

Artigo

Análise de Espectro Singular e Wavelet sobre Série Temporal de Profundidade Ótica de Aerossóis no Pantanal do Brasil

Rafael da Silva Palácios¹, João Basso Marques¹, Magdiel Josias do Prado¹, Carlo Ralph De Musis^{1,2}, Fernando da Silva Sallo¹, Luciana Sanches³, Sérgio Roberto de Paulo¹, José de Souza Nogueira¹

¹*Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.*

²*Universidade de Cuiabá, Cuiabá, MT, Brasil.*

³*Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.*

Recebido: 8/9/2015 - Aceito: 15/12/2015

Resumo

As variações das propriedades óticas dos aerossóis podem interferir nos processos de transferência de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre. A AOD (*Aerosol Optical Depth*) é a variável mais usada para este propósito, a qual possibilita obtenção das principais tendências e periodicidades das variações. Este trabalho objetivou verificar a habilidade das técnicas SSA (Singular Spectrum Analysis) e Wavelet em descrever as flutuações, e respectivas periodicidades, presentes em uma série temporal de 12 anos (2003-2014) de AOD na faixa do espectro de 550 nm (AOD 550 nm) sobre a região do Pantanal brasileiro. Os dados de AOD 550 nm foram adquiridos dos produtos do sensor MODIS, a bordo dos satélites TERRA e AQUA, e foram submetidos a análise de SSA, permitindo a descrição das principais periodicidades da AOD 550 nm, além de constatar dois períodos dominantes, 1 e 0,5 ano, tendo pequenas variações. A Wavelet de Morlet inferiu as periodicidades estatisticamente significativas, entre as quais também foram detectadas periodicidades anual e semestral. Ambas as técnicas reproduziram as principais oscilações dos valores da AOD 550 nm, bem como a gradativa redução dos valores de AOD 550 nm a partir de 2011. A Wavelet possibilitou a interpretação e visualização das principais periodicidades ao longo do tempo, sendo possível verificar em quais instantes as periodicidades ocorreram.

Palavras-chave: MODIS, valores singulares, queima de biomassa, Profundidade Ótica de Aerossóis.

Singular Spectrum Analysis and Wavelet about Time Series Aerosol Optical Depth in Pantanal of the Brazil

Abstract

Variations of the optical properties of aerosols can interfere in the energy transfer processes between the atmosphere and the Earth's surface. Aerosol Optical Depth (AOD) has been most used variable to investigate such variations, which enabling the achievement of main trends and periodicities from AOD time series. This study aimed to verify the sensitivity of Singular Spectrum Analysis (SSA) and Wavelet techniques on a time series of 12 years (2003-2014) AOD at wavelengths 550 nm (AOD 550 nm) over the Brazilian Pantanal region. AOD 550 nm data set were acquired from MODIS sensor and were subjected by SSA, allowing description of the main frequencies of the AOD 550 nm and of two dominant periods of 1 and 0.5 year. From Morlet Wavelet model were inferred major statistically significant periodicity, among which were also detected an annual and a biannual frequencies. Both techniques explained the main variations of the values of AOD 550 nm on the area of study, moreover, detected a gradual reduction in AOD 550 nm values from 2011. The Wavelet analysis allowed the interpretation and visualization of the main periodicities over time, being possible to identify at what instant such periodicities series occurred.

Keywords: MODIS, singular values, burning biomass, Aerosol Optical Depth.

1. Introdução

As variações espaço-temporais das propriedades óticas dos aerossóis tais como espalhamento e absorção alteram significativamente os processos de transferência de energia entre o sistema superfície-atmosfera (Artaxo *et al.*, 2006; Wright *et al.*, 2010; Kumar, 2014; Kumar *et al.*, 2014; Murthy *et al.*, 2014). A profundidade ótica do aerossol (AOD, do inglês *Aerosol Optical Depth*) representa a quantidade de aerossóis na coluna atmosférica associada a atenuação da radiação solar em comprimentos de ondas específicos. Por isso, a AOD é uma variável relevante na análise dos efeitos dos aerossóis sobre os fluxos radiativos entre a atmosfera e a superfície (Balakrishnaiah *et al.*, 2011; Murthy *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014).

A variação temporal da AOD tem sido monitorada por fotômetros solares instalados em áreas representativas do globo terrestre pela AERONET (*Aerosol Robotic Network*) (Holben *et al.*, 1998; Smirnov *et al.*, 2000). Entretanto, a cobertura dessa rede não contempla vários pontos estratégicos do globo, como o Pantanal brasileiro, uma das maiores áreas alagáveis contínuas do planeta, resultado de uma zona úmida sazonalmente inundada cuja área é de aproximadamente 160.000 km², dos quais 140.000 km² pertencem aos estados brasileiros de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (Sanches *et al.*, 2010; Mesquita *et al.*, 2013).

O bioma Pantanal brasileiro, assim como toda a região central do Brasil, é fortemente influenciado por aerossóis de queimadas na estação seca (Sena *et al.*, 2013), o que impacta os fluxos de superfície e altera a dinâmica do regime hídrico local por meio da evapotranspiração (Murthy *et al.*, 2014). Devido as deficiências na instrumentação *in situ* para as mensurações das propriedades óticas dos aerossóis em regiões como o Pantanal, o sensoriamento remoto por satélites mostra-se como uma importante ferramenta para a estimativa e recuperação de medidas de aerossóis (Alam *et al.*, 2010; Alam *et al.*, 2011).

Entre os diversos sensores orbitais, o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) tem se destacado em estudos de aerossóis atmosféricos (Remer *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2010). As propriedades óticas dos aerossóis estimados pelos produtos MODIS, utilizando-se de sete canais espectrais (0,47-2,1 μm) presentes no sensor, possibilitam monitorar as características espaciais e temporais, inclusive a longo prazo, dos aerossóis na escala global, tanto sobre o continente (Kaufman *et al.*, 1997), quanto sobre o oceano (Tanré *et al.*, 1997).

As técnicas de análises de séries temporais podem fornecer informações precisas sobre as principais tendências e oscilações da variável em estudo (Ghil *et al.*, 2002), o método de defasagem temporal, embora recente, apresenta-se como uma robusta ferramenta para análises de séries de dados de longo prazo (Elsner e Tsonis, 1996). A técnica de Análise de Espectro Singular (SSA, do inglês *Singular Spectrum Analysis*) consiste na decomposição espectral de

uma matriz, gerada pela aplicação da defasagem da variável por ela mesma no tempo, da qual são extraídos um conjunto de autovalores, que possibilitam avaliar as principais periodicidades da série em questão (Ghil *et al.*, 2002). O formalismo matemático e o desenvolvimento da SSA é descrito por Elsner e Tsonis (1996).

Já as transformadas de Wavelet fornecem uma representação precisa de um sinal em função do tempo e frequência simultaneamente, seja ele estacionário ou não, contínuo ou descontínuo (FURON *et al.*, 2008).

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi verificar a habilidade das técnicas de SSA e Wavelet em decompor e reproduzir as flutuações e periodicidades de uma série temporal de 12 anos de AOD para o espectro de 550 nm sobre a região do Pantanal brasileiro. A hipótese levantada nesse trabalho é que ambas técnicas sejam hábeis a descrever as variações da AOD 550 nm para a área de estudo. A verificação de tais habilidades abordadas nesse estudo, é realizada pensando em possíveis aplicações em modelagem da distribuição temporal da AOD, assim como sua influência sobre os fluxos de radiação sobre a área de estudo.

2. Material e Métodos

2.1. Área em estudo

A área em estudo encontra-se localizada no centro do continente Sul Americano, no Centro-Oeste do Brasil (Fig. 1), cujas coordenadas abrangem: -16°0'00" a -20°0'00" S e -55°30'00" a -57°30'00" W.

O clima da região é do tipo Aw conforme classificação climática de Köppen, com uma estação seca (junho a novembro) e uma estação chuvosa (dezembro a maio) (Sanches *et al.*, 2014). Entretanto, o período crítico para seca fica concentrado em cinco meses, de maio a setembro (Biudes *et al.*, 2015). A precipitação média anual é aproximadamente 1400 mm, com registros máximos em janeiro e mínimos em julho (Sanches *et al.*, 2014).

2.2. Aerossóis estimado pelo produto MODIS

Nesse trabalho foram adquiridos os dados de AOD 550 nm da coleção C005 (versão 5.1) de nível 3 do MODIS, produto MOD08_D3.051, dados diários de 2003 a 2014, o produto foi adquirido e processado através do aplicativo Giovanni (<http://disc.sci.gsfc.gov/giovanni/>). O aplicativo Giovanni (versão 3) é uma ferramenta projetada para a visualização e análise de dados ambientais globais. Os produtos de profundidade ótica de aerossóis MODIS possuem uma resolução espacial de 1° x 1°.

O algoritmo do MODIS para aerossóis sobre o continente é baseado na técnica de 'alvos escuros', baseia-se na detecção de superfícies escuras (Kaufman *et al.*, 1997). A técnica faz o uso de três relações empíricas: (I) o efeito dos aerossóis na radiação solar decresce com o comprimento de onda em uma lei de potências de primeiro e segundo grau; (II) o efeito radiativo líquido sobre superfícies escuras in-

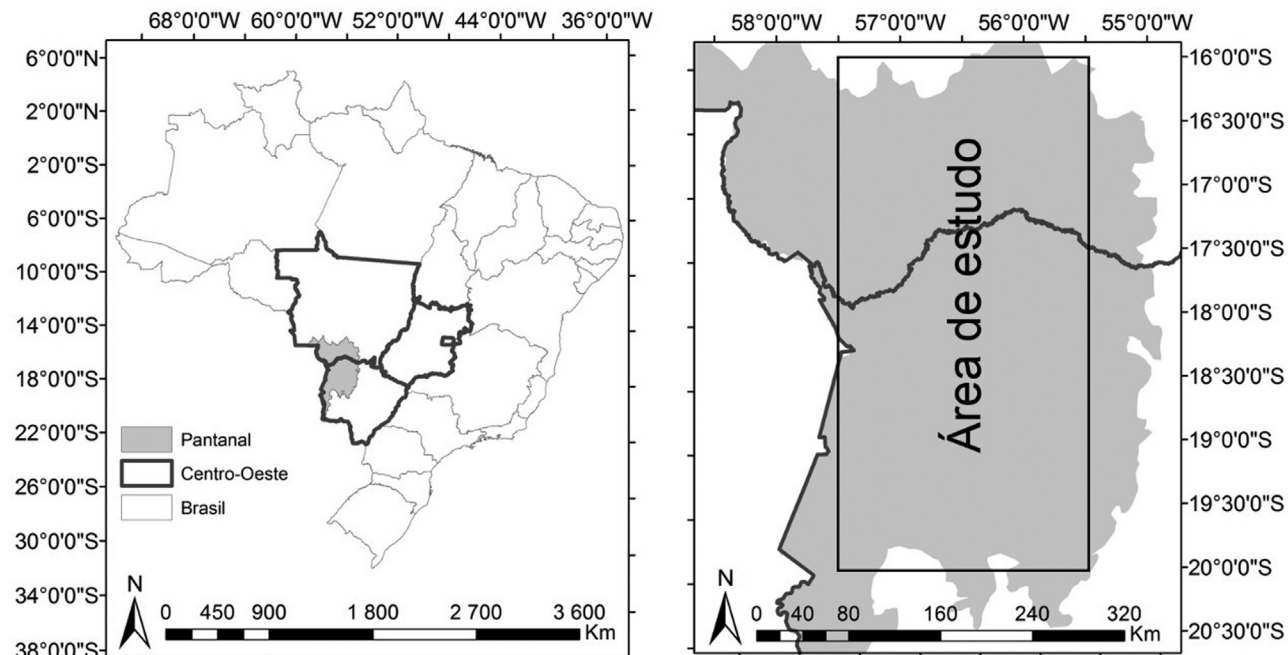


Figura 1 - Localização do Pantanal brasileiro e da área em estudo, no detalhe o recorte do Pantanal brasileiro de onde foram obtidas as estimativas da AOD 550 nm.

dica que o espalhamento da radiação é predominantemente; e (III) a refletância de superfície, entre as distintas faixas do espectro solar, apresenta graus de correlação.

O método de detecção dos aerossóis é baseado nos resultados empíricos. Para tanto, primeiramente determinam-se os pixels escuros da imagem no canal do infravermelho (2,1 μm), pela correlação existente entre o canal infravermelho e o visível. Assim, estima-se a refletância da superfície nos canais azul (0,47 μm) e vermelho (0,66 μm) (Kaufmam *et al.*, 1997; Artaxo *et al.*, 2006). Desta forma determinam-se os tipos de aerossóis a partir de informações de sua distribuição média global e por meio das refletâncias do aerossol dos canais do vermelho e azul (Artaxo *et al.*, 2006).

2.3. Análise de espectro singular

A série temporal de AOD 550 nm passou por dois estágios complementares, o primeiro decompôs a série original, enquanto o segundo a reconstruiu (Ghil *et al.*, 2002; Destro *et al.*, 2012). No primeiro estágio foram realizados dois procedimentos, o primeiro inseriu a série em um espaço vetorial enquanto o segundo procedimento fez sua decomposição em valores singulares. Já no segundo estágio foi realizada a análise dos autovetores representativos e a reconstrução da série em função dos componentes principais gerados por esses autovetores (Ghil *et al.*, 2002).

Foi considerado a série temporal de AOD 550 nm com o tamanho N . A matriz de correlação para o conjunto defasado é dada por C_{ij} de forma que:

$$C_{ij} = \frac{1}{N - |i - j|} \sum_{t=1}^{N - |i - j|} X(t)X(t + N - |i - j|) \quad (1)$$

Em que, a dimensão da matriz é dada por $M \times M$, com $M = 400$ neste trabalho, de forma que o valor de N foi 4383.

Na matriz C_{ij} todos os elementos da diagonal, onde $i + j = \text{constante}$, são iguais, desta forma os autovalores (autovalores e autovetores) foram obtidos por:

$$C_{ij} \rho_k = \lambda_k \rho_k \quad (2)$$

Em que, C_{ij} representa a matriz de correlação para os vetores defasados, ρ_k e λ_k são respectivamente os autovetores e autovalores para essa matriz, cujas dimensões são dadas por:

$$L \{ X_i \}_{i=1}^K \quad (3)$$

Em que, L corresponde a 10% de N .

$$K = N - L + 1 \quad (4)$$

Após o primeiro estágio (desconstrução da série), foi analisada a classificação de ordem decrescente dos autovalores, classificando-os por ordem decrescente, estipulando assim quais seriam os devidos autovetores associados que representariam a série em sua reconstrução. Desta forma foram obtidas as componentes principais representativas das principais periodicidades da série.

$$A_k(t) = \sum_{j=1}^L X(t + j - 1) \rho_k(j) \quad (5)$$

Em que, $A_k(t)$ representa as componentes principais escritas em função dos autovetores escolhidos para representar a série. Por fim, a série é reconstruída em função de $A_k(t)$, sendo essa dada por:

$$R_k(t) = \frac{1}{M_t} \sum_{k=L}^{L_t} \sum_{j=L_t}^{U_t} A_k(t-j+1) p_k(j) \quad (6)$$

De forma que sejam satisfeitas as seguintes condições para o fator de normalização M_t e para os limites superiores e inferiores U_t e L_t (Ghil e Vautard, 1991), onde tais condições corrigem efeitos de bordas para as defasagens de dados próximo ao início ou fim da série de dados.

$$(M_t, L_t, U_t) = \left\{ \begin{array}{ll} (\frac{1}{t}, 1, t), & 1 \leq t \leq L-1, \\ (\frac{1}{L}, 1, L), & L \leq t \leq K, \\ (\frac{1}{N-t+1}, t-N+L, L), & K+1 \leq t \leq N, \end{array} \right\} \quad (7)$$

Os componentes utilizados na reconstrução têm a propriedade de captar a fase da série temporal, de forma que $X(t)$ e $R_k(t)$ possam ser sobrepostas na mesma escala de tempo, ou seja, $1 \leq t \leq N$ (Ghil *et al.*, 2002).

2.4. Análise de Wavelet de Morlet

As transformadas de Wavelets, ou ondaletas, são transformações aplicadas em uma série de dados que permitem que as janelas móveis, de uma função aplicada, consigam capturar sinais de baixa e alta frequência (Vilani e Sanches, 2013). Essas janelas, formadas a partir de uma função wavelet específica, dilatam-se e contraem-se no espaço ou no tempo para registrar todas as oscilações contidas na série (Goulart *et al.*, 2015).

As transformadas de wavelet permitem a decomposição de um sinal em diferentes componentes de frequências que podem ser analisadas separadamente permitindo uma melhor compreensão de fenômeno em questão. A transformada de wavelet contínua é dada por:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (8)$$

Onde os parâmetros a e b representam a mudança de escala e translação, respectivamente, sobre a série temporal. O produto entre a wavelet mãe (mother wavelet) com as funções denominadas wavelets filhas mede o grau de correlação entre o sinal $f(t)$ e suas filhas.

Nesse trabalho foi utilizada a Wavelet de Morlet, como wavelet filha, essa função pertence à família de wavelets complexas não ortogonais (Vilani e Sanches, 2013; Goulart *et al.*, 2015):

$$\psi(t) = \pi^{-0.25} e^{i w_0 t} e^{-\frac{1}{2} t^2} \quad (9)$$

Em que, $\psi(t)$ representa o valor Wavelet para um parâmetro não-adimensional, w_0 representa a frequência (fornece o número de oscilações dentro da própria wavelet, maior ou igual a 5) e t representa o período ou escala temporal de

análise (adimensional). Conforme Torrence e Compo (1998), Silva *et al.* (2010), Vilani e Sanches (2013) e Goulart *et al.* (2015), adota-se $w_0 = 6$ para satisfazer a condição de admissibilidade, para esse valor, os erros devidos as médias não iguais a zero são menores que os erros típicos de arredondamento. O algoritmo aplicado foi desenvolvido por C. Torrence, disponível em <http://paos.colorado.edu/research/wavelets>, e cujo código é executável no software Matlab. Os valores diários da AOD 550 nm foram convertidos em médias mensais para aplicação das transformadas de wavelets. Para caracterização do comportamento geral da série, a wavelet também foi aplicada sobre a média anual para todo o período de estudo, obtendo-se assim as principais periodicidades de um ano característico.

3. Resultados e Discussão

3.1. Resultados da análise de espectro singular

A série original da AOD 550 nm apresentada na Fig. 2, evidencia o comportamento sazonal ao longo dos anos, com máximos valores ocorrendo em setembro de cada ano, no período de seca nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil (Sena *et al.*, 2013) e mínimos no período chuvoso.

A sazonalidade dos valores de AOD 550 nm está diretamente relacionada com os registros de queimadas que ocorrem na estação seca em toda região central do Brasil (Sena *et al.*, 2013; Palácios *et al.*, 2014; Palácios *et al.*, 2015).

Após a aplicação das Eqs. (1) e (2), a obtenção da ordem decrescente dos valores singulares (Fig. 3) sugere que o valor singular 1 é consideravelmente maior que os demais, sendo que o primeiro autovalor e seu respectivo autovetor representam a tendência geral da série, enquanto que os autovalores 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 representam as

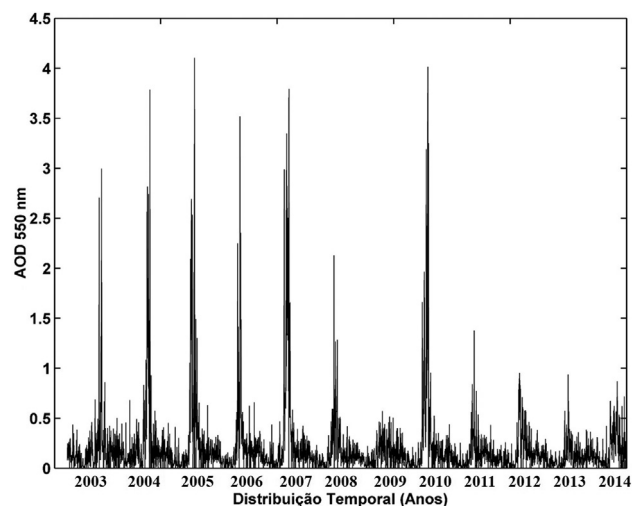


Figura 2 - Distribuição temporal da AOD 550 nm, a série é disposta em função dos anos, desde 01 de janeiro de 2003 a 31 de dezembro de 2014, totalizando 4383 dias.

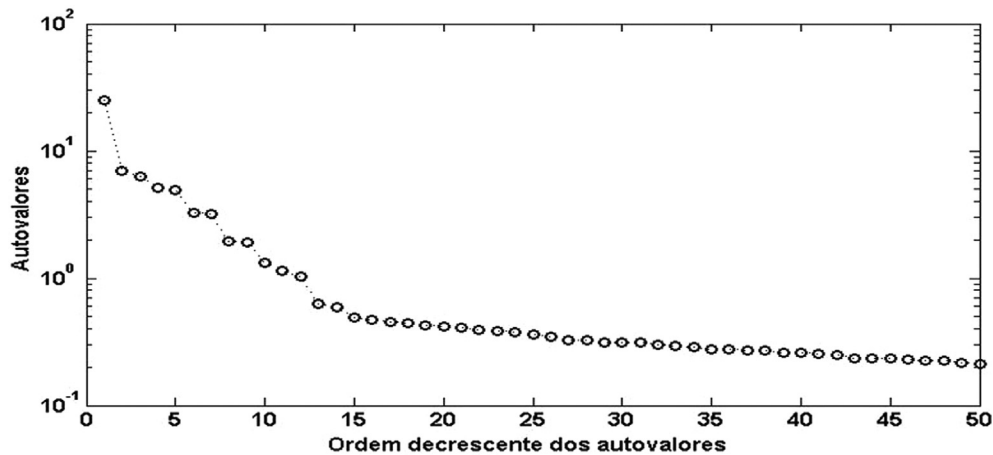


Figura 3 - Organização decrescente dos autovalores, representação dos 50 primeiros autovalores mais elevados do total de 400 calculados.

principais oscilações dentro da série (Ghil *et al.*, 2002; Destro *et al.*, 2012).

Foi verificado que, do total de 400 autovalores calculados, os 50 primeiros explicam 74.96% dos dados originais. Utilizando os nove primeiros autovalores a série reconstruída explicou 58.88% dos dados originais. Tal fato é justificado pelas pequenas formas de oscilações na distribuição temporal da AOD, de forma que a técnica de SSA possui perceptível dificuldades em lidar com a amplitude de tais oscilações. Entretanto, os 58.88% explicados evidenciam claramente os padrões sazonais, assim como as flutuações entre o atraso ou antecedência das estações seca na área de estudo.

A partir do nono autovetor, a redução gradativa dos valores singulares se estabiliza por volta do autovalor 15 (Fig. 3). Considerando a análise da série temporal empregada, observou-se que os comportamentos de outras variáveis submetidas a mesma análise foram semelhantes.

O comportamento geral ou tendência da série é dada pelo primeiro valor singular, enquanto os demais representam as principais periodicidades da série, concordando com os resultados obtidos por Ghil *et al.* (2002), analisando o Índice de Oscilação Sul (SOI, *Southern Oscillation Index*), e o trabalho de Destro *et al.* (2012), analisando a vazão média mensal no rio Cuiabá no estado de Mato Grosso.

De acordo com os nove primeiros valores singulares, foram calculadas (Eq. (5)) as nove componentes principais para a série temporal da AOD 550 nm, entre as quais a componente principal 1 (PC - 1) que representa a tendência geral da série (Fig. 4).

A tendência geral da série sugere uma redução nos valores da AOD 550 nm no período de estudo (Fig. 4). Na tendência geral houve uma redução na amplitude de oscilação por volta do dia 2400, que corresponde justamente ao ano 2009, que foi um ano atípico em que praticamente não houve seca na região de estudo, diminuindo consideravel-

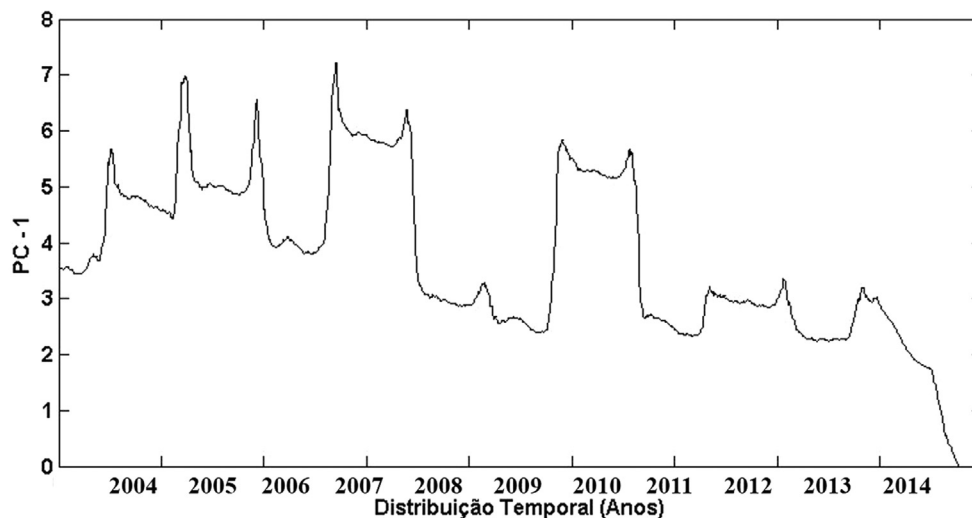


Figura 4 - Distribuição temporal da primeira componente principal (PC-1), representando a tendência geral da série ao longo do período estudado.

mente os registros de focos de queimadas em todo o Brasil (Palácios *et al.*, 2015). Já a partir do dia 2500, no ano 2010, a amplitude de oscilação volta a subir, pois 2010 também foi um período atípico com extrema seca e altos índices para os focos de queimadas em todo o Brasil, elevando consideravelmente os valores de AOD (Sena *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2014).

As componentes principais 2 e 3 (PC - 2, PC - 3) representam de forma conjunta o principal modo de oscilação da série AOD 550 nm (Fig. 5). As amplitudes das componentes PC - 2 e PC - 3 também apresentaram uma acentuada redução por volta do dia 2000 e se mantiveram por um certo intervalo, o que corresponde aos anos 2008 e 2009, anos com baixos registros de focos de queimadas e baixos valores de AOD para as proximidades da região de estudo (SENA *et al.*, 2013; Palácios *et al.*, 2015).

Embora os registros de queimadas sobre a região do Pantanal brasileiro sejam extremamente baixos, quando comparados aos registros de suas vizinhanças (Savana ou localmente conhecido como 'Cerrado'), as movimentações atmosféricas na estação seca tornam a região central do Brasil um local de alta subsidência de ar (Longo *et al.*, 1999), o que pode contribuir para as elevações da AOD 550 nm na estação seca sobre o Pantanal devido as contribuições de massas de ar vindas do norte e do leste da área de estudo (Vieira-Filho *et al.*, 2013).

Os períodos de oscilações da PC - 2 e PC - 3 evidenciam uma periodicidade com pouco menos de 400 dias, ou seja, uma periodicidade anual para a AOD 550 nm (Figs. 5a e 5b), concordando com os resultados obtidos no trabalho

de Destro *et al.* (2012), em que duas componentes principais sugerem uma forma conjunta da frequência dominante dentro da série. O período de oscilação de um ano para os valores de AOD 550 nm sobre a região do Pantanal do Brasil é coerente uma vez que essa variável possui forte sazonalidade na região central do Brasil (Sena *et al.*, 2013).

Já as oscilações da PC - 4 e PC - 5 evidenciam períodos menores que 300 dias, ou seja, menores que um ano (Figs. 5c e 5d). Assim como as componentes 2 e 3 sugerem uma representação conjunta para uma periodicidade da série, as componentes 4 e 5 também evidenciam uma associação que representa um período característico da série de AOD 550 nm.

As duas primeiras frequências dominantes encontradas na série temporal sugerem uma pequena variação na ocorrência dos máximos para os valores de AOD 550 nm, com períodos menores ou maiores que um ano. Esse fato também pode ser analisado em função dos períodos de seca para a região central do Brasil, pois as variações do início da estação seca impactam na quantidade de registros de focos de queimadas, que por sua vez interferem no período de tempo no qual os valores de AOD atingem seus máximos. Os valores máximos da AOD são atingidos, em todos os anos, em setembro, entretanto observa-se que há registros de anos em que os máximos se estenderam ao mês de outubro, como foi o caso de 2004, 2005, 2007 e 2010.

As componentes PC - 6 e PC - 7 representam outra periodicidade da série, com cerca de 200 dias (aproximadamente 6 meses) (Figs. 6a e 6b), o que também está de acordo com as variações sazonais da série de AOD 550 nm,

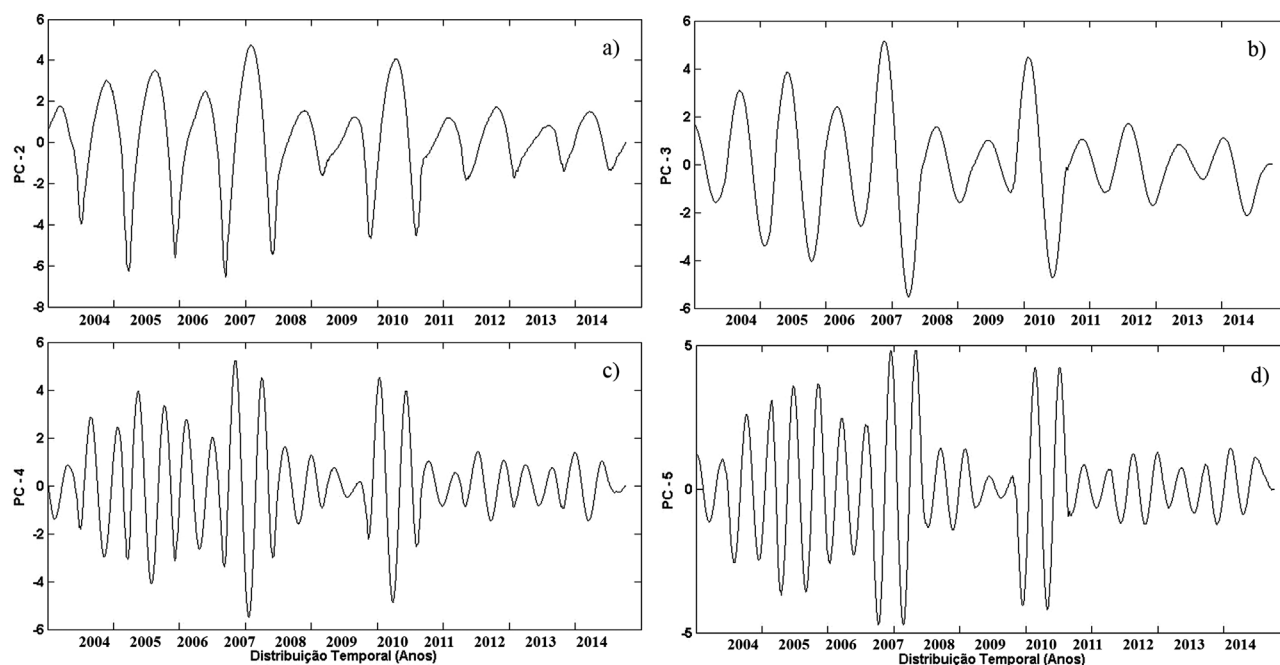


Figura 5 - a) Representação da segunda componente principal com periodicidade de aproximadamente 400 dias, b) terceira componente principal, também apresenta um período de aproximadamente 400 dias, c) quarta componente principal, período de aproximadamente 300 dias, d) quinta componente principal, também apresenta um período de oscilação de aproximadamente 300 dias.

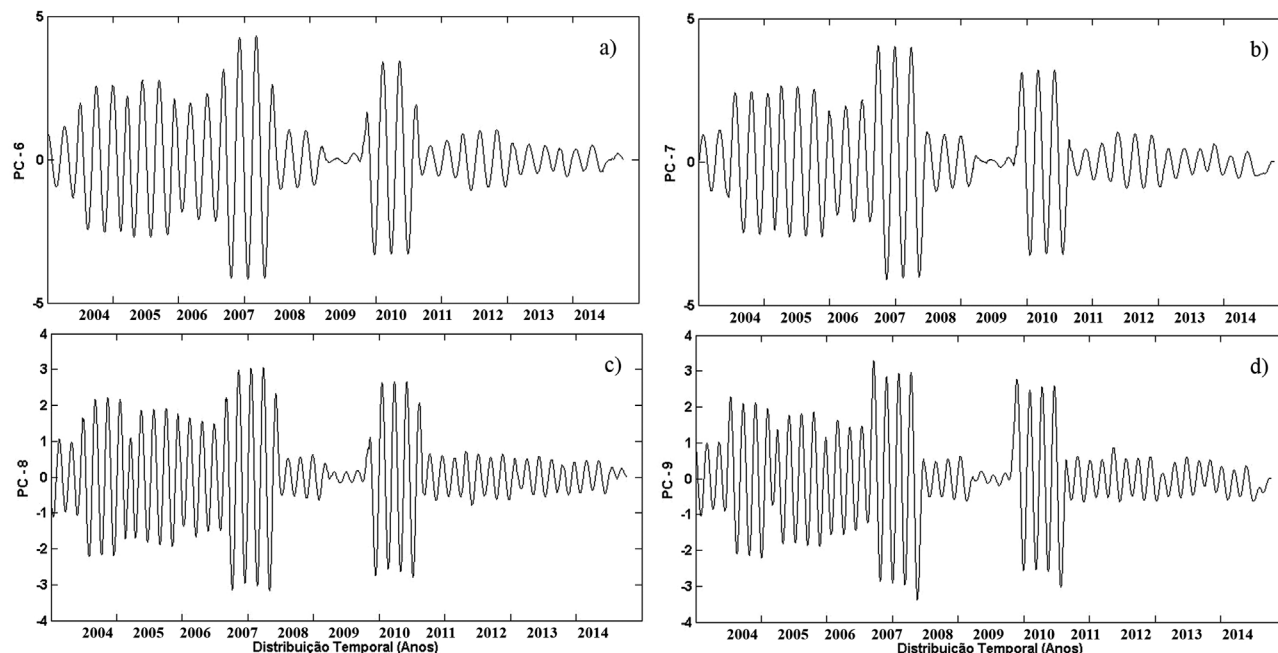


Figura 6 - Distribuição temporal da: a) sexta componente principal (PC-6), com período de aproximadamente 200 dias, b) sétima componente principal (PC-7), também apresenta um período de oscilação de aproximadamente 200 dias, c) oitava componente principal (PC-8), período um pouco menor que 200 dias, d) nona componente principal (PC-9), também apresenta um período de oscilação um pouco menor que 200 dias.

período que corresponde a toda estação seca para a área de estudo (Sanches *et al.*, 2014; Biudes *et al.*, 2015). O intervalo de aproximadamente 6 meses representa todo o período considerado como estação seca na área de estudo, desta forma a distribuição temporal da AOD 550 nm, que é influenciada diretamente pela estação seca, também apresenta essa periodicidade. A mesma variação encontrada entre as duas primeiras frequências da série também é aplicada aos períodos formados pelas PC - 6 e PC - 7 com as PC - 8 e PC - 9, já que foi encontrado para as componentes PC - 8 e PC - 9 um período de um pouco menos de 200 dias.

A comparação entre a série original da AOD 550 nm e sua reconstrução, a partir da análise dos valores singulares e componentes principais associados (Fig. 7), evidencia que as principais periodicidades analisadas nesse trabalho jun-

tamente com a tendência geral da série descrita pela primeira componente principal representam as principais oscilações temporais da AOD 550 nm sobre a região de estudo.

Os resíduos encontrados ao longo da série (Fig. 7) também atingem seus valores máximos para o período de máximo nos valores da AOD 550 nm, justamente devido ao fato das frequências analisadas nesse trabalho não conseguirem reproduzir as amplitudes dos eventos ocorridos na série original. Devido a suavização na série reconstruída, que conforme descrito acima explicou 58.88% da série original, a variância encontrada foi consideravelmente menor que a variância da série original. A variância para a série original foi de 0.12 enquanto que para a série reconstruída foi de 0.05.

A série reconstruída da AOD 550 nm, embora não modele as amplitudes da série original, explica claramente as periodicidades reais da série assim como sua variação ao longo dos anos (Fig. 7). A série reconstruída reproduz os baixos valores atingidos nos anos de 2008 e 2009, assim como descreve os máximos atingidos em 2010 seguidos de uma redução gradativa até 2014 (Palácios *et al.*, 2015).

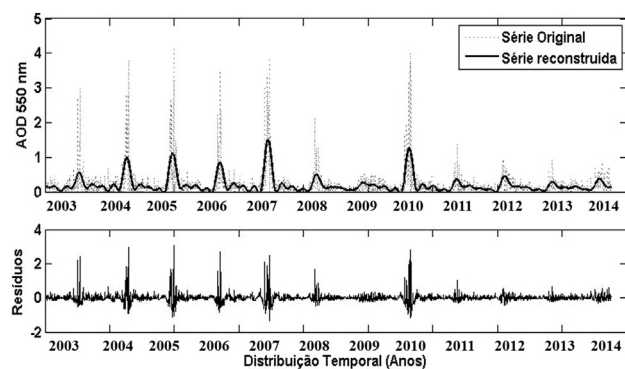


Figura 7 - Distribuição temporal das séries original e reconstruída para os valores de AOD 550 nm sobre o Pantanal brasileiro, na parte inferior da figura é apresentada a distribuição dos resíduos.

3.2. Resultados da Wavelet de Morlet

A aplicação da wavelet de Morlet sobre as médias mensais representa as principais periodicidades da série da AOD 550 nm (Fig. 8). A alta intensidade de energia do final do ano 2004 ao final do ano de 2007 (mês 20 ao mês 60) evidenciou uma periodicidade de 1 ano (variação entre 10 e 14 meses), ou seja, durante esse intervalo de tempo o comportamento da AOD 550 nm foi bem definido com um

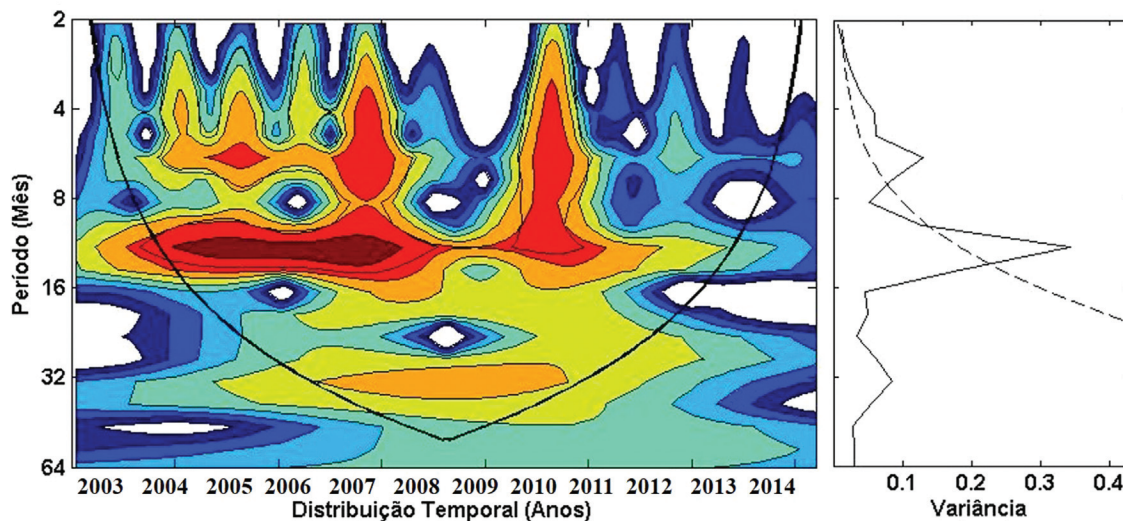


Figura 8 - Wavelet de Morlet para a distribuição das médias mensais da AOD 550 nm sobre a região do Pantanal brasileiro.

intervalo de periodicidade de 1 ano. Esse resultado evidencia a sazonalidade bem definida dos valores de AOD 550 nm entre os anos de 2004 e 2007. Pal e Devera (2012) encontraram uma periodicidade semelhante nos valores de AOD em várias faixas do espectro sobre uma região urbana na Índia através da aplicação de wavelets sobre uma série temporal de 14 anos, encontraram uma periodicidade que variou entre 12 a 14 meses.

O período de aproximadamente 1 ano encontrado na wavelet de Morlet entre os meses 20 e 60 (anos de 2004 a 2007) também foi detectado pela SSA, entretanto o modelo possibilitou a visualização do intervalo de tempo em que esse período foi dominante dentro da série de AOD 550 nm. A regularidade do período no intervalo de 2004 a 2007 também pode ser analisado em função da entrada da estação seca e do início dos registros de focos de queimadas nas extremidades da área de estudo (Sena *et al.*, 2013). As variações interanuais também foram verificadas por meio da periodicidade de aproximadamente 1 ano dentro da wavelet (Fig. 8), observa-se que essa periodicidade praticamente deixa de existir por volta dos meses 70 a 80 (anos de 2008 e 2009), justamente devido aos baixos valores atingidos para a AOD 550 nm nesse intervalo de tempo sobre as proximidades da área de estudo (Palácios *et al.*, 2015). Entretanto, para o mês 90 (ano de 2010) a periodicidade de 1 ano volta a aparecer, se estendendo também para períodos menores constatados também para os meses 30 e 50 (anos de 2005 e 2007).

Assim como na técnica de SSA, a wavelet sugere uma periodicidade de aproximadamente 6 meses que ocorre com menor intensidade sobre os anos de 2005, 2007 e 2010, esses anos atingiram valores altos para a AOD 550 nm, ultrapassando o valor 3.5 obtido por Palácios *et al.* (2015). A partir do ano 2011 os ciclos associados aos altos valores de AOD 550 nm praticamente cessam, uma vez que se observa uma redução significativa na intensidade dos má-

ximos de AOD 550 nm sobre a região de estudo (Mao *et al.*, 2014). Essa tendência na diminuição dos valores de AOD 550 nm também foi constatada através da técnica de SSA sobre a tendência geral da série. O trabalho de Sena *et al.* (2013) associa essa redução gradativa da AOD a redução das intensidades de registro de focos de queimadas sobre toda a região norte, nordeste e leste da área de estudo.

Dentro do ‘cone de influência’ (fronteira correspondente a um intervalo de confiança de 95%) foi verificada uma periodicidade de menor intensidade entre os meses 50 e 90 (2007 a 2010), sendo constatado um período de aproximadamente 32 meses, um ciclo de aproximadamente 2 anos e meio. Este trabalho sugere que essa periodicidade decorra dos intervalos entre os máximos ocorridos nos valores da AOD 550 nm. O ano de 2007 apresentou registros máximos que voltaram a se repetir em 2010, ou seja, houve um intervalo de aproximadamente 3 anos para que os máximos retornassem ao valor de referência.

O trabalho de Pal e Devera (2012), sobre a aplicação da wavelet em uma série de AOD, também reporta uma periodicidade de aproximadamente 2 anos, com períodos entre 20 e 22 meses, justificados pelas ocorrências de tempestades e elevação de poeira devido a altas intensidades dos ventos no período de pré-moção sobre a Índia. Esses autores ainda observam um período de menor intensidade de energia, com 28 meses, que se assemelha ao período encontrado neste trabalho. Entretanto, o resultado da periodicidade encontrada nesse trabalho, assim como descrito por Pal e Devera (2012), possui uma intensidade de energia menor quando comparada as periodicidades dominantes.

O ciclo anual da média diária da AOD 550 nm sobre o Pantanal brasileiro (Fig. 9) representa as principais periodicidades dentro de 1 ano característico. O espectro de energia da wavelet sugere que as principais periodicidades, ao longo de um ano característico, ocorrem entre os dias do ano de número 200 a 300, aproximadamente de julho a

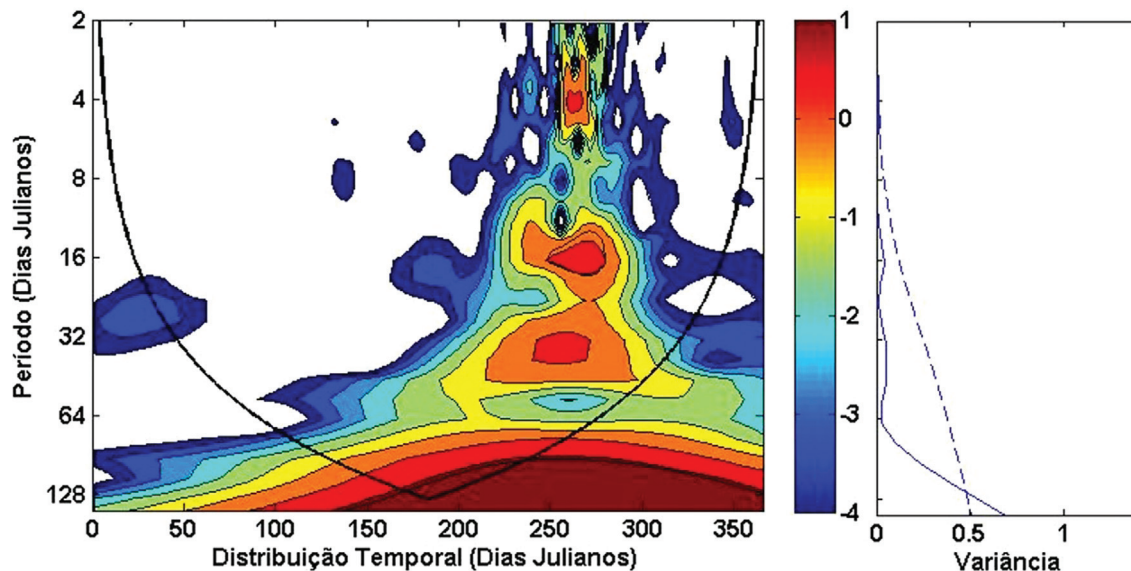


Figura 9 - Wavelet de Morlet para a distribuição das médias diárias de AOD 550 nm sobre a região do Pantanal brasileiro, um ano representativo para o período de 2003 a 2014.

outubro. O deslocamento das altas intensidades de energia para o lado direito do cone de influência (Fig. 9) se deve ao fato dos principais eventos ligados as variações da AOD 550 nm ocorrerem durante o período crítico de seca (Palácios *et al.*, 2014).

O ciclo anual das médias diárias da AOD 550 nm apresentam 3 periodicidades estatisticamente significativas cujo espectro de energia é relativamente alto (Fig. 9). A primeira periodicidade marcante apresenta um período de aproximadamente 32 dias, ou seja, um mês. Esse evento pode ser analisado em função do mês de setembro cujos valores de AOD 550 nm representam os máximos ao longo do ano (Sena *et al.*, 2013; Palácios *et al.*, 2014; Palácios *et al.*, 2015). A segunda periodicidade (Fig. 9) apresenta um ciclo de aproximadamente 16 dias, enquanto que a terceira apresenta um período de aproximadamente 5 dias. Esse trabalho sugere que todas as periodicidades encontradas em um ano característico representam a sazonalidade da AOD 550 nm sobre a região de estudo, sendo as variações dos períodos predominantes decorrentes dos máximos valores de AOD atingidos ao longo do mês de setembro.

4. Conclusão

A análise de valores singulares (aplicação da técnica SSA) possibilitou a descrição das principais periodicidades da série de AOD 550 nm na região do Pantanal brasileiro, constatou-se dois períodos dominantes com pequenas variações, períodos de 1 ano e 6 meses. Esse trabalho sugere que as variações obtidas por essa técnica são decorrentes das variações no período de estiagem sobre a área de estudo, uma vez que a AOD 550 nm é extremamente sazonal e regulada pelo período de seca através das incidências de focos de queimadas.

A análise da wavelet de Morlet apresentou as principais periodicidades estatisticamente significativas, entre as quais também foram detectadas uma periodicidade anual e uma periodicidade de 6 meses, igualmente justificadas pelas variações nos períodos de seca sobre o Pantanal brasileiro e suas regiões vizinhas.

Ambas as técnicas explicaram as principais oscilações nos valores de AOD 550 nm sobre a área de estudo, que variam de acordo com o período de estiagem e potencializados pelos registros de queimadas. Ambas as técnicas também detectaram uma gradativa redução dos valores de AOD 550 nm a partir de 2011. Entretanto, a técnica de wavelet possibilitou a interpretação e visualização das principais periodicidades ao longo do tempo dentro da série, sendo possível verificar em que momento na série tais periodicidades ocorreram.

Com relação as hipóteses levantadas no início desse trabalho, foi verificado que embora a técnica de SSA possua limitações com relação as amplitudes das oscilações da AOD 550 nm para a área de estudo, a reconstrução da série com 9 autovalores explicou 58.88% dos dados originais. Ambas técnicas abordadas nesse estudo representaram as principais periodicidades da AOD 550 nm, sendo possível a partir dessas se pensar em modelagem para as propriedades óticas dos aerossóis no Pantanal brasileiro.

Agradecimentos

Agradecemos a CAPES, pelo apoio financeiro (Processo nº 01439213127), ao grupo de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, Projeto de processo 457824/2013-1 aprovado na Chamada Nº 68/2013 MCTI/CNPq/FNDCT - Ação Transversal/LBA.

Referências

- ALAM, K.; IQBAL, M.J.; BLASCHKE, T.; QURESHI, S.; KHAN, G. Monitoring spatio-temporal variations in aerosols and aerosol-cloud interactions over Pakistan using MODIS data. **Advances in Space Research**, v. 46, p. 1162-1176, 2010.
- ALAM, K.; QURESHI, S.; BLASCHKE, T. Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 4641-4651, 2011.
- ARTAXO, P.; OLIVEIRA, P.H.; LARA, L.L.; PAULIQUEVIS, T.M.; RIZZO, L.V.; PIRES JUNIOR, C.; PAIXÃO, M.A.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.; CORREIA, A.L. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 167-189, 2006.
- BALAKRISHNAIAH, G.; KUMAR, K.R.; REDDY, B.S.K.; GOPAL, K.R.; REDDY, R.R.; REDDY, L.S.S.; AHAMMED, Y.N.; NARASIMHULU, K.; MOORTHY, K.K.; BABU, S.S. Analysis of optical properties of atmospheric aerosols inferred from spectral AODs and Ångström wavelength exponent. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 1275-1285, 2011.
- BIUDES, M.S.; VOURLITIS, G.L.; MACHADO, N.G.; ARRUDA, P.H.Z.; NEVES, G.A.R.; LOBO, F.A.; NEALE, C.M.U.; NOGUEIRA, J.S. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112-124, 2015.
- DESTRO, C.A.M.; LIMA, G.A.R.; ZEILHOFER, P. Análise de séries temporais de vazão média mensal do Rio Cuiabá através do método de Análise de Espectro Singular. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 111-120, 2012.
- ELSNER, J.B.; TSONIS, A.A. **Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis**. Plenum Press, New York and London, 164 p, 1996.
- FURON, A.C.; WAGNER-RIDDLE, C.; SMITH, C.R.; WARLAND, J.S. wavelet analysis of wintertime and spring thaw CO₂ and N₂O fluxes from agricultural fields. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. I305-I317, 2008.
- GHIL, M.; ALLEN, M.R.; DETTINGER, M.D.; IDE, K.; KONDRASHOV, D.; MANN, M.E.; ROBERTSON, A.W.; SUNDERS, A.; TIAN, Y.; VARADI, F.; YIOU, P. Advanced spectral methods for climatic time series. **Reviews of Geophysics**, v. 40, p. 3.1-3.40, 2002.
- GHIL, M.; VAUTARD, R. Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series. **Nature**, v. 350, p. 324-327, 1991.
- GOULART, M.A.; SANCHES, L.; VILANI, M.T.; PINTO JÚNIOR, O.B. Análise da evapotranspiração por wavelets de Morlet em área de *Vochysia divergens* Pohl no Pantanal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 93-98, 2015.
- HOLBEN, B.N.; ECK, T.F.; SLUTSKER, I.; TANRÉ, D.; BUIS, J.P.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J.A.; KAUFMAN, Y.J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANKOWIAK, I.; SMIRNOV, A. AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. **Remote Sensing of the Environment**, v. 66, p. 1-16, 1998.
- KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D.; REMER, L.A.; VERMOTE, E.F.; CHU, A.; HOLBEN, B.N. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 17051-17067, 1997.
- KUMAR, A. Long term (2003-2012) spatio-temporal MODIS (Terra/Aqua level 3) derived climatic variations of aerosol optical depth and cloud properties over a semi arid urban tropical region of Northern India. **Atmospheric Environment**, v. 83, p. 291-300, 2014.
- KUMAR, K.R.; SIVAKUMAR, V.; YAN Y.; REDDY, R.R.; NAKANG, DIAO, A.J.A.; YU, X. Long-term (2003-2013) climatological trends and variations in aerosol optical parameters from MODIS over three stations in South Africa. **Atmospheric Environment**, v. 95, p. 400-408, 2014.
- LONGO, K.M.; THOMPSON, A.M.; KIRCHHOFF, V.W.J.H.; REMER, L.A.; FREITAS, S.R.; SILVA DIAS, M.A.F.; ARTAXO, P.; HART, W.; SPINHIRNE, J.D.; YAMASOE, M.A. Correlation between smoke and tropospheric ozone concentration in Cuiabá during Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil (SCAR). **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 12113-12129, 1999.
- MAO, K.B.; MA, Y.; XIA, L.; CHEN, W.Y.; SHEN, X.Y.; HE, T.J.; XU, T.R. Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data. **Atmospheric Environment**, v. 94, p. 680-686, 2014.
- MESQUITA, F.L.L.; MARQUES FILHO, E.P.; KARAM, H.A.; ALVALÁ, R.C.S. Balanço de radiação no Pantanal Sul Mato-grossense durante a estação seca. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 65-74, 2013.
- MURTHY, B.S.; LATHA, R.; MANOJ KUMAR; MAHANTI, N.C. Effect of aerosols on evapo-transpiration. **Atmospheric Environment**, v. 89, p. 109-118, 2014.
- PAL, S.; DEVARA, P.C.S. A wavelet-based spectral analysis of long time series of optical properties of aerosol obtained by lidar and radiometer measurements over an urban station in Western India. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 84-85, p. 75-87, 2012.
- PALÁCIOS, R.S.; SALLO, F.S.; PRADO, M.J.; MUSIS, C.R.; NOGUEIRA, J.S. Análise da profundidade ótica de aerossóis e coeficiente de Angstrom no cerrado Mato-grossense. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 173-185, 2014.
- PALÁCIOS, R.S.; SALLO, F.S.; NOGUEIRA, J.S. Caracterização sazonal e interanual da profundidade ótica de aerossóis em região de transição Pantanal-Cerrado no estado de Mato Grosso, Brasil. **HOLOS Environment**, v. 15, n. 1, p. 92-99, 2015.
- REMER, L.A.; KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D.; MATTOO, S.; CHU, D.A.; MARTINS, J.V.; LI, R.R.; ICHOKU, C.; LEVY, R.C.; KLEIDMAN, R.G.; ECK, T.F.; VERMOTE, E.; HOLBEN, B.N. The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 62, p. 847-973, 2005.
- SANCHES, L.; ALVES, M.C.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; NOGUEIRA, J.S.; DALMAGRO, H.J. Estimativa do coeficiente Priestley-Taylor em floresta monodominante cambazal no Pantanal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 448-454, 2010.
- SANCHES, L.; SILVA, L.B.; LIMA, S.D.; PEREIRA, O.A.; CARRILHO, F.J.; NOGUEIRA, J.S. Estoque de energia na

- biomassa e no ar do dossel de *Vochysia divergens* Pohl. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 955-962, 2014.
- SENA, E.T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A.L. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosol and the effects of land use change in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, p. 1261-1275, 2013.
- SILVA, D.F.; SOUSA, F.A.S.; KAYANO, M.T. Escalas temporais da variabilidade pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 324-332, 2010.
- SMIRNOV, A.; HOLBEN, B.N.; ECK, T.F.; DUBOVIK, O.; SLUTSKER, I. Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base. **Remote Sensing of the Environment**, v. 73, p. 337-349, 2000.
- TANRÉ, D.; KAUFMAN, Y.J.; HERMAN, M.; MATTOO S. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 16971-16988, 1997.
- TORRENCE, C.; COMPO, Y.G.P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletins of American Meteorological Society**, v.79, p.61-78, 1998.
- VIEIRA-FILHO, M.S.; PEDROTTI, J.J.; FORNARO, A. Contribution of long and mid-range transport on the sodium and potassium concentrations in Rainwater samples, São Paulo megacity, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 79, p. 299-307, 2013.
- VILANI, M.T.; SANCHES, L. Análise de Fourier e Wavelets aplicada à temperatura do ar em diferentes tipologias de ocupação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1340-1346, 2013.
- WANG, L.; WANG, Y.; XIN, J.; LI, Z.; WAN, X. Assessment and comparison of three years of Terra and Aqua MODIS Aerosol Optical Depth Retrieval (C005) in Chinese terrestrial regions. **Atmospheric Research**, v. 97, p. 229-240, 2010.
- WRIGHT, M.E.; ATKINSON, D.B.; ZIEMBA, L.; GRIFFIN, R.; HIRANUMA, N.; BROOKS, S.; LEFER, B.; FLYNN, J.; PERNA, R.; RAPPENGLÜCK, B.; LUKE, W.; KELLEY P. Extensive aerosol optical properties and aerosol mass related measurements during TRAMP/TexAQs 2006 – Implications for PM compliance and planning. **Atmosphere Environment**, v. 44, p. 4035-4044, 2010.
- ZHANG Z.; WENIG M.; ZHOU W.; DIEHL T.; CHAN K.; WANG L. The contribution of different aerosol sources to the Aerosol Optical Depth in Hong Kong. **Atmospheric Environment**, v. 83, p. 145-154, 2014.