

Representação de ciclos harmônicos de séries temporais de dados EVI/MODIS para análise do cultivo da cana-de-açúcar

João Francisco Gonçalves Antunes^{1,3}
Júlio César Dalla Mora Esquerdo¹
Rubens Augusto Camargo Lamparelli^{2,3}
Luiz Henrique Antunes Rodrigues³

¹ Embrapa Informática Agropecuária (Doutorando na Feagri/Unicamp)
Caixa Postal 6041 - 13083-886 - Campinas - SP, Brasil
{joao.antunes, julio.esquerdo}@embrapa.br

² Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético - Nipe/Unicamp
Cidade Universitária “Zeferino Vaz” - 13083-860 - Campinas - SP
rubens@nipeunicamp.org.br

³ Faculdade de Engenharia Agrícola - Feagri/Unicamp
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Campinas - SP, Brasil
lique@feagri.unicamp.br

Abstract. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data provide coverage of large areas and high periodicity. These characteristics are fundamental to analyze strategic agricultural crops in Brazil, such as sugarcane. The harmonic analysis can be used for the study of time-series of remote sensing data in order to evaluate the temporal behavior of vegetation indices. The visual representation of the harmonic amplitude and phase terms can assist the image interpretation process through a color combination. However, as the phase term is quantified on a circular scale, it is recommended to carry out a color transformation into the HLS (hue, lightness, saturation) space, as the hue component is inherently circular, which provides a smooth visual transition effect between the cycles. In this context, the objective of this study was to analyze of the sugarcane cultivation in São Paulo State using harmonic analysis applied to EVI (Enhanced Vegetation Index) time-series data throughout 10 cropping years, from October 2001 to September 2011, using the HLS representation of the harmonic terms. The results showed that the sugarcane cultivation in São Paulo State presented spatial patterns that match the vegetation development, which is consistent with the variability of the seasonal rainfall which affects the maximum EVI period. The HLS representation of harmonic terms has showed to be an effective tool for visual interpretation of vegetation cycles.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, harmonic analysis, sensoriamento remoto, processamento de imagens, análise harmônica.

1. Introdução

O setor agrícola brasileiro está sendo marcado por um novo ciclo no plantio da cana-de-açúcar. O Brasil é hoje o maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar do mundo, e o segundo maior produtor de etanol, gerando, anualmente, mais de dois bilhões de dólares para a balança comercial brasileira. A região Centro-Sul produz quase toda a cana-de-açúcar do país, em que o Estado de São Paulo é o maior produtor nacional, onde vários municípios têm grandes áreas de plantio e várias usinas instaladas (UNICA, 2012).

A cana-de-açúcar é uma poácea e tem como características um rápido crescimento, uma reprodução abundante e o aproveitamento econômico de toda a planta. Como pode ter vários ciclos de desenvolvimento é considerada uma cultura semiperene, permitindo cerca de cinco cortes para posteriormente ser feita a reforma do canavial (Scarpari e Beauclair, 2010).

O ciclo fenológico da cana-de-açúcar é composto pelas fases de brotação, perfilhamento, crescimento e maturação. Do plantio até o primeiro corte recebe o nome de cana-planta, cujo ciclo de desenvolvimento tem duração entre 12 a 18 meses, dependendo da época e da região de plantio. Após o primeiro corte, a rebrota da cana-de-açúcar passa a ter um ciclo de 12

meses, sendo denominada cana-soca. No Estado de São Paulo, predominantemente, o plantio da cana-de-açúcar ocorre entre os meses de janeiro a março e a colheita estende-se de abril a dezembro (Anjos e Figueiredo, 2010).

Os satélites ambientais vêm operando de forma sistemática nos últimos anos, provendo uma visão sinóptica e frequente de grandes áreas, a custos baixos. As imagens geradas pelos sensores orbitais a bordo desses satélites têm características que possibilitam o estudo e a análise do ciclo de desenvolvimento de culturas agrícolas.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo das plataformas orbitais do programa internacional EOS (*Earth Observing System*), liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), tem gerado dados processados para estudos globais da vegetação. O satélite Terra foi lançado em dezembro de 1999 e tem passagem pelo Equador às 10h30 (horário local), em órbita descendente (Soares et al., 2007).

Os dados MODIS, de moderada resolução espacial, alta repetitividade, boa qualidade radiométrica, alta precisão geométrica, com correção atmosférica e de distribuição gratuita, possuem características que proporcionam um grande potencial de aplicação no monitoramento da cultura da cana-de-açúcar (Xavier et al., 2006).

A análise harmônica vem sendo empregada no estudo de séries temporais de índices de vegetação para examinar as mudanças que acontecem na superfície terrestre, a fim de encontrar evidências de alterações no desenvolvimento da vegetação e revelar padrões da dinâmica temporal (Jakubauskas et al., 2001). Nesse sentido, pode ser utilizada para estudar o comportamento cíclico dos índices de vegetação, por meio da representação dos termos harmônicos num espaço de cores que facilite a interpretação visual das imagens.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar o cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, utilizando a análise harmônica aplicada em séries temporais de dados EVI/MODIS, do período de outubro de 2001 a setembro de 2011, por meio da representação dos termos harmônicos.

2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi realizado no Estado de São Paulo, tomando como base as áreas de cultivo da cana-de-açúcar nas regiões de Ribeirão Preto, São Carlos e Bauru, que são significativamente representativas das condições da cultura durante a safra.

As séries temporais de imagens MODIS do satélite Terra foram obtidas do “Banco de Produtos MODIS na Base Estadual Brasileira”, que é um repositório da Embrapa Informática Agropecuária desenvolvido para armazenar e disponibilizar aos usuários produtos prontos, em recortes por estados, na projeção geográfica e no formato GeoTIFF (Esquerdo et al., 2010).

O índice de vegetação utilizado nesse trabalho foi o EVI com o propósito de melhor representar a dinâmica da vegetação ao longo da série temporal de imagens. O EVI foi desenvolvido por Huete et al. (1994) para otimizar a resposta espectral da vegetação e melhorar a sensibilidade em regiões de maior fitomassa, propiciando o monitoramento da vegetação através da redução dos efeitos de substrato do dossel vegetal e de influências atmosféricas, calculado pela Equação (1):

$$EVI = G \times \left[\frac{(\rho_{IVP} - \rho_{VER})}{(\rho_{IVP} + C_1 \times \rho_{VER} - C_2 \times \rho_{AZU} + L)} \right] \quad (1)$$

onde,

ρ_{AZU} = fator de refletância na banda do azul (459 a 479 nm);

ρ_{VER} = fator de refletância na banda do vermelho (620 a 670 nm);

ρ_{IVP} = fator de refletância na banda do infravermelho próximo (841 a 876 nm);

$G = 2,59$: fator de ganho;

$L = 1$: fator de ajuste do substrato do dossel;

$C_1 = 6,0$ e $C_2 = 7,5$: coeficientes da resistência de aerossóis que utiliza a banda do azul para atenuar a influência dos aerossóis na banda do vermelho.

Para analisar as séries temporais de EVI foi utilizada a Transformada de Fourier que tem a finalidade de decompor uma função complexa, formada pela somatória de ondas senoidais e cossenoidais, onde cada onda é definida por um valor único de amplitude e fase, conforme ilustrado na **Figura 1**.

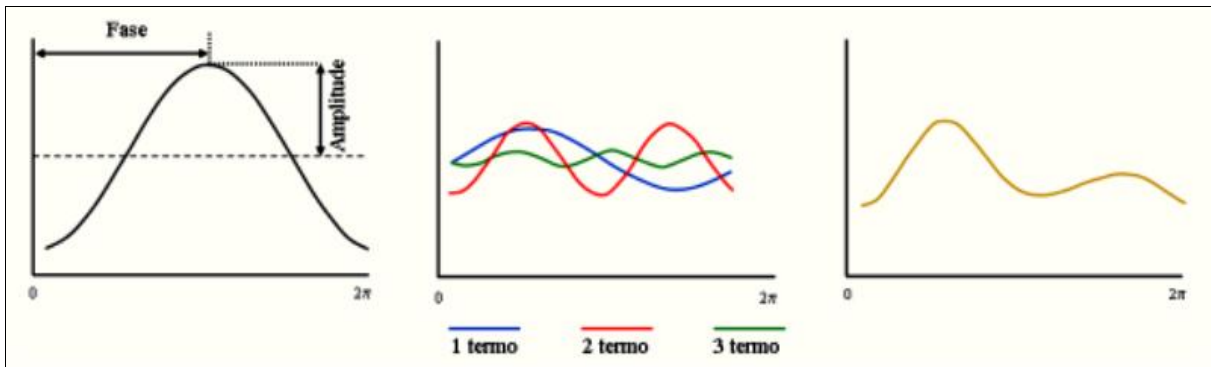


Figura 1: Representação dos termos harmônicos gerados pela Transformada de Fourier. Fonte: Pardi Lacruz (2006), adaptado de Jakubauskas et al. (2001).

A amplitude corresponde à metade do valor onde a função é maximizada e a fase é o deslocamento entre a origem e o pico da onda no intervalo de 0 até 2π . Cada harmônico (termo) representa o número de ciclos completados por uma onda num determinado intervalo de tempo e é responsável por um percentual da variância total da série temporal de dados original. Assim, o primeiro harmônico tem um período T igual ao período total em estudo, o segundo harmônico corresponde à metade do período do primeiro harmônico $T/2$, o terceiro harmônico a $T/3$ e assim sucessivamente (Pardi Lacruz, 2006).

Segundo Jakubauskas et al. (2001), uma série temporal de dados de N amostras pode ser representada pela Transformada de Fourier Discreta, conforme a Equação (2):

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

onde,

\bar{c} = média dos valores da série temporal;

c_j = amplitude do j -ésimo harmônico;

ϕ_j = ângulo de fase do j -ésimo harmônico.

A amplitude é calculada com a Equação (3):

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

onde, a_j e b_j são as componentes de cosseno e seno do vetor amplitude c_j e são obtidas pelas Equações (4) e (5), respectivamente:

$$a_j = \frac{2}{N} + \sum_{t=1}^N y_t \cos\left(\frac{2\pi t}{N}\right), \text{ para } t \geq 0. \quad (4)$$

$$b_j = \frac{2}{N} + \sum_{t=1}^N y_t \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{N} \right), \text{ para } t \geq 1. \quad (5)$$

O ângulo de fase é calculado pela Equação (6):

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

As imagens obtidas a partir da aplicação da Transformada de Fourier são geradas numa base por pixel para cada composição da série temporal. Na prática, significa decompor a variação anual do EVI em harmônicos que representem a média e as oscilações anuais, semestrais, quadrimestrais, etc., com o propósito de identificar alvos da superfície terrestre. A imagem harmônico zero (termo aditivo) corresponde à média do EVI e representa o vigor total para cada tipo de cobertura vegetal durante o período em estudo. As imagens amplitude indicam a variação máxima do EVI para todo o período. A fase indica o tempo, ao longo da série temporal, em que acontece o máximo valor de amplitude. O intervalo dos valores das imagens fase é de 0° a 360° e pode ser associado com os meses do ano.

O comportamento desses parâmetros em estudos de paisagens é indicativo do tipo de mudança que vem ocorrendo com o tempo. As mudanças sazonais somente na amplitude podem indicar variações no tipo de uso da terra ou nas condições da vegetação. As mudanças apenas de fase podem indicar variações no tempo de máximo vigor vegetativo. As mudanças na amplitude e na fase podem ser indicativos de significativas transformações na superfície terrestre relacionadas com a alteração do manejo do solo ou substituição da vegetação.

O processamento das séries temporais de EVI foi realizado por meio do pacote de software HANTS (*Harmonic Analysis of NDVI Time-Series*), desenvolvido originalmente por Roerink et al. (2000) e implementado em linguagem IDL (*Interactive Data Language*) por De Wit e Su (2005). O conceito básico do algoritmo é que o desenvolvimento da vegetação apresenta um forte efeito sazonal que pode ser simulado por funções senoidais de baixa frequência, com diferentes fases e amplitudes. As nuvens provocam alterações nas séries temporais e podem ser consideradas ruídos de altas frequências. O algoritmo HANTS analisa a série temporal original, identifica as áreas de baixas frequências referentes à vegetação e, a partir da Transformada de Fourier, elimina os valores discrepantes da série temporal que representam altas frequências.

A representação visual eficaz das imagens amplitude e fase dos termos harmônicos pode auxiliar na interpretação da paisagem por meio da combinação de cores. Porém, a fase é quantificada numa escala circular, o que torna difícil a interpretação de imagens no espaço de cores RGB, onde ocorre uma mudança abrupta da cor escura para a cor brilhante. Já no espaço de cores HLS, a componente matiz é inerentemente circular, proporcionando um efeito visual de transição suave do azul para o magenta e para o vermelho. Os outros parâmetros harmônicos são lineares e podem ser bem representados nas componentes luminosidade ou saturação (Hall-Beyer, 2007).

Com base nisso, para analisar a condição de crescimento da vegetação, em especial a informação de fase, a transformação HLS foi aplicada aos termos harmônicos obtidos com o

algoritmo HANTS, segundo o procedimento desenvolvido por Foley e Van Dam (1984), que está implementado no software ENVI (*The Environment for Visualizing Images*). Esse espaço de cores é formado por um duplo hexacone, conforme apresentado na **Figura 2**.

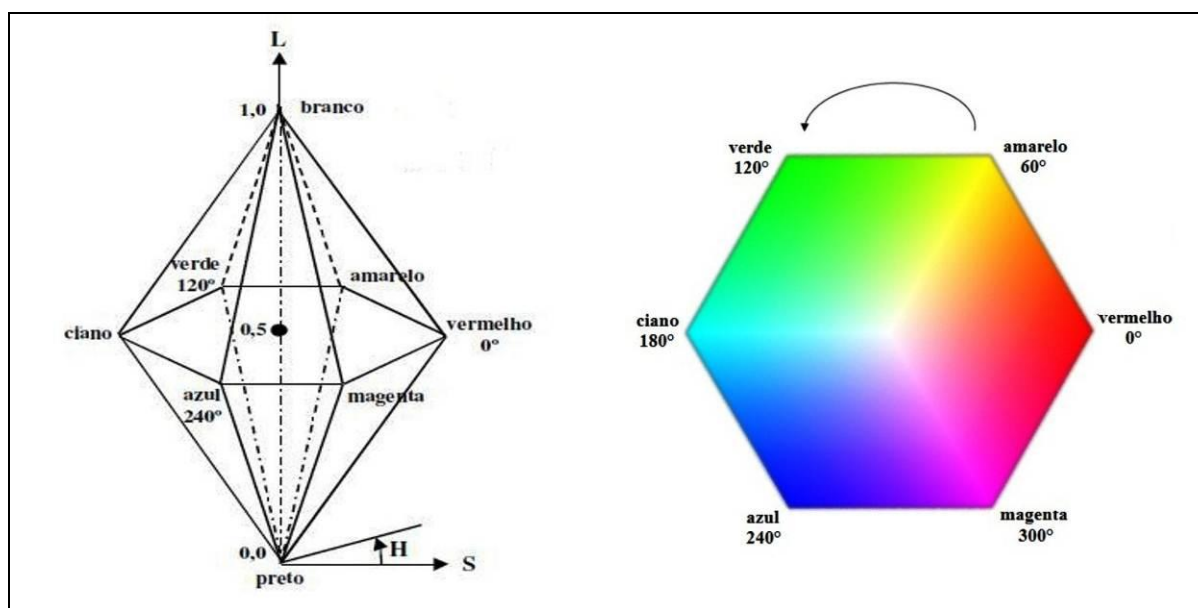


Figura 2: Espaço de cores HLS.

As cores primárias estão situadas no perímetro da base comum e as cores branca e preta no vértice de cada um dos cones. Os tons de cinza localizam-se sobre o eixo comum dos dois cones. Matiz (H) é o ângulo ao redor do eixo vertical do hexacone, percorrido no sentido anti-horário, com o vermelho em 0° , amarelo em 60° , verde em 120° , ciano em 180° , azul em 240° e magenta em 300° . Saturação (S) é medida radialmente a partir do eixo vertical, sendo 0 as cores brancas com os tons de cinza variando até 1 referente às cores puras. Luminosidade (L) pode variar entre 0 para preto até 1 para branco, com as cores puras apresentando uma luminosidade de 0,5.

Para fins de comparação visual foram utilizados os dados de precipitação acumulada do Estado de São Paulo calculada por interpolação de 195 estações pluviométricas do Agritempo (Sistema de Monitoramento Agrometeorológico) (Embrapa Informática Agropecuária e Cepagri/Unicamp, 2012).

3. Resultados e Discussão

As séries temporais das composições de 16 dias de EVI do Estado de São Paulo foram obtidas para os 10 anos. Para isso foi considerado o ano agrícola da cana-de-açúcar com início em outubro e término em setembro do próximo ano, que engloba, de forma geral, todo ciclo de desenvolvimento da cultura na área de estudo. Deste modo, as imagens foram obtidas do período de outubro de 2001 a setembro de 2011, sendo 23 composições para cada ano, totalizando 230 imagens.

As séries temporais de EVI foram processadas pelo HANTS para cada ano agrícola separadamente, de outubro de 2001 a setembro de 2011. Os dados estão no fator original de escala no intervalo de -2000 a 10000. A tolerância de ajuste entre a diferença dos valores da Transformada de Fourier e os valores originais de EVI foi definida em 1000.

Os termos harmônicos gerados foram a amplitude e a fase para as frequências 0, 1, 2 e 3 que correspondem a média do EVI de cada série temporal e aos ciclos de 1 ano, 6 meses e 4 meses, respectivamente. De forma geral, esses três harmônicos são suficientes para explicar a maioria da variância das séries temporais de imagens.

A transformação HLS foi utilizada para ilustrar o desenvolvimento da vegetação em cada ano agrícola. Para cada pixel, a fase do ciclo anual foi atribuída à componente matiz, a amplitude do ciclo anual à componente luminosidade e a média do ciclo anual do EVI à componente saturação. Na imagem resultante foi aplicada a equalização de histograma para realçar pequenas diferenças com o propósito de facilitar a interpretação visual. A **Figura 3** mostra a representação HLS do Estado de São Paulo para os 10 anos agrícolas, do período de outubro de 2001 a setembro de 2011.

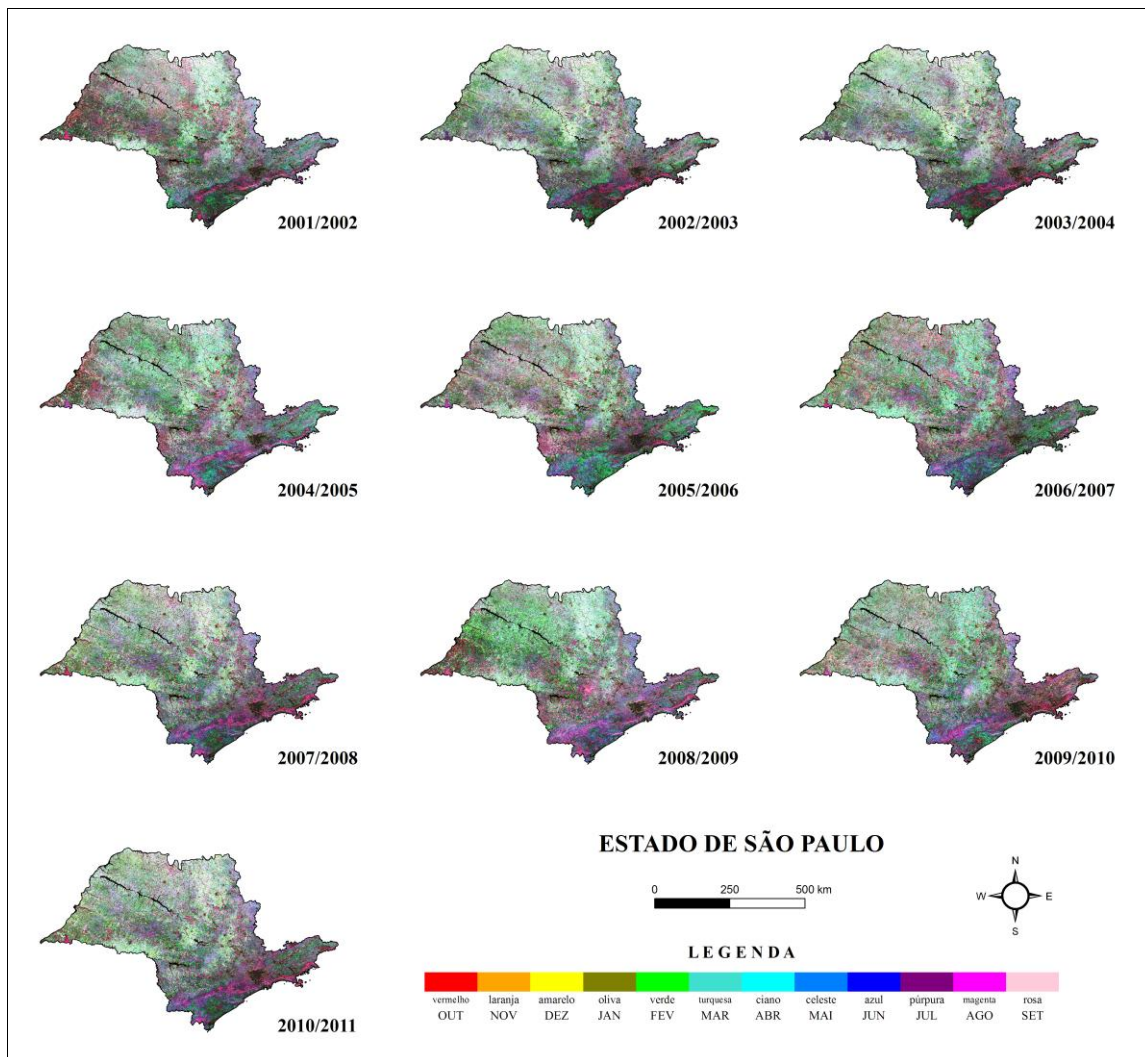


Figura 3: Representação HLS do Estado de São Paulo para os 10 anos agrícolas, do período de outubro de 2001 a setembro de 2011.

Para auxiliar na compreensão das representações HLS, a legenda de cores mostrada na **Figura 3** estabelece a correspondência com a ocorrência do pico vegetativo nos diferentes anos agrícolas, o que dá uma impressão rápida das mudanças nas regiões de cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

Neste tipo de representação HLS, uma intensidade incolor alta, de cinza claro a branco, refere-se a um EVI quase que constantemente elevado durante o ano, como em regiões agrícolas. As áreas de coloração mais clara possuem um forte efeito do ciclo anual. Como a matiz indica o tempo de máximo EVI, a ordem das cores vermelho - laranja - amarelo - oliva - verde - turquesa - ciano - celeste - azul - púrpura - magenta - rosa corresponde à temporização da fase nos meses de outubro - novembro - dezembro - janeiro - fevereiro - março - abril - maio - junho - julho - agosto - setembro, respectivamente.

A intensidade incolor brilhante próxima ao branco refere-se a um EVI constantemente elevado durante toda a série temporal que se manifesta em todos os harmônicos, como no entorno das regiões de Ribeirão Preto, São Carlos e Bauru, onde predomina o cultivo intenso da cana-de-açúcar, conforme pode ser visualizado na **Figura 3**.

A **Figura 4** apresenta os mapas de precipitação acumulada do Estado de São Paulo para os 10 anos agrícolas, do período de outubro de 2001 a setembro de 2011.

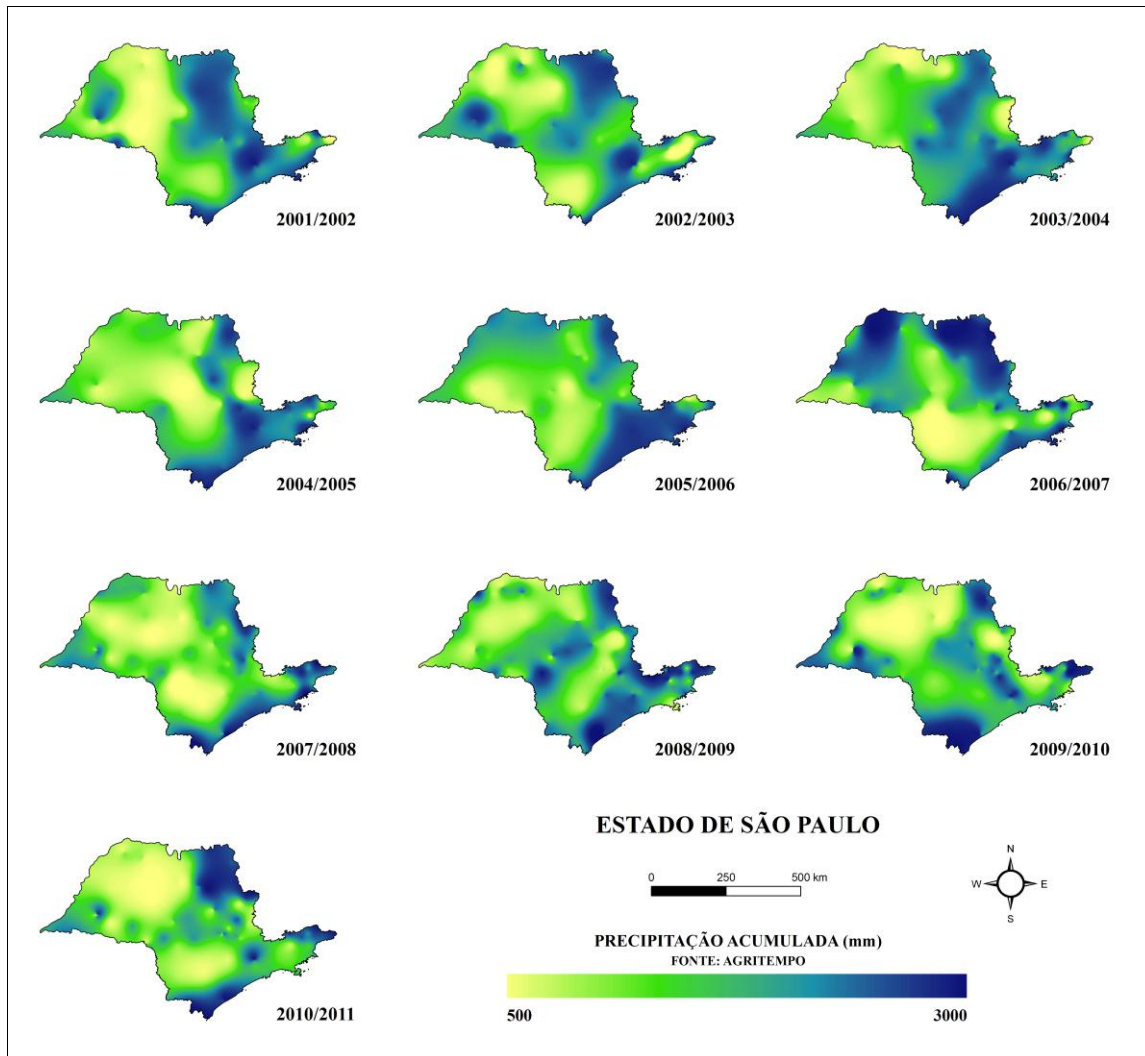


Figura 4: Mapas de precipitação acumulada do Estado de São Paulo para os 10 anos agrícolas, do período de outubro de 2001 a setembro de 2011.

Os anos agrícolas de 2003/2004, 2005/2006 e 2007/2008 foram de condições climáticas favoráveis à cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, em termos de quantidade de chuvas e distribuição ao longo dos meses (**Figura 4**). Por essa razão que nas representações HLS do Estado de São Paulo desses respectivos anos na **Figura 3**, pode-se observar áreas de cultivo da cana-de-açúcar em tons de cinza claro a branco, com pico vegetativo indo de abril a maio durante a fase de maturação.

Já nos anos agrícolas de 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011, a incidência das chuvas ocorreu durante o ano todo (**Figura 4**). Tal fato normalmente prejudica muito a qualidade da cana-de-açúcar e pode acarretar no atraso da colheita, talvez até ficando no campo de uma safra para a outra, o que é conhecida por cana “bisada”. Em função disso, nas representações HLS desses referidos anos na **Figura 3**, prevalecem os tons de verde, indicando que o máximo EVI foi adiantado para fevereiro.

4. Conclusões

Os resultados deste trabalho mostraram o potencial da análise harmônica no estudo do comportamento cíclico dos índices de vegetação, cujo entendimento é importante para evidenciar alterações no crescimento da vegetação e revelar padrões da dinâmica temporal.

A representação HLS dos termos harmônicos das séries temporais de EVI/MODIS indicou que o cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo possui padrões espaciais coerentes com o desenvolvimento da vegetação, consistente com a variabilidade das precipitações sazonais que afetam diretamente o momento de máximo EVI.

A representação HLS dos termos harmônicos mostrou ser uma ferramenta eficaz para a interpretação visual dos ciclos da vegetação, proporcionando um efeito de transição suave entre os ciclos.

Referências Bibliográficas

- Anjos, I. A. dos.; Figueiredo, P. A. M. de. **Aspectos fitotécnicos do plantio**. In: Cana-de-açúcar. - Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M. de; Landell, M. G. de A. (Eds.) Campinas: Instituto Agronômico, 1 edição, 882p., 2010.
- Embrapa Informática Agropecuária; Cepagri/Unicamp. **Agritempo**. Disponível em <<http://www.agritempo.gov.br/>>. Acesso em: 15. out. 2012.
- Esquerdo, J. C. D. M.; Antunes, J. F. G.; Andrade, J. C. de. **Desenvolvimento do banco de produtos MODIS na Base Estadual Brasileira**. (Comunicado Técnico, 100) - Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 7 p., 2010.
- Foley, J. D.; Van Dam, A. **Fundamentals of Interactive Computer graphics**. Addison-Wesley Publishing Company, 664 p., 1984.
- Hall-Beyer, M. IHS Co-representation of circular and non-circular variables using harmonic analysis parameters. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 5, p. 416-421, 2007.
- Huete, A.; Justice, C.; Liu, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994.
- 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.
- Pardi 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.
- Roerink, G. J.; Menenti, M.; Verhoef, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 9, p.1911-1917, 2000.
- Scarpari, M. S.; Beauclair, E. G. F. de. **Anatomia e botânica**. In: Cana-de-açúcar. - Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M. de; Landell, M. G. de A. (Eds.) Campinas: Instituto Agronômico, 1 edição, 882p., 2010.
- Soares, J. V.; Batista, G. T.; Shimabukuro, Y. E. **Sensor MODIS: Histórico e Descrição**. In: O Sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil - Shimabukuro, Y. E.; Rudorff, B. F. T.; Ceballos, J. C. (Coords). São José dos Campos: Editora Parêntese, SP, Brasil, 2007.
- União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA). **Setor Sucroenergético - Histórico**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/default.asp?cchCode={C2B8C535-736F-406B-BEB2-5D12B834EF59}>>>. Acesso em: 15. out. 2012.
- Xavier, A. C.; Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Berka, L. M. S. B.; Moreira, M. A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 55-768, 2006.