

AS PROPRIEDADES FRACTAIS DA REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DE LINHAS: UM ESTUDO DE CASO PARA O LITORAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - BRASIL

Thiago Salomão de Azevedo* & Mara Lúcia Marques**

RESUMO:

Este artigo apresenta a influência da resolução espacial na estimativa da dimensão fractal (D) de linhas de costa localizadas no litoral norte e sul do Estado de São Paulo, respectivamente. Os resultados mostram que a resolução interfere na estimativa da dimensão fractal do litoral paulistano. Contudo, estes são menos significativos para a linha de costa localizada no litoral sul (Itanhaém) do que para a linha de costa no litoral norte (Maresias).

PALAVRAS-CHAVE:

Dimensão Fractal; Resolução Espacial; Linha de Costa

ABSTRACT:

This paper presents a study case involving the influence of resolution on estimative of the Fractal Dimension (D) of the São Paulo State coastline. To analyze such influence we calculate D for two coastal zones. One was located in Maresias, north coastal zone, and the other in Itanhaém, south coastal zone. The results showed that the resolution altered the fractal estimative of coastal shoreline. However, the results also indicate that this influence is smaller in Itanhaém compared with that in Maresias

KEY WORDS:

Fractal Dimension; Resolution; Coastal Shoreline

I- Introdução

A geometria clássica aborda o espaço tendo por base noções euclidianas de n dimensões, examinando a natureza e as relações de figuras abstratas como pontos, linhas e polígonos. Esses objetos são conhecidos como sendo idealizações que não têm comprimento característico e nem tamanho absoluto. Este tipo de representação geométrica (Euclidiana) não pode caracterizar formas, exceto por estabelecer correspondência (igualdade e similaridade) entre um dado objeto e

simples objetos ideais (linhas e elipses) (LAM & DE COLA, 1993, apud MARQUES & FERREIRA, 2000).

Deste modo, a análise do espaço por meio de técnicas baseadas na geometria euclidiana tem se mostrado insuficiente para identificar a diversidade e a complexidade de fatores que influenciam na forma geométrica dos fenômenos espaciais (LOGLEY & BATTY, 1989).

Para JIANG & PLOTNICK (1998), a dificuldade em quantificar formas geometricamente

*Departamento de Geografia - Unesp - Rio Claro - SP. E-mail: azevdots@bol.com.br

** Curso de Pós-Graduação em Geografia - Unesp - Rio Claro - SP

complexas, como linhas de costa, cadeias de montanhas, sistemas fluviais, devia-se à inexistência de um método que pudesse efetuar tais constatações.

Na tentativa de suprir esta dificuldade MANDELBROT (1983), desenvolveu uma metodologia que permite descrever formas irregulares e complexas da natureza, retomando a riqueza original do fenômeno, permitindo que ele seja representado em diversas dimensões e seja visualizado em múltiplas dimensões.

Esta geometria irregular e complexa foi denominada de fractal. Ao procurar uma palavra que descrevesse melhor essas formas geométricas que acabara de descobrir, *Mandelbrot* se deparou com o adjetivo latino *fractus*, do verbo *frangere*, que significa quebrar, fraturar (PEITGEN, et al., 1992; BARBOSA, 2002).

Desde a sua criação, a geometria fractal tem sido usada em muitas áreas científicas (LONGLEY & BATTY, 1989). Mas foi somente no início dos anos 70, e mais recentemente com o desenvolvimento dos sistemas de informação geográfica e do sensoriamento remoto, que a geometria fractal passou a ser incorporada em estudos cartográficos, topográficos, ecológicos, etc. (LAWFORD & MASTER, 2002).

Entretanto, salientam LAWFORD & MASTER (2002), que a aplicação de metodologias baseadas na geometria fractal, relacionada a estudos de representação cartográfica de linhas, apresentam algumas limitações. Para estes autores, tais limitações devem-se ao fato de que as metodologias baseadas na geometria fractal podem ser aplicadas somente para alguns tipos de feições cartográficas lineares, como linhas de costa e cursos d'água, por exemplo.

Porém, as metodologias fractais aplicadas a representações cartográficas lineares não são totalmente inválidas, pois alguns estudos têm mostrado que a geometria fractal linear possui fundamentação lógica na representação e na simplificação de linhas, na estimativa da complexidade das mesmas, assim como na verificação da resolução efetiva (LAWFORD & MASTER, 2002).

Baseado nestas observações, este trabalho tem o objetivo de verificar a influência da resolução espacial na estimativa da dimensão fractal de duas faixas litorâneas, localizadas no sul (Itanhaém) e no litoral norte (Maresias) do Estado.

II- Revisão da Literatura

Os estudos mais recentes em ecologia e geografia espacial têm ressaltado que as métricas utilizadas na quantificação da dinâmica da paisagem estão baseadas no nível de detalhe dos arranjos espaciais que as compõem (TURNER et al. 2001).

Segundo LAWRENCE & RIPPLE (1996) e MLADENOFF (1997), a variação da resolução, ou do nível de detalhe das feições espaciais contidas em um mapa, é responsável por distorções nos valores de área, perímetro, número e forma dos objetos.

Desta maneira, muita atenção tem sido dada à resolução espacial dos arranjos espaciais das paisagens, pois quando a resolução ou o nível de detalhe é alterado, diferentes estruturas e feições espaciais podem aparecer (BENSON & MACKENZIE, 1995).

Segundo TURNER et al (2001), estas alterações influenciam diretamente nos valores das métricas utilizadas na quantificação dos padrões espaciais da paisagem, provocando distorções que são responsáveis por variações na estimativa da dimensão fractal (D) de elementos lineares, como é o caso das linhas de costa.

YOUNG & CHOPPING (1996), salientam que a utilização de resoluções inadequadas pode ser crucial em estudos ambientais, pois a supressão ou o aparecimento de novas feições espaciais na paisagem pode ser responsável, por exemplo, pela alteração dos padrões de irregularidade e sinuosidade.

O primeiro pesquisador que estudou empiricamente esta variação foi *Richardson* (1961, apud MANDELBROT, 1983). Em seu estudo, *Richardson* reproduziu as medidas experimentais do comprimento de várias curvas utilizando triângulos equiláteros de lado e cada vez

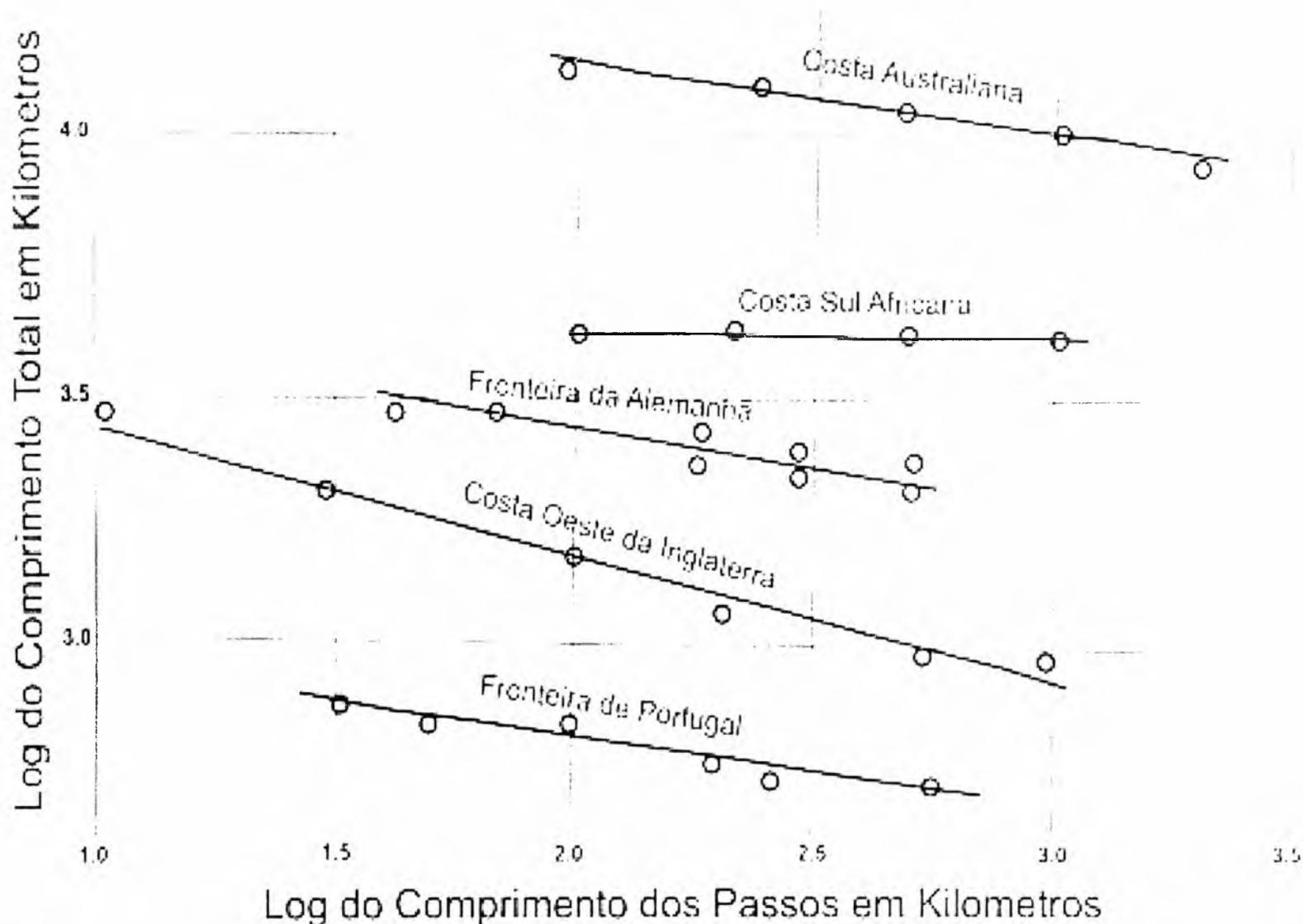


Figura 1- Experimento de Richardson (Mandelbrot, 1967)

vez menores (Figura 1).

Como observamos na figura 1, à medida que o tamanho padrão aumenta, os comprimentos aproximados das linhas de costa e das fronteiras diminuem MANDELBROT (1967). Segundo MANDELBROT (1983), não deu nenhuma interpretação teórica para estes padrões. Mas para este mesmo autor estes gráficos o levaram a concluir que o comprimento da linha de costa é dependente da resolução, ou seja, MANDELBROT concluiu que este padrão negativo dos gráficos são dependentes de duas constantes que podem ser interpretadas como uma dimensão, no caso a dimensão fractal.

A partir destas premissas, muitos pesquisadores puderam verificar a relação entre a resolução e a estimativa da dimensão fractal (D) de linhas de costa (MULLER, 1986; LONGLEY & BATTY, 1989; KLINBERLBERG, 1994; JIANG & PLOTNICK, 1998).

A variação do nível de detalhe, faz com que a geometria da linha costeira seja cada vez mais irregular (fragmentada), ou seja, a resolução determina o grau de complexidade da linha costeira que, conseqüentemente, influencia nos valores da dimensão fractal (D) (Figura 2).

Estas observações mostram a importância do estudo da resolução espacial, uma vez que as descrições de paisagens costeiras com níveis de detalhamento não apropriados podem acarretar em erros que influenciam na quantificação e no diagnóstico ecológico e geográfico da paisagem.

III- Materiais e Métodos

Para efetuar os procedimentos metodológicos referentes à avaliação da influência da resolução na estimativa da dimensão fractal de linhas de costa, foram selecionadas duas áreas testes do litoral paulista, localizadas no litoral norte a Folha Maresias (SF-23-Y-D-V-4) e no litoral sul a Folha Itanhaém (SG-23-V-A-III-1 e SG-23-V-A-III-3) (Figura 3).

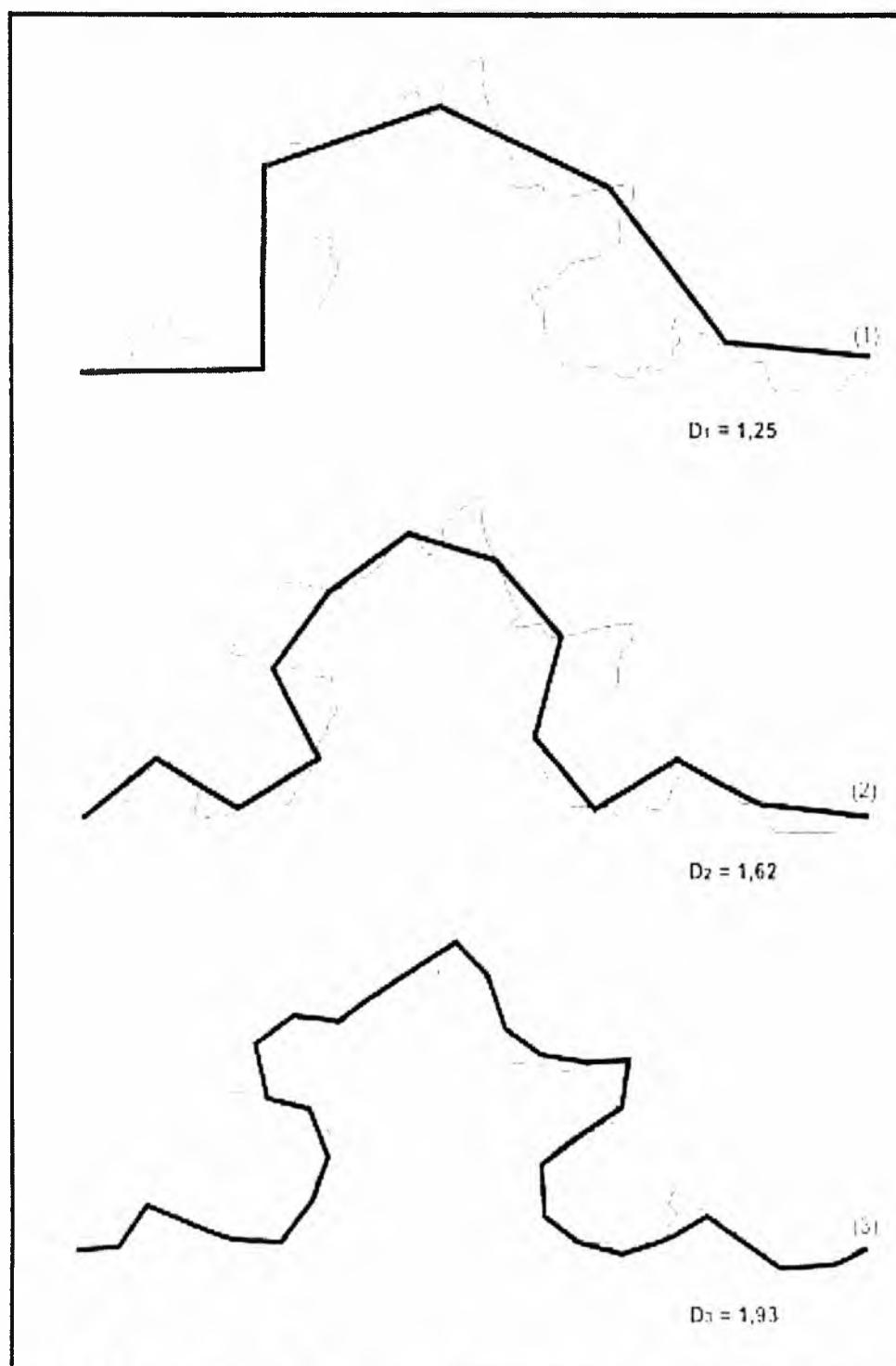


Figura 2- Influência da resolução na estimativa da dimensão fractal (Longley & Batty, 1989)

A distância entre os pontos extremos das áreas de estudo foram determinadas pelo método convencional (Teorema de Pitágoras), tendo sido calculado os comprimentos AB (Itanhaém) e AB' (Maresias) em linha reta (Le) para as linhas de costa estudadas, utilizando como unidade de referência as coordenadas UTM da carta topográfica na escala 1:50.000.

Posteriormente, as linhas de costa foram segmentadas em arcos onde cada arco é considerado como um passo, ou seja, entre dois pontos coletados na linha de costa existe um passo. Assim, foram efetuadas 08 digitalizações, no software AutoCadMap-R2 (AUTODESK, 1998), para cada uma das linhas de costa, sendo a resolução de cada passo, assim definidas: 125m; 250m; 500m; 1000m; 2000m; 4000m; 8000m e 16000m.

Em cada digitalização antes da conversão do formato analógico para o digital, os passos ou arcos foram marcados na carta topográfica e usados como pontos de controle para coleta de dados na digitalização em tela.

Cada uma das 08 curvas geradas para cada linha de costa, no formato digital (medidas em passos diferentes), resultou em um conjunto de dados utilizados para a determinação de medidas específicas para ϵ ($\epsilon_{0,25}$, $\epsilon_{0,50}$, $\epsilon_{1,0}$, $\epsilon_{2,0}$, $\epsilon_{4,0}$, $\epsilon_{8,0}$, $\epsilon_{16,0}$, $\epsilon_{32,0}$).

Para o cálculo de D foi utilizado o procedimento adotado por LAM & DE COLA (1993), que consideram o princípio de sinuosidade da curva como um modelo da dimensão fractal. O valor de D para as linhas de costa foi obtido através da relação:



Figura 3- Localização das áreas de Estudo

$$D = \Sigma \epsilon / L_{\epsilon} \quad (1)$$

Onde:

D = Dimensão Fractal

$\Sigma \epsilon$ = somatória do comprimento dos segmentos

L_{ϵ} = comprimento da reta

Este método ajusta um conjunto de dados a uma linha de tendência, mensurando as variações da resolução por meio da flutuação dos padrões de irregularidade das linhas, sobre a reta de tendência (Figura 4).

Para cada curva, este método analisa as n diferenças entre cada valor de α em relação à reta de tendência. As curvas que apresentam menores somas das diferenças α possuem valores de D menores do que as curvas que apresentam somas maiores.

Assim, a dimensão fractal linear (D) foi calculada para cada curva a partir das medidas L_{ϵ} e a somatória dos segmentos ϵ .

IV - Resultados e Discussão

Os resultados sobre a influência da resolução na estimativa de D , para as linhas de costa localizadas em Itanhaém e Maresias, litoral Sul e Norte do Estado de São Paulo, respectivamente, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores da dimensão fractal (D) da linha de costa de Itanhaém e Maresias

Resolução	Dimensão Fractal	
	Itanhaém	Maresias
125m	1,0016	1,0066
250m	1,0031	1,0317
500m	1,0034	1,0794
1000m	1,0045	1,1953
2000m	1,0066	1,2879
4000m	1,0087	1,4719
8000m	1,0167	1,5532
16000m	1,0254	1,6369
Média	1,0097	1,3223
Desvio Padrão	0,0083	0,2364
CV %	0,8	17,87

Figura 4 - Sinuosidade de linhas de costa hipotéticas

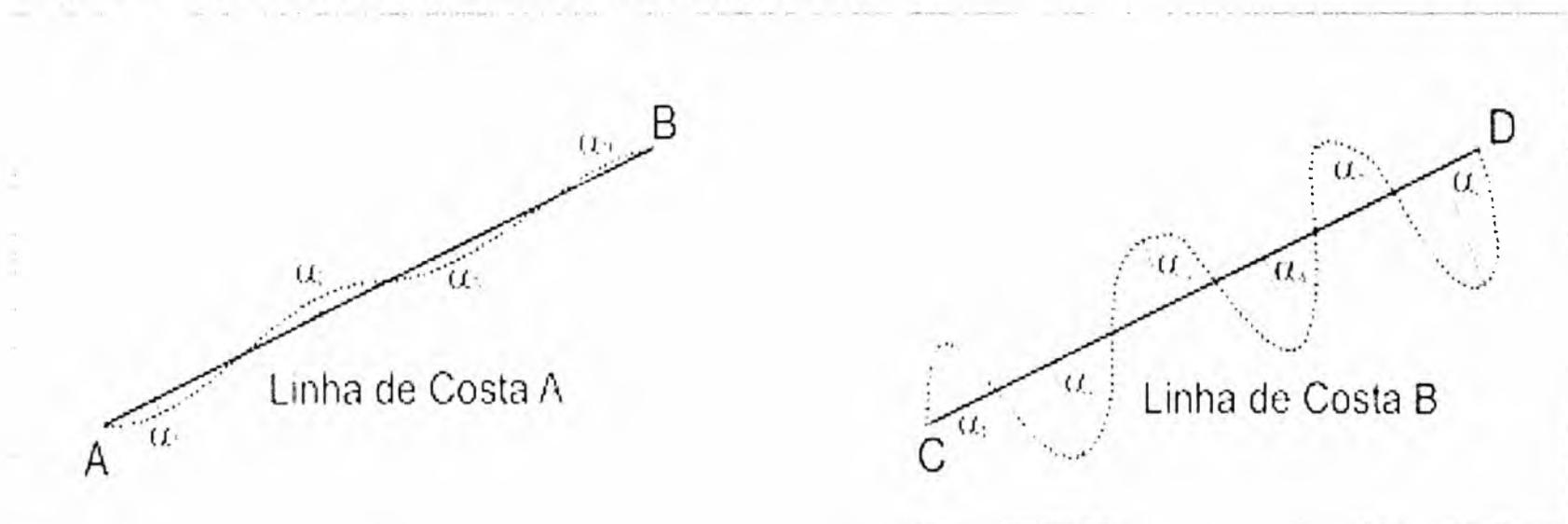
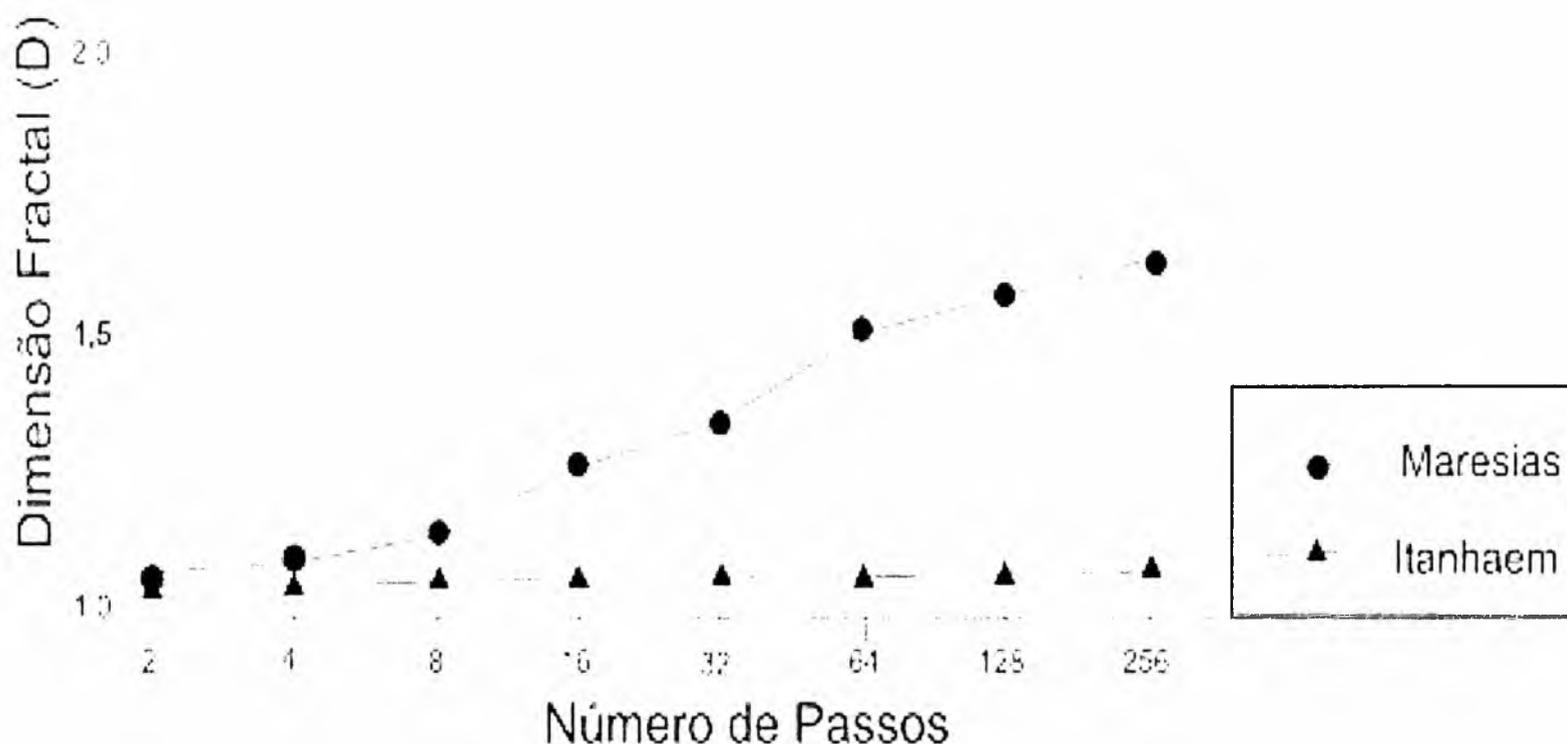


Figura 5 - Influência da resolução na estimativa de (D) para Maresias e Itanhaém

Nesta figura, observamos que a resolução altera a estimativa da dimensão fractal das linhas de costa localizadas em Itanhaém e Maresias. Os resultados mostram que os valores de D, situam-se entre 1,0016 a 1,0254 para Itanhaém e 1,0066 a 1,6369 para Maresias, observadas na figura 5. Estas amplitudes devem-se à relação entre a distância entre os pontos extremos das áreas (L_ϵ) e a soma dos seguimentos das diferenças α ($\sum \epsilon$), dadas pela resolução (n° de passos).

Entretanto, notamos que a influência das resoluções, na estimativa de D, é mais significativa para a faixa litorânea localizada ao Norte (Maresias) do que ao Sul (Itanhaém). Essas evidências podem ser melhor observadas na figura 5.

Com o intuito de verificar melhor estas observações foram efetuados testes estatísticos que estimaram o coeficiente de variação (CV) das amostras. Os resultados indicam que o CV são 0,8% para Itanhaém e 17,87% para Maresias, respectivamente. Desta forma, confirmamos que a resolução influencia mais a estimativa da linha de costa localizada em Maresias do que em Itanhaém.

Os resultados aqui encontrados estão em concordância com os estudos realizados por LEDUC et al (1994), em que aumento da resolução poder ser responsável por uma oscilação em torno de 10% na estimativa da dimensão fractal.

LAWRENCE & RIPPLE (1996) salientam que este tipo de padrão oscilatório deve-se ao fato de que à medida que se aumenta a

resolução, o nível de detalhamento dos objetos também aumenta, diminuindo por conseguinte, os erros associados à estimativa de D das linhas de costa.

As observações acima comentadas, nos indicam que as métricas utilizadas para quantificar a estrutura da paisagem, baseadas nas proporções de forma, como por exemplo a dimensão fractal, podem providenciar informações não confiáveis quando utilizamos baixa resolução espacial, apresentando assim resultados com alto grau de incerteza (erros).

Segundo MULLER (1986) e KLINKENBERG (1994), quando o foco de interesse está centrado no estudo de linhas de costa ou redes de drenagem, as resoluções mais adequadas são aquelas que apresentam menor grau de incerteza de medida (erros) destas métricas.

Isto ocorre por que os valores das métricas utilizadas para quantificar a estrutura da paisagem em baixas resoluções apresentam-se menos acuradas, pois estes conjuntos de dados possuem distorções oriundas da generalização dos arranjos espaciais.

A generalização dos arranjos espaciais consiste na perda de detalhes, ou seja, a generalização nada mais é que a simplificação dos detalhes dos objetos à medida que diminuimos a resolução (WOODCOCK & STRAHLER, 1987; MARCEAU et al, 1994).

Neste nível de compreensão, à medida que aumentamos o número de amostras (passos) através da simulação da resolução das linhas de costa em sistemas de informação geográfica, estamos transformando estas linhas, tornando-as retilizadas através da perda da irregularidade (Figura 6).

Como podemos observar na figura 6, o processo de generalização das linhas de costa, notamos que a forma do litoral vai se alterando, ou seja, a morfologia costeira vai perdendo a irregularidade (tortuosidade) tornando-se geometricamente regular. A figura 6 também nos mostra que o processo de generalização afeta a estimativa da dimensão fractal, pois a medida que alteramos o nível de detalhe dos objetos, tornando-os retilíneos, ocorre a perda de

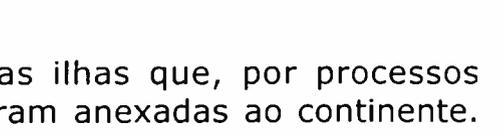
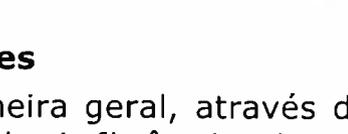
informação e, conseqüentemente, valores imprecisos da dimensão fractal são estimados não condizendo com a realidade encontrada das linhas de costa.

Os erros na estimativa de D , oriundos da utilização de resoluções grosseiras (baixo nível de detalhe) poderiam trazer conseqüências desastrosas em estudos ecológicos, geológicos e geográficos, pois a complexidade das regiões costeiras, dada pela sinuosidade da costa expressa pela dimensão fractal, pode ser um indicador dos padrões de diversidade de espécies, da origem do assoalho oceânico, no estabelecimento de áreas urbanas e portos, etc.

Estes resultados revelam a importância da resolução espacial na estimativa da dimensão fractal (D), porém, cabe aqui ressaltar, que para as linhas de costa, a geomorfologia do litoral também pode influenciar na mensuração da dimensão fractal, pois a feição do litoral onde as características geomorfológicas são mais homogêneas, isto é, apresentam geometria retilínea, a resolução não tem tanta influência na estimativa de D , como a porção do litoral em que as características geomorfológicas apresentam-se mais heterogêneas (sinuosas).

A oscilação nos valores de D das linhas de costa estudadas, aqui apresentados, segundo ALMEIDA (1968), ALMEIDA & CARNEIRO (1998) e SUGUIO (1999), são influenciadas pela morfologia do litoral paulista. O litoral do Estado de São Paulo é dividido em duas regiões, a porção Norte e a porção Sul. A feição Norte é caracterizada pela existência de falésias, onde se desenvolvem planícies costeiras, baías e enseadas, que são responsáveis por uma linha de costa totalmente irregular como, por exemplo, Maresias, Caraguatatuba, Ubatuba, Picinguaba, etc. Na feição Sul, a linha de costa muda a característica, torna-se baixa, com planícies deposicionais com praias extensas e urbanizadas, que são responsáveis por uma linha de costa retilizada como, por exemplo, Praia Grande, Mongaguá, Itanhaém, Peruíbe, etc. Contudo, estes autores também salientam a existência de algumas exceções, como os maciços da Juréia, Itatins e Iguape, que na

Figura 6 - Variações geométricas das linhas de costa (Maresias e Itanhaém) em função da resolução espacial e da dimensão fractal

Resolução (m)	Itanhaém	D	Maresias	D
125		1,0016		1,0066
250		1,0031		1,0317
500		1,0034		1,0794
1000		1,0045		1,1953
2000		1,0066		1,2879
4000		1,0087		1,4719
8000		1,0167		1,5532
16000		1,0254		1,6369

verdade são antigas ilhas que, por processos de colmatagem, foram anexadas ao continente.

Segundo ALMEIDA & CARNEIRO (1998); SUGUIO (1999), as diferenciações morfológicas entre as feições norte e sul do litoral paulista, podem ser explicadas pelo tectonismo, ou seja, pela movimentação de camadas, ocasionadas por movimentos endógenos, que propiciaram o soerguimento da porção Norte e subsidência da porção Sul do litoral paulista.

V - Conclusões

De maneira geral, através dos resultados da análise da influência da resolução na estimativa da dimensão fractal (D), podemos concluir que D é influenciado pela resolução espacial, pois dependendo do nível de detalhe de um conjunto de objetos a dimensão fractal apresenta valores diferentes.

Constatamos também que o comportamento da dimensão fractal pode ser influenciado pela geomorfologia das linhas de costa, pois dependendo do grau de

irregularidade da linha de costa, os valores de D possuem um padrão que é menos dependente da resolução, isto é, as linhas de costa com feições linearizadas (Itanhaém), apresentam valores de D muito similares, exibindo pouca variabilidade independentemente da resolução utilizada para mensurá-la.

Estes resultados nos alertam para a importância da resolução espacial em estudos no nível de paisagem, pois a utilização deste parâmetro incorretamente, pode acarretar em erros que mascarem e impossibilitem a interpretação acurada dos processos ecológicos, geológicos, geográficos, entre outros.

Os resultados apresentados e discutidos neste trabalho constituem-se em uma continuação aos estudos a serem desenvolvidos por outros pesquisadores, tanto na área de ecologia de paisagem ou de geografia, aplicando a teoria dos fractais.

Como este tipo de abordagem tem apenas duas décadas de existência, e que no Brasil está apenas aflorando, saliento que como qualquer outro modelo matemático, a teoria fractal apresenta limitações. O sucesso deste tipo de pesquisa depende da qualidade e da disponibilidade dos dados, além de um bom conhecimento teórico-metodológico do pesquisador.

Bibliografia

ALMEIDA, J. D. "Morfologia do Litoral". In: AROLDO DE AZEVEDO (Ed.) *Brasil: A Terra e o Homem*. Rio de Janeiro, Companhia Editora Nacional. 1968, p. 135 - 150.

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. "Origem e evolução da Serra do Mar". *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, v. 25 n. 2, 1998, p. 135 - 150.

AUTODESK, INC. *AutoCad MAP Release 2: user's guide*, EUA, 1998.

BARBOSA, R. M. *Descobrimos a Geometria Fractal para a sala de aula*. Belo Horizonte: Autêntica, 2002, 144p.

BENSON, B.; MACKENZIE "Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters" *Landscape Ecology*. v. 10, 1995, p.113 - 120.

JIANG, J.; PLOTNICK, R. E. "Fractal analysis of the complexity of United States Coastlines" *Mathematical Geology*. v. 30, 1998, p. 535 - 546.

KLINKEBERG, B. "A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features" *Mathematical Geology* v. 26, 1994, p. 23 - 46.

LAM, N. S.; DE COLA, L. *Fractals in Geography*. New Jersey: Prince and Hall, Inc., 1993, 308 p.

LAWRENCE, R.; RIPLE, W. "Determining patch perimeters in raster image processing and geographic information systems" *International Journal of Remote Sensing*. v. 17, 1996, p. 1255 - 1259.

LAWFORD, G. J.; MASTERS, E. G. "Fractals and the cartographic line". *Cartography*. v. 31. n. 2. 2002, p. 61 - 72.

LEDUC, A.; PRAIRIE, Y. T.; BERGERON, Y. "Fractal dimension estimatives of fragmented landscape: sources of variability" *Landscape Ecology*. v. 9, 1994, p. 279 - 286.

LONGLEY, P. A.; BATTY, M. "Fractal measurement and line generalization" *Computers & Geosciences*. v. 15, 1989, p. 167 - 183.

MANDELBROT, B. B. *How long is the coast of Britain*. Science. v.156. 1967, p. 636 - 638.

_____. *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman, 1983, 468 p.

MARCEAU, D. J.; GRATON, D. J.; FOURNIER, R. A.; FORTIN, J. P. *Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment*. 2. The optimal spatial resolution.

Remote Sensing of Environment. v. 49. 1994, p.105 - 117

MARQUES, M. L.; FERREIRA, M. C. "Avaliação preliminar de um procedimento metodológico para o cálculo da dimensão fractal das linhas de costa do litoral paulista" In: *VIII Simpósio de Quantificação em Geociências*. Rio Claro: Anais Rio Claro. v. 1, 2000, p. 145 - 147

MLADENOFF, D.; GERALD, J. N.; MARK, A. W. *Effects of changing landscape pattern and U.S.G.S. land cover data variability on ecoregion discrimination across a forest-agriculture gradient*. Landscape Ecology. v. 12, 1997, p. 379 - 396.

MULLER, J. C. *Fractal dimension and inconsistencies in cartographic line representations*. The Cartographic Journal. v. 23. 1986, p. 123 - 130.

PEITGEN, H. O. P; JÜRGENS, H.; SAUPE, D. *Fractals of the Classroom. Part One: Introduction*

to Fractals and Chaos. New York: Springer-Verlag, 1992, 450p.

SUGUIO, K. *Geologia do quaternário e mudanças ambientais*. São Paulo: Paulo's Editoras, 1999, 366p.

TURNER, M. G.; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. *Landscape Ecology in theory and practice: pattern on process*. New York: Springer Verlag, 2001, 401p.

YOUNG, R.; CHOPPING, M. "Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes". *Progress in physical Geography*. v.20. 1996, p. 418 - 445.

WOODCOCK, C. E.; STRAHLER, A. H. "The factor of scale in remote sensing" *Remote Sensing of Environment*. v. 21. 1987, p. 311 - 332.

Trabalho enviado em dezembro de 2003.

Trabalho aceito em abril de 2004.

