

## ANÁLISES DE DADOS ATMOSFÉRICOS COLETADOS PELOS SATÉLITES CBERS E SCD A PARTIR DA TÉCNICA DO PADRÃO DE GRADIENTES

Arcilan Trevenzoli Assireu<sup>1</sup>  
Reinaldo Roberto Rosa<sup>1</sup>  
Fernando Manuel Ramos<sup>1</sup>  
Eduardo Batista de Moraes Barbosa<sup>1</sup>  
Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Caixa Postal 515 -12201-970 – São José dos Campos – SP, Brasil  
arcilan@ltd.inpe.br  
Eduardo@cptec.inpe.br  
{reinaldo,fernando,vijay }@lac.inpe.br

**Abstract.** As part of a large limnological project, an autonomous data collection system has been installed at some natural and man-made water reservoirs in Brazil. This is a moored buoy where a special electronics and a suite of meteorological and water quality sensors is used to transmit in near real time the hourly collected data using the Brazilian satellites CBERS-2 and SCD 1/2. This paper discusses the application of the "Phase Space" and the "Gradient Pattern Analysis" methodologies to examine if are synoptic the atmospheric influence over two hydroelectric reservoir: Sera da Mesa (GO) and Manso (MT). Preliminary results indicated large-scale atmospheric process influencing simultaneously the two reservoir but local influences are important to small temporal scale process.

Palavras-chave: Operador de Fragmentação Assimétrica, Assymmetric Fragmentation Operator, Monitoramento Ambiental, Environmental monitoring, dados meteorológicos, meteorological data.

## **1. INTRODUÇÃO**

Nas últimas décadas têm-se observado um crescente interesse em aplicações das idéias advindas de pesquisas em sistemas dinâmicos complexos na investigação de sistemas geofísicos. Estas idéias incluem a noção geométrica da dimensão de correlação ou escalas, inicialmente utilizada em análises de atratores que surgem em sistemas matemáticos ou em experimentos controlados. A motivação central para estes estudos recai sobre a necessidade de se estimar a previsibilidade obtida a partir de métodos puramente determinísticos e da necessidade de um melhor entendimento da dinâmica envolvida nos processos, tendo em vista a proposição de modelos mais realistas. Mandelbrot (1975) foi um dos primeiros a sugerir que a compreensão da dinâmica associada a escoamentos turbulentos requeria considerações sobre as propriedades fractais do movimento. Desde então, vários estudos têm sido feitos no sentido de adequar e aplicar estas idéias em sistemas geofísicos.

Elsner & Tsonis (1993), Stepeller (1997), Tsonis & Elsner (1997) e Bauer & Brown (1992) baseados nesta linha de pesquisa, apresentam evidências experimentais de que o El Niño Southern Oscillation (ENSO) exhibe uma estrutura não linear, se comportando como um subsistema de um sistema caótico complexo. Fraedrich & Leslie (1989) e Fraedrich et al. (1990) basearam-se em dados de pressão para avaliar as trajetórias de ciclones no Pacífico Norte e Austrália. Os autores concluíram que a previsibilidade deste processo varia entre 3 e 5 dias no Pacífico Norte e entre 18 e 24 horas na região da Austrália o que, segundo eles, confirma o fato de que os modelos estocásticos podem ser importantes nas tentativas de previsões que ultrapassem estes intervalos. Os autores determinaram também uma lei de potência para o decaimento do espectro com a frequência. Brown & Smith (1989) investigaram padrões caóticos sobre trajetórias de derivadores lançados no Atlântico Norte. Os autores concluem que suas análises indicam que tais trajetórias são caóticas, porém não assumem o fato como consumado. Osborne et al. (1989) estudaram as propriedades de escala de três derivadores lançados na Corrente de Kuroshio. Os autores encontraram que para escalas espaciais entre 20 e 150 km e escala temporal entre 1,5 dias e uma semana, cada uma das trajetórias exhibe comportamento fractal com dimensão aproximadamente igual a 1,4.

Será apresentado neste trabalho um método que, por se basear em características geométricas de séries temporais e não nas propriedades estatísticas, permite a extração de informações robustas a partir de um número mínimo de nove pontos. Este método, que será apresentado em detalhes na próxima seção, foi aplicado sobre dados ambientais coletados em reservatórios hidrelétricos, e pôde-se observar sua importante potencialidade em permitir o monitoramento e comparação entre os dados de diferentes ambientes, em escala de 9 hs. Este artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 são descritos os dados e a metodologia utilizada. Na Seção 3 são apresentados e discutidos os resultados. Na Seção 4 são apresentadas as conclusões.

## **2. DADOS E MÉTODOS**

### **2.1 – Dados**

Os dados analisados neste trabalho são provenientes do Sistema de Monitoramento Ambiental (SIMA) instalados nos Reservatórios Hidrelétricos de Serra da Mesa e Manso, ambos localizados na região centro-oeste do Brasil. O SIMA é um sistema projetado para medir dados atmosféricos, limnológicos e dados relativos a hidrodinâmica dos reservatórios. Os dados coletados são transmitidos via satélite. Neste trabalho foram utilizados, como exemplo, séries temporais com incrementos horários de temperatura do ar, pressão atmosférica e umidade relativa

do ar, concomitantes e provenientes dos dois diferentes reservatórios supra-citados. Os dados foram tratados numa abordagem de espaço de fase como será discutido a seguir. Esta abordagem tem como vantagem a possibilidade de se condensar na mesma análise tanto a informação associada a intensidade da grandeza como a forma como esta grandeza evolui no tempo.

## 2.2 – Espaço de fase

De acordo com a teoria de sistemas dinâmicos, a melhor forma de estudar a dinâmica de um sistema é através do espaço de estado. O espaço de estado é um conjunto de coordenadas cujas variáveis que descrevem o sistema são estas coordenadas. Para cada passo de tempo o sistema pode ser representado por um ponto neste estado de espaço. A partir da conexão destes pontos uma trajetória que descreve a evolução do sistema é definida. Esta trajetória converge para um atrator, o qual descreve assintoticamente o estado final do sistema. O atrator pode ser uma estrutura topológica simples, como um ponto ou um ciclo limite, como pode ser também uma estrutura caracterizada por geometria fractal (veja por exemplo, Tsonis & Elsner, 1989). Se a descrição matemática de um sistema dinâmico é dada, o número de variáveis é conhecido e a geração do estado de espaço e do atrator é imediato. Se, no entanto, a formulação matemática de um sistema for desconhecida, o espaço de estado pode ser substituído pelo espaço de fase. O espaço de fase pode ser construído a partir dos dados observacionais de uma variável  $x(t)$  de um determinado sistema e seus sucessivos deslocamentos (Packard et al., 1980).

Assim, dada uma observação  $x(t)$ , é possível gerar o estado completo do vetor  $X(t)$  por usar  $x(t+\tau)$  como a primeira coordenada,  $x(t+2\tau)$  como a segunda coordenada e  $x(t+m\tau)$  como a última coordenada. Neste contexto,  $\tau$  é o intervalo ou o incremento dos dados. Como as grandezas utilizadas neste trabalho (temperatura, pressão e umidade relativa do ar) são todas escalares, foi feito o seguinte para que estas variáveis pudessem ser representadas num espaço de fase:

1) seja  $\alpha = \frac{\Delta G}{\Delta t}$ , onde  $G$  é a grandeza escalar em análise;

2) a fim de obter uma grandeza adimensional para  $\alpha$ , seja:  $\theta = \frac{\alpha}{\max(\alpha)}$ ;

3) Assumindo  $\theta$  (definido acima) como um equivalente de direção, pode-se definir as componentes de  $G$  como:

$$G_x = G \cos(\theta)$$

$$G_y = G \sin(\theta) \tag{1}$$

4) A partir de (1) pode-se construir a pseudo-trajetória que retrata a evolução temporal da dinâmica associada a grandeza em questão, a partir da adaptação da seguinte formulação (Emery & Thomson, 2001):

$$(x, y) = (G_{x0}, G_{y0}) + \sum (G_{xi}, G_{yi}), (i = 1, 2, \dots) \tag{2}$$

## 2.3 –Análise por Padrão de Gradientes

Segundo Mandelbrot (1991), um número útil para caracterizar fractais é a dimensão fractal. Esse número quantifica o grau de irregularidade ou de fragmentação de um conjunto geométrico, de uma figura ou de um objeto natural. Neste contexto nós aplicamos um operador baseado em Análises do Padrão de Gradiente (APG) introduzido por Rosa et al. (1998). Este operador propicia uma investigação da complexidade espaço-temporal contida na série temporal.

O Operador de Fragmentação Assimétrica 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 pressuposto adotado no desenvolvimento do GPA é o de que a complexidade de um padrão espacial é caracterizada pela sua

falta de simetria e pelo seu grau de fragmentação. Essas propriedades do padrão (falta de simetria e fragmentação) podem ser resumidas no Operador de Fragmentação Assimétrica (FA). Padrões simétricos apresentam valores de Fa iguais ou próximos a zero. A partir da análise de aproximadamente 200 simulações de padrões, Rosa et al. (1998) e Rosa et al. (1999) concluíram que o aumento de FA corresponde a um aumento da quantidade e da extensão de contornos e de estruturas finas em diferentes padrões. A Figura 1 ilustra os resultados das simulações de Rosa et al. (1998). Pode-se observar que à medida que o padrão espacial se torna mais complexo e que há um aumento da variabilidade de pequena escala, o valor de FA aumenta.

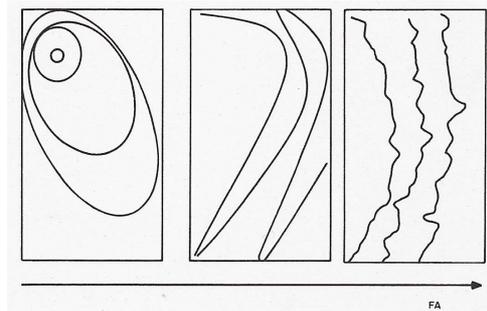


Figura 1 – Resposta teórica do FA à complexidade do padrão espacial  
Adaptado de Rosa et al. 1998.

Este operador (FA) propicia uma investigação da complexidade espaço-temporal contida na série espaço-temporal. A Técnica GPA foi originalmente desenvolvida para operar com matrizes. Assireu et al. (2002) apresentaram uma adaptação que possibilitou a aplicação desta técnica a séries espaço-temporais unidimensionais. Por não se basear em propriedades estatísticas da série, mas somente nas propriedades locais das simetrias do padrão gradiente, o método apresenta a importante propriedade de ser menos dependente do comprimento da série, quando comparado às técnicas estatísticas convencionais. Isto abre a possibilidade ao método de localizar, ao longo de séries unidimensionais, quais são as regiões com maior complexidade e instabilidades. Alguns detalhes sobre este método serão agora apresentados e maiores detalhes podem ser obtidos em Rosa et al. (1999) e Assireu et al. (2002).

A análise baseada no Fator de Assimetria (FA) do padrão de gradientes consiste em gerar campos vetoriais, a partir de matrizes numéricas (Figura 2). Por conveniência metodológica aplicada às estruturas complexas, os vetores simétricos são removidos e, portanto apenas os vetores assimétricos são mantidos. Pela análise da Figura 2 percebe-se que, embora a matriz relativa a Figura 2(c) corresponda a um processo mais complexo (mais irregular) quando comparado ao apresentado na Figura 2(b), a simples comparação entre o número de vetores oriundos do campo gradiente (V) e o número de vetores assimétricos (L) não permitiria uma separabilidade dos diferentes processos representados por estas matrizes. Devido a isto, há necessidade de uma segunda operação que permita distinguir entre estes campos gradientes.

Dada uma distribuição cartesiana P com p pontos, o processo de união destes pontos através de linhas usando como critério a necessidade dos vértices dos triângulos resultantes estarem sempre em conexão com estes pontos é conhecido como Triangulação de Delaunay (maiores detalhes vide Adelsbrunner, 1993). Também faz parte do critério o não cruzamento das linhas que unem os pontos (Figura 3). Note que agora é possível distinguir as matrizes, mesmo estas tendo iguais valores de V e L. O número de linhas (I) utilizado para unir, via triangulação de Delaunay, os centros de cada vetor, é diferente. Portanto, com a quantidade I é possível distinguir diferentes matrizes quanto a sua correspondência em termos de complexidade, já que I é diretamente

proporcional ao nível de desordem espacial (complexidade) do campo gradiente. O valor numérico utilizado para representar este campo de assimetria é:

$$FA=(I-L)/L, \quad (I \geq L > 0). \quad (3)$$

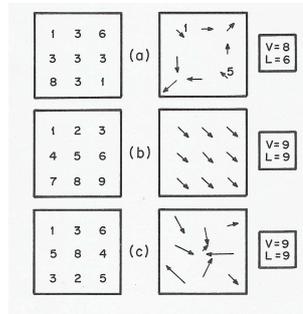


Figura 2 – Exemplo de matrizes representativas de campos vectoriais assimétricos. (a): seis vetores assimétricos (note que os vetores 1 e 5 são simétricos), (b) e (c): todos os vetores são assimétricos (Fonte: Rosa et al. (1999)).

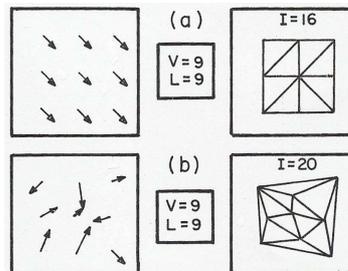


Figura 3 – Campo de triangulação para as matrizes (b) e (c) da Figura 2 (Fonte: Rosa et al. (1999)).

Como já comentado 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 unidimensionais, Assireu et al. (2002) fizeram a seguinte adaptação:

Cada nove pontos da série são convertidos em uma matriz 3x3 e o método é, desta forma, aplicado ao longo da série. Esta série pode ser, por exemplo, as componentes zonal e ou meridional de medidas de vento. Um valor de FA é obtido ao longo da série para cada nove pontos. A Figura 4 exemplifica o método. Um exemplo de uma série unidimensional com nove pontos (Figura 4(a)) que é convertida em uma matriz 3x3 (Figura 4(b)) e finalmente os campos de gradiente e de triangulação são gerados (Figura 4(c) e 4(d) respectivamente). 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. Por exemplo, uma série temporal com incremento de 1h resultaria em um valor de FA a cada 9hs.

### 3. Resultados

Valores de temperatura do ar, pressão atmosférica e umidade relativa do ar medida nos reservatórios hidrelétrica de Serra da Mesa (GO) e Manso (MT) foram comparados. A Tabela 1 traz os valores médios destes parâmetros e os respectivos desvios padrão (colunas 4 e 5). A partir da análise dos dados contidos nestas duas últimas colunas percebe-se que, considerando o intervalo de confiança, os parâmetros são estatisticamente idênticos entre os dois reservatórios.

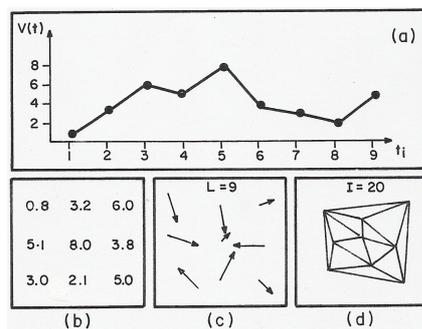


Figura 4 – (a) um típico padrão de variabilidade extraído de uma série relativa a uma variável genérica  $V(t)$ , (b) sua correspondente matriz; (c) correspondente campo gradiente (nove vetores assimétricos) e (d) campo de triangulação com 20 linhas conectoras (Fonte: Assireu et al. (2002)).

Observam-se variações significativas apenas nos dados de pressão atmosférica, o que está associado aos diferentes níveis de altitudes a que se encontram estes reservatórios (380m – Manso e 420m – Serra da Mesa). A segunda coluna da Tabela 1 traz os valores médios do parâmetro FA (como discutido na Seção 2.3), com os respectivos intervalos de confiança. Conforme apresentado na Seção 2.3, para cada nove pontos ao longo da série é obtido um valor de FA. Assim, os valores apresentados na coluna 2 da Tabela 1 representam os valores médios de FA estimados ao longo de toda a série. A exemplo do que foi verificado a partir dos valores médios dos parâmetros, o valor médio de FA (que dá indicação da complexidade média da série temporal), também não mostrou diferenças significativas entre os reservatórios. Os valores de mediana do FA (coluna 3 da Tabela 1) também apresentou esta tendência, a exceção para os valores referentes a temperatura, que indicou um padrão mais complexo deste parâmetro para Serra da Mesa em comparação com Manso. Estes resultados dão indicação de que, para os meses analisados, os regimes sinópticos (larga escala) e climatológicos atuam concomitantemente para ambos os reservatórios. Se as análises ficassem restritas nestas condições médias observadas, o leitor poderia ser levado a acreditar que exista uma universalidade nas forçantes atuantes sobre estes dois sistemas, e que, portanto, um mesmo modelo se aplicaria a ambos os ambientes. Porém, análises feitas em escala de 9hs indicam que a evolução temporal destes parâmetros é significativamente diferente, conforme será mostrado a seguir.

A Figura 5 traz exemplos de séries temporais analisadas neste trabalho. Estas séries, que representam medidas de umidade relativa (Fig. 5-a) e temperatura do ar (Fig. 5-b), mostram que devido à alta frequência, análises puramente visuais seriam inconsistentes e carregadas de elevado grau de subjetividade.

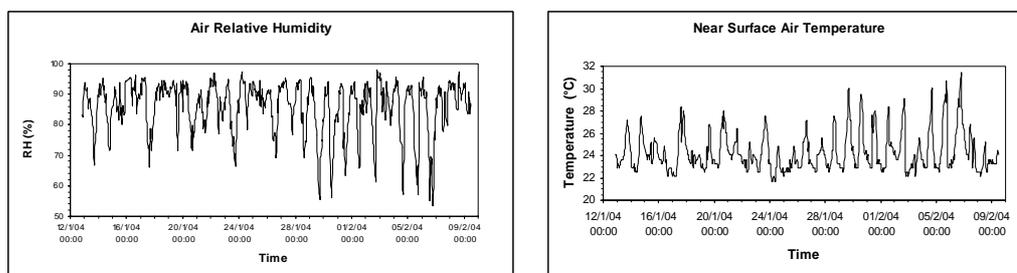


Figura 5 – Série temporal de dados de umidade relativa do ar (a) e de temperatura do ar (b) para o reservatório hidrelétrico de Serra da Mesa.

Tabela 1 – Valores médios do Fator de Assimetria (FA) com o respectivos intervalos de confiança, mediana do FA, valores médios e respectivos desvios padrão da umidade relativa, temperatura do ar e pressão atmosférica para os reservatórios hidrelétricos de Serra da Mesa e Manso.

	<Fa>	Mediana do FA	Valor médio do parâmetro	STD
<b>Umidade relativa - Manso</b>	1,076 +/- 0,023	1,111	87%	80%
<b>Umidade relativa - Serra da Mesa</b>	1,082 +/- 0,022	1,111	86%	72%
<b>Temperatura do ar - Manso</b>	1,037 +/- 0,034	1,000	25,3°C	3,83°C
<b>Temp. do ar - Serra da Mesa</b>	1,070 +/- 0,026	1,111	24,3°C	3,00°C
<b>Pressão - Manso</b>	1,068 +/- 0,024	1,111	976,85 mb	4,90 mb
<b>Pressão - Serra da Mesa</b>	1,044 +/- 0,033	1,111	962,13 mb	3,48 mb

Os resultados que serão agora apresentados e discutidos foram obtidos a partir da aplicação dos métodos apresentados nas Seções 2.2 e 2.3. A Figura 6 indica a evolução do grau de complexidade local (a cada 9hs) associado à dinâmica dos parâmetros analisados. A Figura foi montada de forma que, a evolução registrada em cada parâmetro nos diferentes reservatórios pudesse ser comparada. Assim, por exemplo, a Figura 6(a) traz o mapeamento da complexidade registrada ao longo da evolução da temperatura do ar no reservatório de Serra de Mesa. A Figura 6(b) é o equivalente à Figura 6(a), porém relativo ao reservatório de Manso. Os valores em azul, verde e vermelho, representam, respectivamente, valores associados a níveis de complexidade baixa(B), média(M) e alto (A). Pela análise das Figuras 6(a) e 6(b) percebe-se que os sinais estão razoavelmente em fase. Mas, pode-se concluir a partir destas figuras, que na escala de 9hs, apenas para um pequeno trecho (marcado com barras tracejadas) a evolução temporal da temperatura do ar foi regida por processos semelhantes em ambos os reservatórios. Note que no restante da série, nenhuma semelhança perceptível pôde ser observada em termos de complexidade indicada pelos valores de FA. Note que isto contrasta com os resultados indicados pelos valores médios apresentados na Tabela 1. Portanto, embora a condição média dos parâmetros ambientais, ditada pelos processos de larga escala, sejam semelhante nos reservatórios de Serra da Mesa e Manso, os processos em escala de 9h são regidos por sistemas independentes. Isto é uma indicação de que, se em larga escala modelos universais possam representar a dinâmica dos parâmetros ambientais neste dois reservatórios, em escalas menores, tais como 9hs, os modelos devem levar em conta as peculiaridades locais de cada um dos reservatórios. Estes resultados abrem a possibilidade de adaptação da conclusão de Ramos et al. (2004), os quais concluíram que um modelo universal de turbulência intermitente é muito difícil de ser definido ou pode até não existir em escoamentos sob influência de copas de árvores. Adaptando esta conclusão ao que mostramos, poder-se-ia chegar algo como: embora os parâmetros ambientais analisados tendam a ser muito influenciados por efeitos sinóticos e que, portanto atuariam simultaneamente nos dois sistemas, as influências locais não são negligenciáveis para as variabilidades observadas na escala de 9hs. Assim, tentativas de modelar estes parâmetros devem levar em conta as peculiaridades de cada reservatório.

Resultados idênticos foram observados tanto para os dados de pressão atmosférica quanto para os de umidade relativa do ar.

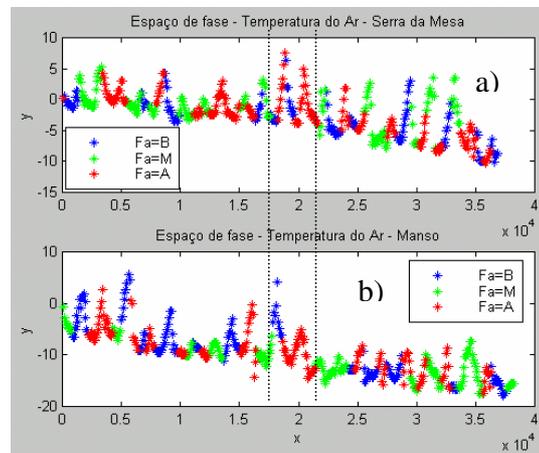


Figura 6 – Valores de FA ao longo da série de temperatura para os reservatórios de Serra da Mesa (a) e Manso (b). As linhas tracejadas indicam período de nível de complexidade similar.

#### 4. Considerações finais

Neste trabalho nós apresentamos técnicas baseadas em Análises do Padrão de Gradientes (APG) e em teorias de dinâmica de sistemas não lineares, as quais foram adaptadas para operarem com séries temporais. A análise apresentada permite comparações entre séries, com estas comparações podendo ser efetuadas a cada nove pontos, o que permite o acompanhamento local (em alta resolução temporal) da evolução relativa da dinâmica associada a processos. Até onde sabemos, não existe técnica similar que permita investigações desta natureza. Estas técnicas foram aplicadas sobre dados de pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, obtidas em dois reservatórios hidroelétricos: Serra da Mesa (GO) e Manso (MT). Os valores de FA (Fator de Assimetria) médio indicam que o regime em larga escala a que está submetido ambos os reservatórios é o mesmo, para estes parâmetros analisados. Isto foi confirmado também a partir da intercomparação dos valores médios de cada um destes parâmetros. Porém, a aplicação do FA Local sobre o espaço de fase reconstruído para cada um destes parâmetros indica que, na escala de 9hs, as instabilidades registradas são diferentes para cada reservatório. Isto é uma indicação de que, embora os parâmetros analisados tendam a ser muito influenciados por efeitos sinópticos e que, portanto atuariam simultaneamente nos dois sistemas, as influências locais não são negligenciáveis para as variabilidades observadas na escala de 9hs. Assim, tentativas de modelar estes parâmetros deveriam levar em conta este aspecto. Como trabalho futuro esta investigação estará sendo estendida a dados limnológicos, e se estará também variando o tamanho da janela de análises.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo financiamento ao Projeto que gerou os dados utilizados aqui.

#### Referências

Assireu, A.T., R. R Rosa, J. A. Lorenzetti, N. L. Vijaykumar, E. L. Rempel, F. M. Ramos, L. D. Abreu Sá, M. J. A . Bolzan and A. Zanandrea, 2002: Gradient pattern analysis of short

- nonstationary time series: an application to Lagrangian data from satellite tracked drifters. *Physica D*, **168-169C**, 397-403.
- Bauer, S. T. e M. B. Brown, 1992: Empirical low-order ENSO dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 2055-2058.
- Elsner, J. B. and A. A. Tsonis, 1993: Nonlinear dynamics established in the ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 213-216.
- Emery, W. J. e R. E. Thomson, 2001: Data analysis methods in physical oceanography. Elsevier, Amsterdam, 638 p.
- Fraedrich, k. e L. M. Leslie, 1990: Estimates of cyclone track predictability. II: Fractal analysis of mid-latitude cyclones. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **116**, 317-335.
- Mandelbrot, B. B., 1975: On the geometry of homogeneous turbulence, with stress on the fractal dimension of the iso-surfaces of scalars. *J. Fluid Mech.*, **72**, 401-416.
- Ramos, F.M., M. J. A. Bolzan, L. D. A. Sá, R. R. Rosa, 2004: Atmospheric turbulence within and above an Amazon forest. *Physica D*, **193**, 278-291.
- Rosa, R. R., A. S. Sharma e J. A. Valdivia, 1998: Characterization of Asymmetric Fragmentation Patterns in Spatially Extended Systems. *Journal of Modern Physics C*, **10(1)**, 147-163.
- Rosa, R. R., A. S. Sharma and J. A. Valdivia, 1999: Characterization of localized turbulence in plasma extended system. *Physica A*, **256**, 509-514.