

## Utilização da análise harmônica em séries temporais de dados EVI e ET de áreas canavieiras

Sulimar Munira Caparoci Nogueira<sup>1</sup>  
Bruno Silva Oliveira<sup>1</sup>  
Maurício Alves Moreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Divisão de Sensoriamento Remoto  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil.  
{suli, bruno.so}@dsr.inpe.br  
mauricio.moreira@inpe.br

**Abstract.** The objective of the study was to describe seasonal phenological profiles by means of the vegetation index and investigate the seasonal evapotranspiration cycle of sugarcane areas in the municipality of Barretos, São Paulo, by applying harmonic analysis to time series of EVI and evapotranspiration from products of the MODIS/Terra sensor. We used a 2-year time series of EVI data (16 days) and ET data (8 days) for the years 2010 and 2011. The vegetation presents seasonal and periodic behaviour; the harmonic analysis expresses the periodic phenomenon in a series of sinusoidal and cosinusoidal functions described in amplitude and phase values, from which we can extract the variance of each term in the data set. In the sugarcane area that presents annual seasonality, the majority of the variance was captured by the second harmonic, with vegetative vigour between the months of January and April. The additive term, the amplitude and the phase angles enable us to identify, respectively, the areas of lesser and greater vigour, the periodicity of events, and the period of maximum vegetative vigour. The study demonstrated the utility of the analysis for detecting areas of change in the vegetation, such as reform and expansion of sugarcane areas, showing potential for monitoring and analyzing landscape changes, with reduction in the data volume of temporal data series.

**Palavras-chave:** harmonic analysis, EVI, evapotranspiration, análise harmônica, EVI, evapotranspiração

### 1. Introdução

A evapotranspiração (ET) pode ser definida como a quantidade de água evaporada pelo solo e transpirada pela vegetação durante determinado período (BERNARDO et al., 2008). Segundo os autores, o processo de ET depende principalmente da quantidade de energia solar recebida, das estações do ano e do clima, além disso, está intimamente relacionada com a planta e varia com a extensão de área coberta pela vegetação. A ET relaciona-se de maneira direta com as características fenológicas e vigor da vegetação expressas pelos índices de vegetação (IVs). Os IVs podem ser aplicados para construir perfis sazonal e temporal das atividades da vegetação. Em culturas agrícolas é possível avaliar as características sazonais e fenológicas, duração do período de crescimento e senescência das culturas (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

A análise harmônica tem sido utilizada quando os ciclos sazonais e intrasazonais podem ser realçados e oferece a análise de variação sazonal e interanual na condição da superfície da terra a partir da série temporal de dados de sensoriamento remoto (JAKUBAUSKAS et al., 2002). Neste contexto, o trabalho tem o objetivo de caracterizar os perfis sazonais de fenologia das áreas canavieiras. Além disso, dada a importância da ET no ciclo hidrológico e manutenção das culturas agrícolas, o estudo teve também como objetivo investigar o ciclo sazonal da ET das áreas canavieiras no município de Barretos - SP, a partir da aplicação de análise harmônica em série temporal de EVI e ET produtos do sensor MODIS, para os anos de 2010 e 2011.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1 Área de estudo

Esta pesquisa foi realizada no município de Barretos – SP. Com uma área de 1.566,2 km<sup>2</sup> (IBGE, 2014), a área de estudo está localizada entre as coordenadas geográficas 48°53'39" O, 20°44'24" S e 48°20'50" O, 20°17'39" S (Figura 1).

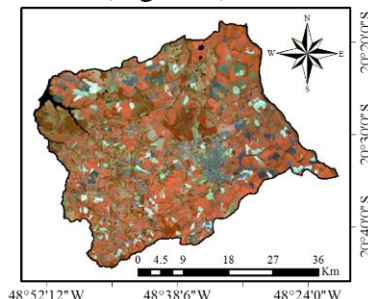


Figura 1. Localização do município de Barretos no Estado de São Paulo

Segundo a classificação climática de Koeppen, o clima é do tipo Aw, clima tropical com estação seca, é caracterizado por temperatura anual média de 24,3°C e pluviosidade anual média de 1.018 mm, com período chuvoso de novembro a janeiro (CEPAGRI, 2015). A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo.

### 2.2 Dados Utilizados

#### 2.2.1 Cobertura vegetal

Os mapas temáticos da distribuição espacial das lavouras de cana-de-açúcar foram gerados pelo Programa de Monitoramento da Cana de Açúcar (Canasat/INPE) e o mapa de cobertura da terra para o ano de 2010 foi obtido no site da Secretaria do Meio Ambiente (SMA) do Governo do Estado de São Paulo em formato *shapefile* (Figura 2).

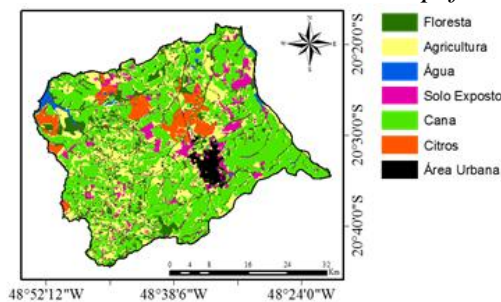


Figura 2. Mapa temático de uso e cobertura de terra.

#### 2.2.2 Dados de Sensoriamento Remoto

Os valores de EVI foram obtidos do produto MOD13Q1 e os valores de ET do produto MOD16A2. O produto MOD13Q1 apresenta-se em mosaico de 16 dias com resolução espacial de 250 m. Já o MOD16A2 apresenta resolução espacial de 1000 m (1 km) e composição de 8 dias (MU et al., 2007). O Índice de Vegetação Realçado (EVI) consiste no melhoramento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (HUETE et al., 2002). Em comparação ao NDVI, o EVI apresenta maior sensibilidade a alta biomassa, minimizando o efeito de fundo e reduzindo a influência atmosférica. O EVI contém um fator de ajuste para solos e coeficientes que descrevem o uso da banda azul para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis (JENSEN, 2011). A equação para o cálculo do EVI é descrita em (1).

$$EVI = G \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1 * \rho_{red} + C_2 * \rho_{blue} + L} (1 + L) \quad (1)$$

em que:  $\rho_{\text{blue}}$ = reflectância para o azul,  $\rho_{\text{red}}$ = reflectância no vermelho,  $\rho_{\text{nir}}$  = reflectância no infravermelho próximo e as constantes  $G=2,5$ ,  $L=1$ ,  $C_1=6$  e  $C_2=7,5$ .

Os dados MOD16A2 contém valores de ET potencial e ET real, fluxos de calor latente potencial e real (MU et al., 2007). O algoritmo utiliza dados do sensor MODIS (Terra e Aqua) para estimar a evapotranspiração (real e potencial) de superfície em escala global com base na equação de Penman-Monteith, adaptada para a inserção de dados de sensoriamento remoto (RUHOFF, 2011).

### 2.3 Análise Harmônica

A análise harmônica permite que uma função complexa seja expressa como o somatório de termos senoidais e cossenoidais, em que cada termo é definido por um valor único de amplitude e ângulo de fase (DAVIS, 1986). De acordo com Wilks (1995) e Jakubauskas et al. (2001), uma dada série temporal de dados de N amostras, pode ser representada por uma função harmônica (Equação 2):

$$f(t) = c_0 + \sum_{j=1}^{N/2} c_j * \cos\left(\frac{2\pi jt}{N} - \phi_j\right) \quad (2)$$

em que:  $c_0$ : representa a média dos valores da série de dados;  $c_j$ : representa a amplitude do j-ésimo harmônico e  $\phi_j$ : representa o "ângulo de fase" do j-ésimo harmônico.

Segundo Lacruz e Souza (2007), cada harmônico representa o número de ciclos completados por uma onda num determinado intervalo, desse modo o primeiro harmônico (harmônico fundamental) tem um período T igual ao período total analisado, enquanto o segundo harmônico tem um período que corresponde à metade do período do primeiro harmônico (T/2) e assim sucessivamente. O valor da amplitude é metade da altura de uma onda e o ângulo de fase define o afastamento entre a origem e o pico da onda ao longo do intervalo 0-2 $\pi$ , ou seja, 0-360° (JAKUBAUSKAS et al., 2001). A amplitude ( $c_j$ ) é estimada por meio da Equação 3:

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

em que  $a_j$  e  $b_j$  são as componentes do vetor amplitude ( $c_j$ ) e são obtidas por:

$$a_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N f(t) * \cos\left(\frac{2\pi t}{N}\right) \quad e \quad b_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N f(t) * \sin\left(\frac{2\pi t}{N}\right) \quad (4)$$

Segundo Jakubauskas et al. (2001), valores elevados de amplitude para um determinado termo, indicam um elevado nível de variação no índice de vegetação e o termo no qual a variação ocorre indica a periodicidade do evento. Desse modo, altos valores de amplitude no primeiro termo indicam um padrão temporal unimodal, enquanto altos valores de amplitude no segundo termo indicam picos bimodais. Dado que uma série temporal, é a soma de múltiplas ondas sinusoidais, a variância de uma série temporal é a soma das variâncias dos termos individuais (DAVIS, 1986). O ângulo de fase ( $\phi_j$ ) é dado pela Equação (5) e a contribuição de cada harmônico (j) na variância total da série de dados é dada pela Equação (6).

$$\phi_j = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{b_j}{a_j}; & a_j > 0 \\ \tan^{-1} \frac{b_j}{a_j} \pm \pi \text{ ou } \pm 180^\circ; & a_j < 0 \\ \frac{\pi}{2} \text{ ou } 90^\circ; & a_j = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$var = \frac{c_j^2}{2s^2} \quad (6)$$

em que,  $s^2$  é a variância populacional.

### 2.3.1 Algoritmo de análise harmônica (HANTS)

O algoritmo HANTS (*Harmonic Analysis of NDVI Time-Series*) de análise harmônica implementado em MATLAB por Abouali (2011) foi aplicado para o processamento das séries temporais utilizadas neste estudo. Partindo do pressuposto que o índice de vegetação (IV) apresenta efeito sazonal em função da variabilidade fenológica da cultura, o algoritmo HANTS simula o efeito sazonal por funções senoidais de baixa frequência, com diferentes amplitudes e fases (ANTUNES e ESQUERDO, 2009). Ao final do processo foram obtidos valores da variância total da série temporal, termo aditivo, ângulos de fase e amplitude para cada termo até o 6º harmônico.

### 2.3.2 Seleção de pixels puros

A partir do mapa de classificação das áreas agrícolas, foi gerada uma máscara de cultivo com tamanho de pixels compatível com as imagens MODIS para seleção de dados em pixels puros, ou seja, com 100% de ocupação com a cultura de interesse. Posteriormente, foram extraídos valores de EVI e ET da série original e valores de termo aditivo, amplitude, fase e porcentagem de variância total para cada tipo de cobertura de terra de interesse.

## 3. Resultados e Discussão

Foram geradas imagens amplitude, fase e variância total provenientes da aplicação da análise harmônica sobre imagens índice vegetativo EVI e evapotranspiração (ET). Além disso, foram geradas as imagens termo aditivo (Figuras 4 e 6, Tabela 1).

As Figuras 4 e 6 apresentam os mapas dos resultados da Análise Harmônica (termo aditivo, 4 primeiros harmônicos e variância total) para a série temporal de imagens de EVI e ET do município de Barretos-SP, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros dos quatro harmônicos gerados sobre imagens EVI para áreas canavieiras

| Análise Harmônica de dados EVI                  |           |        |       |            |
|---|-----------|--------|-------|------------|
| Termo   | Amplitude | Fase   | % Var | Var. Acum. |
| 0   | 0.36      | 0.00   | 0.00  | 0.00       |
| 1   | 0.04      | 144.17 | 6.54  | 6.54       |
| 2   | 0.14      | 66.17  | 79.34 | 85.88      |
| 3   | 0.03      | 172.83 | 3.36  | 89.25      |
| 4   | 0.04      | 180.22 | 6.51  | 95.76      |
| Análise Harmônica de dados de Evapotranspiração |           |        |       |            |
| Termo   | Amplitude | Fase   | % Var | Var. Acum. |
| 0   | 16.4      | 0.0    | 0.0   | 0.0        |
| 1   | 2.0       | 172.2  | 2.3   | 2.3        |
| 2   | 12.7      | 51.5   | 92.3  | 94.6       |
| 3   | 1.9       | 108.1  | 1.9   | 96.5       |
| 4   | 1.8       | 99.1   | 1.8   | 98.4       |

### 3.1 Interpretação da Análise Harmônica de dados EVI

Ao analisar os resultados da análise harmônica observou-se que a cana-de-açúcar apresentou perfil anual, com um valor de amplitude elevada no segundo termo (0,14) e valores baixos de amplitude nos outros termos. A maior parte da variação (79,34%) está contida no segundo termo harmônico (Tabela 1).

Na Figura 3 observa-se que o índice de vegetação EVI foi sensível as diferentes fases do ciclo fenológico da cultura, pois apresentou o comportamento esperado, ou seja, valores mais baixos no início e no final do ciclo, consequência do menor índice de área foliar e senescência das folhas, respectivamente. É possível verificar ainda que os valores máximos do EVI ocorreram entre os meses de janeiro e abril (Figura 4) coincidindo com a época em que a maioria das lavouras estava no período de máxima expansão foliar e consequentemente, máxima intensidade fotossintética, demonstrando a sensibilidade do índice ao incremento da biomassa. Observa-se uma diminuição de valores máximos de EVI entre o primeiro e segundo ano de estudo, esse efeito pode ser decorrente da idade da planta, com diminuição de produtividade.

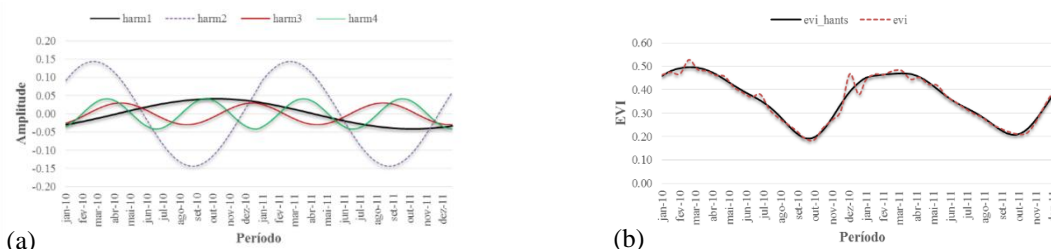


Figura 3. Análise harmônica da Cana – de – açúcar: (a) Curva dos primeiros 4 harmônicos; (b) Perfil temporal do EVI/MODIS de cana-de-açúcar e perfil temporal da série suavizada utilizando Hants.

Valores elevados de termo aditivo foram observados em culturas de citros, cana e floresta, estes valores representam alto vigor vegetativo no período de estudo. Valores baixos manifestaram-se em áreas de baixa sazonalidade, como áreas urbanas, água e solo exposto (Figura 4).

Na primeira componente ( $A_1$ ) temos a representação dos fenômenos com oscilações a cada 24 meses (Período Fundamental -  $T = 24$  meses). As coberturas com pouca ou nenhuma variação a cada 24 meses possuem baixos valores de amplitude nesta componente. Neste caso, foram realçadas somente áreas de mudança de uso e cobertura, referentes à reforma e expansão do canavial, essas áreas apresentaram valores de amplitude mais elevados (coloração amarela e avermelhada, Figura 4).

Na segunda componente ( $A_2$ ) foram representados os fenômenos com sazonalidade anual. Áreas agrícolas com variação anual apresentam amplitudes elevadas no segundo harmônico, como verificado em áreas de cana-de-açúcar e citros (tons amarelados e avermelhados). Áreas com pouca variação sazonal aparecem com baixos valores de amplitude, como área urbana e água (tons azulados, Figura 4).

A terceira ( $A_3$ ) e quarta ( $A_4$ ) componentes harmônicas representam áreas de sazonalidade com periodicidade de 8 meses e 6 meses, respectivamente. Nesse caso, as áreas de cana-de-açúcar, citros e floresta apresentam baixa amplitude em ambos os harmônicos.

A fase indica a época do ano em que o valor de pico para um termo harmônico ocorre. Verifica-se que para ciclos anuais representados pelo segundo harmônico, os valores de fase do segundo harmônico indicam que o período do vigor ocorreu entre os meses de janeiro e abril (zonas azuladas, Figura 4).

Nas áreas canavieiras há alta variabilidade do termo aditivo ( $A_0$ ) que varia entre 0,22 e 0,48, ressalta-se que na área de estudo, há presença de cana-de-açúcar plantada em diferentes datas, o que resultou em áreas de plantio em diferentes estádios de desenvolvimento. Em



função de características próprias do cultivo, tipo de solo, manejo e adubação, o aumento do índice de área foliar e consequentemente, a variação do índice de vegetação não ocorre na mesma intensidade para os vários talhões (EIPHANIO; FORMAGGIO, 1991).

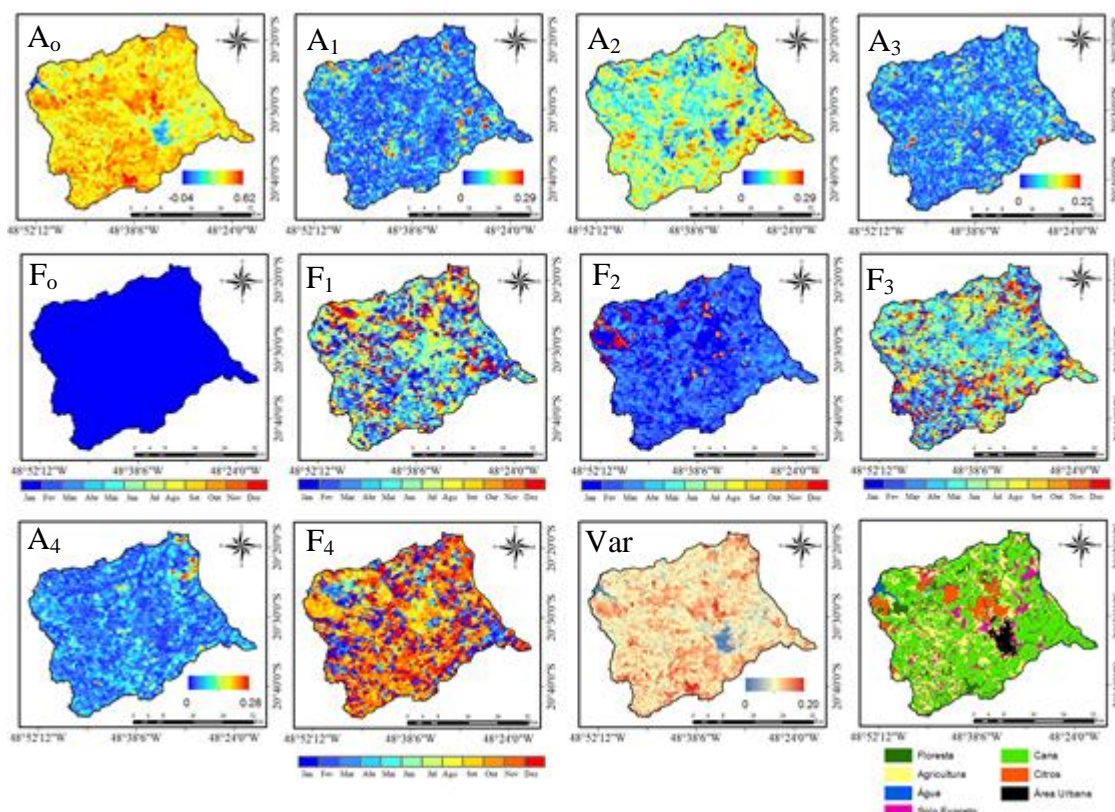


Figura 4. Mapas do termo aditivo ( $A_0$ ), amplitudes ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$ ), ângulos de fase ( $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_4$ ), variância total (Var) da série de EVI da superfície e mapa temático.

### 3.2 Interpretação da Análise Harmônica de dados de Evapotranspiração

Na Figura 5 verifica-se que o comportamento da evapotranspiração segue o padrão anual do índice de vegetação apresentado na Figura 3. São verificados altos valores de amplitude no segundo termo e a maioria da variância (cerca de 92%) é representada pelo segundo harmônico (Tabela 1).

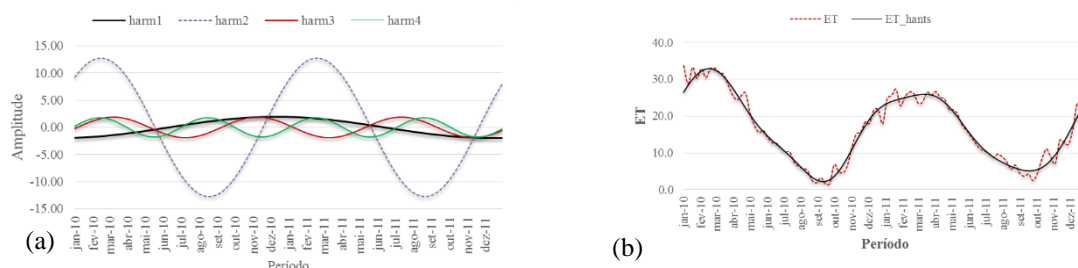


Figura 5. Análise harmônica da Cana – de – açúcar: (a) Curva dos primeiros 4 harmônicos; (b) Perfil temporal do ET/MODIS de cana-de-açúcar e perfil temporal da série suavizada utilizando Hants.

O termo aditivo é a média aritmética de ET sobre a série temporal (92 imagens ET/MODIS). Áreas florestadas apresentaram altos valores durante o período analisado (avermelhado, Figura 6). Culturas citrícolas possuem evapotranspiração elevada, com valores intermediários entre áreas de floresta e canaveira.

Os maiores valores de amplitude do segundo termo ocorreram em áreas de plantio de cana (azul claro), enquanto áreas citrícolas apareceram em tons amarelados e floresta em tons avermelhados. Para os uso e cobertura de terra com perfil anual da evapotranspiração o pico ocorreu entre os meses de janeiro e março, apresentando coloração azulada (Figura 6).

O harmônico de segunda ordem possui a maior parte da variabilidade temporal da evapotranspiração, expressando sazonalidade anual, com amplitude de 12,7. A fase indicou uma ET máxima da cana-de-açúcar em fevereiro, com variação entre os meses de janeiro e abril (Figura 6).

Assim como ocorreu com o índice de vegetação a evapotranspiração real obtida dos dados MODIS foi sensível às variações fenológicas da cultura. No início do crescimento há menor consumo de água pelas plantas; a demanda cresce com o desenvolvimento da cultura, até atingir um máximo, posteriormente, com a diminuição da área foliar da cultura há menor evapotranspiração.

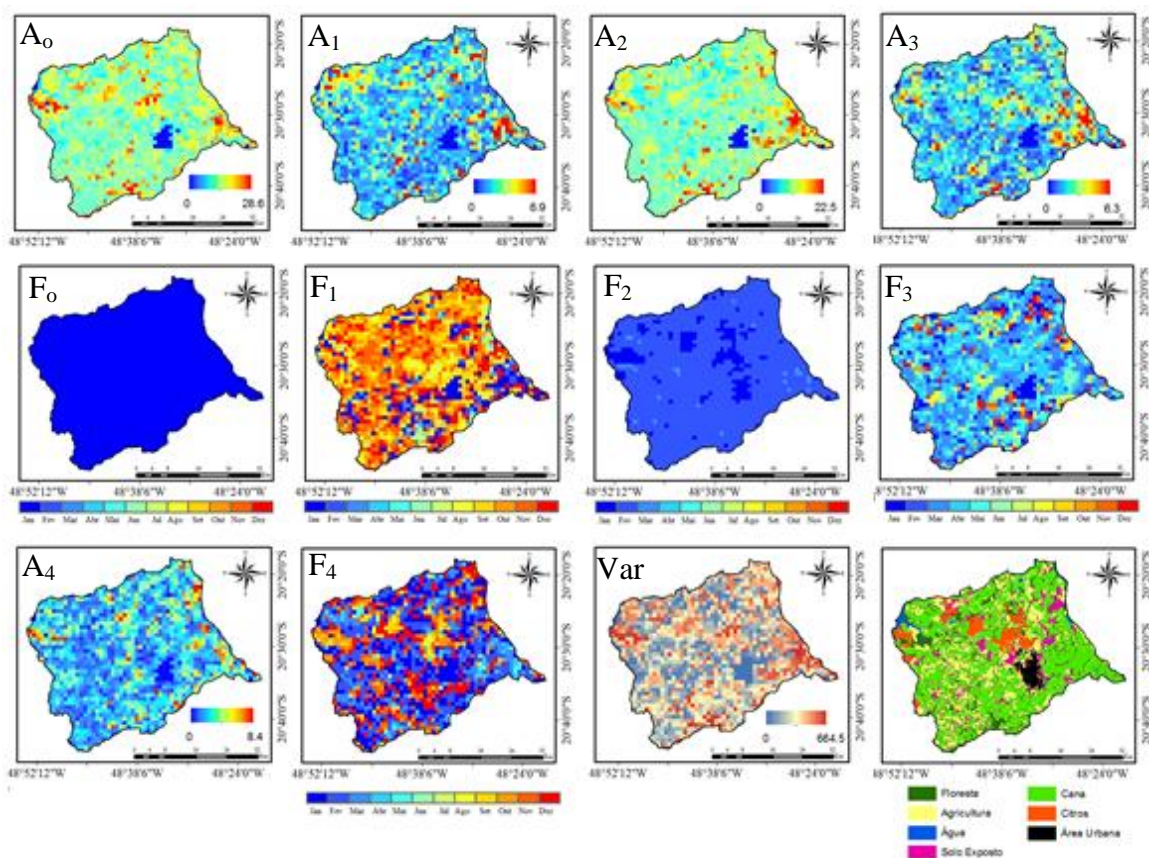


Figura 6. Mapas do termo aditivo ( $A_0$ ), amplitudes ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$ ), ângulos de fase ( $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_4$ ), variância total (Var) da série de ET da superfície e mapa temático.

#### 4. Conclusão

A partir do estudo pode-se concluir que:

- A análise harmônica mostrou-se eficiente na detecção da variabilidade sazonal de mudança fenológica da vegetação ao longo do crescimento;
- A análise também foi útil na detecção de áreas de mudança da vegetação, como reforma e expansão de áreas canavieiras;
- O termo aditivo caracterizou áreas de maior e menor vigor vegetativo, os valores de amplitude descreveram a periodicidade dos eventos estudados, enquanto os ângulos de fase permitiram identificar o período de máximo vigor das culturas em campo.

O estudo demonstra o potencial da análise harmônica na caracterização de comportamento sazonal e evidenciou as alterações no ciclo fenológico da vegetação ao longo do tempo, tanto em relação ao que é expresso pelos índices de vegetação quanto sua influência sobre a evapotranspiração. Além disso, evidencia o potencial no monitoramento e análise de mudanças da paisagem, com redução do volume de dados de séries de dados temporais.

### Referências Bibliográficas

- Abouali, M. **Harmonic Analysis of Time Series (HANTS)**. 2011. Disponível em <<http://mabouali.wordpress.com/projects/harmonic-analysis-of-time-series-hants/>>. Acesso em ago. 2015.
- Antunes, J.F.G.; Esquerdo J.C.D.M. Monitoramento agrícola usando análise harmônica de séries temporais de dados NDVI/AVHRR-NOAA. In. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal, RN. **Anais...** Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.15.51.23/doc/49-55.pdf>. Acesso em: ago. 2015.
- Bernardo, S.; Soares, A.A.; Mantovani, E.C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625 p.
- Centro de pesquisas meteorológicas e climáticas aplicadas a agricultura (CEPAGRI). **Climas dos municípios paulistas**. 2015. Disponível em: <http://www.cepagri.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>. Acesso em: 20 jul. 2015.
- Davis, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. New York: J. Wiley and Sons, 1986. 646 p.
- Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R. **Sensoriamento Remoto de Três Parâmetros Agronômicos de Trigo e Feijão**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, V.26, n.10, p.1615-1624, 1991.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p. 195-213, 2002.
- Instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE). **Cidades**. 2014. Disponível em: [/http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=350550&search=sao-paulo|barretos](http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=350550&search=sao-paulo|barretos). Acessado em 20 jul. 2015.
- Jakubauskas, M.E.; Legates, D. R.; Kastens, J. H. Harmonic Analysis of Time-Series AVHRR NDVI Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 67, n. 4, p 461 - 470, 2001.
- Jakubauskas, M.E.; Legates, D.R.; Kastens, J.H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 37, p. 127-139, 2002.
- Jensen, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2011, 604 p.
- Lacruz, M.S.P.; Sousa, M.A. Uso de séries temporais EVI/MODIS e análise harmônica para o estudo da bacia do rio Taquari. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59, 2007.
- Mu, Q.; Heinsch, F. A.; Zhao, M.; Running, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, p. 519-536, 2007.
- Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, p. 127, 2010.
- Ruhoff, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. 162p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- Wilks, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction**. San Diego, California: Academic Press, 1995. 467 p.