

Aplicação da análise harmônica em séries temporais de EVI2/MODIS para áreas de cana-de-açúcar na Região Administrativa de Ribeirão Preto

Bruno Silva Oliveira¹
Elisabete Caria Moraes¹
Guilherme Augusto Verola Mataveli¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{bruno.so, bete, mataveli}@dsr.inpe.br

Abstract. One of the most important agricultural activities for Brazilian economy, sugarcane crop is increasing in São Paulo State, especially after 2003, mainly due to the growing demand for ethanol produced from sugarcane. Considering this expansion, it is important to evaluate sugarcane crop cycle, becoming harmonic analysis of time series applied to satellite data one useful technique to characterize vegetation cover and its biophysical properties. The objective of this study is to apply harmonic analysis to evaluate the temporal behavior of the vegetation index EVI2 for sugarcane crop areas in the administrative region of Ribeirão Preto, one of the most important regions of sugarcane production in São Paulo State. For this purpose, a time series of EVI2/MODIS images from 2005 to 2007 was used, assessing the temporal pattern of this vegetation index in a pixel located in a sugarcane experimental site. In addition, Canasat project thematic maps were used to identify pixels of MODIS images in which land cover was only sugarcane, assessing the overall behavior of the crop in the study area. At the experimental site, the harmonic related to the annual period was responsible for most of the variance, showing the crop cycle. The results show that it is possible to apply harmonic analysis bands in colored compositions to delimitate agricultural areas, which are stand out in the third harmonic, related to the annual period.

Palavras-chave: harmonic analysis, MODIS, EVI2, análise harmônica, MODIS, EVI2.

1. Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura agrícola de grande importância econômica no Brasil, principalmente devido à crescente demanda de etanol, decorrente tanto da mistura do etanol na gasolina quanto da popularização dos carros flex após o ano de 2003. Nesta última década houve uma grande expansão do cultivo da cana de açúcar (RUDORFF et al., 2010) e toda a intervenção antrópica gerada por esta monocultura gera questionamentos socioambientais ainda não bem respondidos. A expansão desta cultura é intensa na região Centro-Sul do Brasil, em especial no Estado de São Paulo. Entre os anos de 2003 e 2013, a área plantada de cana-de-açúcar no estado aumentou 92%, em decorrência da crescente demanda do produto para produção de etanol (INPE, 2014).

Dessa forma, é importante que se conheça os impactos da expansão da cultura, bem como a dinâmica do seu ciclo produtivo. Nesse sentido, o estudo de séries temporais de imagens de sensoriamento remoto apresenta um grande potencial por permitir o reconhecimento de padrões temporais para diferentes variáveis em diversas coberturas da terra, com ampla abrangência espacial.

Os índices espectrais de vegetação podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais bandas espectrais, selecionadas de forma a representar o fenômeno estudado na forma de um índice, que pode ser relacionado com os parâmetros da vegetação (HUETE, 1996). O uso dos índices de vegetação permite a obtenção de informações sobre o crescimento e vigor da vegetação e podem ser utilizados na determinação de parâmetros biofísicos, destacando as características das plantas por sua interação com a radiação solar eletromagnética em cada banda espectral, minimizando efeitos do solo, atmosfera e variações abaixo do dossel (JENSEN, 2006).

Com o lançamento de sistemas sensores como o MODIS, o monitoramento de propriedades e processos de superfície teve um novo impulso, permitindo o desenvolvimento de novas metodologias para a compreensão das características dos sistemas ambientais. Nesse

sentido, o sensor MODIS apresenta uma vantagem, pela possibilidade de estimar fluxos de energia em escala regional, continental e global, com resolução temporal quase diária (RUHOFF et al., 2012).

A Análise Harmônica é uma técnica que vem sendo utilizada em séries temporais de imagens de sensoriamento remoto principalmente para caracterizar a fenologia da vegetação, com base em mudanças que ocorrem na superfície terrestre, facilitando a compreensão da dinâmica temporal da cobertura vegetal (JAKUBAUSKAS, 2001; LACRUZ, 2006).

Nesse sentido, este estudo teve como objetivo aplicar a técnica da Análise Harmônica em uma série temporal de imagens do índice de vegetação EVI2/MODIS para áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto, de forma a caracterizar temporalmente o comportamento da cana-de-açúcar no campo.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a Região Administrativa (RA) de Ribeirão Preto, que está localizada no centro-norte do Estado de São Paulo (Figura 1a). Essa RA é composta por 25 municípios, que ocupam uma área total de 934.800 ha, um total de 3,8% do território paulista, e população de 1.247.761 habitantes. Possui clima tropical, relevo suave e plano, com solos adequados ao desenvolvimento de agricultura tropical. O agronegócio sucroalcooleiro é o principal indutor de desenvolvimento da economia da RA, de segmentos industriais a ele relacionado, como o setor metal-mecânico ou o de turismo de negócios. (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012).

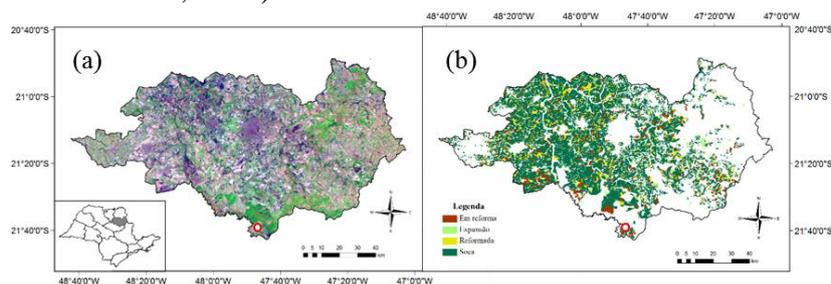


Figura 1. (a) Localização da RA de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo; (b) áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto no ano de 2006. O círculo vermelho indica a localização do sítio experimental em área de cana-de-açúcar. Fonte: INPE (2014).

Segundo o mapeamento do Projeto Canasat (INPE, 2014), a RA de Ribeirão Preto apresentou uma área cultivada de cana-de-açúcar de aproximadamente 433 mil ha na safra 2005 e 447 mil ha na safra 2006, representando respectivamente 12,88% e 12,21% da área total cultivada no Estado de São Paulo. Verifica-se ainda que a área cultivada de cana-de-açúcar nessas duas safras representa 46,36% e 47,85% da área total desta RA (INPE, 2014).

Para a extração do perfil temporal de EVI2 foi selecionado um pixel referente ao sítio experimental em cana-de-açúcar, localizado município Luiz Antônio – SP. O pixel situa-se sobre uma plantação da Companhia Energética Santa Rita (USR), nas coordenadas 21° 38' 13,4" S e 47° 47' 24,9" O, a 552 m de altitude, a qual foi plantada em 2003, passando por duas colheitas com queima da palha, em 2004 e 2005 (CABRAL et al., 2012). Desse modo, para o período de avaliação deste estudo, a série temporal corresponde ao período da segunda à quarta rebrota da cultura.

2.2 Dados de satélite e de superfície

Os dados de reflectância da superfície utilizados para estimar o albedo de superfície foram obtidos do produto MOD09A1 (VERMOTE e VERMEULEN, 1999), com resolução espacial de 500m e resolução temporal de 8 dias, para o tile H13V11. Esse produto é distribuído

de forma gratuita pelo *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC) em formato HDF (*Hierarchy Data Format*), com projeção Sinusoidal, sendo posteriormente convertido para o formato GEOTIFF (*Tagged Image File Format*) por meio da ferramenta MRT (*Modis Reprojection Tools*), desenvolvida pelo *Earth Resources Observation System Data Center* (EDC) e pelo LPDAAC. No processamento no MRT, definiu-se a saída para as imagens em Coordenadas Geográficas (Lat-Long) e Datum WGS84.

2.3 Mapas do projeto Canasat

As áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto (Figura 1b) foram obtidas dos mapas temáticos do Projeto Canasat (INPE, 2014), para as safras 2005, 2006 e 2007, nos quais as classes “cana-planta”, “cana soca” e “reformada” foram agrupadas em uma única classe, enquanto a classe “em reforma” foi excluída. Dessa forma, a avaliação para os pixels de cana-de-açúcar abrange a área total disponível para colheita em cada safra.

2.4 Geração da série temporal do índice de vegetação EVI2

O cálculo das variáveis analisadas neste estudo foi realizado no MATLAB, automatizando o processo para todos os mosaicos de 8 dias das imagens MODIS entre as datas de 01/01/2005 e 31/12/2007, gerando por fim a série temporal composta por 138 imagens.

O índice de vegetação EVI2 (JIANG et al., 2008) surgiu como alternativa ao índice EVI, que utiliza as bandas do infravermelho próximo, do vermelho e azul, sendo um índice sensível a altas quantidades de biomassa, porém com a desvantagem de limitar seu emprego a sensores que apresentam a banda azul. Desse modo o EVI2 (Equação 1) apresenta a vantagem de ter um desempenho similar ao EVI sem necessitar da banda azul.

$$EVI2 = 2,5 \frac{NIR - RED}{NIR + 2,4 RED + 1} \quad (1)$$

em que NIR é a reflectância da banda do infravermelho próximo e RED é a reflectância da banda do vermelho.

2.5 Aplicação da Análise Harmônica

A análise harmônica ou análise de Fourier tem sido utilizada no estudo de séries temporais de imagens de satélite para fins como caracterização de mudanças sazonais na vegetação natural e agricultura (JAKUBAUSKAS et al., 2001). Essa técnica permite representar uma função complexa como a somatória de ondas (termos) senoidais e cossenoidais, onde cada onda é definida por um valor único de amplitude e fase (LACRUZ, 2006). Os harmônicos são funções trigonométricas com frequências múltiplas da frequência fundamental, que é determinada pelo tamanho amostral da série.

De acordo com Jakubauskas et al. (2001), a série temporal de N amostras pode ser representada pela transformada discreta de Fourier, apresentada na Equação (2).

$$f(x)_t = \bar{c} + \sum_{j=1}^{N/2} c_j \cos\left(\frac{2\pi t}{N} - \varphi_j\right) \quad (2)$$

em que \bar{c} é a média dos valores da série temporal, c_j =amplitude do j-ésimo harmônico e φ_j é o ângulo de fase do j-ésimo harmônico.

A amplitude (Equação 3) representa a metade do valor máximo da função, de modo que altos valores de amplitude indicam elevados níveis de variação do respectivo harmônico, que têm portanto maior contribuição na periodicidade do evento.

$$c_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad (3)$$

em que a_j e b_j são as componentes cosseno e seno do vetor amplitude c_j , calculados por:

$$a_j = \frac{2}{N} + \sum_{t=1}^N f(x) \cos\left(\frac{2\pi t t}{N}\right) \quad (4)$$

$$b_j = \frac{2}{N} + \sum_{t=1}^N f(x) \sin\left(\frac{2\pi t t}{N}\right) \quad (5)$$

O ângulo de fase é o deslocamento entre a origem da série e o pico da onda no intervalo entre 0 a 2π , obtido pela equação 6. A variância total da série, bem como a contribuição de cada termo na variância total da série se obtém pelas equações 7 e 8, respectivamente.

$$\varphi_j = \begin{cases} \arctan \frac{b_j}{a_j}, & \text{se } a_j > 0 \\ \arctan \frac{b_j}{a_j} \pm \pi, & \text{se } a_j < 0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{se } a_j = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\% \text{Variância} = \frac{c_j^2}{2S^2} \quad (7)$$

$$\text{Var. Total} = \sum_{j=1}^N \frac{c_j^2}{2} \quad (8)$$

em que c_j é a amplitude do harmônico e S^2 a variância populacional.

A Análise Harmônica foi implementada em MATLAB, adaptando o algoritmo disponibilizado por ABOUALI(2014) para dados MODIS, obtendo-se por fim as imagens de amplitude e fase para cada harmônico, além do termo aditivo e variância total da série temporal.

O algoritmo adaptado tem como dados de entrada a série temporal de imagens em formato GEOTIFF, além de parâmetros que a caracterizam, como o número de imagens (n_i), período total da série temporal (n_b), número de harmônicos desejado pelo usuário (n_f), mínimo e máximo da variável (low, high), entre outros. Como saída, o algoritmo fornece as bandas do termo aditivo (média da série temporal), amplitude e ângulo de fase dos “ n_f ” harmônicos definidos pelo usuário, além da variância da série temporal em cada *pixel*. Para a série temporal de EVI2 (janeiro de 2005 a dezembro de 2007), foram gerados 12 harmônicos.

Das bandas resultantes da aplicação da Análise Harmônica, foram extraídos os valores dos *pixels* puros em áreas de cana-de-açúcar, ou seja, dos *pixels* do MODIS (1km) totalmente preenchidos com áreas da cultura. Este procedimento foi realizado no ArcGIS 10.1, com a ferramenta Hawth's Tools (BEYER, 2004), onde a grade das células da imagem MODIS foi vetorizada e cruzada com os polígonos do mapeamento do Canasat, conforme ilustrado na Figura 3.

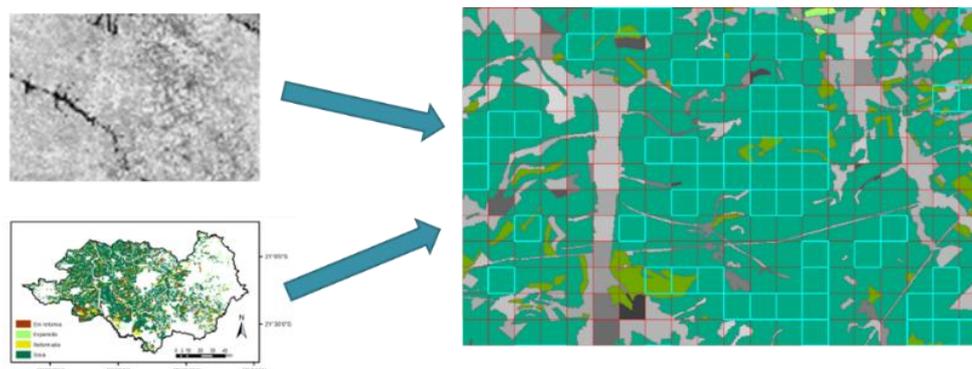


Figura 3. Seleção de *pixels* puros (células em ciano) do MODIS em áreas de cana-de-açúcar para extração dos valores de amplitude e fase dos harmônicos. As linhas vermelhas indicam a grade das células do MODIS.

3. Resultados e Discussão

A partir da série temporal de EVI2 foram gerados os primeiros 12 harmônicos, além do termo aditivo da série, conforme descrito acima. A Figura 4 apresenta os resultados obtidos da aplicação da Análise Harmônica na série temporal de EVI2 no *pixel* do sítio experimental em cana-de-açúcar.

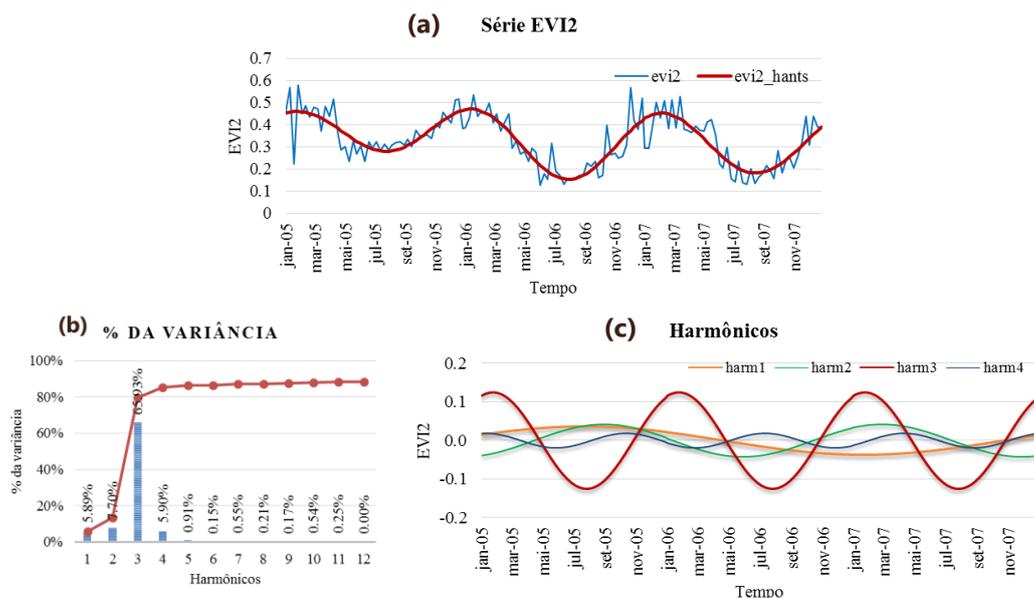


Figura 4. (a) Perfil temporal do índice EVI2 no pixel de estudo em área de cana-de-açúcar e série suavizada (soma dos harmônicos); (b) variância parcial dos 12 harmônicos gerados; (c) curvas dos 12 harmônicos gerados.

O padrão observado na Figura 4(a) mostra que o ciclo anual do EVI2 para a cana-de-açúcar é aproximadamente senoidal, acompanhando cada safra da cultura em questão, e o que permite o bom ajuste da série temporal pela série suavizada pela Análise Harmônica. Além disso, a aplicação da Análise Harmônica filtra as variações no índice decorrentes de nuvens ou outras fontes de ruídos (NASCIMENTO e ZULLO JUNIOR, 2011).

A maior parte da variância da série está contida no terceiro harmônico (65,93%), que representa o ciclo anual. Há ainda parte da variância no primeiro, segundo e quarto harmônico. Pode-se destacar entre essas a influência do primeiro harmônico, que representa principalmente a tendência a diminuição do índice EVI2 a partir de 2006. Essa tendência a redução pode ter como causa a queda sucessiva de produtividade que a cana-de-açúcar apresenta em cada ciclo, ou ainda o maior déficit hídrico a que a cultura foi submetida aproximadamente em agosto de 2006 e agosto de 2007, o que levou a menores índices EVI2, refletindo uma condição de menor vigor vegetativo da cultura.

A Figura 5 apresenta os mapas dos resultados da Análise Harmônica (termo aditivo e 4 primeiros harmônicos) para a série temporal de imagens de EVI2 na RA de Ribeirão Preto. Com relação a distribuição espacial da média (A0) de EVI2 na série temporal, nota-se que os menores valores foram obtidos para áreas urbanas e de água, que caracteristicamente apresentam valores baixos (ou negativos) de EVI2, também com pouca variação ao longo da série, indicado pelos menores valores de variância. Os valores mais altos correspondem a áreas de floresta, reflorestamento ou culturas perenes (vegetação sempre verde), que apresentam índices mais altos ao longo de toda a série temporal, ao contrário de culturas agrícolas que apresentam máximos e mínimos bem definidos, acompanhando o ciclo fenológico da cultura.

Desse modo, pode-se destacar o comportamento verificado no terceiro harmônico, que corresponde ao ciclo anual (período de 1 ano) e apresenta os maiores valores de amplitude entre os harmônicos. No mapa de amplitude do terceiro harmônico é possível notar que a distribuição espacial dos maiores valores corresponde às áreas de cana-de-açúcar mapeadas pelo Canasat, sendo esse um resultado interessante na aplicação de metodologias que visem o mapeamento dessa culturas.

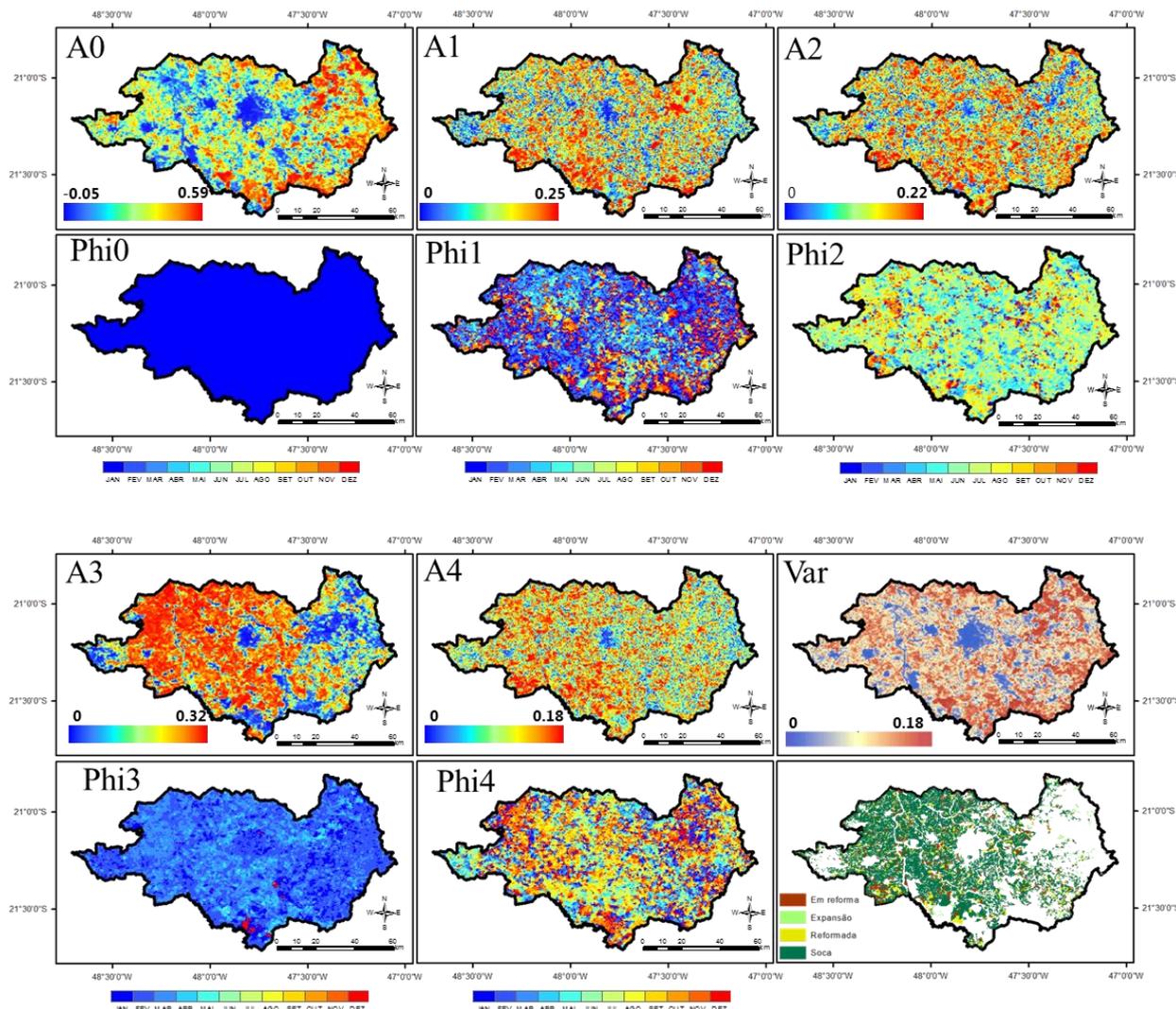


Figura 5. Mapas do termo aditivo (A0), amplitudes (A1 a A4) e ângulos de fase (Phi 0 a Phi4), variância total da série de EVI2, mapa de cultivo do Canasat.

Nota-se ainda no mapa de ângulo de fase do terceiro harmônico que o pico de EVI2 em toda a área varia entre janeiro e abril, havendo ainda áreas com o pico do índice ocorrendo em dezembro. Extraindo-se os valores dos harmônicos e ângulos de fase nos pixels puros em áreas de cana-de-açúcar, foram construídos os histogramas apresentados na Figura 6.

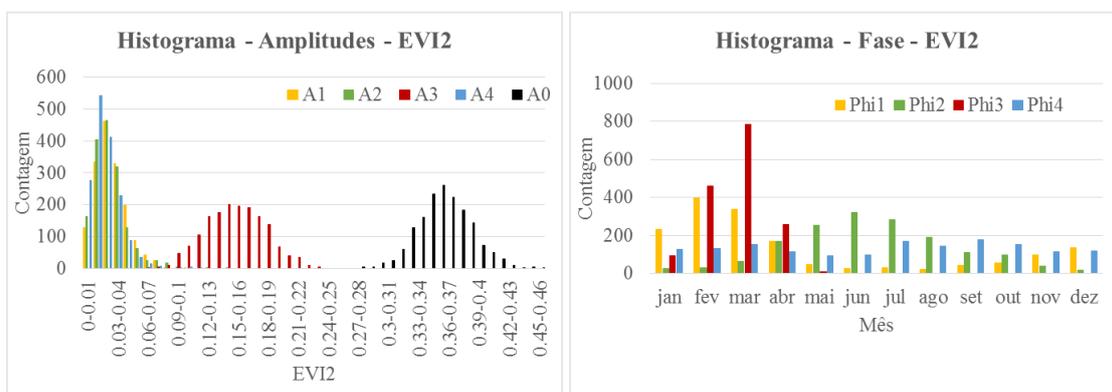


Figura 6. Histogramas de Amplitude e ângulos de fase dos harmônicos da série temporal de EVI2 nos pixels de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto.

Conforme apresentado na Figura 6, nas áreas de cana-de-açúcar a média (A_0) de EVI2 variou entre 0,27 e 0,46, refletindo diferentes condições da cultura no campo. Essas diferentes condições podem ter como origem diferentes tipos de manejo empregados (com ou sem queima pré-colheita, irrigado ou não irrigado), ou mesmo em qual ciclo (corte) cada cultura se encontra (cana-planta, primeira rebrota, segunda rebrota, etc.). Vale lembrar ainda que para o ciclo de cana-planta (primeiro ciclo após o plantio), este pode ter duração de um ano ou de um ano e meio, o que altera o padrão da série temporal de EVI2 para determinados pixels. Mas de forma geral o terceiro harmônico apresentou maiores valores de amplitude, destacando o comportamento da cultura no campo. Para essas áreas de cana-de-açúcar o pico do ciclo de EVI2 ocorreu entre janeiro e abril, destacando-se o mês de março como aquele em que maior parte da cana-de-açúcar alcança o máximo vigor vegetativo.

A Figura 7 apresenta uma composição colorida RGB gerada com as imagens resultantes da Análise Harmônica para a série de imagens de EVI2 (amplitude do harmônico 3, termo aditivo (A_0) e variância total da série).

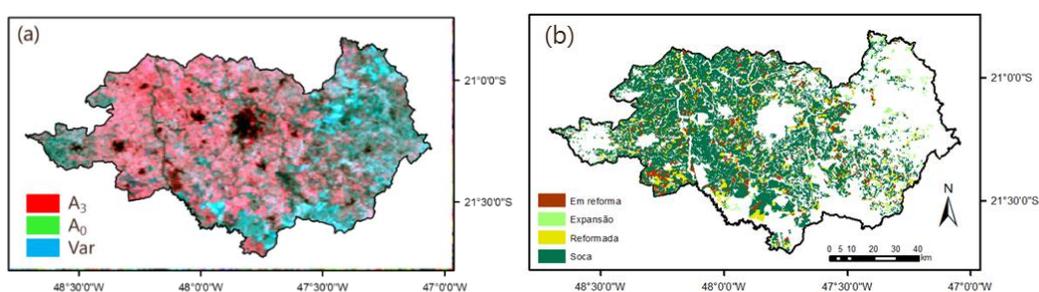


Figura 7. (a) Composição colorida RGB com as bandas A_3 , termo aditivo (A_0) e variância obtidas da análise harmônica da série temporal de imagens de EVI2. (b) Mapa de Área plantada – Canasat.

Essa composição colorida destaca em tons avermelhados as áreas de cana-de-açúcar, conforme se nota comparando-a visualmente com o mapeamento do Canasat (Figura 7b). Esse tipo de composição pode ser aplicado na classificação de imagens, diferenciando culturas através da amplitude (que para o EVI2 pode diferenciar culturas com diferentes graus de vigor vegetativo) e do ângulo de fase (que pode ser relacionado com o calendário agrícola da região para definir qual é a cultura em questão para cada pixel) (JAKUBAUSKAS, 2001; LACRUZ, 2006; ARENAS-TOLEDO, 2008).

Verifica-se ainda na Figura 7a que pixels mais escuros representam áreas urbanas, com baixa média e variabilidade de EVI2 ao longo do ciclo, além de pixels correspondentes a classe de floresta ou reflorestamento (vegetação sempre verde), que aparecem em ciano na imagem. A cor ciano se deve a alta média e variância de EVI2 ao longo da série temporal para esse tipo de cobertura.

4. Conclusões

A Análise Harmônica se mostrou uma técnica útil na análise de séries temporais regulares. Para séries temporais de imagens do índice de vegetação EVI2, a técnica permite diferenciar áreas agrícolas (alta variabilidade do índice) de áreas com vegetação arbórea ou urbanas, que também apresentam comportamentos característicos, destacados nos harmônicos e no termo aditivo.

Utilizando as imagens de amplitude referente a componente anual da série temporal de EVI2 é possível delimitar os pixels que contém agricultura, podendo-se ainda associar essa imagem à variância da série, que é maior nos pixels de agricultura.

Espera-se futuramente aplicar esses resultados, utilizando ainda o ângulo de fase do harmônico referente a componente anual da série em metodologias de classificação que visem

a delimitação das áreas de cana-de-açúcar, levando em conta não só a resposta espectral da cultura, mas também seu comportamento no tempo.

Agradecimentos

A CAPES pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Abouali, M. Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS). Disponível em <<http://mabouali.wordpress.com/projects/harmonic-analysis-of-time-series-hants/>>. Acesso em ago. 2014.
- Arenas-Toledo, J. M. **Crop discrimination using harmonic analysis of EVI MODIS time-series data**. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008.
- Beyer, H. L. 2004. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS. Disponível em: <<http://www.spatial ecology.com/htools>> Acesso em: ago. 2014.
- Cabral, O. M. R.; Rocha, H. R.; Gash, J. H.; Ligo, M. A. V.; Tatsch, J. D.; Freitas, H. C.; Brasílio, E. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 5, p. 555-565, 2012.
- Governo do Estado de São Paulo. **Caracterização socioeconômica das regiões do Estado de São Paulo: Região Administrativa de Ribeirão Preto**. Disponível em: <http://www.planejamento.sp.gov.br/noti_anexo/files/uam/trabalhos/Ribeir%20C3%A3o%20Preto.pdf> Acesso em: 15 jan. 2013.
- Huete, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, v.34, n.2, p.101-114, 1996.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR). **Canasat - Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra**. 2013. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/index.html>> Acesso em: ago. 2014.
- Jakubauskas, M. E.; Legates, D. R.; Kastens, J. H. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 4, p. 461 - 470, 2001.
- Jensen, J. R. **Remote sensing of the environment: an Earth Resource perspective**. 2 ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2006. 608 p. (Prentice Hall series in geographic information science).
- Jiang, Z.; HUETE, A.R.; DIDAN, K. MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**. V.112, n.10, p.3833-3845, 2008.
- Lacruz, M. S. **Análise de séries temporais de dados MODIS como uma nova técnica para a caracterização de paisagem e análise de lacunas de conservação**. 129 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- Nascimento, C. R.; Zullo Junior, J. Utilização de Séries Temporais de Imagens AVHRR/NOAA no apoio à Estimativa Operacional da Produção da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 101-107. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1001.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2014.
- Rudorff, B. F. T.; Aguiar, D.A.; Silva, W.F.; Sugawara, L.M.; Adami, M.; Moreira, M.A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.
- Ruhoff, A. L.; Paz, A.R.; Collischonn, W.; Aragão, L.E.O.C.; Rocha, H.R., Malhi, Y.S. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 703-725, 12 mar. 2012.
- Vermote, E.F.; Vermeulen, A. **Algorithm technical background document –Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectance (MOD09)**. Maryland: University of Maryland, abr. 1999. 107p. (NAS5-96062)