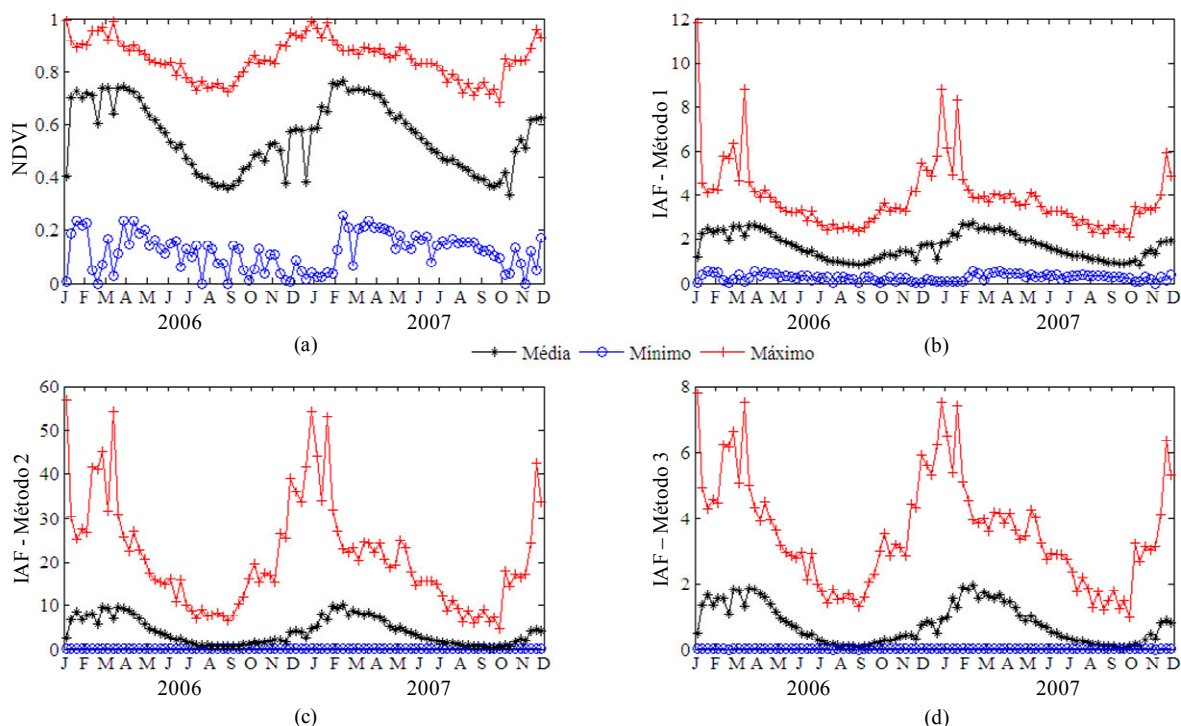


Figura 3. Comportamento do NDVI (a) e dos IAFs calculados pelos Métodos 1(b), 2(c) e 3(d) ao longo dos anos de 2006 e 2007.

O Método 1 (Figura 3b) e 3 (Figura 3d) apresentaram valores máximos de IAF próximos aos observados por Teruel et al. (1997), que foi entre 6 e 7. O comportamento temporal das duas estimativas foi similar. Contudo, há uma tendência do Método 3 apresentar valores de IAF médios abaixo de 2. Os valores de IAF calculados pelo Método 2 (Figura 3c) são superestimados, onde os valores médios ficaram próximos a 10, que são valores acima do observado por Teruel et al. (1997). No Método 1 existe a possibilidade de ajustar o coeficiente ξ no cálculo do F_c , o que pode ajustar os valores de IAF mais próximos à realidade. Entretanto, o ajuste do ξ deve ser feito por meio de um experimento conduzido a campo, com medições espectrais e de IAF da cana-de-açúcar, a fim de ajustar estas estimativas às imagens do sensor MODIS.

Os diagramas de dispersão mostram que a diferença existente entre os três métodos de cálculo do IAF são do ponto de vista matemático, onde é possível construir uma relação

funcional entre os valores de IAF calculados pelos métodos analisados. Entre os Métodos 1 e 2 e os Métodos 1 e 3 parece existir uma relação positiva não linear, já entre os Métodos 2 e 3 a relação é positiva e quase linear. O limite superior da função do Método 1 é próximo a 12, sendo que valores de NDVI entre 0,75 e 0,90 resultam em valores de IAF entre 2,5 e 4,1. No Método 2, o limite máximo do IAF é próximo a 60. Neste método, os valores de NDVI entre 0,75 e 0,90 resultam em valores de IAF entre 8 e 26. No Método 3, o limite máximo para o IAF é próximo a 8, onde valores de NDVI entre 0,75 e 0,90 resultam em valores de IAF entre 1,6 e 4,4.

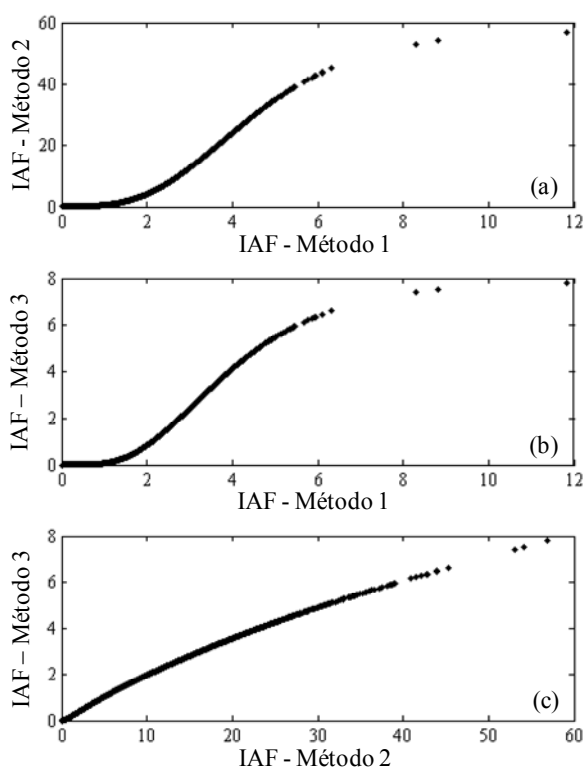


Figura 4. Diagrama de dispersão dos três métodos de obtenção do IAF: Método 1 versus o Método 2 (a), Método 1 versus o Método 3 (b), Método 2 versus o Método 3 (c).

A variação do IAF calculado por meio de relações matemáticas é dependente dos diversos fatores que influenciam a resposta espectral da cultura de cana-de-açúcar, tais como o estado fitossanitário, tratos culturais e condições meteorológicas.

4. Conclusões

É possível acompanhar o desenvolvimento da cana-de-açúcar por meio de imagens MODIS.

Antes do uso das imagens MODIS é preciso aplicar uma metodologia para detectar e eliminar ou minimizar os ruídos nas imagens.

Os Métodos 1 e 3 apresentam estimativas de IAF com valores condizentes com os encontrados na literatura.

Cuidados no cálculo de IAF devem ser tomados para que a real variação da condição de uma cultura agrícola não seja mascarada e impliquem em erros no seu acompanhamento e conseqüentemente no cálculo da produtividade agrícola.

Agradecimentos

Ao Egídio Arai pelo auxílio no processamento das imagens MODIS e ao Ramon Morais de Freitas pelo auxílio na confecção das figuras.

Referências Bibliográficas

- Begue, A.; Bappel, E.; Pellegrino, A.; Degenne, P.; Lebourgeois, V.; Siegmund, B.; Todoroff, P.; Autrey, J. C.; Ng Kee Kwong, K. F.; Baillarin, F. Use of SPOT NDVI time series to map sugarcane crop conditions and forecast yields. **Remote Sensing of Environment** (RSE-D-06-00761). No prelo.
- Berka, L.M.S.; Rudorff, B.F.T.; Shimabukuro, Y.E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3; p.433-440, 2003.
- Choudhury, B.J.; Ahmed N.U.; Idso S.B.; Reginato R.J.; Daughtry C.S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, v.50, p.1-17, 1994.
- Cohen, W. B.; Maersperger, T. K.; Gower, S. T.; Turner, D. P. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 4, p. 561-571, 2003.
- Doraiswamy, P.C.; Hatfield, J.L.; Jackson, B.; Akhmedov, B.; Prueger, J.; Stern, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.92, p.548-559, 2004.
- Dorigo, W.A.; Zurita-Milla, R.; de Wit, A.J.W.; Brazile, J.; Singh, R.; Schaepman, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 9, n. 2, p.165-193, 2007.
- Goel, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, n. 1, p. 1-212, 1988.
- González-Sanpedro, M. C.; Le Toan, T.; Moreno, J.; Kergoat, L.; Rubio, E. Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 810-824, 2008.
- Justice, C. O.; Townshend, J. R. G. Special issue on the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): A new generation of land surface monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p. 1-2, 2002.
- Latorre, M. L.; Shimabukuro, Y.E.; Anderson, L. O. Produtos para ecossistemas terrestres MODLAND. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (Coordenadores). **Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. 1ª edição. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. p. 23-36.
- Lucchesi, A. A. Fatores da produção vegetal. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 1-11.
- Norman, J. M.; Anderson, M. C.; Kustas, W. P.; French, A. N.; Mecikalski, J.; Torn, R.; Diak, G. R.; Achmugge, T. J. **Remote Sensing of Evapotranspiration for Precision-Farming Applications**. In: International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Toulouse, 2003. 308p.
- Picoli, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva**. São José dos Campos, 2006. 90p. (INPE-14669-TDI/1222). Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Rizzi, R.; Rudorff, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônômico para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.
- Rouse Jr., J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, 1973. **Proceedings**. Washington: NASA, 1974. v.1, p. 309-317.
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n.3, p. 183-192, 1990.
- Rudorff, B. F. T.; Sugawara, L. M. Mapeamento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul via imagens de satélites. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 241, p. 79-86, 2007.
- Segato, S. V.; Mattiuz, C. F. M.; Mozambani, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V.; Pinto, A. S.; Jendiroba, E. Nóbrega, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.
- Sellers, P. J. Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. Washington: John Wiley & Sons, 1989. p. 297-335.

Teruel, D. A.; Barbieri, V.; Ferraro Jr., L. A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, v. 54, n. spe, p. 39-44, 1997.

Xavier, A. C.; Vettorazzi, C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1661-1672, 2004.