

## Uso do operador de fragmentação assimétrica como caracterizador morfométrico de paisagens: cenário estático versus cenário dinâmico

Ramon Morais de Freitas <sup>1</sup>  
Arcilan Trevenzoli Assireu <sup>1</sup>  
Yosio Edemir Shimabukuro <sup>1</sup>  
Reinaldo Roberto Rosa <sup>2</sup>  
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo <sup>1</sup>  
José Luiz Stech <sup>1</sup>  
João Antonio Lorenzetti <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Divisão de Sensoriamento Remoto  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{ramon, arcilan, yosio, evlyn, stech, loren}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC)  
Núcleo para Simulação e Análise de Sistemas Complexos  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
reinaldo@lac.inpe.br

**Abstract.** We discuss in this paper the application of Assymmetric Amplitude Fragmentation Operator (FA) in the characterization of natural shapes. This analysis was carried out to reservoir contours derived from Landsat – TM data. Two possible schemes were assessment: static and dynamic scenarios. The first one presented the advantage of easier interpretation but high initial condition dependence. The dynamic scenario not depends of initial conditions but presents high computational cost.

**Palavras-chave:** Assymmetric Fragmentation Operator, Morphometrics, Reservoirs, Operador de Fragmentação Assimétrica, Morphometria, Reservatórios.

### 1. Introdução

Nas últimas décadas tem-se observado um crescente interesse em aplicações das teorias originadas em pesquisas de sistemas dinâmicos complexos na investigação de sistemas geofísicos. Na área de ecologia de paisagem existem várias métricas desenvolvidas a partir do conceito de complexidade que descrevem padrões espaciais. Tais padrões são fundamentais para a caracterização e a análise espacial de um ecossistema (McGarigal e Marks 1995; McGarigal, 2002). Segundo Mandelbrot (1991), um número útil para caracterizar a complexidade de um sistema 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. Rosa et al. (1998) propuseram um operador baseado em Análises do Padrão de Gradiente (APG) para estudos de sistemas complexos. Este operador propicia a investigação da complexidade espacial, temporal ou espaço-temporal que caracteriza o evento em estudo. A técnica APG foi originalmente desenvolvida para operar com matrizes. Assireu et al. (2002) apresentaram uma adaptação que possibilitou a aplicação desta técnica a séries unidimensionais. O método já foi testado para estudos envolvendo séries temporais e séries espaciais. (Assireu et al. 2005 a,b). Assireu et al. (2003 e 2004) propuseram a utilização do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) para a caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidroelétricos. O Operador FA é

uma técnica eficiente para caracterizar padrões de variabilidade espacial. Este método apresenta vantagens em relação ao método tradicional: o Índice de Desenvolvimento de Margens. Neste trabalho serão discutidas duas metodologias para a aplicação do operador FA no estudo do nível de complexidade em formas naturais. Os exemplos canônicos propostos para demonstração da metodologia foram os entornos dos reservatórios hidrelétricos de Serra da Mesa e Itumbiara.

## 2. Metodologia

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 representadas usando-se o 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). 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.

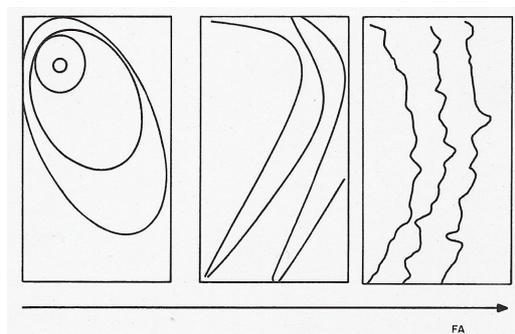


Figura 1 – Resposta teórica do FA à complexidade do padrão espacial. Adaptado de Rosa et al. 1998.

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. Assim, o método possibilita identificar, ao longo de entornos, quais as regiões que apresentam maior complexidade morfométrica. 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 (Fig. 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 a simples comparação entre o número de vetores oriundos do campo gradiente ( $V$ ) e o número de vetores assimétricos ( $L$ ) não permite a separabilidade dos diferentes processos representados por estas matrizes. Assim, há a

necessidade de uma segunda operação que permita distinguir entre estes campos gradientes. Esta operação consiste em conectar os pontos resultantes dos vetores assimétricos através da Triangulação de Delaunay (Adelsbrunner, 1993). A Figura 3 exemplifica esse procedimento.

Portanto, com a quantidade I (numero de conexões) 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 dado por:

$$FA=(I-L)/L, \quad (I \geq L > 0). \tag{1}$$

Em que, I é o número de conexões gerados pela triangulação de Delaunay e L o número de vetores assimétricos de um campo gradiente. O FA assume valores discretos no domínio de [0..2], sendo proporcional da matriz n.

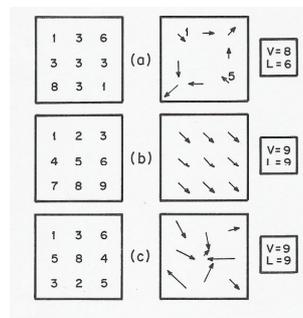


Figura 2 – Exemplo de matrizes representativas de campos vectoriais assimétricos. (a): seis vetores assimétricos (note que os vetores 1 e 5 são simétricos), (b) e (c): todos os vetores são assimétricos (Fonte: Rosa et al. (1999)).

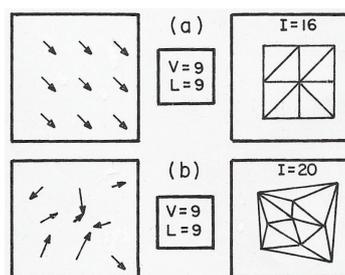


Figura 3 – Campo de triangulação para as matrizes (b) e (c) da Figura 2 (Fonte: Rosa et al. (1999)).

O cálculo do FA foi originalmente desenvolvido para tratar campos bidimensionais representados através de matrizes numéricas. Com o intuito de estender a aplicabilidade do método Assireu et al. (2002) fizeram a adaptação do método para aplicação em séries temporais. Conforme descrito no exemplo canônico a seguir:

Dada uma série unidimensional qualquer, para nove pontos da série são convertidos em uma matriz 3x3 e então o FA pode ser calculado para série. Esta série pode ser, por exemplo, a

componente x ou y do entorno de reservatórios. Um valor de FA é gerado para cada nove pontos, e, no Cenário estático, este valor é atribuído a cada um dos respectivos nove pontos para efeito de segmentação. A Figura 4 exemplifica o método. Um exemplo de uma série unidimensional com nove pontos (Fig. 4(a)) que é convertida em uma matriz 3x3 (Fig. 4(b)) e finalmente os campos de gradiente e de triangulação são gerados (Fig. 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, o entorno de um reservatório obtido a partir de uma imagem Landsat em resolução de 20 m, gera um índice (FA) a cada 180m ao longo do entorno.

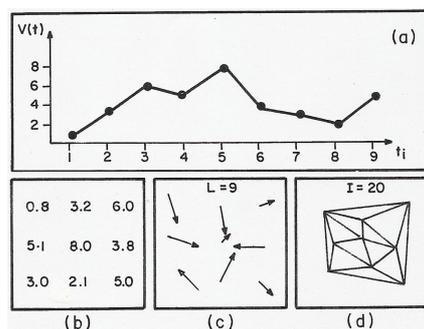


Figura 4 – (a) um típico padrão de variabilidade extraído de uma série relativa a uma variável genérica  $V(t)$ , (b) sua correspondente matriz; (c) correspondente campo gradiente (nove vetores assimétricos) e (d) campo de triangulação com 20 linhas conectoras (Fonte: Assireu et al. (2002)).

Neste trabalho são comparadas duas formas de utilizar este método em sua versão local. Numa, as sucessivas matrizes são constituídas de elementos independentes entre si, de forma que a janela móvel corre sobre cada nove elementos distintos ao longo do processo, chamado aqui de Cenário Estático. Neste método cada nove pontos respondem por um valor de FA sem influência dos demais pontos vizinhos. Na outra possibilidade, a janela “aproveita” os oito últimos pontos da janela anterior e, portanto, é atualizado apenas um ponto ao longo da janela. Note que isto induz uma situação de memória no sistema, de forma que o regime da janela anterior terá influência na posterior. A esta forma de aplicação do FA dá-se o nome de Cenário Dinâmico.

Para a determinação dos entornos dos reservatórios foram utilizadas imagens digitais do sensor TM-Landsat. Dada que a forma de um reservatório pode ser representada por um vetor cuja complexidade traduz seus diferentes padrões espaciais. O FA foi aplicado ao vetor descritor da superfície alagada dos Reservatórios de Serra da Mesa e Itumbiara o que permitiu classificar o entorno destes reservatórios segundo diferentes níveis de complexidade geomorfológica.

Os valores de FA foram obtidos a partir dos dados do entorno filtrados por um filtro do tipo média móvel de 10 pontos. Este procedimento elimina as altas frequências, minimiza a subjetividade associada ao procedimento de digitalização e assegura uma amostragem mutuamente independente. Para concentrar as análises em apenas uma das componentes direcionais do reservatório, foi efetuada uma rotação do eixo segundo a direção de máxima variância da distribuição.

### 3. Resultados e Discussão

As Figuras 5 a e b mostram as feições morfométricas dos reservatórios de Serra da Mesa e Itumbiara.

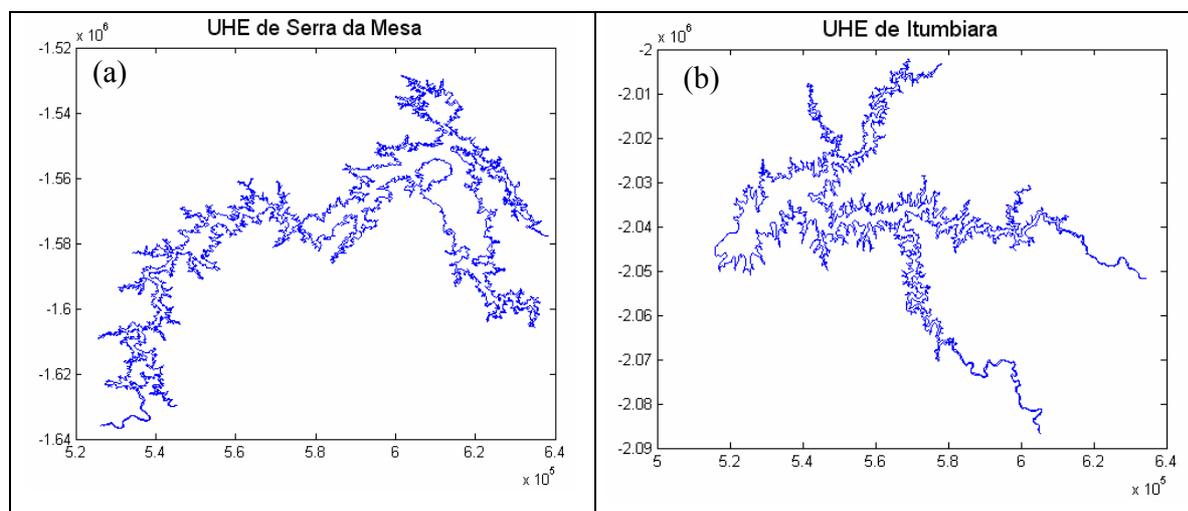


Figura 5 – Entorno correspondente as UHEs de Serra da Mesa (a) e Itumbiara(b).

O resultado da aplicação do FA Local na versão Cenário Estático (FAE) é apresentado na Figura 6. Um dos problemas mais questionáveis em termos da aplicação do FAE é a sua forte dependência às condições iniciais. Assim, os resultados a partir das análises pelo FAE mudam significativamente dependendo do ponto inicial utilizado no processo de formação das matrizes. As Figuras 6 mostram os resultados da aplicação para o método nos dois UHEs com condições iniciais ligeiramente diferentes. A discussão que segue será centrada no caso da UHE de Serra da Mesa (Fig. 6 a e b), mas, a partir de inspeção visual, vê-se que são extensíveis também para o caso da UHE de Itumbiara (Fig. 6 c,d). As setas 1 e 2 indicam esta forte resposta do método FAE à condição inicial onde ocorreram transições de regime de alta complexidade para baixa e de baixa para média complexidade, respectivamente. Como uma alternativa a esta dependência da condição inicial propõe-se neste trabalho um abordagem chamada de Cenário Dinâmico (FAD), onde em cada janela 3x3 são considerados os oito últimos pontos da janela anterior. Assim, neste cenário, estar-se-ia investigando o potencial do ponto em questão alterar o FA. Os resultados da aplicação do FAD sobre os entornos dos dois reservatórios em estudo estão na Figura 7. Os resultados indicam que este método apresentou menor sensibilidade a condições iniciais, porém, conforme pode ser visto na Figura 7, a interpretação é dificultada pelo elevado nível de variabilidades dos FAs ao longo do entorno.

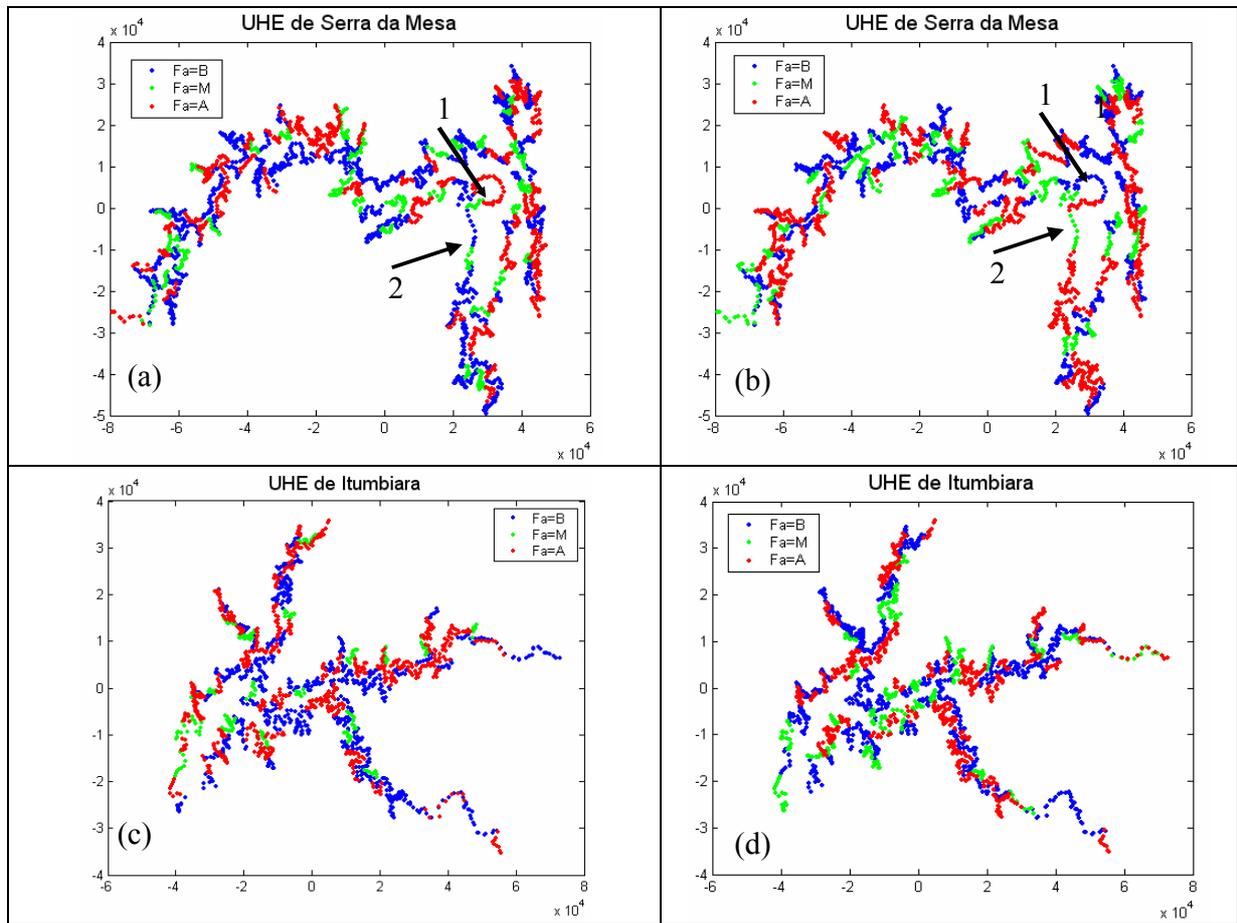


Figura 6 – Aplicação do FA local na versão Cenário Estático e sua resposta a mudanças na condição inicial.

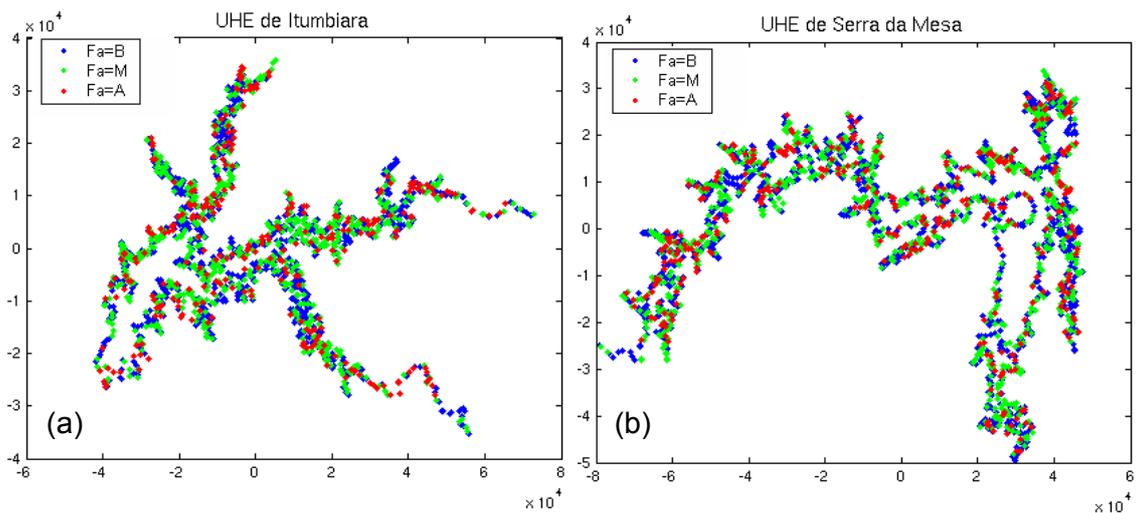


Figura 7 – Aplicação do FA local na versão Cenário Dinâmico. a) Itumbiara e b) Serra da Mesa

Uma alternativa para visualização do FAD é a espacialização dos valores de FAs extremos. Na Figura 8 é possível observar as regiões de menores e maiores complexidade dos reservatórios. Neste contexto a aplicação do FAD pode ser interessante para correlacionar padrões espaciais de complexidade com as variáveis ambientais. Porém ressalta-se que o tempo computacional no cenário dinâmico (FAD) é bem maior que o cenário estático (FAE), uma vez que o FA é calculado a partir de todos os pontos.

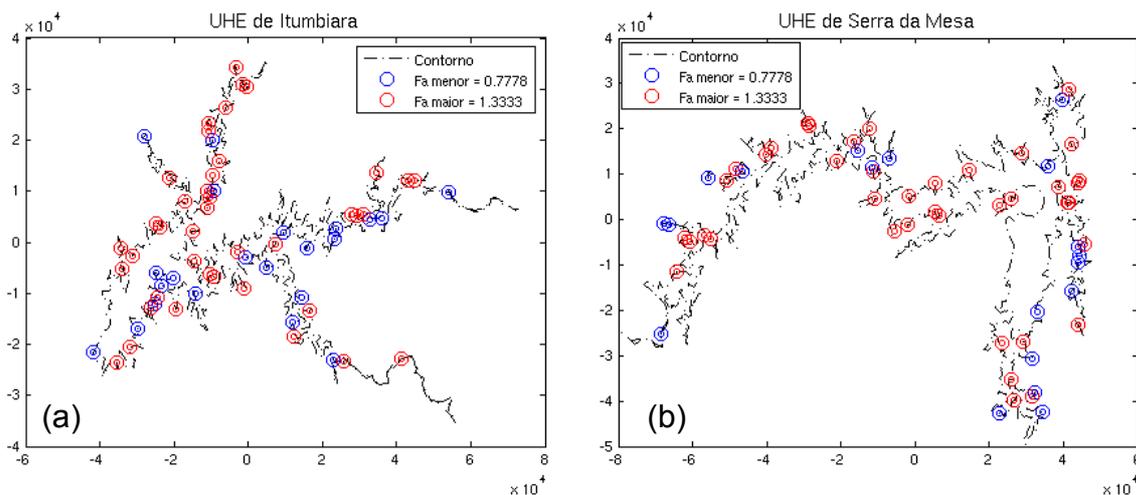


Figura 8 – Pontos extremos de complexidade espacial calculados a partir do FAD. a) Itumbiara e b) Serra da Mesa

### 3. Conclusão

A utilização do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) como quantificador de padrões morfométricos em alta resolução pode ser muito útil na caracterização de feições em escalas mais finas. Pelo fato deste operador levar em conta propriedades geométricas do conjunto dos dados em detrimento a propriedades estatísticas, este método apresenta-se como uma alternativa aos tratamentos estatísticos convencionais que são muito pouco robustos quando se trata de número de dados reduzidos, e, portanto, em análises de alta resolução. Isso sugere a potencialidade do FA como caracterizador morfométrico de paisagens. Porém, testes preliminares com as duas formas usuais deste operador, Cenário Estático e Cenário Dinâmico, indicam que melhorias ainda precisam ser feitas para contornar os problemas levantados neste trabalho: forte dependência às condições iniciais do Cenário Estático e difícil interpretação dos resultados no Cenário Dinâmico devido a grande variabilidade quando do processo de fatiamento.

### Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela disponibilidade das imagens Landsat-TM, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq processo 132140/2005-5.

### Referências

Adelsbrunner H. 1993. **Handbook of Convex Geometry** (eds.) P. M. Gruber and J. M. Wills (Elsevier Science Publishers, 1993), 230pp.

- Assireu, A. T., Rosa, R. R., Vijaykumar, N. L., Lorenzetti, J. A., Rempel, E. L., Ramos, F.M., Abreu, L. D.; Bolzan, M. J. A., Zanandrea, A. Gradient pattern analysis of short nonstationary time series: an application to lagrangian data from satellite tracked drifters. **Physical D: Nonlinear Phenomena**, v. 168-169, p. 397-403, Aug. 2002.
- Assireu, A.T. ; Novo, E.M.L.M. ; Lorenzetti, J.A. ; Braga, C.Z.F. ; Lima, I.B.T. ; Stech, J.L. . Aplicação do operador de fragmentação assimétrica (FA) na caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidrelétricos. 2003.
- Assireu, A. T.; J. A. Lorenzetti; E. M. L. M. Novo; J. L. Stech; C. Z. F. Braga; I. B. T. Lima. Aplicação do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidroelétricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4. 2004.
- 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). **Anais**. In. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Artigos, p. 3477-3486. 2005a, Goiânia. CDROM.
- Assireu, A. T. ; Rosa, R. R. ; Ramos, F. M. ; Barbosa, E. B. M. ; Vijaykumar, N. L. . Análises de dados atmosféricos coletados pelos satélites CBERS e SCD a partir da técnica do padrão de Gradientes. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiania. **Anais**. In. do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. v. 1. p. 3477-3485. 2005b. CDROM.
- Mandelbrot, B. **Objectos Fractais**. Lisboa: Gradiva, 1991.
- McGarigal, K., and B. J. Marks. **FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure**. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-351. 1995.
- McGarigal, K. **Landscape pattern metrics**. in A. H. El-Shaarawi and W. W. Piegorsch, eds. **Encyclopedia of Environmentrics** Volume 2: 1135-1142. John Wiley & Sons, Sussex, England. P. 1135-1142 2002.
- Rosa, R. R., A. S. Sharma e J. A. Valdivia., Characterization of Asymmetric Fragmentation Patterns in Spatially Extended Systems. **Journal of Modern Physics C**, 10(1), 147-163. 1998.
- Rosa, R. R., A. S. Sharma and J. A. Valdivia, Characterization of localized turbulence in plasma extended system. **Physica A**, **256**, 509-514. 1999.
- Rosa, R. R.; Campos, M. R.; Vijaykumar, N. L.; Fujiwara, S.; Sato, O. T. Gradient pattern analysis of structural dynamics: Application to molecular system relaxation. **Brazilian journal of physics**, v. 33, n. 3, p. 605-610, Sep. 2003.