

## Variabilidade dos dados da bóia SIMA analisados pelo Operador de Fragmentação Assimétrico

Aline de Matos Valerio<sup>1</sup>  
Milton Kampel<sup>1</sup>  
José Luis Stech<sup>1</sup>  
Arcilan Trevenzoli Assireu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{alineval, milton, stech}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI  
Caixa Postal 50 - 37500-903 - Itajubá - MG, Brasil  
{arcilan}@dsr.inpe.br

**Abstract:** The water quality in tropical reservoirs of Brazil has generally shown large changes in their trophic states, depending on the use and occupation of its river basis. To understand these changes and the ecological processes involved it is necessary to monitor the water quality of these ecosystems. It is important to register the temporal and spatial variability noting the various mechanisms of the water systems and drainage basin details. However, ecological data can be difficult to analyze due to complexity presented in the ecological systems with its non-linear variables. Thus, efficient methods are required to understand the information extracted out of the complex data and build an ecological prediction model. In this paper, two techniques are presented: Wavelet Transform (WT) and Asymmetric Fragmentation Operator (FA). These techniques were used to analyze the data obtained in 2007 from an eulerian buoy anchored in the Manso Reservoir, MT, Brazil. Observations showed that, due the short period analyzed, the WT technique was not appropriate in this case. All WT generated have little variation and low energy levels. On the other hand, the FA results displayed a positive geometrical relationship between chlorophyll-a, intensity and wind direction. Thus the use of FA in this study proved to be a useful tool to study the variability of parameters of water quality parameters in a tropical reservoir.

**Palavras-chave:** wavelet, fragmentação assimétrica, reservatório, processos ecológicos, reservoir, ecological processes.

### 1. Introdução

No Brasil, a qualidade de água dos reservatórios tem apresentado, em geral, grandes alterações de seus estados tróficos, devido aos tipos de uso e ocupação das bacias hidrográficas. Para entender essas alterações e então estabelecer o manejo adequado torna-se evidente a importância do monitoramento da qualidade da água, pois, além de registrar as variações espaço temporais, relaciona os diversos mecanismos do sistema hídrico com toda a sua bacia de drenagem (Calijuri, 1999; Jong et al, 1995).

A técnica de Wavelet é indicada para a construção de modelos matemáticos de dados ecológicos e análises estatísticas de fatores complexos na rede ecológica por possuir boa localização na frequência espaço-temporal e poder representar os dados de forma adequada e ainda ser implementado com vários algoritmos diferentes. Wavelets baseadas em análises e sínteses podem levar aos pesquisadores, novos conhecimentos e novas teorias para a compreensão de complexos ecológicos e fenômenos ambientais (Cho e Chon, 2006).

O Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) desenvolvido por Rosa et al. (1999), é outra técnica que apresenta potencial aplicação em parâmetros ecológicos. É uma técnica eficiente que caracteriza padrões de variabilidade espacial e faz parte do método de análise de padrões dos campos gradientes (Gradient Pattern Analysis – GPA).

O objetivo desse trabalho é processar os dados limnológicos/meteorológicos coletados pelo Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental (SIMA), fundeado no reservatório de

Manso, utilizando-se os métodos de Wavelet e Operador de Fragmentação Assimétrica e comparar os resultados obtidos.

## 2. Metodologia de Trabalho

O Reservatório de Manso localiza-se no estado de Mato Grosso, Brasil, entre as seguintes coordenadas:  $14^{\circ}14' - 15^{\circ}20'S$  e  $55^{\circ}20' - 60^{\circ}00'W$  (Figura 1).

O reservatório possui uma área inundada de  $427 \text{ km}^2$ , volume de  $7,3 \text{ km}^3$ , profundidade máxima de 60m e média de 18m. O reservatório foi criado entre novembro de 1999 e fevereiro de 2000. O clima tropical da área possui duas épocas distintas: seca (abril-agosto) e chuvosa (setembro-março).

O entorno, assim como a área inundada, é principalmente formado por arbustos, embora algumas regiões apresentem mata ciliar. As árvores não foram retiradas antes do enchimento do reservatório e estão parcialmente submersas, decompondo-se lentamente (Hylander et al., 2006).

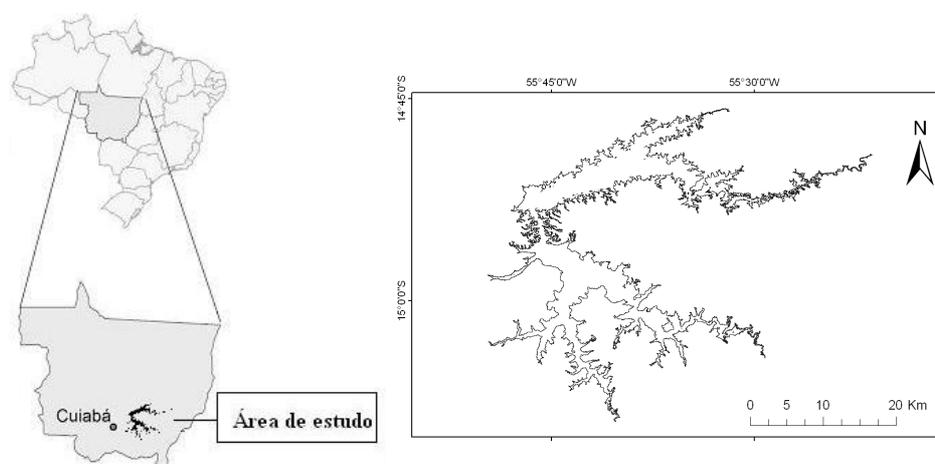


Figura 1. Área de estudo, reservatório de Manso, MT, Brasil.

O SIMA foi desenvolvido a partir da ação conjunta entre a Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para fornecer uma ferramenta útil ao gerenciamento e controle ambiental de recursos hídricos. Para a coleta dos dados, o SIMA utiliza um sistema autônomo de bóia fundeada onde estão instalados sensores. Os dados coletados em intervalo de tempo pré-programados são transmitidos via satélite, em tempo quase real (Lorenzetti et al., 2005) e estão disponibilizados através do portal do Projeto Balanço de Carbono, Reservatórios de Furnas Centrais Elétricas S.A.

A bóia SIMA, no reservatório de Manso, foi fundeada nas coordenadas geográficas  $14^{\circ}52'12,30''S - 55^{\circ}46'12,90''W$ . Os dados utilizados para o desenvolvimento do trabalho proveniente da bóia SIMA foram: concentração de clorofila-*a* (chl-*a*), intensidade e direção do vento e estão concentrados no período de fevereiro a outubro de 2007.

Devido a algumas lacunas, a série temporal dos parâmetros utilizados foi interpolada e estes dados foram analisados pela técnica de Transformada de Wavelet (TW) e Operador de Fragmentação Assimétrica (FA).

Para a aplicação das técnicas Wavelet e FA, foi selecionado o período com dados mais consistentes, de 02 de fevereiro a 21 de outubro de 2007. Antes da análise os dados foram normalizados para que a variabilidade temporal fosse destacada.

Também foram utilizados dados de chl-*a* e temperatura, medidos por meio do radiômetro hiperespectral Satlantic durante o mesmo período em 2008. O Satlantic é um perfilador subaquático que mede a reflectância espectral em 136 canais com comprimentos de onda

variando entre 350 a 800 nm, com resolução de 10 nm, além de parâmetros tais como a temperatura da água.

A TW é uma função matemática que permite analisar sinais não estacionários pela decomposição das séries temporais em tempo e frequência em segmentos, deste modo, demonstra quais frequências existem no sinal e em qual intervalo de tempo ocorrem (Graps, 1995). Na análise wavelet, o sinal é multiplicado e a transformada é calculada separadamente para cada segmento do domínio temporal. Para ser considerada uma wavelet, a função deve possuir média zero e para realizar a transformada, deve-se considerar uma série temporal,  $X_n$ , com igual intervalo de tempo  $\delta t$  e  $n = 0..N-1$ . Deve-se considerar também que esta série temporal possui uma função wavelet que depende de um parâmetro de tempo adimensional  $n$  (Farge, 1992).

Para este trabalho foi adotada a transformada contínua de wavelet (TCW) que é uma implementação da TW que usa escalas arbitrárias. Essas wavelets não são ortogonais e, portanto, apresentam sobreposições dos sinais e os dados obtidos por essa transformada são altamente correlacionados. Este tipo de wavelet é mais indicado para análise de séries temporais porque permite identificar variações mais contínuas e suaves (Torrence e Compo, 1998). A TCW utilizada foi a derivada da gaussiana (DOG), cujo resultado identifica sinais com picos isolados e de descontinuidade.

O FA é uma técnica eficiente para caracterizar padrões de variabilidade espacial e faz parte do método de análise de padrões dos campos gradientes (Gradient Pattern Analysis – GPA, introduzido por Rosa et al., 1998). O GPA permite caracterizar regimes complexos, como intermitência e turbulência, durante a formação e evolução de padrões espaço-temporais em sistemas não lineares. A técnica se baseia na aplicação de operadores computacionais que quantificam quebras de simetria e desordem de fase em escalas locais e globais de um dado padrão espaço-temporal (Rosa et al., 2003).

A medida de quebras de simetria do campo gradiente pode ser obtida por meio do operador computacional FA, que mede o grau de fragmentação. Padrões simétricos apresentam valores de FA iguais ou próximos à zero, pois não há desordem na distribuição (Assireu et al., 2005). Este operador computacionalmente gera uma medida da assimetria global do padrão espaço temporal, quantificando, no tempo, as possíveis quebras de simetria.

O FA não se baseia em propriedades estatísticas da série, somente nas propriedades locais das simetrias do padrão gradiente, sendo assim menos dependente do comprimento da série, quando comparado às técnicas estatísticas convencionais como a wavelet. Maiores detalhes podem ser obtidos em Rosa et al. (1998) e Assireu et al. (2002).

Esta técnica foi originalmente desenvolvida para tratar campos bidimensionais representados através de matrizes numéricas. Com o intuito de estender as aplicações do método para séries temporais, Assireu et al., (2002) adaptaram o método ao converter em uma matriz 3x3 cada nove pontos da série. Assim, um valor médio, considerando cada um dos FAs obtidos ao longo da série é gerado. A escolha de se utilizar matrizes 3x3 deve-se à possibilidade das análises serem feitas na melhor janela de resolução e sem comprometimento da robustez do método (Assireu et al., 2004).

De acordo com Assireu et al. (2005), a grande vantagem deste tipo de operador é permitir mapear ao mesmo tempo a evolução instantânea do parâmetro e sua intensidade, permitindo se diagnosticar em quais períodos as séries se mantiveram mais coerentes entre si e em que períodos elas apresentam comportamentos distintos.

### 3. Resultados e Discussão

De modo geral, para todos os TW gerados (Figura 2) se observa poucas variações sendo o nível de energia baixo em relação a todo o período escolhido. Talvez isso se deva a uma série temporal curta para se trabalhar utilizando esta técnica. Estes parâmetros foram selecionados

para sinalar que os picos de clorofila vistos na série temporal de 2007 não se observa no espectro da wavelet apesar desta ser do tipo gaussiana que tem como propósito fornecer informações de descontinuidades e picos isolados nas séries temporais.

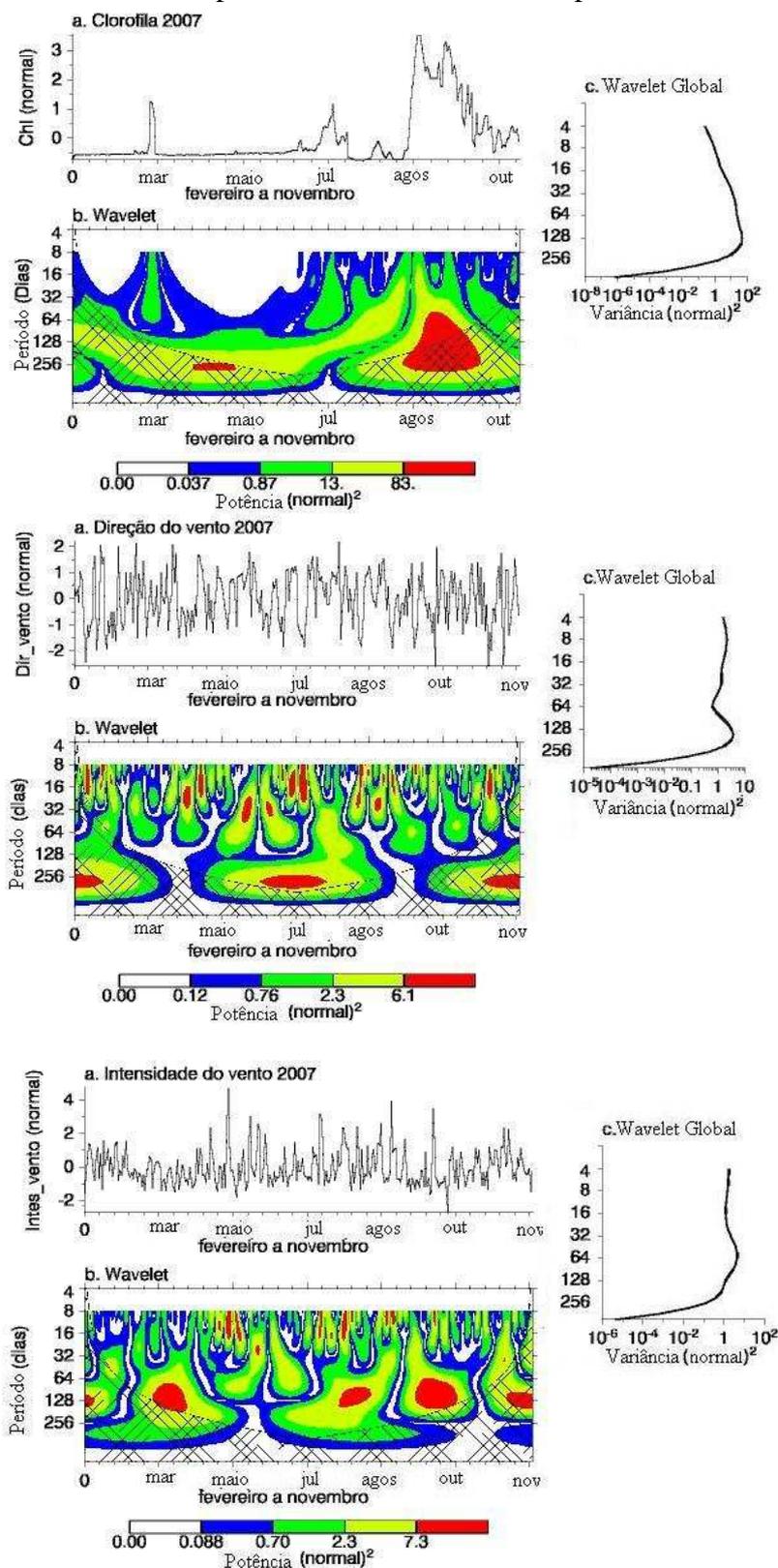


Figura 2. Série temporal e transformada de wavelet para: a) concentração de clorofila; b) direção do vento; c) intensidade do vento de 2007.

Entre os meses de agosto a outubro, observa-se uma maior energia para a chl-a (Figura 2a), mas devido ao pequeno período da série temporal, não é possível afirmar que há uma periodicidade. Já a direção e a intensidade do vento (Figura 2b e 2c respectivamente) apresentam maior energia, mas ainda assim este resultado pouco diz sobre a série temporal. Os sinais mais alongados de energia devem-se a característica da wavelet mãe gaussiana utilizada.

A aplicação do FA foi realizada para a mesma série temporal onde antes fora aplicada a Transformada de Wavelet. Como não foi possível observar uma periodicidade com a técnica anterior, foi aplicado o FA que, por ser uma técnica baseada em análises geométricas da série temporal, permite o acompanhamento local (com alta resolução temporal) da evolução relativa da dinâmica associada a processos. Os resultados destas análises sobre os dados em questão indicaram relação geométrica entre chl-a e intensidade e direção do vento. A Figura 4a, b e c, geradas pelo FA, mostram a complexidade registrada ao longo da evolução da chl-a, direção e intensidade do vento para o ano de 2007.

Foi observado um pico de chl-a em março (Figura 3) que não pôde ser explicado pela TW. Ao observar os mesmos dados com a técnica do FA, nota-se que o período entre 01 de março e 09 de março de 2007, foi marcado por alta variabilidade no parâmetro chl-a (FA~1,2) (Figura 5). Os resultados desta análise para os dados de vento indicaram que nos dias que antecederam ao pico de clorofila, a direção apresentou os menos valores de FA (FA~0,8), o que indica persistência na direção do vento. Os valores de FA para a intensidade do vento também acusaram variação de regime na momento do pico e, neste mesmo período, a direção do vento permaneceu sob o mesmo regime de variabilidade (FA~1), sendo que para a direção do vento, este regime se manteve entre 01 de março a 19 de março de 2007.

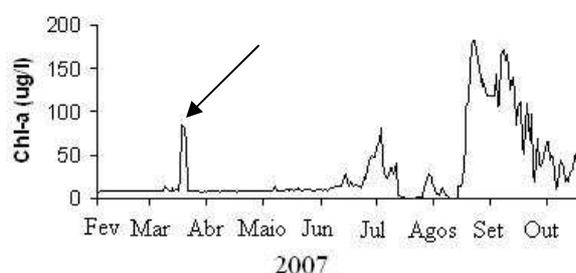


Figura 3. Série temporal da concentração de clorofila-a de superfície para o ano de 2007 média pela bóia SIMA no reservatório de Manso, 2007.

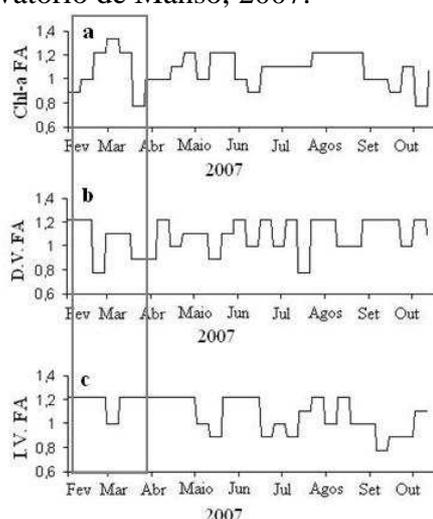


Figura 4. FA aplicado a: a) chl-a; b) direção do vento (D.V.) e c) intensidade do vento (I.V.) para o ano de 2007. Em destaque está o período de fevereiro a abril que se deseja analisar.

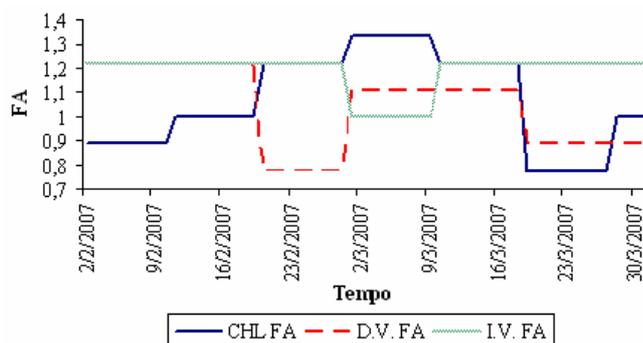


Figura 5. Detalhe do FA aplicado a chl-a, direção do vento (D.V.) e intensidade do vento (I.V.) para o período de fevereiro a março de 2007.

Este resultado indica que o pico de clorofila em março foi precedido por ventos persistentes em direção e que, durante o evento, tanto a direção quanto a intensidade do vento estiveram sob o mesmo regime de assimetria ( $FA \sim 1$ ).

Na Figura 4 observa-se dois valores de mínimos, sendo que, o que ocorreu em março, precedeu ao pico de clorofila. Este período corresponde ao verão e época de chuva e o corpo de água do reservatório de Manso está estratificado como pode ser observado na Figura 6.

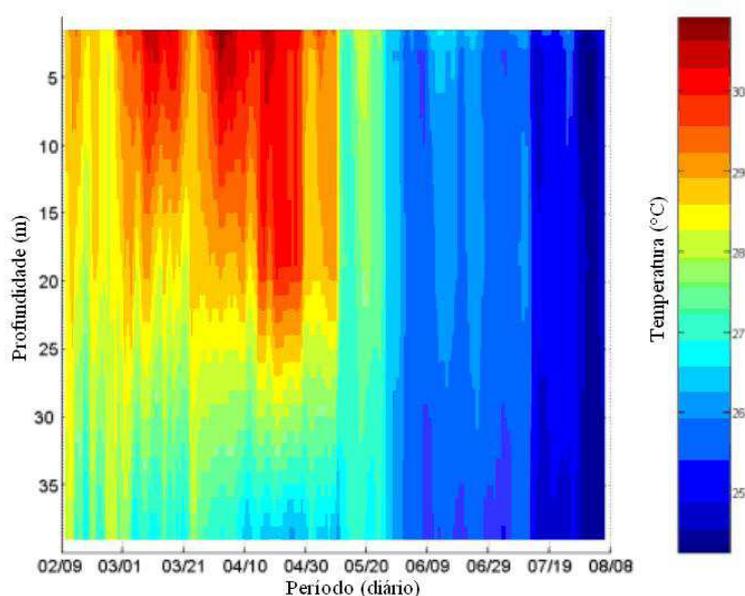


Figura 6. Perfil de temperatura medida no Reservatório de Manso. Fonte: Assireu et al. (2008).

Devido à estratificação, neste período existe uma profundidade de máxima clorofila que coincide com a formação da termoclina conforme pode ser visto na Figura 7. Especula-se aqui que, o outro FA mínimo de direção do vento, observado em junho, não motivou um pico por ser este um período em que o reservatório está misturado (Figura 6) e, portanto, não se esperaria um máximo de clorofila em subsuperfície.

Na figura 7, observa-se o pico de clorofila aos 14m de profundidade para o mês de março de 2008, mostrando que a localização da chl-a, coincide com a termoclina.

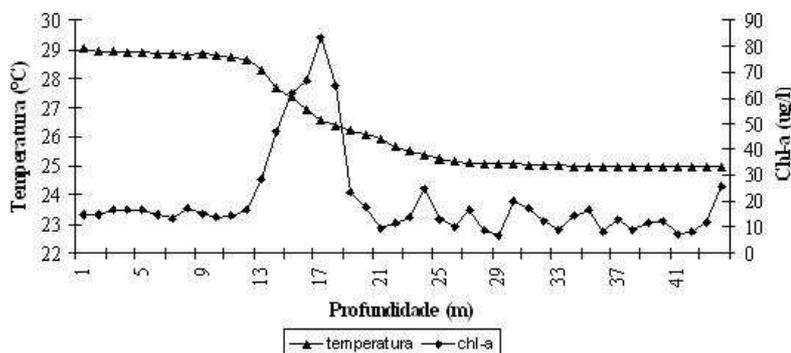


Figura 7. Perfil da concentração de clorofila e temperatura. Dados obtidos ao utilizar o equipamento Satlantic.

Como observado na Figura 7, o pico de clorofila-a no metalímnio é comumente observado tanto no mar como em reservatórios estratificados. Este pico é denominado clorofila máximo de subsuperfície e se encontra a uma profundidade ótima para o desenvolvimento do fitoplâncton, combinando a interação entre a disponibilidade de nutrientes e disponibilidade de luz (Camacho, 2006; Fennel e Boss, 2003).

Assim, o pico de clorofila observado em meados de março de 2007 (Figura 3), pode estar associado a um processo de ressurgência forçada pelo vento. Sendo o vento, portanto um candidato a índice a ser usado como uma constante ao desenvolver parametrizações para estimar a clorofila do reservatório de Manso.

#### 4. Conclusões

A utilização do FA para este estudo se mostrou uma ferramenta útil para estudar a variabilidade de parâmetros de qualidade da água. Com o FA foi possível observar uma relação entre séries temporais de chl-a e campo de vento. Deste modo, o vento deve ser considerado na modelagem e/ou parametrizações de estimativas da chl-a no reservatório de Manso.

#### Referências Bibliográficas

- Assireu, A. T.; Lima, I. B. T.; Novo, E.M.L.M.; Roland, F.; Pacheco, F. S.; Alcântara, E.H.; Stech, J. L.; Lorenzetti, J.A.; Barros, N; Marani, L. Underflow suspension induced by the interplay between upwelling and Kelvin-Helmholtz instability in tropical Manso Reservoir, Brazil. **J. Geophys. Research**, Aceito pela revista, 2008.
- Assireu, A. T.; Stech, J. L.; Novo, E. M. L. M.; Lorenzetti, J. A.; Lima, I.B. T.; Carvalho, J. C. Aplicação do operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na comparação de dados coletados in situ por diferentes sensores e transmitidos pelos satélites brasileiros SCD e CBERS: um exemplo de aplicação ao Sistema de Monitoramento Ambiental (SIMA). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 2455-2462, 2005.
- Assireu, A. T.; Rosa, R. R.; Ramos, F. M.; Barbosa, E. B. M.; Vijaykumar, N. L., 2005. Análises de dados atmosféricos coletados pelos satélites CBERS e SCD a partir da técnica do padrão de gradientes. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3477-3486.
- Assireu, A.T., Rosa, R.R., Lorenzetti, J.A, Vijaykumar, N.L., Rempel, E.L., Ramos, F. M., Abreu de Sá, L.D., Bolzan, M.J.A. ,Zanandrea, A.Gradient Pattern Analysis of short nonstationary time séries: an application to lagrangian data from satellite tracked drifters. **Physica D: Nonlinear phenomena**, v.168, p. 397- 403, 2002.
- Calijuri, M.C.A. Estrutura fitoplanctônica em um reservatório tropical (Barra Bonita, SP).1999.197p. Tese (Doutorado de Livre-Docência) – Universidade de São Paulo (USP), São Carlos. 1999.

Camacho, A. On the occurrence and ecological features of deep chlorophyll maxima (DCM) in Spanish stratified lakes. **Limnetica**, v. 25, n.1-2, p. 453-478, 2006.

Cho, E.; Chon, T.-S. Application of wavelet analysis to ecological data. **Ecological Informatics**, p. 229-233, 2006.

Hylander, L.D., Gröhn J., Tropp M., Vikström A., Wolpher H., Castro e Silva E., Meilie M., Oliveira L.J. Fish mercury increase in Lago Manso, a new hydroelectric reservoir in tropical Brazil. **Journal of Environmental Management**, v.81, p.155-166, 2006.

Farge, M. Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence. **Ann. Rev. Fluid Mech.**, v. 24, n. 1, p. 395-457, 1992.

Fenel, K.; Boss, E. Subsurface maxima of phytoplankton and chlorophyll: Steadystate solutions from a simple model. **Limnol. Oceanogr**, v. 48, n. 4, p. 1521-1534, 2003.

Graps, A. An introduction to wavelets. **IEEE Computational Science and Engineering**, v.2, n.2, p. 50-61, 1995.

Jong, J.; Rooy, P. T. J. C.; Hosper, S. H. Living with water: at the crossroads of change. **Water Science Technology**. The Netherlands: Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, v. 8, p. 393-400, 1995.

Lorenzetti, J.A.; Stech, J.L.; Assireu, A.T.; Novo, E.M.L.; De Lima, I.B.T. SIMA: a near real buoy data acquisition and telemetry system as a support for limnological studies. In: Santos, M.A.; Rosa, L.P. (Ed.). **Global warming and hydroelectric reservoirs**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, Eletrobrás, 2005. p. 71-80.

Rosa, R. R., Campos, M.R., Ramos, F. M. Gradient pattern analysis of structural dynamics: application to molecular system relaxation. **Int. Journal of Modern Physics C**. v.33, n.3, p. 605-610, 2003.

Rosa, R. R.; Sharma, A. S.; Valdivia, J.A. Characterization of asymmetric fragmentation patterns in spatially extended systems. **Int. Journal of Modern Physics C**. v.10, n.1, p.147-163, 1999.

Rosa R.R., Sharma A.S., Valdivia J.A. Characterization of localized turbulence in plasma extended system. **Physica A**, v.257, p. 509-514, 1998.

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.