

## 1 Introdução

O suprimento energético do Brasil se concentra basicamente na hidreletricidade. Segundo Müller (1996) a produção constante de energia depende de dois elementos essenciais: 1) um reservatório de acumulação capaz de reter águas no período chuvoso para uso no período de estiagem; 2) um sistema de controle, nas turbinas, para ajustar o caudal às demandas de energia.

A área do reservatório representa a superfície do terreno inundada pelo represamento da água de um rio, na cota correspondente ao nível máximo de operação. Os reservatórios se caracterizam pela superfície inundada e pela capacidade de geração de energia. A capacidade de um reservatório depende do volume ativo de água, que é definido pelos níveis máximos e mínimos operativos. Os fatores que favorecem ou dificultam o aproveitamento hidrelétrico são controlados pelas características fisiográficas de uma dada região, uma vez que estas determinam a vazão do rio (velocidade de escoamento da água) e a altura de queda da água. A morfometria e o substrato geológico das bacias que contêm os reservatórios são fatores determinantes nas interações entre os ecossistemas terrestres e aquáticos, que influenciam na qualidade de suas águas. A geomorfologia das bacias se reflete nos eventos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos reservatórios formados em seu interior.

Um dos parâmetros mais utilizados em Limnologia para descrever a morfometria dos corpos d'água é o índice D, de desenvolvimento das margens (Wetzel, 1975). Esse índice representa a razão entre o perímetro do corpo d'água (L) em relação ao comprimento da circunferência de um círculo com área equivalente à do corpo d'água.

Reservatórios circulares tendem a ter valores próximos a 1, enquanto que lagos alongados, ou com padrão dendrítico tendem a ter valores que se distanciam de 1. Quanto maior o índice de desenvolvimento das margens, maior é a probabilidade de desenvolvimento de

comunidades litorâneas e de interferência da bacia de captação imediata nas propriedades locais do corpo d'água.

Os valores de D, entretanto, são descritores muito simplificados da complexidade dos padrões espaciais dos reservatórios; complexidade essa derivada da interação entre o projeto de engenharia adotado (altura entre a fundação e crista; comprimento de crista, volume) e as características topográficas das bacias hidrográficas em que eles se inserem.

As bacias de drenagem se diferenciam em função dos padrões de drenagem (Christofolletti, 1986), os quais são influenciados pela: natureza das rochas (disposição e resistência das diferentes litologias), declividade, amplitude altimétrica e história geológica e geomorfológica local.

Sob o ponto de vista puramente geométrico, os padrões de drenagem podem ser classificados em: dendrítico (típico de regiões de estruturas sedimentares horizontais com rochas de resistência uniforme); treliça (típico de rios principais conseqüentes com afluentes subseqüentes, obseqüentes e resseqüentes (Christofolletti, 1986); paralelo (típico de regiões com forte controle estrutural e vertentes íngremes); radial (centrífuga, com rios conseqüentes divergentes a partir do interflúvio e centrípeta, com rios convergentes típicos de depressões topográficas).

Além de se diferenciarem quanto ao padrão geométrico, as bacias também se diferenciam numericamente no tocante à densidade de drenagem, relação de bifurcação, gradiente, índice de forma da bacia, coeficiente de manutenção, amplitude altimétrica, coeficiente orográfico, relação de relevo e índice de rugosidade (Christofolletti, 1986).

Como conseqüência dessa complexidade das bacias, o represamento de um rio pode resultar em lagos de formas e complexidade variáveis em diversas escalas. Essa complexidade, teoricamente, pode ser traduzida, em termos numéricos através de índices derivados de métodos de análise de padrões de gradientes (Gradient Pattern Analyses) introduzidos por Rosa et al. (1998).

Neste contexto, o objetivo desse estudo é o de avaliar o uso dos métodos de análise de gradiente, particularmente, o Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na caracterização das propriedades morfométricas dos reservatórios hidrelétricos brasileiros.

## **2 A Hidrografia Brasileira e seu Potencial Hidrelétrico**

Os rios do Brasil, sob o ponto de vista fisiográfico, podem ser classificados em rios de planície e baixos platôs e rios de planalto. Os primeiros, via de regra, possuem um perfil longitudinal de baixo gradiente, isto é com pequeno desnível entre as nascentes e a barragem. Possuem poucas corredeiras e cachoeiras de modo que a velocidade do escoamento da água é basicamente função de seu volume, e, portanto, da dimensão da bacia de captação e do regime pluviométrico regional.

Os rios de planalto, por sua vez, apresentam grandes desníveis entre as nascentes e as barragens, e possuem grande potencial hidráulico. No Brasil a Bacia do Paraná e seus afluentes, Parnaíba, Grande, Tietê, Paranapanema e Iguaçu, apresentam desníveis superiores a 1000 m. Outros importantes rios de planalto são o Tocantins-Araguaia e o São Francisco, cujos desníveis das nascentes à foz também se encontram entorno de 1000 m.

As características topográficas e altimétricas controlam, portanto, o potencial hidrelétrico de uma dada bacia hidrográfica (Müller, 1996). O rio Amazonas e todos os seus afluentes possuem uma vazão média anual de 250 mil  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  e um potencial hidrelétrico de  $54 \times 10^6$   $\text{kW ano}^{-1}$ . O rio Paraná, em Itaipu, tem uma vazão em torno de apenas 9 mil  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  (27 vezes menor) com um potencial hidrelétrico de cerca de  $30 \times 10^6$   $\text{kW ano}^{-1}$  (apenas 1,8 vezes menor). Essa variabilidade regional faz com que o impacto ambiental dos diferentes reservatórios hidrelétricos varie amplamente. Recentemente, uma série de índices tem sido propostos para avaliar o impacto ambiental de uma barragem. Dentre esses índices, um dos mais utilizados é a relação potência/área inundada.

A Tabela 1 apresenta esse índice para alguns reservatórios brasileiros cuja superfície alagada é superior a  $100 \text{ km}^2$ .

A análise da tabela 1 mostra claramente que a eficiência hidráulica dos reservatórios de rios de planaltos é muito maior. A produção por Balbina de um mW de energia demandou a inundação de 9 km<sup>2</sup>, enquanto que para Itaipu, apenas 0,11 km<sup>2</sup> foram “sacrificados” à produção de energia.

TABELA 1 – Razão área inundada/potência instalada.

Usina	Área Alagada (km <sup>2</sup> )	Volume (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Potência mW	Índice Área/Potência
Sobradinho	4214	34 100	1 050	4,01
Balbina	2360	17 500	250	9,44
Itaipu	1350	29 000	12 600	0,11

FONTE: Adaptada de Muller. (1996).

Dessas considerações preliminares fica evidente que os aspectos geométricos dos reservatórios são fundamentais na previsão de seus impactos ambientais, e que novas ferramentas de análise são necessárias para melhorar essa avaliação.

No Brasil, até o ano de 2000, existiam 124 aproveitamentos hidráulicos destinados à geração de energia elétrica. Em 2000, foi elaborado um projeto de cooperação técnico-científica entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) com o objetivo de mapear a Área Inundada de 124 reservatórios através de Imagens do sensor Thematic Mapper do Satélite LANDSAT-5 (TM-Landsat) como subsídio à fiscalização da compensação financeira dos municípios. Como sub-produto desse projeto foi organizado um banco de dados que permitiu gerar para cada reservatório informação vetorial sobre o perímetro e a área do reservatório bem como sua localização geográfica associada às diferentes bacias hidrográficas.

Devido à necessidade de se ampliar o conhecimento sobre as características morfométricas dos reservatórios e sua relação com as propriedades limnológicas, propõe-se neste estudo testar a viabilidade de se utilizar o Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) para caracterizar as propriedades morfométricas dos reservatórios hidrelétricos e seus controles geomorfológicos. A Figura 1 mostra a distribuição espacial dos reservatórios submetidos à análise.



### 3 Fundamentação Teórica

O Operador de Fragmentação Assimétrica é uma técnica eficiente para caracterizar padrões de variabilidade espacial e faz parte do método de análise de padrões de gradientes (Gradient Pattern Analysis- GPA) introduzido por Rosa et al. (1998).

O pressuposto adotado no desenvolvimento do GPA é que a complexidade de um padrão espacial seja caracterizada pela sua falta de simetria e pelo seu grau de fragmentação. Para maiores detalhes sobre o método e seu formalismo matemático consultar Rosa et al. (1998) e Rosa et al. (1999). 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) concluíram que o aumento de FA corresponde a um aumento da quantidade e da extensão de contornos e de estruturas finas. A Figura 2 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.

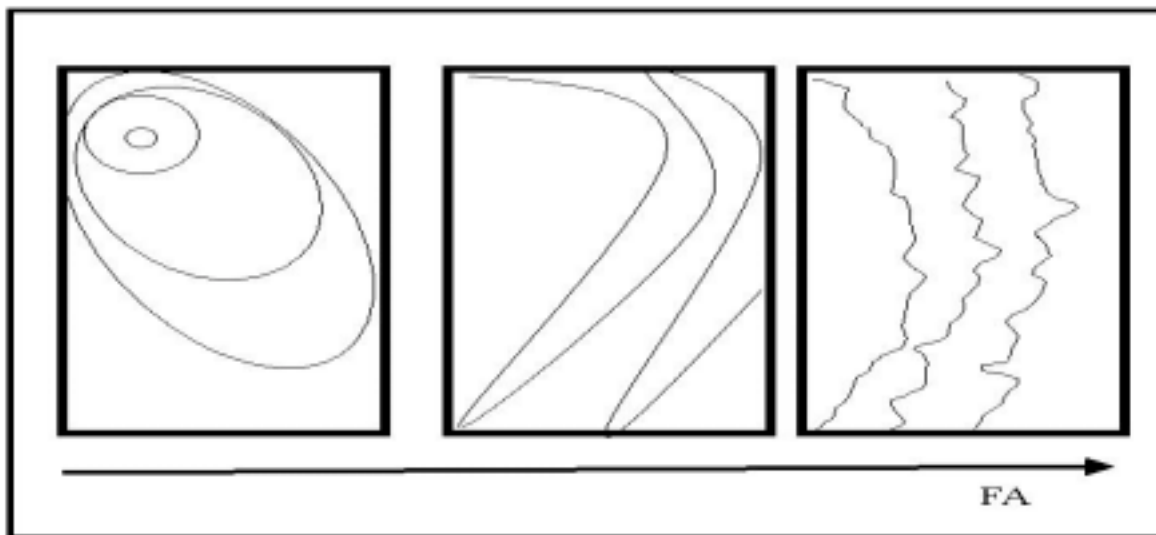


FIGURA 2 – Resposta teórica do FA à complexidade do padrão espacial.

FONTE: Adaptada de Rosa et al. (1998).

O método do GPA foi desenvolvido por Rosa et al. (1998) para a manipulação de matrizes. Assireu et al. (2002) adaptaram o método de forma a possibilitar a análise de séries unidimensionais. A nova abordagem foi testada na análise de séries temporais de velocidade de vento de regime puramente turbulento, séries temporais de regime não-estacionário e séries de velocidade Lagrangiana obtidas a partir de bóias de deriva. Os resultados demonstraram ser possível utilizar os valores de FA para discriminar os diferentes tipos de séries temporais. Os autores também propuseram a transformação logarítmica dos valores de FA como estratégia de ampliar sua sensibilidade aos diferentes tipos de regime de velocidade das bóias de deriva.

#### **4 Metodologia**

Tendo em vista que a forma de um reservatório pode ser representada por um vetor cuja complexidade traduz seus diferentes padrões espaciais, o método GPA foi aplicado a dados vetoriais disponíveis para 124 reservatórios hidrelétricos. A tabela 2 resume o tamanho médio dos reservatórios dos principais rios brasileiros. A superfície alagada pelos reservatórios foi determinada a partir de imagens digitais do sensor TM-Landsat.

O primeiro passo do trabalho consistiu na obtenção de uma matriz de dados com a distribuição de reservatórios por bacias hidrográficas e seu posicionamento ao longo dos rios. A Figura 3 mostra um exemplo de informação disponível para a análise no banco de dados construído durante a execução do projeto. Esse banco de dados é composto pelos seguintes tipos de informação: a) fornecidas pelo IBGE: Hidrografia (rios permanentes, temporários e áreas inundáveis), Divisão Estadual, Divisão Municipal, Estradas, Delimitação das Bacias Hidrográficas Brasileiras, Delimitação das Sub Bacias Hidrográficas Brasileiras; b) extraídas das imagens TM/Landsat: dados vetoriais e temáticos dos 124 reservatórios mapeados; c) dados fornecidos pela ANEEL: dados cadastrais com a localização dos reservatórios e nome do empreendimento.





FIGURA 3 – Reservatório de Porto Primavera no Rio Paraná e de Rosana no Rio Paranapanema (Bacia do Rio Paraná).

Com base nesse banco de dados foi possível determinar a distribuição de reservatórios ao longo de um rio ou sub-bacia hidrográfica (Tabela 3).

TABELA 2 – Área média dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

<b>BACIA HIDROGRÁFICA</b>	<b>ÁREA ( Km2 )</b>
<b>Atlântico Sudeste</b>	
<i>Média</i>	3,23
<i>Coeficiente de Variação</i>	148,65
<b>Rio Paranapanema</b>	
<i>Média</i>	162,05
<i>Coeficiente de Variação</i>	115,96
<b>Rio Iguaçu</b>	
<i>Média</i>	73,07
<i>Coeficiente de Variação</i>	105,62
<b>Rio Grande</b>	
<i>Média</i>	120,16
<i>Coeficiente de Variação</i>	179,90
<b>Bacia Lagunar (RS)</b>	
<i>Média</i>	52,46
<i>Coeficiente de Variação</i>	188,47
<b>Rio Paraná (canal principal)</b>	
<i>Média</i>	1429,19
<i>Coeficiente de Variação</i>	78,37

(continua)

TABELA 2 – Continuação.

<b>BACIA HIDROGRÁFICA</b>	<b>ÁREA ( Km2 )</b>
<b>Rio Parnaíba</b>	
<i>Média</i>	351,60
<i>Coeficiente de Variação</i>	83,40
<b>Rio Doce</b>	
<i>Média</i>	3,18
<i>Coeficiente de Variação</i>	76,89
<b>Rio São Francisco</b>	
<i>Média</i>	813,38
<i>Coeficiente de Variação</i>	185,00
<b>Rio Paraíba do Sul</b>	
<i>Média</i>	28,05
<i>Coeficiente de Variação</i>	192,28
<b>Rio Tocantins</b>	
<i>Média</i>	1070,48
<i>Coeficiente de Variação</i>	132,93
<b>Rio Amazonas</b>	
<i>Média</i>	1738,11
<i>Coeficiente de Variação</i>	135,39

TABELA 3 – Relação de Reservatórios por Bacia Hidrográfica.

<b>Reservatório</b>	<b>Bacia do Rio São Francisco</b>
Gafanhoto	Alto São Francisco
Itaparica	Médio São Francisco
Moxotó	Médio São Francisco
Paulo Afonso I II III	Médio São Francisco
Paulo Afonso IV	Médio São Francisco
Sobradinho	Médio São Francisco
Três Marias	Alto São Francisco
Xingó	Baixo São Francisco

Paralelamente à classificação dos reservatórios por bacia hidrográfica, aplicou-se o operador de Fragmentação Assimétrica aos dados vetoriais representativos da forma de cada reservatório. Devido à grande amplitude de variação no tamanho dos reservatórios, foram adotadas duas estratégias de cálculo do FA médio. Reservatórios grandes, com séries longas em relação à fragmentação foram submetidos a um filtro média de 10 pontos, para evitar a saturação dos valores de FA; os reservatórios não sujeitos a essa restrição não foram submetidos à filtragem.

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.

A Figura 4 ilustra o efeito da aplicação do filtro e da rotação sobre os eixos segundo a direção de máxima variância.

Os valores médios de FA para cada reservatório foram então convertidos para a escala decibel  $\{10\log_{10}(FA)\}$ . Segundo Assireu et al. (2002) uma melhor distinção dos padrões espaciais pode ser obtida ao se considerar os valores de FA em escala decibel. Esta transformação é importante porque o desvio padrão dos FA médios é da ordem de 0,002, o que torna um valor de FA igual a 1000, por exemplo, significativamente diferente do valor de FA igual a 1005. Este fato confere grande sensibilidade ao FA, fazendo desse operador um eficiente método de distinção de feições. A transformação para a escala decimal amplifica essa distinção.

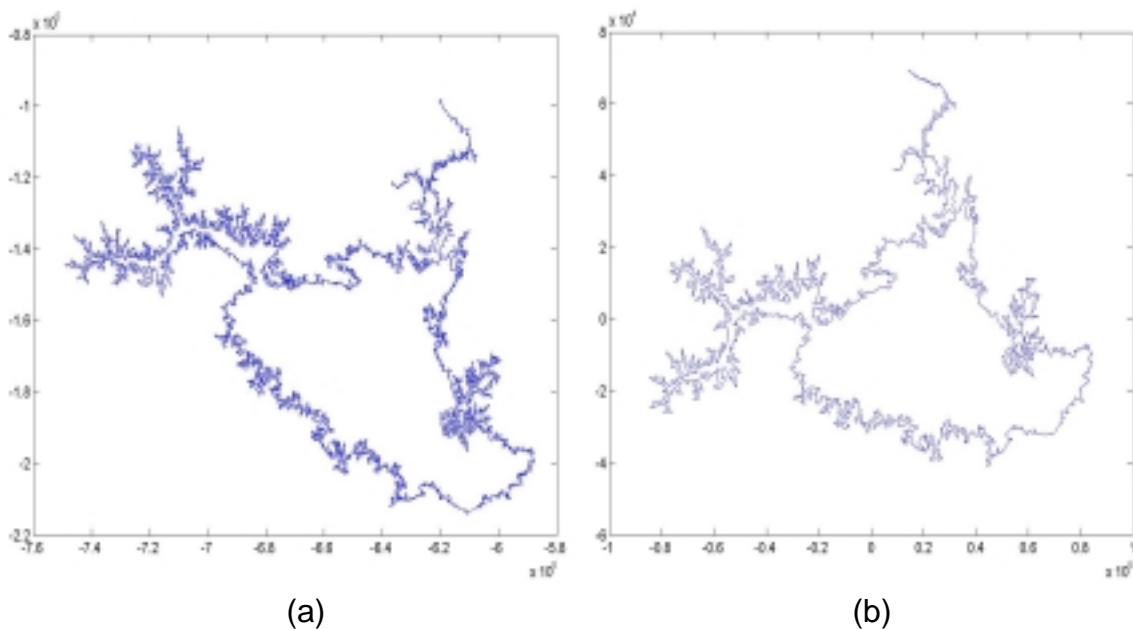


FIGURA 4 – (a) Contorno relativo ao Reservatório de Balbina; (b) como em (a) porém após a rotação dos eixos segundo a direção de máxima variância e aplicação de um filtro do tipo média de 10 pontos.

## 5 O Efeito da Bacia Hidrográfica sobre o FA dos Reservatórios Hidrelétricos

A Tabela 4 resume os valores médios de FA e D para os reservatórios agrupados por bacias hidrográficas.

Um aspecto que chama a atenção na análise desses dados é o aumento do CV de FA dos reservatórios em cerca de 54 % das bacias hidrográficas em relação ao CV de D.

Esse efeito é observado nas bacias do Atlântico Sudeste, dos rios Iguaçu, Tietê, Grande, Parnaíba, Doce e Tocantins. O caso mais crítico ocorre na bacia do Rio Tocantins, onde o coeficiente de variação dos valores de FA dos 4 reservatórios nela localizados é superior a 1000%, enquanto o coeficiente de variação de D é de apenas 60,6 %. Isto significa que o FA está captando variações internas nos padrões dos reservatórios não perceptíveis pelo índice de desenvolvimento das margens.

TABELA 4 – Média e coeficiente de variação (CV) de D e FA de reservatórios hidrelétricos agrupados por bacias hidrográficas.

BACIA HIDROGRÁFICA	D		FA(médio) (db)	
	Média	Coeficiente de Variação	Média	Coeficiente de Variação
<b>Atlântico Sudeste</b>	6,35	53,40	0,20	131,41
<b>Rio Tiete</b>	8,97	48,61	0,21	54,45
<b>Rio Paranapanema</b>	8,88	51,52	0,3	38,49
<b>Rio Iguaçu</b>	10,36	45,91	0,24	47,17
<b>Rio Grande</b>	7,23	58,88	0,19	73,56
<b>Bacia Lagunar (RS)</b>	7,64	61,74	0,27	57,43
<b>Rio Paraná (canal principal)</b>	16	61,58	0,13	58,07
<b>Rio Parnaíba</b>	16,34	27,32	0,27	89,99
<b>Rio Doce</b>	6,02	27,50	0,12	77,18
<b>Rio São Francisco</b>	8,95	73,04	0,24	65,14
<b>Rio Paraíba do Sul</b>	10,34	80,00	0,28	62,87
<b>Rio Tocantins</b>	18,45	60,67	0,02	1549,75
<b>Rio Amazonas</b>	18,93	42,51	0,23	28,08

A análise dos fatores que explicam essa grande dispersão do FA na Bacia do Tocantins revela que ela se deve ao reservatório de São Domingos. Trata-se de um pequeno reservatório, localizado no alto curso de um afluente do rio Tocantins.

A Figura 5 permite comparar as diferenças de forma, fragmentação e tamanho dos reservatórios de São Domingos e Tucuruí que apresentam valores extremos de FA dentro da Bacia do Rio Tocantins. Fica evidente que o Índice de Desenvolvimento das Margens (D) não captura essas diferenças, uma vez que o coeficiente de variação de D é inferior ao coeficiente de variação das variáveis que lhe dão origem (Área e Perímetro).

Isto sugere que o FA resume em um único número diferentes atributos dos reservatórios de uma determinada bacia, tais como tamanho, direção, grau de desenvolvimento das margens, altura de crista, topografia dominante na bacia de captação, grau de dissecação do relevo e densidade de drenagem. Em contrapartida, o índice D apenas dá alguma informação sobre a forma do reservatório em relação a seu distanciamento de um círculo perfeito.

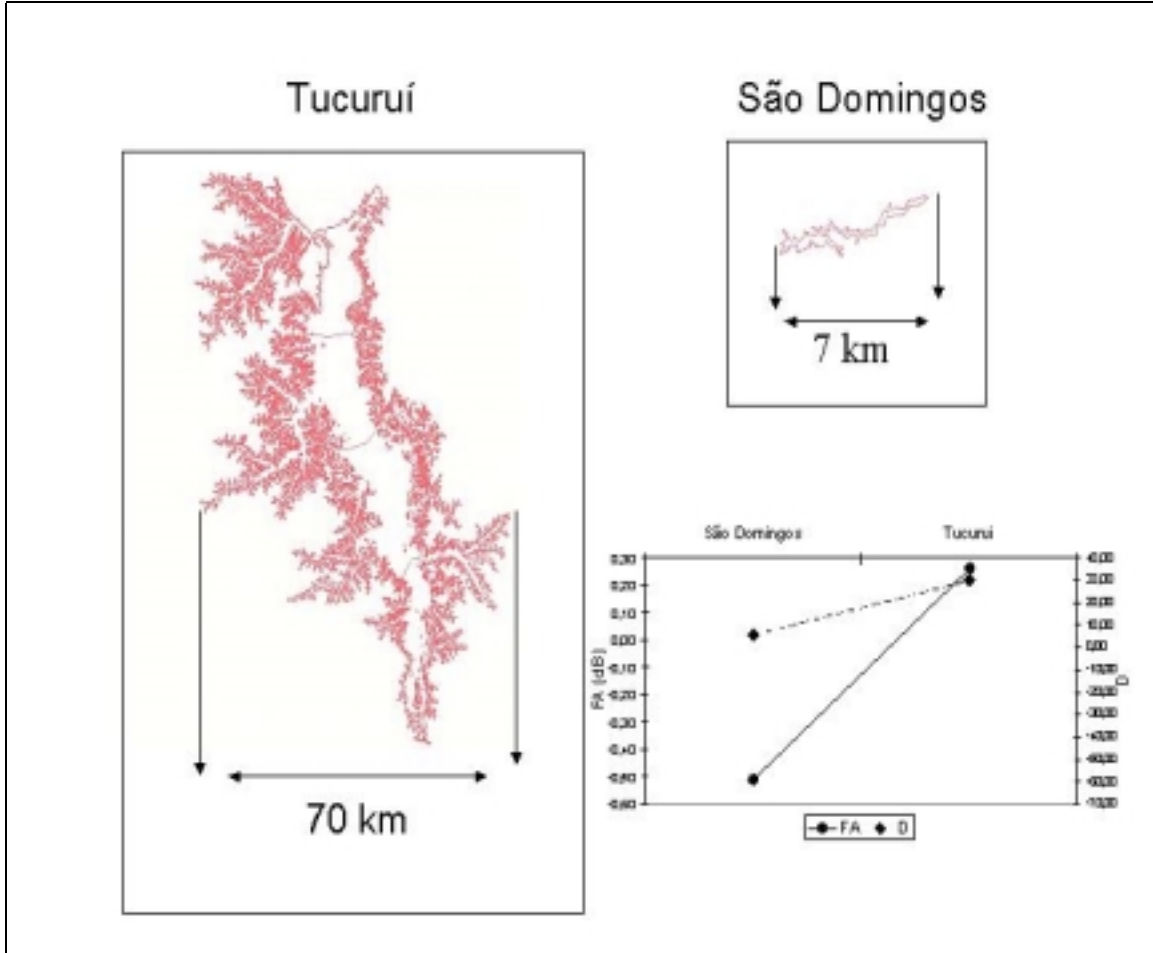


FIGURA 5 – Configuração Espacial de Reservatórios da bacia do Tocantins; 4A – Reservatório de Tucuruí (FA= 0,26 dB), originado a partir da barragem do rio Tocantins; 4B – Reservatório de São Domingos (FA= -0,51 dB), originado a partir da barragem do rio São Domingos, afluente de 2ª ordem do alto curso do rio Tocantins.

A Figura 6 permite observar o comportamento da média e do desvio padrão de FA e de D para várias bacias hidrográficas brasileiras.

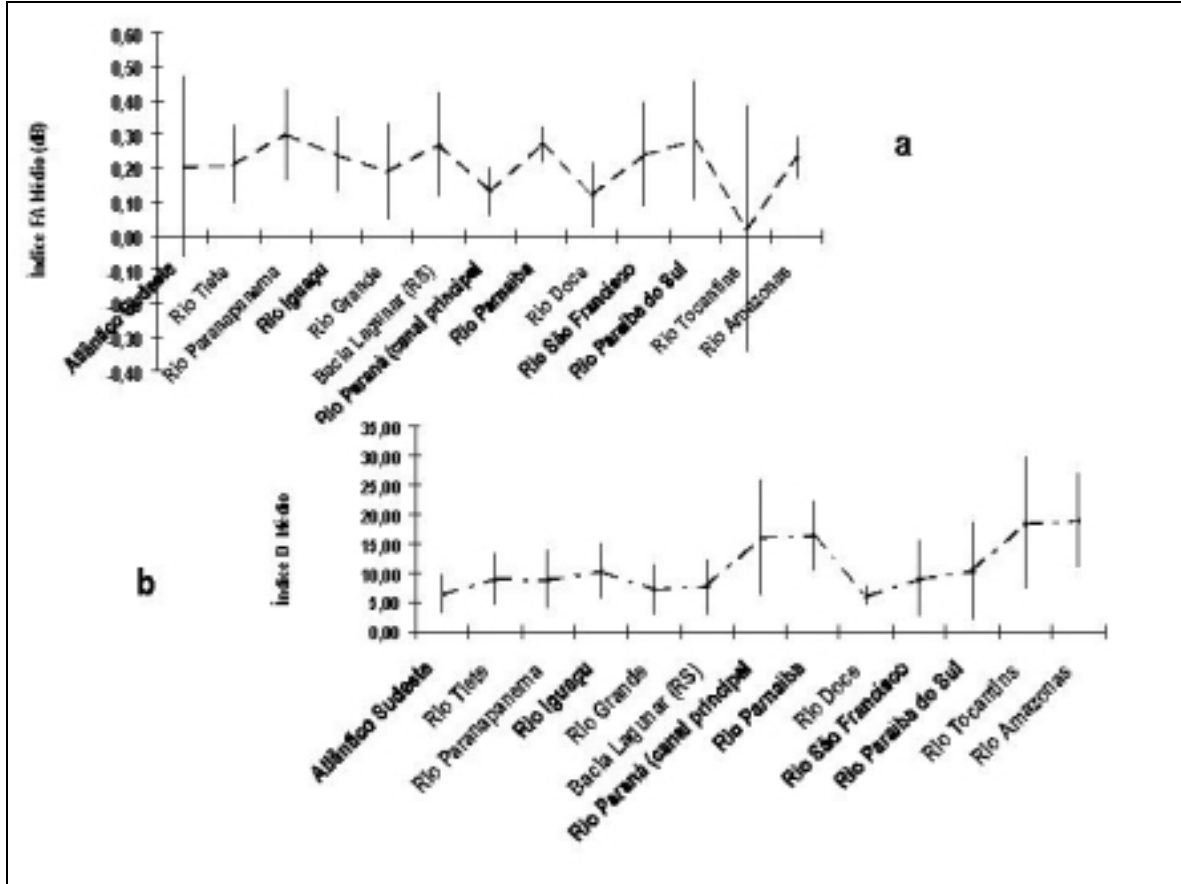


FIGURA 6 – Média e Desvio Padrão de FA (a) e D (b) dos reservatórios de várias bacias hidrográficas brasileiras.

Uma análise geral dos gráficos indica as seguintes tendências:

- O índice D médio é mais uniforme que o índice FA tanto internamente às bacias hidrográficas (pequenos desvios padrão em torno da média), seja entre diferentes bacias (valores médios e desvios padrão relativamente constantes). O índice D Médio varia entre 5, para as bacias do Atlântico Sudeste (que incluem as bacias dos rios Itapemirim, Macaé e Ribeira de Iguape) e 10 para a maioria das bacias. Os valores extremos ocorrem em relação aos reservatórios do Rio Paraná, do Rio Parnaíba, Rio Tocantins e Amazonas.

- O índice FA médio, no entanto, apresenta grande variabilidade intra-bacia hidrográfica, como é o caso das bacias do Atlântico Sudeste que apresentam valores de FA que se estendem de  $-0,6$  a  $0,57$ , indicando que os reservatórios ali presentes apresentam padrões espaciais de pequena até muito grande complexidade.

A análise minuciosa dos reservatórios da Bacia do Rio Ribeira de Iguape (Figura 7) indica uma grande uniformidade de forma dos reservatórios, condicionada pelo relevo regional, mas uma grande diversidade de tamanho. A similaridade das formas dos lagos (ramificados e encaixadas nos vales) explica a pequena variabilidade de D. Observa-se, entretanto, que o tamanho dos reservatórios é bastante distinto. O reservatório de França ocupa uma superfície bem maior do que o reservatório de Serraria, por exemplo. Enquanto o índice D de França é três vezes maior que o de Serraria, o FA desses reservatórios é bastante próximo (Figura 8).



FIGURA 7 – Reservatórios da Bacia do Ribeira de Iguape (Atlântico Sudeste).



Quando se observa a Figura 8, intuitivamente admite-se que o Reservatório França é mais fragmentado espacialmente que o de Serraria. Isto ocorre porque, a avaliação visual do padrão espacial não desconta o tamanho do reservatório em relação à escala da representação gráfica. Ambos os reservatórios foram gerados na escala original 1:100 000. Como o tamanho do reservatório de Serraria é três vezes menor do que o de França, a representação gráfica da variabilidade de pequena escala é perdida. Quando se ampliam segmentos dos reservatórios para escalas grandes, observa-se claramente que em nível de detalhe, os dois reservatórios têm graus de fragmentação semelhantes. Ou seja, descontado o fator dimensional do reservatório, ambos possuem um padrão espacial de baixa complexidade, pouco fragmentado, e com pequena interface com o ecossistema terrestre adjacente, sugerindo menor impacto deste sobre o comportamento físico, químico e biológico do sistema aquático.

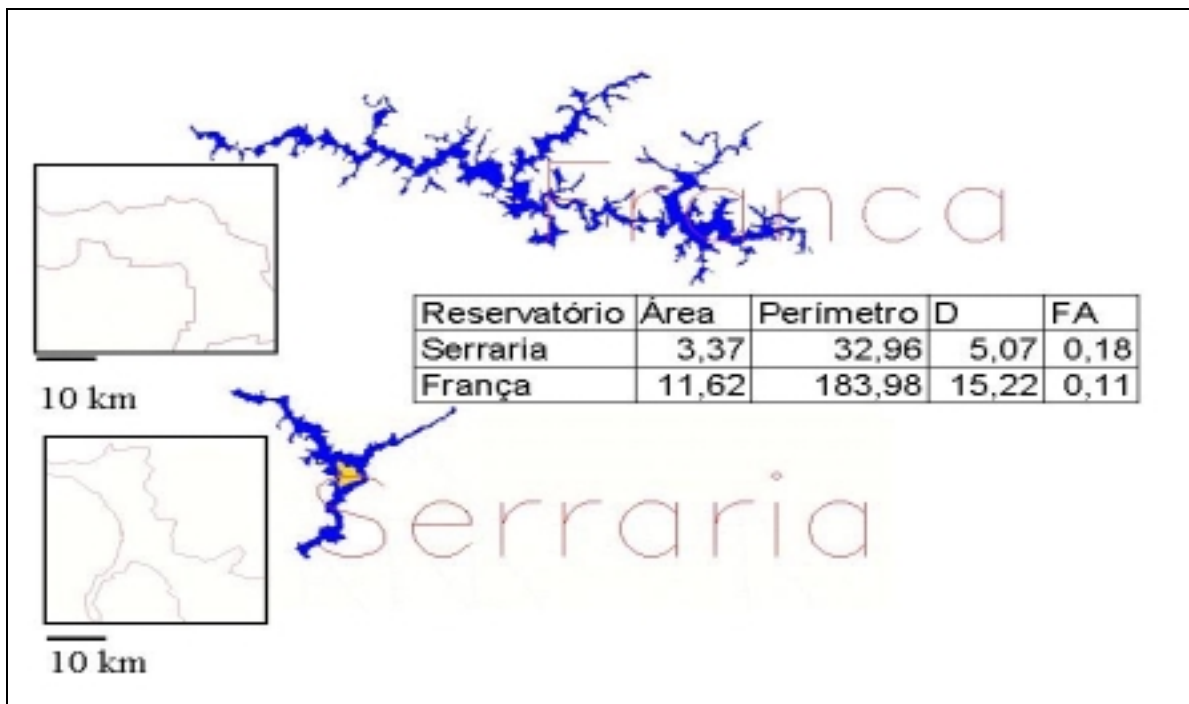


FIGURA 8 – Comportamento de FA e D em reservatórios das bacias do Atlântico Sudeste.

O FA, muito mais que o D, representa um indicador de que a Bacia Hidrográfica a que pertence um reservatório não é razão suficiente para definir a complexidade de seu padrão espacial.

Em Bacias Hidrográficas que atravessam unidades estruturais diferentes, como é o caso da bacia do Tietê que se desenvolveu superimposta ao contato entre a bacia sedimentar do Paraná e o escudo cristalino, os reservatórios estarão adaptados às características locais da bacia e sua complexidade espacial variará de uma região para outra.

A Figura 9 mostra a variação do Índice D e do Índice FA dos reservatórios hidrelétricos construídos na Bacia do Rio Tietê. Sua análise deixa evidente que os dois índices não covariam, e que, portanto, revelam propriedades espaciais distintas. O maior índice FA é apresentado pelo reservatório de Americana, enquanto que o maior índice D é apresentado pelo reservatório de Três Irmãos. Por outro lado, o menor índice FA é apresentado pelo reservatório de Bariri e o menor índice D pelo reservatório de Rasgão.

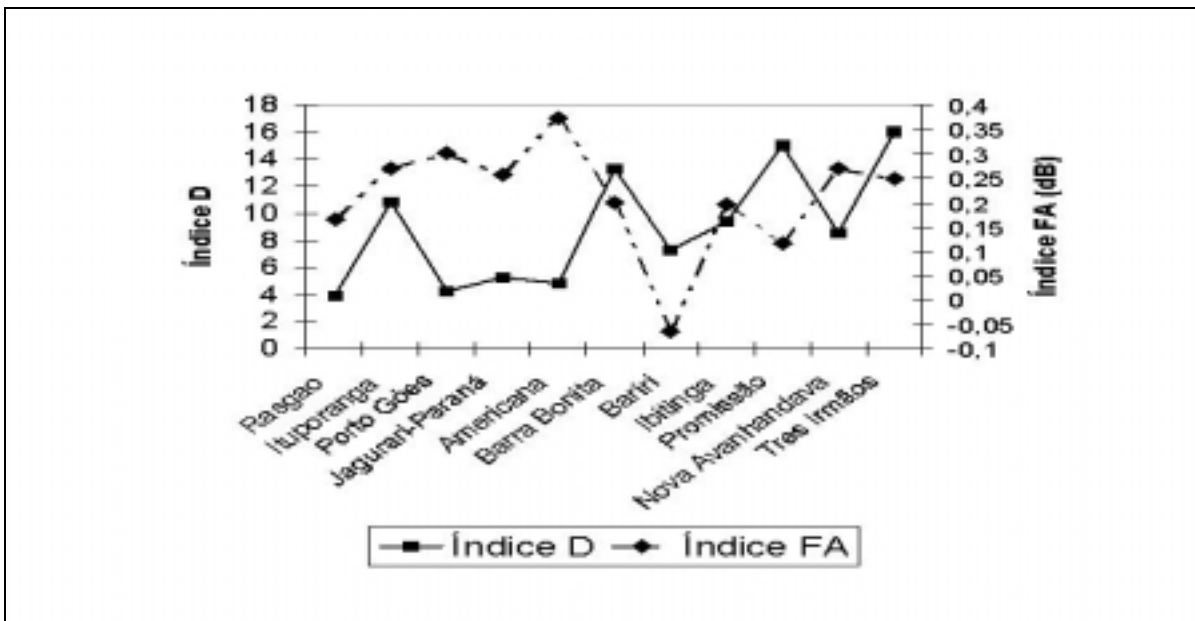


FIGURA 9 – Variação do índice D e FA dos reservatórios da Bacia do Rio Tietê.

Na Figura 10 pode-se observar a forma do reservatório de Bariri (FA=-0,06) e do Reservatório de Americana (FA = 0,37). O Reservatório de Bariri é praticamente encaixado no leito maior do Rio Tietê, exceto pela sua região mais próxima à barragem (ampliada), o que faz com que o valor médio do reservatório seja muito baixo. O Reservatório de Americana, apesar de pequeno, quando comparado ao de Bariri, tem uma forma complexa, com diferentes compartimentos formados por afluentes também alagados pela barragem do rio principal. O valor de D do reservatório de Americana, entretanto, é muito mais baixo do que o do reservatório de Bariri. O que o índice D está informando é que o Reservatório de Bariri apresenta uma forma muito próxima a do canal fluvial do rio que lhe deu origem, enquanto o de Americana, possui uma forma que se aproxima à de um círculo perfeito.

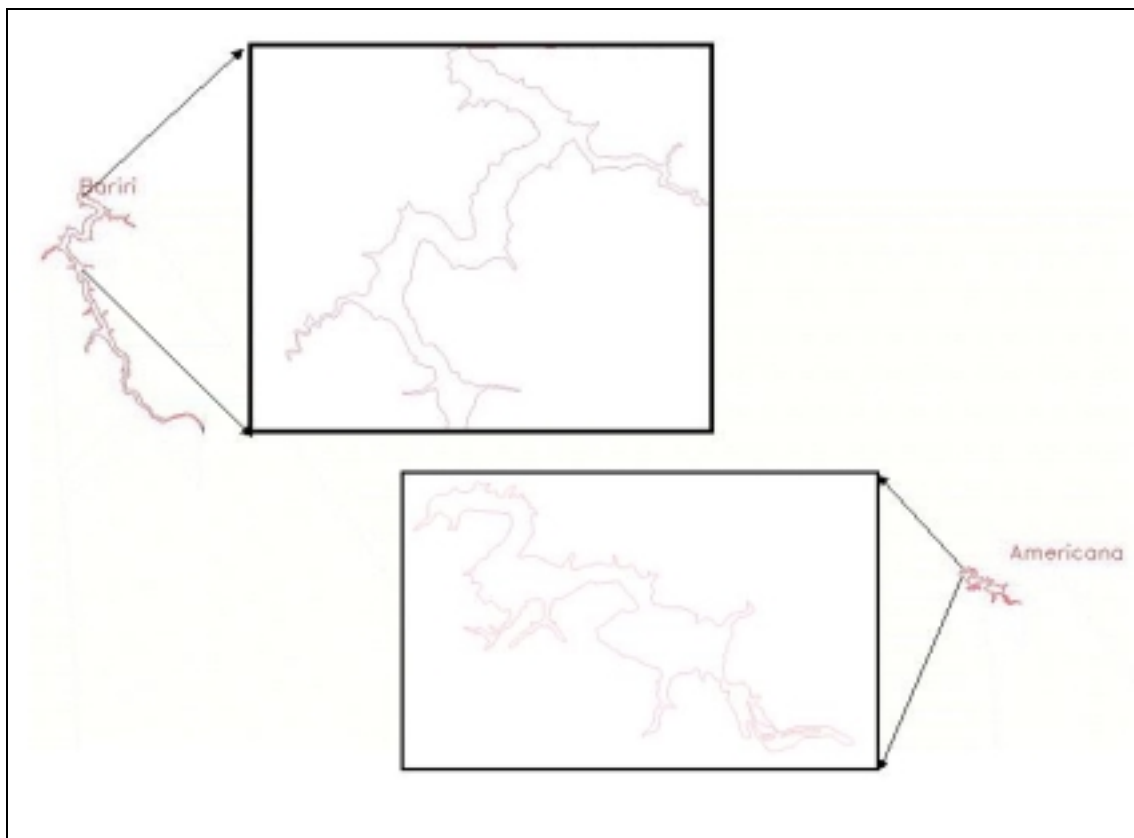


FIGURA 10 – Variabilidade de FA: forma e tamanho do reservatório.

## 6 Relação entre os Índices Morfométricos (D e FA) e as Propriedades Limnológicas dos Reservatórios

Um estudo sobre a tipologia dos reservatórios do Estado de São Paulo (Tundisi, 1980 ) tornou disponível uma série de dados que permitem investigar as relações entre os índices FA e D e algumas propriedades da água. A Figura 11 mostra a relação entre os valores de FA e medidas de Produção Primária em alguns reservatórios do Estado de São Paulo selecionados aleatoriamente dos reservatórios estudados por Tundisi (1980). Embora o número de amostras seja limitado, e a relação encontrada não seja estatisticamente significativa, o valor de  $r^2$  sugere que o índice de Fragmentação Assimétrica média dos reservatórios contribui, de alguma forma, para a variabilidade da Produtividade Primária dos reservatórios.

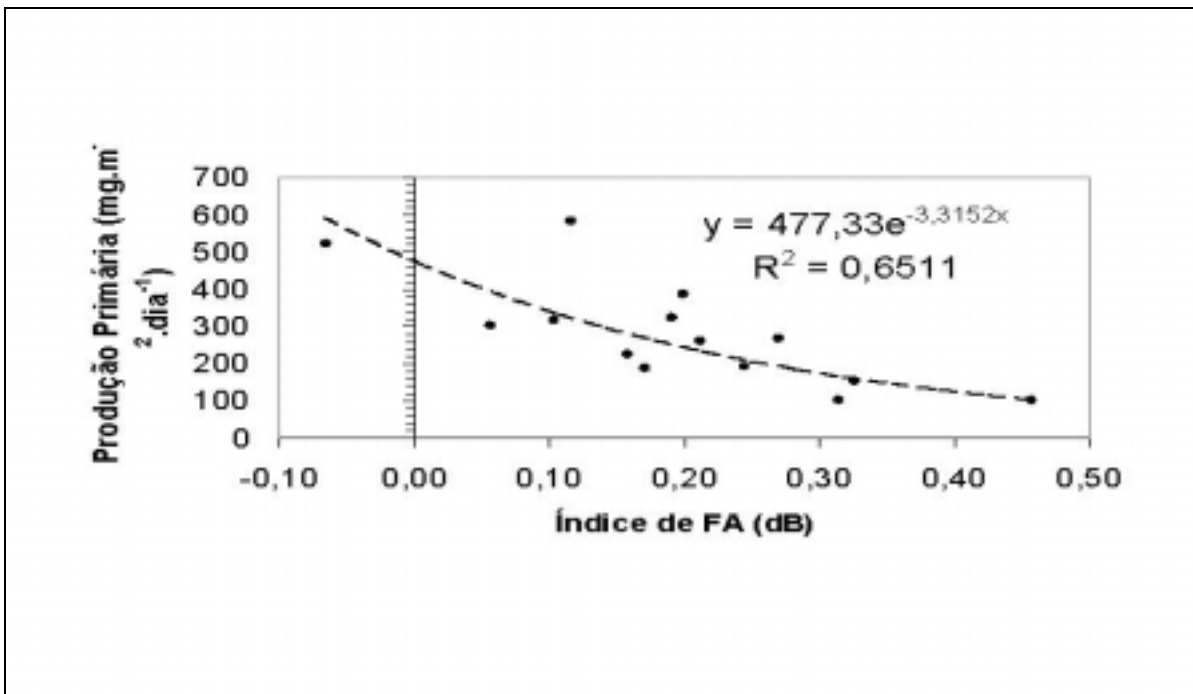


FIGURA 11– Relação entre o índice FA e a Produção Primária Fitoplanctônica de Reservatórios do Estado de São Paulo.

O gráfico da Figura 11 mostra uma clara tendência de redução da produção primária com o aumento do índice FA, e conseqüentemente, com o aumento da complexidade espacial do reservatório. Isto permitiria supor que a existência de interfaces complexas (com grandes zonas litorâneas), com aporte de sedimentos através de inúmeros canais marginais tem um maior impacto sobre o funcionamento do sistema aquático. As extensas zonas litorâneas passam a sustentar comunidades de plantas aquáticas, as quais podem competir ativamente com o fitoplâncton pelos nutrientes e luz disponível para a fotossíntese. Apesar da precariedade dos dados disponíveis, esse é um aspecto que merece ser investigado.

O mesmo conjunto de dados de produção primária, entretanto, não apresenta a mesma relação com o Índice D, como pode ser observado na Figura 12.

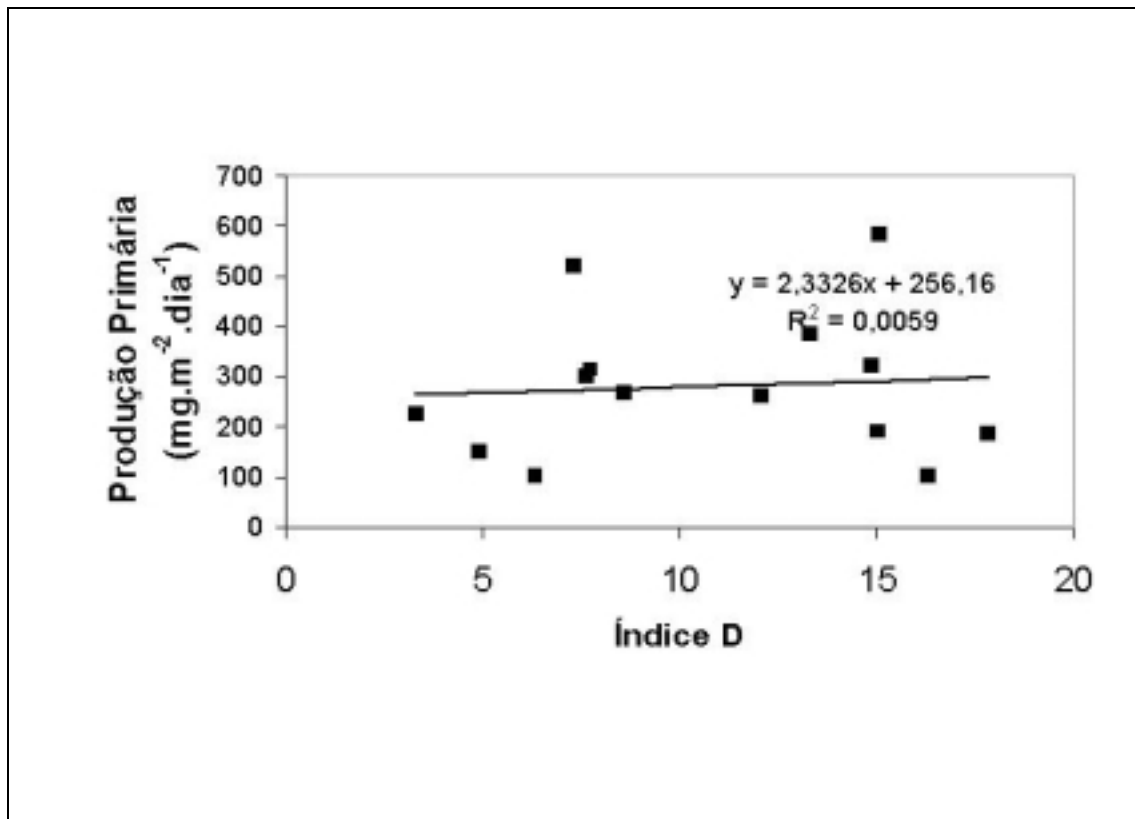


FIGURA 12 – Produção Primária e o Índice de Desenvolvimento das Margens.

## 7 O efeito da Superfície Inundada sobre o Índice de Fragmentação Assimétrica

A área inundada por um reservatório pode afetar o índice de fragmentação assimétrica, mas não é o fator mais relevante. Para testar essa hipótese os reservatórios foram estratificados por tamanho e calculado o coeficiente de correlação linear entre o FA e a área do Reservatório em cada classe (Tabela 5).

TABELA 5 – Coeficiente de correlação entre FA e Área do Reservatório.

Classe de Tamanho	r	N
< 1 km <sup>2</sup>	0,01	23
>1<5 km <sup>2</sup>	-0,11	23
>5<10 km <sup>2</sup>	-0,22	6
>10<15 km <sup>2</sup>	0,15	7
>15<31 km <sup>2</sup>	-0,79	8
>31<50 km <sup>2</sup>	-0,17	9
>50<100 km <sup>2</sup>	0,07	10
>100<200 km <sup>2</sup>	0,59	9
>200<300 km <sup>2</sup>	-0,50	5
>300<400 km <sup>2</sup>	0,70	5
>400<600 km <sup>2</sup>	-0,35	8
>600<900 km <sup>2</sup>	-0,62	3
>900 Km <sup>2</sup>	-0,15	8

A Tabela mostra que os coeficientes de correlação não são significativos, e em geral são baixos. As duas classes de tamanho que apresentaram coeficientes mais altos, porém não significativos englobam reservatórios entre 15 e 31 km<sup>2</sup> (0,79) e entre 300 e 400 km<sup>2</sup> (0,70). A Figura 13 mostra os reservatórios que apresentaram alta correlação entre FA e Área. Sua análise permite verificar que estes reservatórios têm uma característica comum que é a de estarem confinados ao leito maior do rio represado.

A posição do reservatório num sistema de cascata e as características topográficas da bacia são fatores muito mais relevantes. Isto pode ser comprovado pela análise da Figura 14, em que se observa um aumento do índice FA com a diminuição da área inundada pelo

reservatório. Neste caso específico da Bacia do Médio-Baixo Tietê, o FA está respondendo não apenas à superfície alagada do reservatório, mas à sua posição na cascata, e conseqüentemente no arcabouço geomorfológico.

O Reservatório de Americana é o menor do conjunto, mas é o que se localiza numa região próxima ao contato entre Planalto Cristalino e a Depressão Periférica, o que resulta no represamento de um sub-afluente do rio Tietê, o rio Atibaia. Isto produz um padrão de inserção na paisagem mais fragmentado, do que o do reservatório de Promissão, localizado à jusante, já próximo à confluência do rio Tietê com o rio Paraná, onde desenvolve uma ampla planície. Essa distinção não é captada pelo índice D, nem pelo perímetro (que é proporcional à área), mas é bem percebida pelo FA (Figura 15).



FIGURA 13 – Reservatórios com alta correlação (0,79) entre FA e Área Inundada.



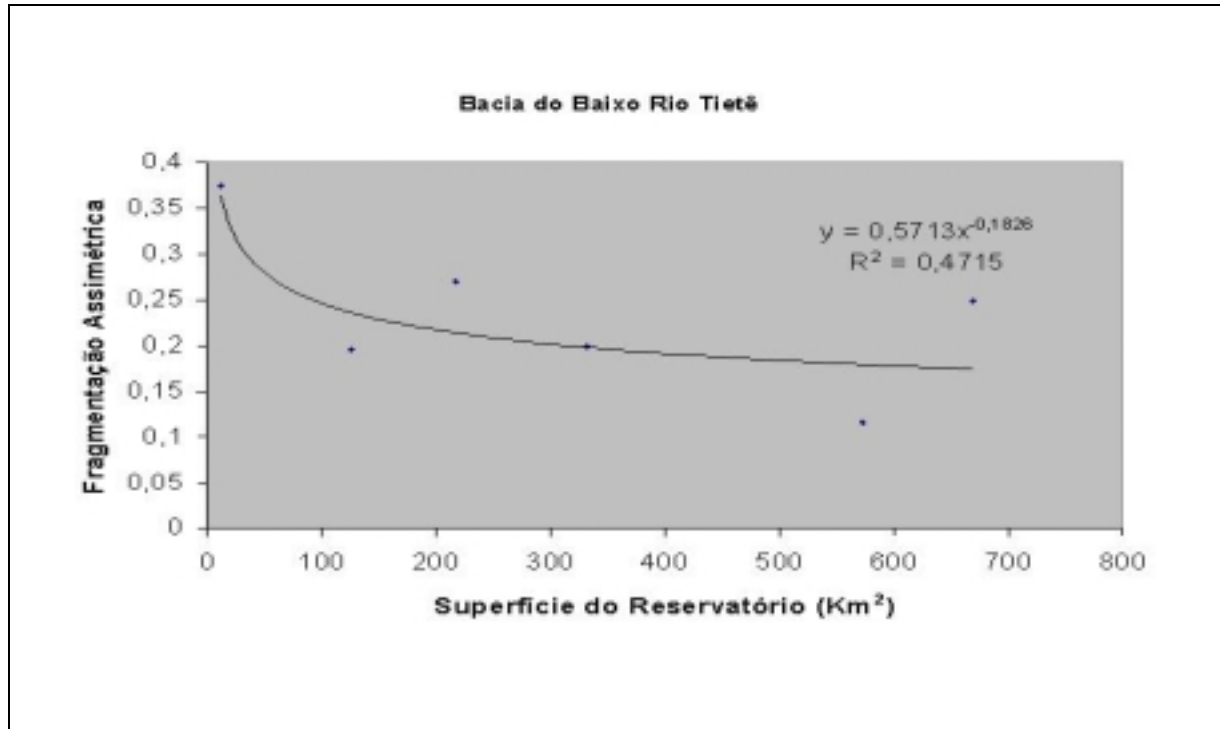


FIGURA 14 – FA em função da superfície alagada dos reservatórios do Baixo Tietê.

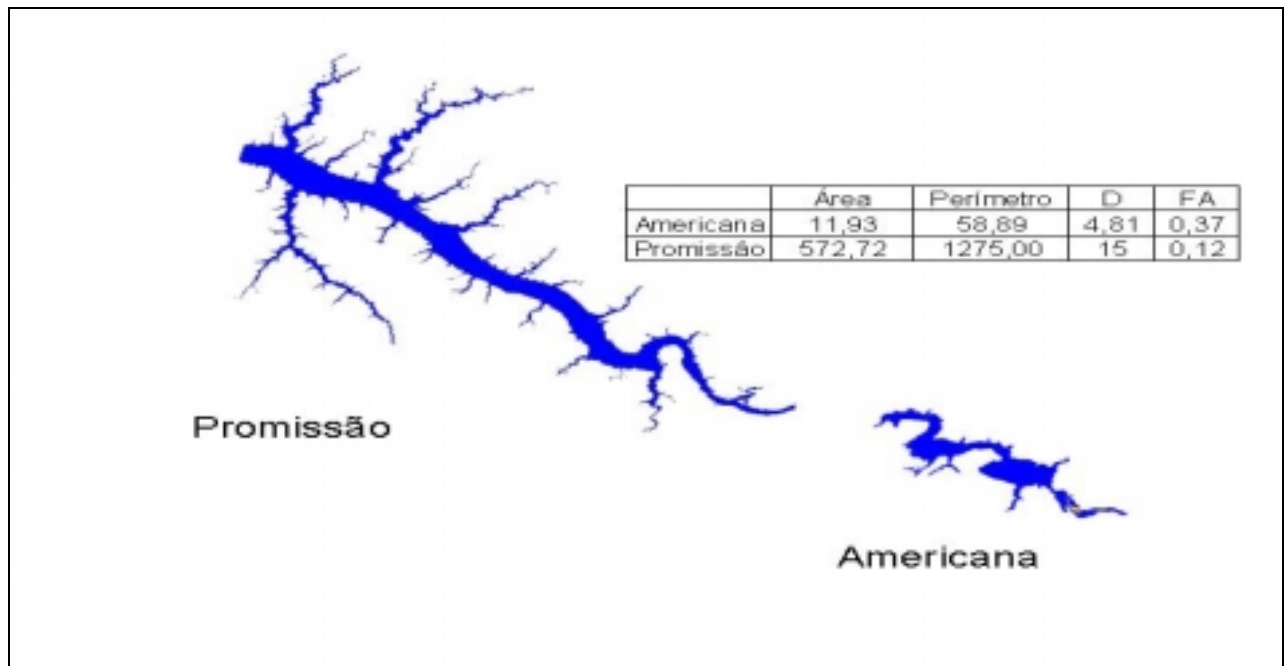


FIGURA 15 – Relação entre o FA e a posição do reservatório na cascata.

## 8 Conclusão

Foi investigada neste trabalho a aplicabilidade do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na caracterização das propriedades morfométricas dos reservatórios hidrelétricos. A técnica foi aplicada a 124 reservatórios hidrelétricos espalhados pelo Brasil. Os resultados apontaram para vantagens do FA em detectar propriedades morfométricas em relação ao Índice de Desenvolvimento de Margens (D), parâmetro tradicionalmente utilizado pela comunidade de limnólogos.

O parâmetro D, pela sua própria definição, restringe-se apenas à caracterização em relação a quanto os reservatórios aproximam-se ou afastam-se da forma geométrica circunferencial. O FA, ao contrário, baseia-se nas propriedades geométricas e estruturais locais ao longo do entorno do reservatório. Isto confere a este parâmetro a capacidade de detectar, em alta resolução, estruturas geomorfológicas que passariam despercebidas pelo D. Por exemplo, análises baseadas no D indicaram que os reservatórios da Bacia do Atlântico Sudeste teriam características morfométricas bastante idênticas, fato que foi negado pelo FA. O FA indicou que os reservatórios que compõem esta bacia hidrográfica apresentam padrões espaciais que variam de pouca até muita complexidade, embora tivessem apresentado valores de D muito próximos entre si.

Pôde-se mostrar também que as inspeções puramente visuais podem levar a confusão quanto à classificação do padrão de morfometria, já que a avaliação visual não leva em conta o tamanho dos reservatórios em relação à escala da representação gráfica. Neste caso o FA funcionaria como uma espécie de classificador automatizado de reservatórios quanto ao nível de complexidade do entorno, e portanto livre da subjetividade da interpretação visual. Em reservatórios que apresentam o entorno muito fragmentado, o índice D, por levar em conta o perímetro do reservatório, tende a ter a sua precisão comprometida.

Análises preliminares indicaram haver relação entre o grau de fragmentação e a produtividade primária nos reservatórios. Embora dependa de uma investigação mais ampla, isto pode ser uma interessante forma de aplicação do FA em Limnologia.

Os resultados indicaram que ao contrário do D, o FA é pouco sensível à área do reservatório, tendo respondido mais a sua posição na cascata, e conseqüentemente ao arcabouço geomorfológico. Um aspecto muito positivo disso é que, em reservatórios que apresentam grande sazonalidade quanto a área inundada, o FA sofreria menos influência se comparado ao D, já que não necessariamente a área inundada aumenta proporcionalmente ao perímetro.

Face ao exposto, acredita-se que o FA possa ser um parâmetro útil na caracterização de feições morfométricas de reservatórios, vindo senão a substituir, a pelo menos complementar o D nestas atividades.

Segundo Mandelbrot (1991), a dimensão fractal é um número útil para caracterizar estruturas fractais. Esse número quantifica o grau de irregularidades ou de fragmentação de um conjunto geométrico, de uma figura ou de um objeto natural. A seqüência deste trabalho será comparar o FA destes 124 reservatórios com suas respectivas dimensões fractais. Isto será apresentado em trabalho futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assireu, A. T.; Rosa, R. R.; Lorenzetti, J. A.; Vijaykumar, N. L.; Rempel, E. L.; Ramos, F. M.; Sá, L. D. Abreu; Bolzan, M. J. A. ; Zanandrea, A. Gradient pattern analysis of short nonstationary time series: an application to Lagrangian data from satellite tracked drifters. **Physica D**, v.168-169, p. 397-403, 2002.
- Christofolletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1986.
- Mandelbrot, B. **Objetos fractais**. Lisboa: Gradiva, 1991.
- Müller, A.C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1996.
- Tundisi, J.G. **Tipologia de represas do Estado de São Paulo**; relatório. São Carlos: UFSCar, 1980.
- Wetzel, R.T. **Limnology**. London: W.B. Saunders, 1975.
- 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.
- Rosa, R. R.; Sharma, A. S.; Valdivia, J. A.; Characterization of asymmetric fragmentation patterns in spatially extended systems. **International Journal of Modern Physics**, v. C10, n.1, p.147-163, 1999.