

## Estimativa do índice de área foliar da cana-de-açúcar a partir de imagens do satélite Landsat-8 (OLI)

Rodrigo Moura Pereira<sup>1</sup>  
Derblai Casaroli<sup>1</sup>  
Dayanna Teodoro Quirino<sup>2</sup>  
Jordana Moura Caetano<sup>1</sup>  
Lucas Melo Velame<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás - UFG  
Caixa Postal 131 - CEP 74690-900 – Campus Samambaia - Rodovia Goiânia / Nova Veneza,  
km 0– Goiânia – GO - Brasil  
rodrigomoura@agricola.eng.br  
derblai@ufg.br  
jordanamcaetano@gmail.com  
lucasvellame@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba - UFPB  
CEP 58051-900 – Cidade Universitária – João Pessoa – PB - Brasil  
dayanna\_teodoro@hotmail.com

**Abstract.** Leaf Area Index (LAI) is an important variable to monitor of crops growth, which can be estimated from remote sensing data. This work evaluated the temporal variation of leaf area index (LAI) by three different mathematical functions that use NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat-8 OLI data in sugarcane area planted with the variety CTC-4, localized in *Santo Antonio of Goias*, Goias State, Brazil, to 2013 and 2014 years. Number of green leaves and leaf area index (LAI) were determined, in field, through eleven samplings, during 510 days of cane-plant cycle. In the sugarcane growing season NDVI data ranged from 0 to 0,57. Different LAI values were observed for each LAI computing method; Method 1 had good performance to estimate LAI whereas method 2 and 3 underestimates LAI values compared with the field data. It's possible to estimate the leaf area index of sugarcane in the cane-plant cycle from the NDVI derived from Landsat-8 data, but, for the estimates of LAI using remote sensing data it is necessary to proceed in the estimation and calibration of tuning parameters considering the environmental and varietal variability of sugarcane at the field.

**Palavras-chave:** remote sensing, vegetation index, LAI, sugarcane, sensoriamento remoto, índice de vegetação, LAI, cana-de-açúcar.

### 1. Introdução

A cana-de-açúcar possui uma colocação de destaque entre as culturas cultivadas no Brasil, que atualmente é o maior produtor mundial com estimativa de área cultivada em 9 milhões de hectares na safra 2014/15, sendo o estado de Goiás a segunda maior área plantada do país, estimada em 896 mil hectares, para aquela safra CONAB (2014).

A identificação da capacidade produtiva da cana-de-açúcar e a investigação dos efeitos do manejo da cultura são geralmente realizadas por intermédio da análise do crescimento e pela avaliação de algumas variáveis morfológicas das plantas como: altura, número de plantas por metro, área foliar e produção Almeida et al.(2008).

A lâmina foliar realiza o processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese e suas dimensões podem alcançar 150 cm de comprimento por 10 cm de largura. O ciclo de morte e substituição foliar ocorre durante todo o período de desenvolvimento da cultura, alguns estudos afirmam que o número médio de folhas permanece constante em torno de 9 a 13 folhas vivas por colmo (Inmam-Bamber, 1991). Para se caracterizar a densidade de área foliar que cobre um terreno, comumente se utiliza o índice de área foliar (IAF) citado por Watson (1947), como sendo a área de folhas por unidade de terreno ( $m^2 m^{-2}$ ). O aumento do IAF ocorre em função tanto do aumento do número de folhas por colmo, como do aumento da área

foliar individual, além disso, o número de folhas por colmo representa o balanço entre as taxas de emissão e a senescência foliar Machado et al. (1982).

Segundo Machado et al. (1982) O desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar pode ser dividido em três etapas, em fase inicial onde o crescimento é lento (até 200 dias após o plantio), a fase de crescimento rápido (de 200 até 400 dias após o plantio), quando 75% da fitomassa total é acumulada e a fase final de crescimento lento (de 400 a 500 dias após o plantio), que corresponde a 11% da fitomassa total.

Os produtos advindos das técnicas de sensoriamento remoto têm sido relacionados a estudos de monitoramento do crescimento vegetal, onde, frequentemente busca-se o estabelecimento de relações entre o padrão de evolução do crescimento das plantas ao longo do tempo com a geração e análise de índices de vegetação, como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), determinado a partir da razão entre a diferença e a soma das refletâncias nas bandas do visível e do infravermelho próximo. Este índice tem apresentado associação direta com a quantidade de biomassa, índice de área foliar, cobertura do solo e interceptação da radiação (Rudorff e Batista, 1990; Wiegand et al., 1992).

Sugawara et al. (2009) avaliaram três métodos de estimativa de índice de área foliar para a cana-de-açúcar, segundo os autores os métodos propostos por Xavier e Vetorazzi (2004), Picoli (2006) e Begue et al. (no prelo) obtiveram boas relações entre o NDVI e o IAF para a cana-de-açúcar nas condições estudadas. Picoli (2006) determinou o IAF em duas etapas: primeiramente calculou a fração da cobertura do solo (Fc) 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 Fc é relacionado ao IAF. 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 com o analisador de dossel LAI-2000 (Li-Cor). 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 com  $r^2$  de 0,94.

O satélite Landsat-8 é o mais recente de sua série. Foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2013 pela NASA na base aérea de Vandenberg no estado da Califórnia (EUA), operando a uma altitude de 705 Km, numa órbita heliosincrona com inclinação de 98,2° (ligeiramente retrógrada), semelhante às órbitas das séries Landsat 5 e 7. A sua passagem na linha do equador ocorre às 10:00 horas, com diferença de 15 minutos para mais ou para menos com resolução temporal de 16 dias (USGS, 2013).

A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores, sendo o primeiro, *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais incluindo a pancromática, e o segundo *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) apresentando as seguintes características:

Tabela 1. Características espectrais das bandas dos sensores a bordo da plataforma Landsat-8.

Bandas Landsat - 8	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução (m)
B1 – Visível Ultra-Azul	0,43 – 0,45	30
B2 – Visível Azul	0,45 – 0,51	30
B3 – Visível Verde	0,53 – 0,59	30
B4 – Visível Vermelho	0,64 – 0,67	30
B5 – Infravermelho Próximo	0,85 – 0,88	30
B6 – Infravermelho Médio/SWIR 1	1,57 – 1,65	30
B7 – Infravermelho Médio/SWIR 2	2,11 – 2,29	30
B8 – Pancromática (PAN)	0,50 – 0,68	15
B9 - Cirrus	1,36 – 1,38	30
B10 – Infravermelho Termal/TIRS 1	10,6 – 11,19	100*
B11 – Infravermelho Termal/TIRS 2	11,5 – 12,51	100*

\*Tratada e disponibilizada com pixel de 30 metros.

O objetivo deste estudo foi comparar métodos para a estimativa do Índice de Área Foliar da cana-de-açúcar a partir do NDVI obtido de imagens Landsat – 8 (OLI) aos dados obtidos em campo.

## 2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi realizado no município de Santo Antônio de Goiás - GO (16° 29'S; 49° 18'W; 780 m) em talhões da destilaria Centro Álcool S.A, cultivados com a variedade CTC-4, em estágio de cana-planta, sendo o plantio realizado em abril/2013, em sistema mecanizado, com mudas pré-brotadas e espaçamento de 1,5 m entre fileiras.

Entre os 290 e 500 dias após o plantio foram realizadas 11 avaliações, em 12 pontos de coleta, determinando-se: área foliar por perfilho (AF) - a partir da contagem do número de folhas verdes (folha totalmente expandida com o mínimo de 20% de área verde, contada a partir da folha +1), e pelas medições nas folhas + 3, sendo obtidos o comprimento e a largura da folha na porção mediana, estimando a área foliar conforme a equação 1:

$$AF = C \cdot L \cdot 0,75 \cdot (N + 2) \quad (1)$$

em que C é o comprimento da folha +3; L é a largura da folha +3; 0,75 é o fator de correção para área foliar da cultura; e N é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde. O índice de área foliar foi calculado pela relação entre a área foliar e a área de solo ocupada pela planta. Foram obtidas as imagens de reflectância de superfície das bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo) do sensor OLI – Landsat 8, sem incidência de nuvens sobre os talhões, em composições de 16 dias com resolução espacial de 30m, totalizando 28 composições entre os anos de 2013 e 2014. As imagens foram empilhadas e processadas no software ArcGis 10.1, onde realizou-se a obtenção, recorte e extração dos valores de NDVI dos pixels sobre os talhões.

O NDVI é calculado segundo a relação (Equação 2):

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (2)$$

sendo  $\rho_{nir}$  a reflectância de superfície da banda 4, e  $\rho_{red}$  a reflectância de superfície da banda 5.

De posse dos valores de NDVI dos talhões, dois 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), conforme foi determinado por Choudhury et al. (1994). Em seguida, o Fc é relacionado ao IAF por meio de uma relação matemática (Equação 3):

$$Fc = 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0,9} \quad (3)$$

Em que  $NDVI_{max}$  é o valor máximo do NDVI na imagem,  $NDVI_{min}$  é o valor mínimo do NDVI da imagem, NDVI é o valor de cada amostra (Equação 1) e, 0,9 é o valor ajustado por Picoli (2006) para a cana-de-açúcar.

Na segunda etapa, o IAF foi determinado de acordo com o Fc obtido pela equação 2, dado por Norman et al. (2003) (Equação 4):

$$IAF = -2\ln(1 - Fc) \quad (4)$$

ii) Método 2, onde o cálculo do IAF é efetuado pela equação ajustada por Begue et al. (no prelo) (Equação 5):

$$IAF = 0,0211e^{7,9336*NDVI} \quad (5)$$

iii) Método 3, onde o IAF é obtido pela equação ajustada por Xavier e Vetorazzi (2004) (Equação 6):

$$IAF = 4,546NDVI^{3,496} \quad (6)$$

As imagens foram recortadas com base no mapa georreferenciado dos talhões com o intuito de se considerar somente as áreas cultivadas com a mesma variedade, época de plantio e preparo do solo. Em seguida foram realizadas análises sobre o comportamento do NDVI e do IAF obtido pelos três métodos por imagem e comparando-os a dados obtidos em campo, durante o período de crescimento da cultura.

### 3. Resultados e Discussão

O recorte das imagens com base no mapa dos talhões permitiu que somente pixels puros de cana-de-açúcar fossem selecionados. Segundo Guissard et al. (2004), as amostras de pixels puros são capazes de representar áreas homogêneas sem que haja perda de precisão no monitoramento do ciclo de uma cultura agrícola. A figura 1 mostra em detalhe a localização dos talhões utilizados para o estudo.

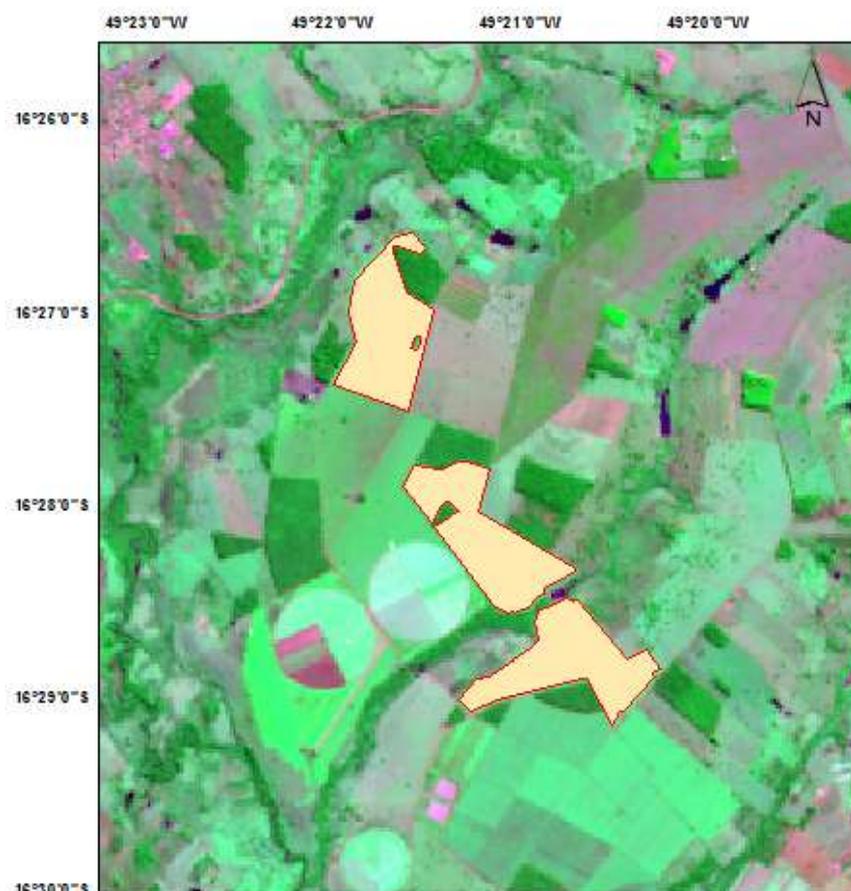


Figura 1. Localização dos talhões cultivados com cana-de-açúcar.

Os valores de NDVI variaram entre 0,02 e 0,57 ao longo do período de crescimento (Figura 2a), representando valores baixos para áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Sugawara et al., 2011 estudando o NDVI obtido a partir de dados do sensor MODIS/Terra verificaram uma variação de NDVI entre 0 e 0,99 ao longo de dois anos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Avaliando o NDVI obtido do satélite AVHRR/NOAA, Romani et al. 2011 verificaram valores entre 0,2 e 0,8 em talhões de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Na figura 2a é possível observar o aumento do NDVI durante a fase de crescimento rápido da cultura e sua diminuição durante o período de crescimento lento.

Os valores mais baixos de NDVI no estágio inicial sugerem a existência de interferência do solo exposto e pouca vegetação, como relatado por Gonçalves (2008) que encontrou os menores valores de NDVI na fase de perfilhamento da cultura. Diola & Santos (2010) descrevem que o perfilhamento inicia-se em torno de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias, sendo um processo fisiológico de ramificação subterrânea contínua das juntas nodais compactadas ao broto primário, e proporciona ao cultivo o número de colmos necessário para uma boa produção.

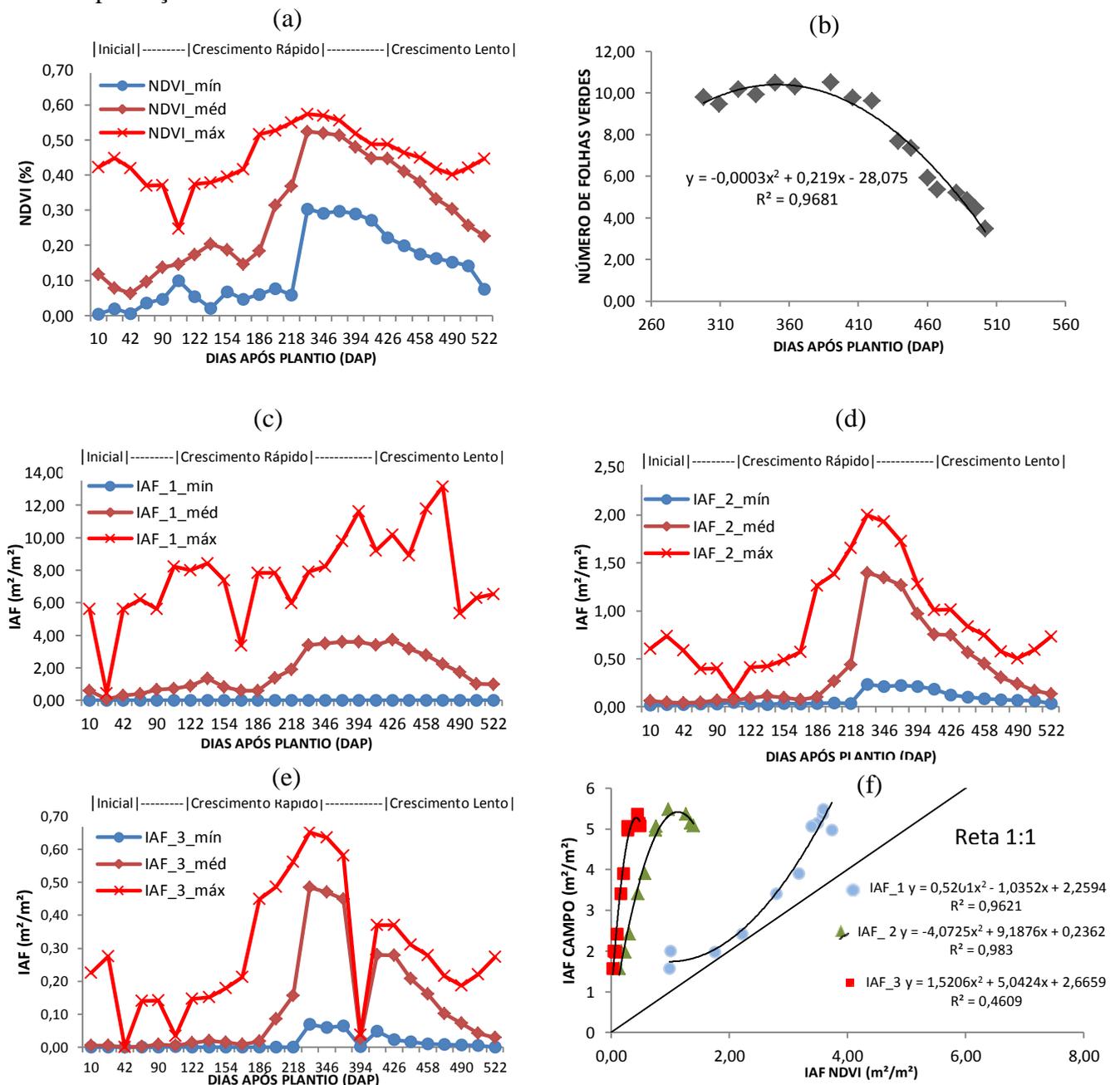


Figura 2. Perfil temporal do NDVI ao longo do ciclo da cana-planta (a), relação entre o número de folhas verdes e DAP (b), comportamento do IAF calculado ao longo do ciclo de cana-planta pelo método 1 (c), método 2 (d) e método 3 (e), relação entre o IAF medido em campo e os estimados por imagem (f).

Dandan et al. (2014) compararam o comportamento do NDVI extraído de imagens Landsat 8 com o obtido a partir de imagens Landsat 7, e verificaram que para áreas de alta cobertura vegetal os valores de NDVI são coerentes, pois nessa condição a diferença entre o Landsat 7 e 8 é próxima de zero, entretanto, os autores afirmam que para assegurar essa coerência ainda são necessárias calibrações, principalmente para condições de baixa cobertura vegetal, o que no caso da cana-de-açúcar ocorre nos períodos iniciais de desenvolvimento da cultura.

Na figura 2b nota-se que os valores máximos do número de folhas verdes ocorreram entre os 350 e 390 DAP, seguido de um declínio até os 510 DAP que correspondeu à data de colheita. Ramesh, (2000) relata que, passada a fase de intenso crescimento, entre 279 e 377 DAP, a cultura diminui o gasto de energia para produção de folhas verdes. Segundo Gomide & Gomide (1999), a redução do número de folhas seria em razão da idade avançada das folhas, aliada ao aumento da atividade respiratória para a sua manutenção. Comparando o comportamento do número de folhas verdes aos valores médios de IAF obtido por imagem (Figuras 2b, 2c, 2d e 2e), verifica-se uma tendência de ocorrência de valores máximos de IAF no mesmo período de máxima do número de folhas verdes para ambos os métodos, logo após esse período observa-se um decréscimo acentuado nas duas variáveis.

Em relação aos valores de IAF obtidos por imagem (Figura 2) o método 1 apresentou picos de valores médios, e o método 2 de valores máximos, em patamares próximos de 2, entre as fases de crescimento rápido e lento. Nassif, (2010) encontrou valores máximos de IAF em torno de 3,3, 2,7 e 3,2 para as variedades CTC – 4, CTC – 7 e CTC - 20 nas regiões de Pradópolis - SP e Piracicaba – SP. Oliveira et al., 2007 encontraram valores máximos de IAF no campo em torno de 4,0 em três cultivares de cana-de-açúcar entre 323 a 377 DAP, seguido de uma redução do número de folhas verdes na fase de maior senescência. Bezuindenhout (2000), afirma que quando o IAF torna-se maior que 4,0 ocorrem a aceleração do amarelecimento e morte das folhas, pois acima desse valor, não existe aumento de assimilação.

Segundo Oliveira et al. 2007, diversas variáveis influenciam o IAF, entre elas, o número de perfilhos, o número de folhas verdes, o tamanho e a largura destas folhas, a eficiência fotossintética delas, além da influência dos genótipos e dos fatores edafoclimáticos. Fatores ambientais como por exemplo a ocorrência de temperaturas elevadas aliadas a períodos de estresse hídrico podem acelerar o processo de senescência das folhas verdes com implicações diretas na diminuição da área foliar (Inman-Bamber, 2004).

O método 3 (Figura 2e) apresentou os menores valores com o pico de IAF próximo de 0,7, o que indica insensibilidade do método para estimativa do IAF. A eficiência do método pode estar ligada a alta variabilidade do ambiente de produção, que é um fator que deve ser considerado quando se pretende avaliar o comportamento do dossel. Scarpari et al. (2008) ao avaliarem a variação espaço-temporal do IAF em cana-de-açúcar afirmam que simular o comportamento do dossel das plantas considerando um ambiente homogêneo pode trazer erros na estimativa da variável estudada.

Apesar do comportamento temporal dos métodos apresentarem uma tendência de crescimento e declínio do IAF semelhante ao que ocorre com a cultura em campo verifica-se uma alta subestimação dos dados pelos métodos 2 e 3 quando comparados ao método 1 (Figura 2f), isso pode ser atribuído ao fato do método 1 possuir uma correção relacionada ao fator de cobertura do solo.

#### 4. Conclusões

É possível estimar o índice de área foliar da cana-de-açúcar, em primeiro corte, a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), utilizando imagens do satélite Landsat 8. O modelo que melhor estimou o IAF foi o proposto por Picoli (2006) que considera a fração de cobertura do solo a partir do NDVI e um ajuste para a cana-de-açúcar. A partir dos IAFs foi possível identificar as expansões foliares e a senescência foliar da cultura.

Por outro lado, para que as estimativas de IAF tenham relação 1:1 aos dados de campo faz-se necessário uma calibração nos parâmetros de ajuste, considerando a variabilidade ambiental e varietal da cana-de-açúcar.

#### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

#### Referências Bibliográficas

Almeida, A. C. DOS S.; Souza, J. L.; Teodoro, I.; Barbosa, G. V. S.; Moura F., G.; Ferreira Júnior, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.

Begue, A.; Bappel, E.; Pellegrino, A.; Degenne, P. Use of SPOT NDVI time series to map sugarcane crop conditions and forecast yields. **Remote Sensing of Environment** (RSE-D-06-00761). No prelo.

Bezuindenhout, C. N. **A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugarcane crop model**. 2000. 78p. M.Tech. these – Technikon Natal, Durban.

Choudhury, B. J.; Ahmed, N. U.; Idso, S. B.; Reginato, R. J. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, v.50, n.1, p. 1-17, 1994.

Conab. Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar Safra 2014/2015. Primeiro Levantamento. Abril. Brasília : Conab, 2014. Disponível em:[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_04\\_15\\_15\\_44\\_37\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_1o\\_lev\\_-\\_14.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_15_15_44_37_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_14.pdf).

Dandan, X.; Xulin, G. Compare NDVI extracted from Landsat 8 imagery with that from Landsat 7 imagery. **American Journal of Remote Sensing**, v.2, n.2, p. 10-14, 2014.

Diola, V.; Santos, F. Fisiologia. In: Santos, F. et al. (Eds.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool Tecnologias e perspectivas**. Viçosa: UFV, 2010. p.25-49

Gomide, C. A. M.; Gomide, J. A. Análise de crescimento de cultivares de *Panicum maximum* Jacq. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.28, n.4, p.675-680, 1999.

Guissard, V., Defourny, P., Ledent, J. F. Crop specific information extraction based on coarse resolution pixel sampling. In: 2nd VEGETATION International Users Conference, Antwerp, Belgium, 2004. **Anais...** Disponível em: <[http://www.vgt.vito.be/vgtapen/pages/fullpapers/guissard\\_full.pdf](http://www.vgt.vito.be/vgtapen/pages/fullpapers/guissard_full.pdf)>. Acesso em 01 Set. 2014.

Inmam-Bamber, N. G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant Soil**, v. 8, p. 93-99, 1991.

Inmam-Bamber, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, p. 107-122, 2004.

Norman, J. M.; Anderson, M. C.; Kustas, W. P.; French, A. N.; Mecikalski, J. **Remote Sensing of Evapotranspiration for Precision-Farming Applications**. In: International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Toulouse, 2003. 308p.

Nassif, D. S. P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar.** 2010. 92 p., Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2010.

Oliveira, R. A. de; Daros, E.; Zambon, J. L.C.; Weber, H.; Ido, O. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agraria**, v.6, p. 71-76, 2007.

Picoli, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva.** 2006. 90 p. (INPE-14669-TDI-1222). Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

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.

Scarpari, M. S.; Beauclair, E. G. F. Variação espaço-temporal do índice de área foliar e do brix em cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 67, n.1, p.35-41, 2008.

Sugawara, L. M.; Adami, M.; Rudorff, B. F.; Faria, V. G. C. Avaliação de três métodos de estimativa de índice de área foliar aplicados à cana-de-açúcar. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 04., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 499-506. On-Line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: < <http://martes.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2009/03.02.18.19/doc/capa.htm>> Acesso em: 05 jan. 2014.

Sugawara, L. M., Rudorff, B. F. T. Sugarcane yield penalization indicator estimated by an agronomic model. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011. Vancouver. **Anais...** Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.

Xavier, A. C.; Vetorazzi, 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.

Wiegand, C. L.; Everitt, J. H.; Richardson, A. J. Comparison of multispectral video and SPOT-HRV observations for cotton affected by soil salinity. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, n.8, p. 1511-1525, 1992.