

ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS MODIS E TRMM

Paulo Roberto da Silva Ruiz¹, Milton Kampel¹, Ieda Del'Arco Sanches¹ e Cláudia Maria de Almeida¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Caixa Postal 515 – 12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil, paulo.ruiz@inpe.br; milton@dsr.inpe.br; ieda.sanches@inpe.br; almeida@dsr.inpe.br

RESUMO

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro, seus derivados possuem destaque nas exportações e abastecimento do mercado interno. Por essa razão, o monitoramento das plantações é de extrema importância para alcançar um aumento de sua produtividade. Nesse sentido, este trabalho analisou o potencial do sensoriamento remoto no monitoramento da produtividade da cana-de-açúcar por meio de séries temporais derivadas de produtos do sensor MODIS e do satélite TRMM. A área de estudo localiza-se no município de Rancheira, interior oeste do estado de São Paulo. Foram analisadas séries temporais de NDVI, EVI e de precipitação por meio da ferramenta matemática de análise *Wavelet*. Os resultados revelaram que há uma alta correlação entre os índices de vegetação e os dados de produtividade.

Palavras-chave — séries temporais, *Wavelet*, MODIS, TRMM.

ABSTRACT

Sugarcane is one of the main products of Brazilian agribusiness, its derivatives are prominent in exports and supply of the domestic market. For this reason, the monitoring of plantations is of extreme importance in order to achieve an increase in their productivity. In this sense, this work analyzed the potential of remote sensing in the monitoring of sugarcane productivity through time series derived from MODIS sensor products and the TRMM satellite. The study area is located in the municipality of Rancheira, in the western inland of São Paulo state. Time series of NDVI, EVI and precipitation were analyzed using the mathematical analysis tool Wavelet. The results showed that there is a high correlation between vegetation indices and productivity data.

Keywords — temporal series, *Wavelet*, MODIS, TRMM.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro, caracterizando o país como o maior produtor mundial do produto. O estado de São Paulo possui a liderança em termos de área plantada e de cana moída, perfazendo respectivamente 55% e 56% do total nacional na safra 2016/2017, segundo dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA [1].

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene com uma duração de ciclo de quatro a cinco cortes. Ao longo dos cortes, a tendência é a perda gradativa em sua produtividade [2]. Devido a essas características, é imprescindível o

acompanhamento de seu crescimento vegetativo a fim de estimar a produtividade entre os sucessivos cortes. Nesse sentido, [3] analisou o monitoramento da cana-de-açúcar por meio de séries temporais de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), constatando que esses produtos de sensoriamento remoto podem ser utilizados na estimativa de variáveis biofísicas empregadas em modelos de produtividade agrícola. Séries temporais de dados do sensor MODIS e do satélite Landsat 5 foram utilizadas como entrada em um modelo de estimativa da produtividade da cana de açúcar, constatando que a incorporação de variáveis espectrais derivadas de índices de vegetação, como o NDVI, complementam a informação coletada em campo pelas usinas para estimar com maior precisão a produtividade da cana [4].

O presente trabalho objetiva avaliar o potencial uso de séries temporais dos índices de vegetação NDVI e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) do sensor MODIS e precipitação do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) para monitorar a produtividade do cultivo de cana-de-açúcar em uma área no interior do estado de São Paulo entre 2012 e 2017.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende uma plantação de cana-de-açúcar pertencente à Fazenda Bartira, no município de Rancheira, interior do estado de São Paulo, delimitada pelas coordenadas 22°10'05''S e 22°11'19''S e 50°58'40''O e 50°58'11''O (Figura 1). A região apresenta clima tropical, com estações secas e úmidas bem definidas ao longo do ano. O verão é longo, quente, abafado e de céu quase encoberto. Em contrapartida, o inverno é curto e de céu quase sem nuvens. A temperatura média é de 21,1° C, variando ao longo do ano entre 15 °C e 31 °C e raramente é inferior a 10 °C e superior a 35 °C. A pluviosidade média é de 1.235 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso e julho o mais seco. A estação mais chuvosa dura 5,1 meses, de 21 de outubro a 24 de março, enquanto a estação mais seca dura 6,9 meses, de 24 de março a 21 de outubro.

Os dados de campo e o mapa de localização dos talhões, bem como os dados de produtividade foram cedidos pela Fazenda Bartira. Até 2011, a área de estudo era pastagem. No final desse ano, foi plantado amendoim, o qual foi colhido em março de 2012 e sucedido pela cana-de-açúcar. O cultivo da cana-de-açúcar permaneceu na área de

2013 a 2017. Ao longo dos cinco cortes, a produtividade apresentou uma acentuada queda, iniciando com 113 t/ha em 2012 e terminando com 55 t/ha em 2017.

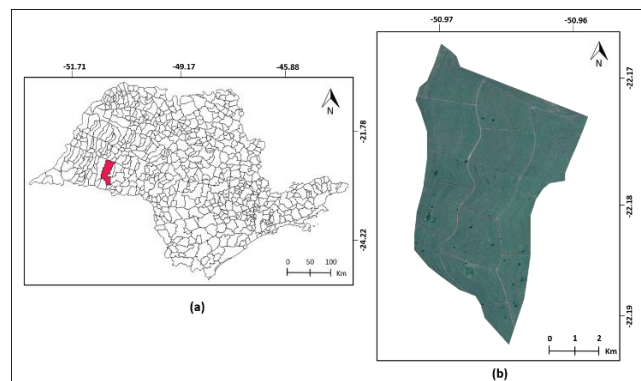


Figura 1. (a) Localização do município de Rancheira no estado de São Paulo e (b) imagem de satélite da área de estudo obtida no Google Maps.

2.2. Dados de satélite

2.2.1. Índices de vegetação

Séries temporais de NDVI e EVI entre 09/2012 e 08/2018 foram obtidas na plataforma *web* Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SatVeg) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Estes dados com resolução espacial de 250 m e temporal de 16 dias correspondem aos produtos MOD13Q1 e MYD12Q1 do sensor MODIS, dos satélites Terra e Aqua, respectivamente.

O NDVI é sensível à presença de clorofila e outros pigmentos acessórios que absorvem a radiação solar na banda do vermelho e é calculado pela Equação 1 [6]:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V}, \quad (1)$$

em que IVP = reflectância no infravermelho próximo; V = reflectância no vermelho.

Já o EVI foi formulado a partir de uma combinação de dois outros índices: o *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) e o *Atmosphere Resistant Vegetation Index* (RVI). Sua principal finalidade é atenuar os efeitos do solo e da atmosfera sobre o monitoramento da vegetação e é dado pela Equação 2 [7].

$$EVI = G * \frac{IVP - V}{IVP + C_1 * V - C_2 * A + L}, \quad (2)$$

em que A = reflectância no azul; C_1 = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho (6); C_2 = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul (7,5); L = fator de correção para os efeitos do solo (1); G = fator de ganho (2,5).

2.2.2. Dados de precipitação

Dados de precipitação estimados pelo satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) no período entre

01/2012 e 06/2017, produto 3B43V6, foram obtidos na plataforma *web* Series View do Laboratório de Agricultura e Floresta do INPE (LAF/INPE). O produto 3B43V6 é gerado pela integração do acúmulo mensal diário do produto TRMM 3B42V5 com o acúmulo mensal do Sistema de Monitoramento e Avaliação do Clima (CAMS) ou do Centro Global de Climatologia e Precipitação (GPCC), medidor de análise de chuva 3A45 TRMM [5].

As séries temporais dos índices de vegetação foram particionadas com base nos períodos que antecederam aos cortes da cana (Tabela 1). Como a variedade da cana cultivada foi a de ano e meio, ou seja, foi plantada em março de 2012 e o primeiro corte ocorreu após 18 meses, o primeiro período abrangeu 2 meses a mais que os outros períodos. A partir do segundo corte, o período entre cortes é de 12 meses. No presente trabalho, os dados referentes aos meses de outubro não foram incluídos nas análises a partir do segundo corte, pois, neste período, a resposta espectral do alvo corresponde à palhada deixada no solo após o procedimento de corte da cana. A produtividade obtida em cada corte foi relacionada com as médias dos índices de vegetação correspondentes aos períodos relativos analisados de cada corte por meio da correlação de Pearson, estimando a reta característica para determinar a produtividade.

Período	Início	Fim
1º	13/09/2012	30/09/2013
2º	09/11/2013	30/09/2014
3º	09/11/2014	30/09/2015
4º	09/11/2015	29/09/2016
5º	08/11/2016	30/09/2017

Tabela 1. Períodos analisados pelas séries temporais correspondentes aos períodos de desenvolvimento fenológico da cana.

2.3. Análise Wavelet

Outra etapa do trabalho foi analisar as séries temporais dos índices de vegetação e precipitação por meio da transformada *Wavelet*. A transformada *Wavelet* é definida pela Equação 3 [8].

$$W(a, b)_i = \frac{1}{\sqrt{a}} \int \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) s(t) dt, \quad (3)$$

em que $s(t)$ é o sinal de entrada analisado e φ^* é a *wavelet* mãe ou base. A largura da *Wavelet* é determinada pelo parâmetro de escala “a”, enquanto o seu centro é determinado pelo parâmetro “b”. A variável “t” representa o intervalo de tempo na série temporal na qual é realizada a integração.

A transformada *Wavelet* tem a vantagem de manter as informações relacionadas à largura (escala) e à localização (tempo) das características presentes em $s(t)$. A Equação 4 é utilizada para reconstruir o sinal.

$$W = \sum_{i=1}^x W(a, b)_i, \quad (4)$$

A série temporal de *Wavelet* é um somatório das wavelets de larguras decrescentes de “*i*” a “*x*”, em que “*x*” é número de transformações necessárias para alcançar o número definido de coeficientes retidos dos dados de entrada. A filtragem *Wavelet* inicia-se com a aplicação da função de suavização na série temporal, para remover os ruídos de alta frequência. Neste estudo, foi utilizada a *Wavelet* mãe discreta conhecida como “chapéu mexicano” [8].

3. RESULTADOS

A escala temporal de variação da análise *Wavelet* foi capaz de identificar as épocas de cortes e os picos de crescimento da cana-de-açúcar, que correspondem aos meses do período chuvoso de cada ano, ou seja, janeiro e fevereiro (Figuras 2 e 3).

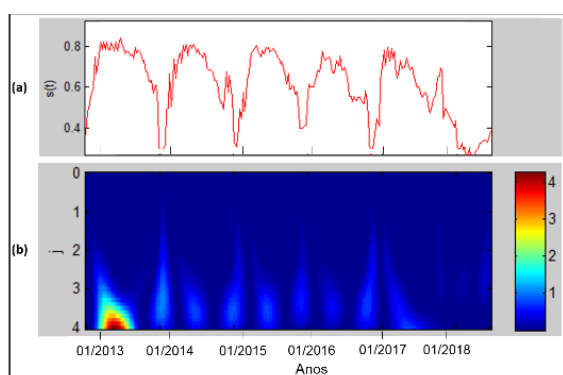


Figura 2. (a) Série temporal do NDVI MODIS 09/2012-08/2018 e (b) decomposição Wavelet.

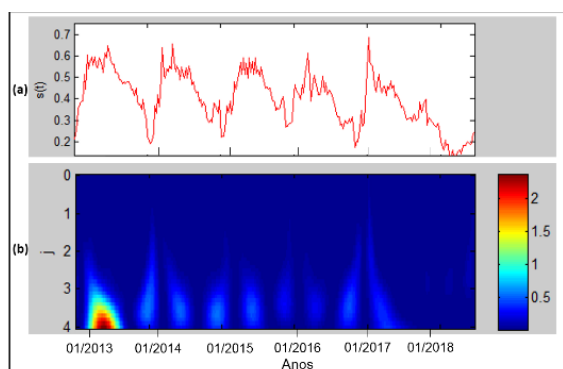


Figura 3. (a) Série temporal do EVI MODIS 09/2012-08/2018 e (b) decomposição Wavelet.

Na decomposição *Wavelet* da série temporal de precipitação TRMM (Figura 4), é possível observar períodos mais chuvosos no início e fim da série, ou seja, nos anos de 2012, 2013, 2016 e 2017. Já nos anos de 2014 e 2015, verifica-se um período de estiagem.

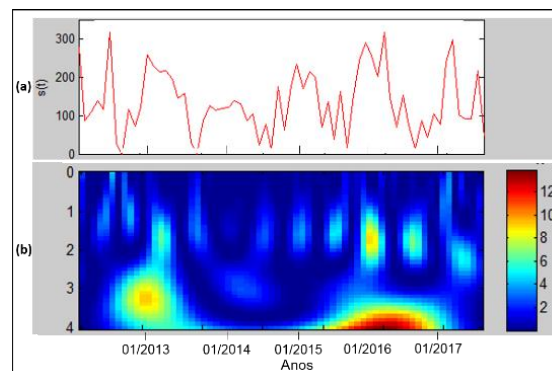


Figura 4. (a) Série temporal de precipitação 01/2012-06/2017 e (b) decomposição Wavelet.

A Figura 5 apresenta a variação temporal das médias dos índices de vegetação entre os períodos de cortes no período 2013-2017. Constata-se uma forte oscilação negativa, no caso do NDVI de 0,71 para 0,61, ao passo que no EVI foi de 0,48 para 0,39.

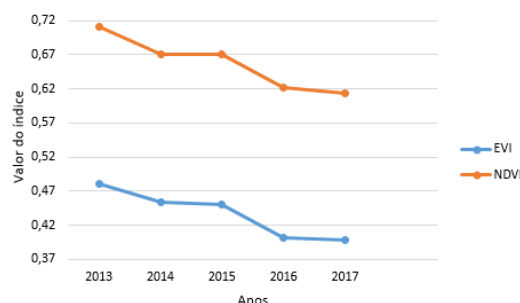


Figura 5. Variação temporal dos índices de vegetação no período 2013-2017.

A regressão linear entre NDVI e produtividade, o R^2 e a equação da reta são apresentados na Figura 6. Verifica-se uma alta correlação entre os dados, apresentando R^2 de 0,9323 e um *p-value* de 0,015556.

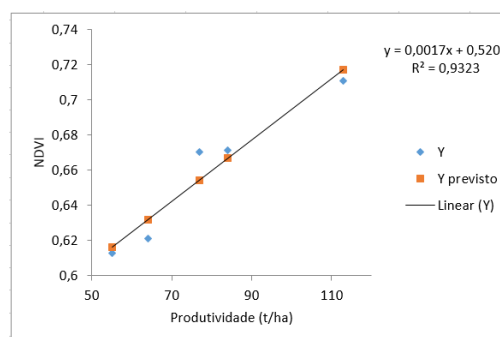


Figura 6. Regressão linear entre NDVI e produtividade.

Por sua vez, a Figura 7 apresenta a regressão linear entre EVI e produtividade, o R^2 e a equação da reta. A regressão apresentou R^2 de 0,8877 e *p-value* de 0,04373, no limite do grau de rejeição de 0,05%.

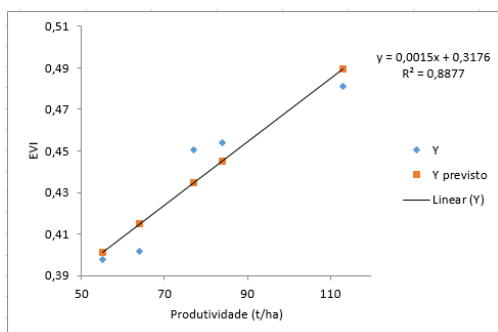


Figura 7. Regressão linear entre EVI e produtividade.

4. DISCUSSÃO

A anomalia negativa de precipitação identificada pela estiagem nos anos de 2014 e 2015 impactou significativamente na queda da produtividade nesses anos e também nos anos seguintes, pois não houve um aumento significativo da precipitação nos anos subsequentes. Essa anomalia proporcionou uma crise de abastecimento de água nas grandes cidades, com impactos na agricultura em todo o estado de São Paulo [9].

Os índices NDVI e EVI apresentaram ao longo da série temporal picos irregulares, que podem ser associados aos meses mais chuvosos (janeiro e fevereiro). A irregularidade da precipitação proporcionou um baixo crescimento da cana, verificado pelos baixos índices de vegetação. Essa característica é determinante para a produtividade. Em entrevistas com os gestores da fazenda Bartira, verificou-se que o cultivo sofreu ao longo de todo o período uma intensa infestação de ervas daninhas, dentre elas se destacam a brachiária (*brachiaria decumbens*) e a popular “corda de viola” (*ipomoea sp.*). Outros trabalhos [10] destacam que os índices de vegetação de um cultivo tendem a aumentar quando apresentam muita erva daninha, sobretudo o NDVI. Os picos verificados nos índices estão associados às ervas daninhas, mas as quedas verificadas posteriormente estão relacionadas com a aplicação de defensivos agrícolas. Portanto, a presença de ervas daninhas e a aplicação de defensivos agrícolas associados à estiagem proporcionaram ao longo dos anos a queda na produtividade da cana-de-açúcar, observada pela queda nos índices de vegetação.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou explorar as potencialidades de uso das séries temporais de satélite no monitoramento da produtividade da cana-de-açúcar. Séries de NDVI e EVI MODIS, e de precipitação TRMM foram analisadas pela aplicação da transformada de Wavelet. Os resultados foram relacionados à produtividade da cana-de-açúcar em uma área no interior paulista.

Os índices de vegetação apresentaram forte queda no período analisado e, como os resultados demonstraram, estão fortemente correlacionados com a queda da produtividade. Outrossim, no período verificou-se uma

anomalia relacionada à estiagem, o que também impactou na queda da produtividade. E, por fim, a infestação de ervas daninhas foi identificada nas séries temporais dos índices de vegetação, contribuindo decisivamente para a queda desses índices, juntamente com a produtividade.

Assim, os resultados deste trabalho demonstraram que a utilização de séries temporais de produtos de sensoriamento remoto são eficazes para o monitoramento da produtividade agrícola.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ÚNICA. *Relatório final da safra 2017/2018* – região Centro-Sul. <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=102>>. Acessado em 29/08/2018.
- [2] 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.
- [3] Sugawara, L. M.; Rudorff, B. F. T. Acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar por meio de séries temporais de NDVI do sensor Modis. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR. INPE, 2011.
- [4] Picoli, M. C. A.; Rudorff, B. F. T.; Rizzi, R.; Giarolla, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. *Bragantia* (São Paulo, SP. Impresso), v. 68, p. 789-795, 2009.
- [5] Huffman, G. J.; Bolvin, D. T.; Nelkin, E. J. TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation, Mesoscale Atmospheric Processes Laboratory. *NASA Global Chang Master. Directory Doc.*, p 44. Disponível em: <http://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/3B42_3B43_doc_V7.pdf>.
- [6] Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. and Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *3rd ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, pp. 309–317, 1973.
- [7] Gao, X.; Huete, A. R.; Ni, W.; Miura, T. Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. *Remote Sensing of Environment*, n. 74, p. 609–620, 2000.
- [8] Domingues, M. O.; Mendes, O.; Kaibara, V. E.; Menconi, V. E.; Bernardes, E. Explorando a transformada wavelet contínua. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 38, nº 3, 2016.
- [9] Marengo, J. A.; Nobre, C. A.; Seluchi, M. E.; Cuartas, A.; Alves, L. M.; Mendiondo, E. M.; Obregón, G.; Sampaio, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, n. 106, p. 31–44, 2015.
- [10] Merotto Jr. A.; Bredemeier, C.; Vidal, R. A.; Goulart, I. C. G. R.; Bortoli, E. D.; Anderson, N. L. Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control performed by multipurpose equipment in precision agriculture. *Planta Daninha*, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 437-447, 2012.