

Análise de multi-resolução por ondeletas da variabilidade espacial e temporal da pluma de salinidade do Rio Amazonas

Gustavo Souto Fontes Molleri¹
Milton Kampel¹
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
(molleri, milton, evlyn)@dsr.inpe.br

Abstract. The wavelet multi-resolution analysis and Fast Fourier Transform (FFT) were applied to the Amazon River plume area time series to identify dominant scales or range of scales present in this feature variability. The time series was extracted from Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) ocean color data for the period from 2000 to 2004. The results show that the plume area has a strong seasonal and annual variability signal. Previous studies showed that this seasonality is related to the cyclic variability of the Amazon River discharge. Another strong bi-annual signal was identified but any further association with the plume variability is limited by the relatively short period of the time series. Another relatively weaker 2–5 months signal was also detected and this could be related with the wind field and ocean currents variability influence over the Amazon River plume.

Palavras-chave: multi-resolution wavelet analysis, time-series analysis, fast fourier transform, amazon river, salinity plume, análise de multi-resolução por ondeletas, análise de séries temporais, transformada rápida de fourier, rio amazonas, pluma de salinidade.

1. Introdução

A pluma de salinidade do Rio Amazonas é caracterizada por salinidades < 34psu (Lentz, 1995b) e pela grande quantidade de material orgânico e inorgânico dissolvido e particulado (DeMaster e Pope, 1996; Hu et al., 2004; Muller-Karger et al., 1988). O grande volume de água e materiais descarregado pelo Rio Amazonas e a influência de diversos fatores ambientais tais como (i) correntes oceânicas, (ii) variação na intensidade e direção do vento e (iii) amplitude de maré, fazem com que a sua pluma de salinidade apresente uma grande variabilidade espacial e temporal (Lentz, 1995b; Muller-Karger et al., 1995; Nittrouer e DeMaster, 1996). Estudos mostram que a pluma alcança à costa nordeste da América do Sul até a região do Caribe, de janeiro a julho, e o Oceano Atlântico Equatorial, de agosto a dezembro (Chérubin e Richardson, 2007; Hu et al., 2004; Lentz, 1995b; Molleri, 2008).

A análise por espectro de potência de ondeletas ou *wavelets* da série temporal da área abrangida pela pluma (Figura 1), estimada a partir de médias bi-semanais de imagens de sensoriamento remoto da cor do oceano, permitiu identificar um forte sinal sazonal desta feição (Molleri, 2008). Segundo Molleri (2008), este forte sinal é consequência, principalmente, da sazonalidade relativa à descarga do Rio Amazonas. A velocidade e a direção de transporte da água na pluma, por sua vez, estão mais relacionadas com a variação da direção e intensidade do vento - conforme o posicionamento da Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT) - e com a sazonalidade das correntes oceânicas - Corrente Norte do Brasil e Contra-Corrente Norte Equatorial -, respectivamente (Lentz, 1995a; Molleri, 2008; Nittrouer e DeMaster, 1996).

Segundo Molleri (2008), a pluma, para o período estudado, apresenta uma média de $680 \times 10^3 \text{ km}^2$ e desvio padrão de $313 \times 10^3 \text{ km}^2$ (Figura 1). A amplitude média anual da área da pluma é de $1020 \times 10^3 \text{ km}^2$, mostrando a grande variabilidade espacial desta feição.

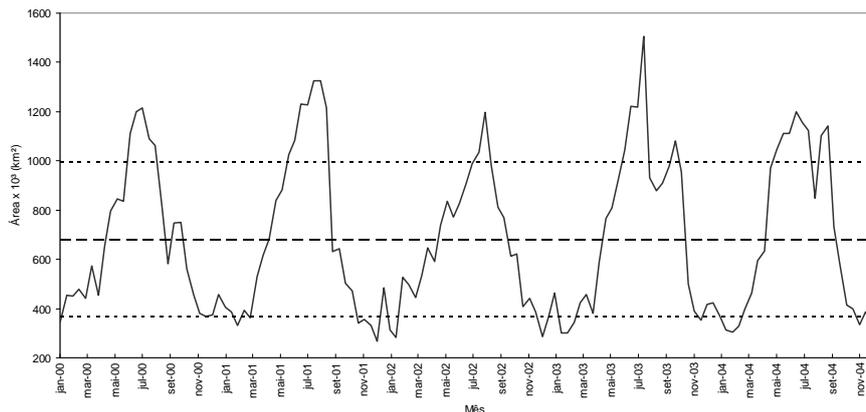


Figura 1. Série temporal da área de pluma de salinidade do Rio Amazonas, extraída a partir de médias bi-semanais de imagens de sensoriamento remoto da cor do oceano, no período de 2000 a 2004. A linha tracejada indica a média calculada para o período ($680 \times 10^3 \text{ km}^2$) e a linha pontilhada o desvio padrão ($313 \times 10^3 \text{ km}^2$). Fonte: Adaptado de Molleri (2008).

Portanto, como forma de dar continuidade ao estudo sobre a variabilidade temporal da pluma do Rio Amazonas, este artigo visa identificar, a partir da técnica de análise de multi-resolução por ondeletas, as diferentes frequências presentes na variabilidade temporal da área da pluma de salinidade do Rio Amazonas.

A análise de multi-resolução consiste na aplicação de filtros passa-baixa e passa-alta na série temporal o que destaca os sinais representativos de: (i) ruído, (ii) sazonalidade e (iii) tendência (Frantziskonis e Denis, 2003). Esta técnica permite, portanto, uma análise quantitativa mais robusta, em relação à análise por espectro de potência de ondeletas aplicada por Molleri (2008), das diferentes escalas presentes na série temporal (Oh et al., 2003).

2. Metodologia

2.1 Área da pluma do Rio Amazonas

A área da pluma do Rio Amazonas foi extraída a partir de 130 imagens bi-semanais (médias de 14 dias) do produto de sensoriamento remoto da cor do oceano referente ao coeficiente de absorção pela matéria orgânica dissolvida e detritos a_{443} do sensor *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) (Maritorena et al., 2002). Este produto mostrou, em estudos anteriores, significativa correlação ($r^2 = 0,76$) com a salinidade superficial na região nordeste da América do Sul sob a influência da pluma do Rio Amazonas (Molleri, 2008). A partir deste produto, portanto, foi mapeada a pluma de salinidade < 34 psu (Lentz, 1995b) e computada a sua área para o período de 2000 a 2004. Consultar Molleri (2008) para maiores informações quanto ao processo de extração série temporal da área da pluma de salinidade do Rio Amazonas.

2.2 Análise multi-resolução por ondeletas

Na análise multi-resolução por ondeletas o sinal ou série temporal é decomposta por filtros passa-baixa e passa-alta em componentes referentes às baixas (aproximação) e às altas (detalhe) frequências, respectivamente (ver exemplo na Figura 2) (Mallat, 1989). Uma característica importante deste tipo de análise é que, no caso do exemplo apresentado na Figura 2, quando integradas as componentes de detalhe de todos os níveis e a componente de aproximação do último nível pode-se obter o sinal original ou a série temporal analisada.

Neste estudo, a ondeleta de *coiflets* (Daubechies, 1992) de terceira ordem foi aplicada na decomposição das séries temporais no aplicativo Matlab 7. Como forma de testar em quantos

níveis de decomposição a variabilidade da pluma é melhor explicada, foi analisada a entropia das séries decompostas para os níveis de 1 a 8 (Frantziskonis e Denis, 2003).

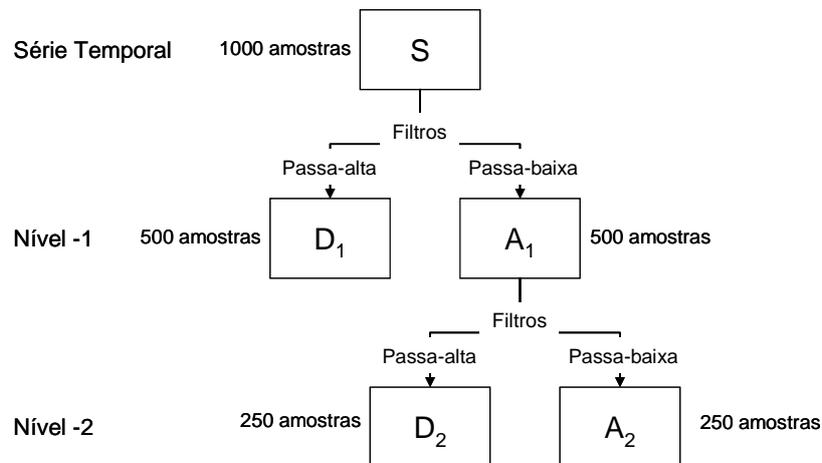


Figura 2. Exemplo do processo de árvore de decomposição por ondeleta com 2 níveis. S é a série temporal original, A é a componente aproximação que corresponde ao conteúdo de baixa frequência do sinal e D é a componente detalhe para as altas frequências.

A Figura 3 demonstra que a entropia da série temporal é melhor explicada quando esta é decomposta em 4 níveis. O passo seguinte consistiu em aplicar a função por transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) nas séries temporais, de detalhe nos 4 níveis e de aproximação do último nível, resultantes do processo de decomposição por ondeletas. A aplicação da FFT neste estudo tem por objetivo identificar as frequências presentes nas séries temporais decompostas (Torrence e Compo, 1998).

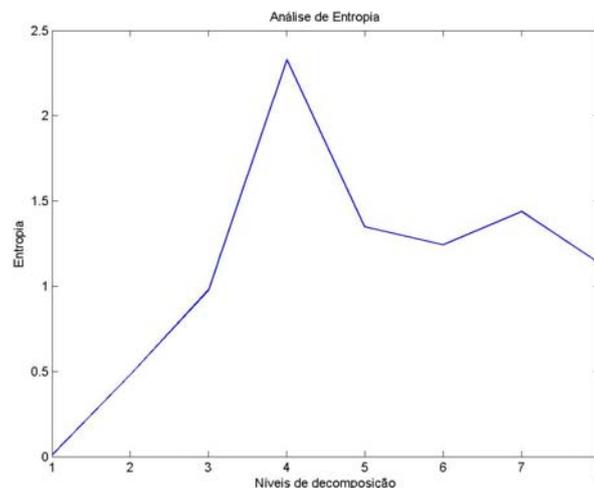


Figura 3. Análise das entropias das componentes de detalhe da série temporal decomposta em até 8 níveis da área da pluma de salinidade do Rio Amazonas.

3. Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta as séries temporais da área da pluma de salinidade do Rio Amazonas normalizada (S) e das componentes de detalhe nos níveis de 1 a 4 (d_{1-4}) e de aproximação do nível 4 (a_4) (ver item 2.2). A Figura 5 mostra a análise por FFT das séries temporais apresentadas na Figura 4.

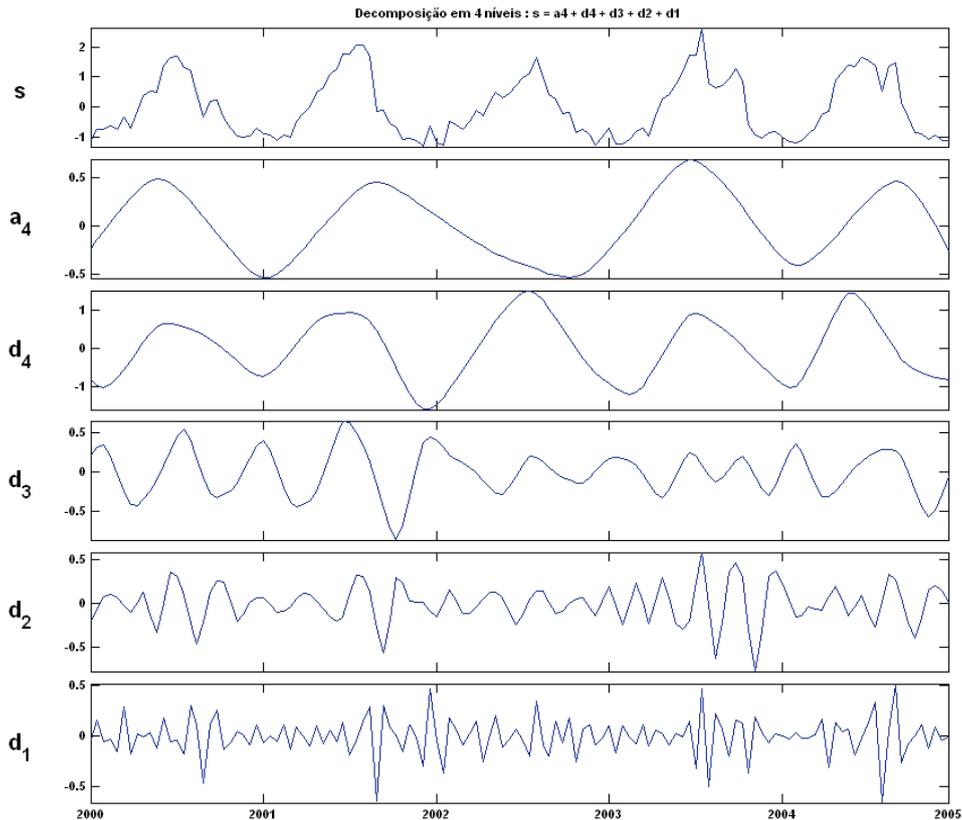


Figura 4. Série temporal normalizada da área da pluma de salinidade do Rio Amazonas (S) e as componentes de aproximação (a_4) e detalhe (d_{1-4}) resultantes do processo de decomposição por ondeletas em 4 níveis.

A Figura 5-A mostra uma forte potência para o período de 24 meses (bianaual) e uma mais fraca para o período de 12 meses (1 ano) da série temporal não decomposta da área da pluma (S). Devido ao baixo número de amostras na série temporal de apenas 5 anos, não há como verificar de forma robusta se esta forte potência bianaual realmente ocorre na variabilidade da pluma ou se é uma feição presente somente no período analisado.

As componentes d_1 , d_2 e d_3 indicaram potências maiores nos períodos: (i) de ~2 meses, (ii) de 3 meses e (iii) de 5 meses, respectivamente (Figura 5-B, C e D). Todavia, as potências destas componentes, quando comparadas às demais, não correspondem a valores altos. Estes baixos valores podem ser representativos de ruídos presentes na série original ou tendências de variabilidade da área da pluma. Por sua vez, estas tendências podem estar relacionadas à dinâmica de fatores ambientais que influenciam a variabilidade da área pluma como, por exemplo, o campo de ventos e de correntes (Molleri, 2008). Entretanto, afim de se obter resultados mais conclusivos, faz-se necessário, também, identificar e analisar a existência das frequências descritas anteriormente nas séries temporais dos fatores ambientais.

A componente d_4 apresentou uma forte potência para períodos de 6 meses (Figura 5-E). Esta sazonalidade, segundo Molleri (2008), está fortemente relacionada ao regime de vazão do Rio Amazonas de seus afluentes. Nesta componente foram, também, observados 2 picos de potência para os períodos representativos de 7-8 meses e de 1 ano.

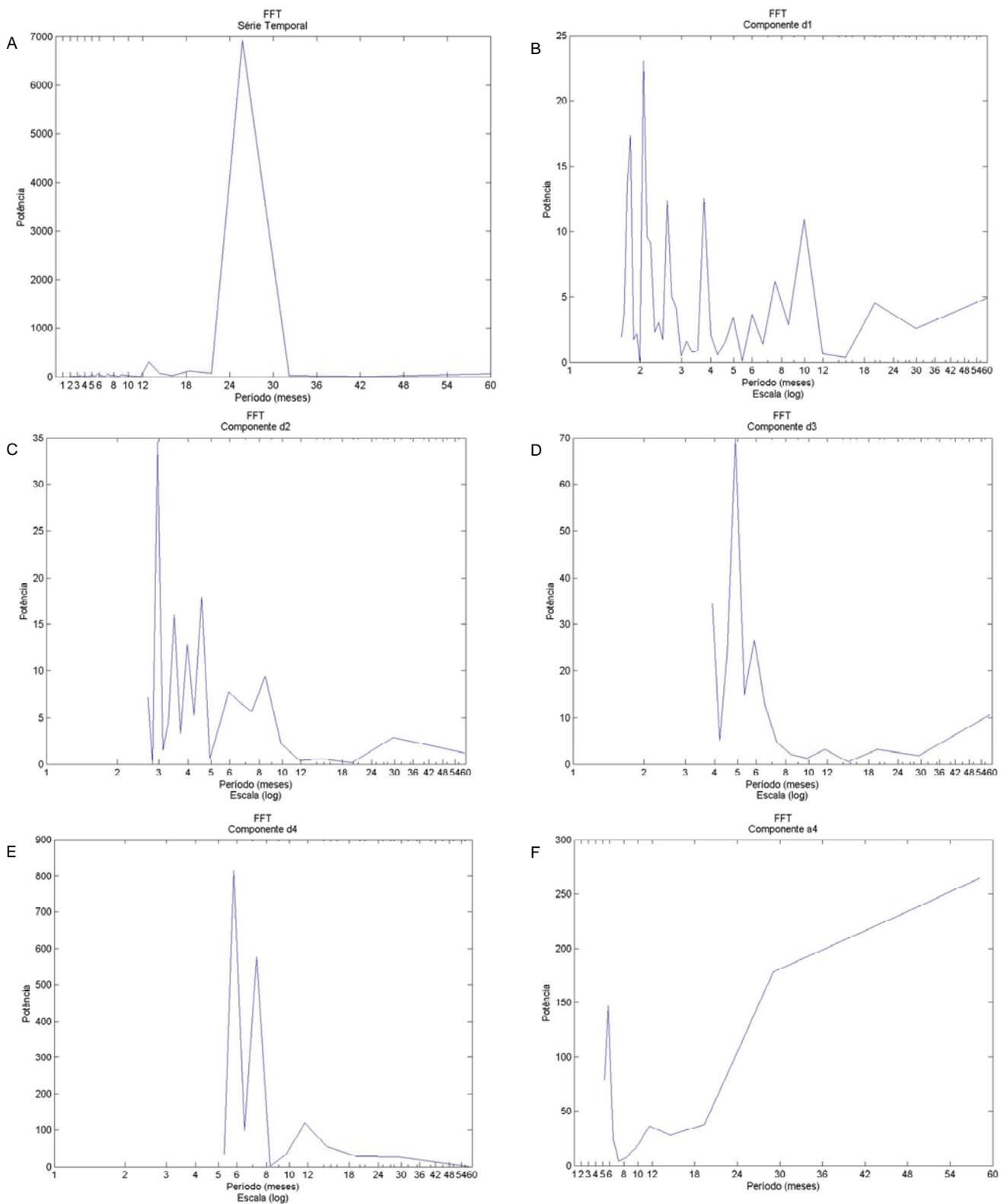


Figura 5 – FFT das séries temporais decompostas pelo método de análise multi-resolução por ondeletas. As letras no canto superior esquerdo indicam as FFTs da série temporal da área de pluma do Rio Amazonas (A), das componentes de detalhe 1 (B), 2 (C), 3 (D) e 4 (E) e a componente de aproximação 4 (F).

Na componente a_4 foram observadas fortes potências relativas a períodos de 6 meses e ~30 meses (Figura 5-F). Esta sazonalidade, conforme comentado anteriormente, está relacionado, principalmente, com o regime de vazão do Rio Amazonas. O sinal referente a períodos de ~30 meses, assim como ocorrido na análise da para a série temporal não decomposta (S), não pode ser conclusivamente associado à variabilidade da pluma ou a algum fenômeno ou processo presente apenas no período estudado.

4. Conclusões

Este artigo apresentou os resultados da aplicação da técnica da análise de multi-resolução de ondeletas em conjunto com a FFT na análise da série temporal da área da pluma de salinidade do Rio Amazonas, extraída a partir de imagens de sensoriamento remoto da cor do oceano, com o objetivo de identificar padrões de variabilidade desta feição.

Os resultados mostram que a pluma apresenta uma forte variabilidade anual e sazonal. Esta sazonalidade, segundo estudos anteriores, está fortemente relacionada com o regime de vazão do Rio Amazonas e de seus afluentes. Foram identificados sinais de potências menores para períodos de 2 a 5 meses que podem ser indicativos de tendências de variabilidade relacionadas às influências de fatores ambientais como o campo vento em superfície e as correntes oceânicas. Entretanto, fazem-se necessários estudos das séries temporais dos campos de vento e das correntes oceânicas presentes na região para concluir a presença destas influências na variabilidade da pluma.

A análise da série temporal também mostrou um forte sinal bianual. Entretanto, devido ao pequeno número de amostras da série temporal analisada não se pode ser identificar se este sinal é um padrão de variabilidade da pluma ou se ele está presente somente no período estudado.

A técnica de análise de multi-resolução por ondeletas permitiu, portanto, identificar as diferentes escalas de variação da série temporal da área da pluma do Rio Amazonas. Os autores sugerem, como forma de dar continuidade aos estudos da variabilidade espaço-temporal desta feição, aumentar o número de amostras da série temporal da área da pluma para períodos mais longos a fim de se identificar padrões de variabilidade em larga escala. Sugere-se, também, aplicar esta técnica em séries temporais extraídas dos campos de vento superficial e de correntes oceânicas presentes na área de estudo para permitir identificar quantitativamente a relação destes fatores com a variabilidade da área pluma.

Agradecimentos

Gustavo Souto Fontes Moller é bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq - Nível 7D.

Referências Bibliográficas

Chérubin, L. M.; Richardson, P. L. Caribbean current variability and the influence of the Amazon and Orinoco freshwater plumes. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 54, n. 9, p. 1451-1473, 2007.

Daubechies, I. **Ten Lectures on Wavelets**. 2nd ed. Philadelphia, PA: Society for Industrial Mathematics, 1992.

DeMaster, D. J.; Pope, R. H. Nutrient dynamics in Amazon shelf waters: results from AMASSEDS. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 263-289, 1996.

Frantziskonis, G.; Denis, A. Complementary Entropy and Wavelet Analysis of Drilling-Ability Data. **Mathematical Geology**, v. 35, n. 1, p. 89-103, 2003.

Hu, C.; Montgomery, E. T.; Schmitt, R. W.; Muller-Karger, F. E. The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: observation from space and S-PALACE floats. **Deep-Sea Research II**, v. 51, n. 10-11, p. 1151–1171, 2004.

Lentz, S. J. The Amazon River plume during AmasSeds: subtidal current variability and the importance of wind forcing. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C2, p. 2377-2390, 1995a.

Lentz, S. J. Seasonal variations in the horizontal structure of the Amazon Plume inferred from historical hydrographic data. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C2, p. 2391-2400, 1995b.

Mallat, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 11, n. 7, p. 674-693, 1989.

Maritorena, S. p.; Siegel, D. A.; Peterson, A. R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied Optics**, v. 41, n. 15, p. 2705-2714, 2002.

Moller, G. S. F., 2008, Aplicação de dados de sensores remotos orbitais no estudo da variabilidade espacial e temporal da pluma do Rio Amazonas no período de 2000 a 2004. 157 p. (INPE-15256-TDI/1341). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008-03-31. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/05.26.14.29>>. Acesso em: 10 nov. 2008.

Muller-Karger, F. E.; McClain, C. R.; Richardson, P. L. The dispersal of the Amazon's water. **Nature**, v. 333, n., p. 56-58, 1988.

Muller-Karger, F. E.; Richardson, P. L.; McGillicuddy, D. On the offshore dispersal of the Amazon's Plume in the North Atlantic: Comments on the paper by A. Longhurst, "Seasonal cooling and blooming in tropical oceans". **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 42, n. 11-12, p. 2127-2131, 1995.

Nittrouer, C. A.; DeMaster, D. J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5-6, p. 553-573, 1996.

Oh, H.-S.; Ammann, C. M.; Naveau, P.; Nychka, D.; Otto-Bliesner, B. L. Multi-resolution time series analysis applied to solar irradiance and climate reconstructions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n., p. 191 – 201, 2003.

Torrence, C.; Compo, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.