

MODELAGEM FRACTAL DE UMA IMAGEM TM/LANDSAT-5 NO MUNICÍPIO DE VIÇOSA - MG

MARCOS CICARINI HOTT¹
VICENTE PAULO SOARES²
CARLOS ANTÔNIO ÁLVARES SOARES RIBEIRO²
JAMES JACKSON GRIFFITH²

¹ Laboratório de Geoprocessamento/DEF/UFV, 36571-000 Viçosa-MG

² Depto. de Engenharia Florestal da UFV, 36571-000 Viçosa-MG

Abstract - The present study was carried out in a composed (3, 4, 5) Landsat-5/TM digital image, from a area with approximately 235 km², located in the county of Viçosa-MG, obtained in october of 1994. The objective of this work was to analyse the anthropic act dynamic in the environment, decomposing the spatial variation of the elements that compose the landscape through fractal modeling. The fractal model for the surface was calculated by Hurst exponents method obtained through R/S analysis, using windows (J) with fixed size, 128 x 128 pixels. Four ranges of scaling were visualized on the model, meaning that each one is formed by a sequence of windows with invariant fractal dimensions. From the results obtained is possible to elaborate environmental management technics, as well as to accomplish fractal simulations of the dynamic represented in the digital image made through remote sensing.

Key words: Fractal modeling, Hurst exponents, fractal dimension, spatial variation, remote sensing.

1. Introdução

O termo “fractal” foi criado pelo matemático polonês Benoit Mandelbrot, o qual se inspirou no adjetivo latino *fractus*, cujo significado literal é fraturado ou quebrado, podendo indicar irregularidade. Um fractal é uma estrutura na qual as suas partes se assemelham ao todo, sendo essa característica dos fractais denominada “auto-semelhança”. A geometria fractal veio como uma ferramenta capaz de tratar, eficientemente, as estruturas complexas, irregulares e descontínuas oriundas da natureza. Inúmeros exemplos de fractais podem ser visualizados em feições da natureza, como nuvens, montanhas, plantas, etc., e em séries temporais ou espaciais de dados de origem antrópica, contextualizando as ações humanas nos processos naturais (Mandelbrot, 1983).

A geometria fractal tem sido utilizada em estudos de sensoriamento remoto para as mais variadas finalidades, como para a análise de padrões e rugosidade nas paisagens (Olsen et al., 1993; De Jong e Burrough, 1995; Chen et al., 1997; Pachepsky et al., 1997; Emerson et al., 1999; Qiu et al., 1999).

A superfície terrestre contém inúmeros elementos e fatores que contribuem para torná-la extremamente complexa. As imagens orbitais de sensoriamento remoto produzidas pelos sensores dos satélites trazem informações geográficas no formato “raster”, deste modo cada pixel na imagem carrega consigo a representação da reflectância média de um local, através dos valores de brilho (Crósta,

1993). Assim, cada resolução espacial (ou tamanho do pixel) permite a obtenção de um nível de informação acerca dos fenômenos geográficos imageados. A resolução próxima a 30 metros permite a análise simultânea de todos os fenômenos retratados em uma cena (Emerson et al., 1999). Portanto, em imagens digitais TM/Landsat-5 é possível analisar-se toda a dinâmica de antropização da superfície terrestre imageada, própria para a escala ou resolução em questão.

A estimação de um modelo fractal para uma superfície envolve a escolha de uma propriedade a ser modelada, das faixas de escalas e do método para o cálculo das dimensões fractais para as faixas de escala.

Os parâmetros fractais podem ordenar as estruturas representadas por dados espaciais, decompondo a variação presente e exibindo escalonamento fractal. A dimensão fractal é o principal parâmetro em um modelo fractal, e ela pode ser entendida como uma medida de complexidade, irregularidade, fragmentação ou diversidade, dependendo da escala de análise adotada. O expoente de Hurst (H), inicialmente usado para a análise de dados de vazões de rios, pode ser relacionado à dimensão fractal (D_F) de superfícies como $D_F = 3 - H$, ou de linhas como $D_F = 2 - H$ (Mandelbrot, 1983; Russ, 1995; Pachepsky et al., 1997).

A análise estatística R/S ou análise de “range” reescalado (Mandelbrot, 1983) avalia as amplitudes (R) médias de segmentos de uma série temporal ou espacial, ponderada pelo desvio-padrão dos segmentos (S), e o expoente de Hurst (H) é a inclinação da reta ajustada por regressão linear da relação log-log de R/S versus tamanho do segmento. O expoente H vai de 0 a 1. Um valor de H igual a 0,5 é um indicativo de uma série aleatória; $H > 0,5$ indica a presença de um efeito de memória (tendência) na série de dados (quanto mais próximo de 1 maior é o efeito de memória); e $H < 0,5$ denota irregularidade na série.

Em relação à D_F de superfícies, D_F alta ($>2,5$) indica grande irregularidade nos dados ou grande rugosidade, D_F média ($\sim 2,5$) indica a presença de fenômenos estocásticos e D_F baixa ($<2,5$) indica a presença de fenômenos não estocásticos, ou seja, a presença de um efeito de memória nos dados. Dados de superfície oriundos de sensoriamento remoto, geralmente, são tratados como auto-afins, significando que os mesmos são anisotrópicos, com fator de escalonamento vertical e horizontal diferenciados (Mandelbrot, 1983).

Os fractais naturais são mais isotrópicos, indicando auto-similaridade. Contudo, áreas com intensa influência antrópica, como áreas urbanas, podem ser também auto-similares no caráter direcional, mas com variação espacial aleatória.

2. Material e métodos

A área de estudo está localizada no município de Viçosa, Zona da Mata Mineira, compreendida entre as coordenadas geográficas 20°41'S, 42°48'O e 20°51'S, 42°57'O. A região caracteriza-se por uma topografia acidentada, apresentando porções reduzidas de área plana. As áreas de uso/ocupação são formadas por área urbana, florestal e agrícola. As análises foram feitas em uma imagem digital TM/Landsat-5. O produto digital é o resultado do imageamento realizado pelo sensor TM (“Thematic mapper”) a bordo do satélite LANDSAT-5 em outubro de 1994, com resolução de 30 metros. A imagem analisada é formada pela composição RGB das bandas espectrais 3 (Vermelho), 4 (IV-Próximo) e 5 (IV-Intermediário), as quais proporcionaram boa distinção visual, e constituída por uma

grade de 512 x 512 pixels, correspondendo a uma área total imageada de aproximadamente 235 km². A imagem digital foi processada e analisada utilizando-se o software Idrisi para Windows, versão 2.0 (Eastman, 1998) e o software Fractor 1.0, desenvolvido para este trabalho.

Foi construído um modelo fractal com resolução e janelas (J) fixas, com o objetivo de determinar as grandes faixas de escalonamento fractal geográfico da superfície para a avaliação da dinâmica antrópica no ambiente (visto que a área imageada sofre intensa influência humana) e da variabilidade espacial. Portanto, a modelagem fractal foi realizada sobre as frequências espaciais dos valores de brilho da imagem TM/LANDSAT-5 da área de estudo, utilizando-se a área total da imagem e janelas da mesma para a análise da auto-afinidade ao longo das extensões espaciais.

As imagens de sensoriamento remoto geralmente retratam superfícies auto-afins, e numa resolução de 30 metros, consegue-se avaliar os vários fenômenos geográficos exibidos na cena, simultaneamente, não sofrendo a interferência de fenômenos individuais, como em resoluções muito pequenas ou muito grandes.

A imagem original formada por uma grade de 512 x 512 pixels foi subdividida em 16 janelas (J) ou quadrantes, constituídos por uma grade de 128 x 128 pixels, denominados em alusão à um eixo de coordenadas Y/X, linha/coluna, (e.g., 1/1) iniciando na parte superior esquerda. Devido às características anisotrópicas das superfícies auto-afins, tornou-se necessária a execução de análise direcional diretamente com as dimensões fractais, a qual serviu de parâmetro para o modelo.

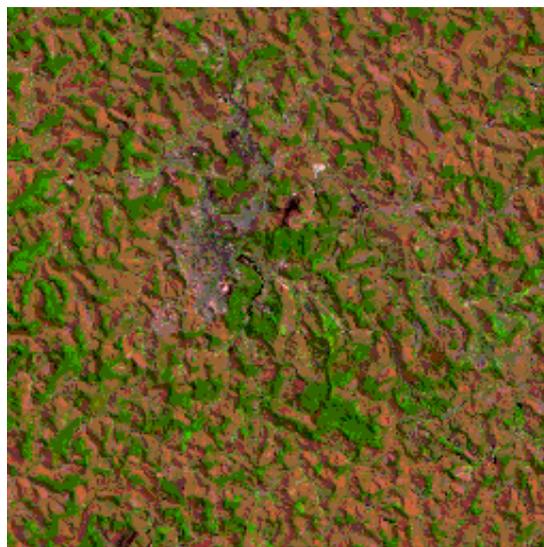


Figura 1 - Imagem TM/Landsat-5 da área de estudo, formada pela composição das bandas 3, 4 e 5.

Os expoentes de Hurst (H) foram estimados para os transectos ou seções transversais da imagem original na direção leste-oeste e norte-sul, e para as janelas na direção leste-oeste, totalizando 3072 estimativas de H.

Para a estimação de H, primeiramente realizou-se a análise R/S subdividindo-se a série de dados X(t) em d segmentos (de vários tamanhos), fazendo o uso das seguintes equações (Mandelbrot, 1983):

$$R = \max_{0 \leq u \leq d} \{ \sum X(u) - (u/d) \sum X(d) \} \\ - \min_{0 \leq u \leq d} \{ \sum X(u) - (u/d) \sum X(d) \}.$$

Em seguida calculou-se o desvio-padrão da amostra de X(t),

$$S^2 = \sum X(d)^2 / d - (\sum X(d))^2 / d^2.$$

A expressão $Q(d) = R(d)/S(d)$ é a estatística R/S, ou “range” reescalado auto-ajustado de $\sum X(t)$. Na execução do plot log-log de R/S versus os vários tamanhos dos d segmentos, H é a inclinação da reta ajustada por regressão linear da relação observada no gráfico.

A partir do H médio para cada imagem ou janela calculou-se os valores de D_F para as superfícies imageadas, na resolução e composição de bandas citadas anteriormente, através da seguinte relação:

$$D_F = 3 - H.$$

3. Resultados e discussão

Para um melhor entendimento dos resultados obtidos nas estimações dos expoentes H realizou-se uma comparação entre dois transectos ou seções transversais da imagem original (composição RGB 3, 4 e 5) na direção leste-oeste, cujos valores de H atingiram um pequeno e um grande valor. O expoente H para a linha 498 foi estimado em 0,676 e para a linha 307 em 0,911. Pelo valor de H igual a 0,676 para a linha 498 evidencia-se o efeito de memória presente na série espacial, mas esta se aproximou de um ruído aleatório ou ruído Gaussiano branco, representado com $H = 0,5$.

No perfil da linha 307 observa-se mudanças gradativas nos valores de brilho, com um número bem menor de segmentos com inclinação nula, o que resultou em um grande efeito de memória com $H = 0,911$ (**Figura 2**). Note, que o perfil dos valores de brilho da linha 498 detém vários segmentos sem inclinação alternando com alguns segmentos com grande inclinação, o que tornam as mudanças do perfil abruptas, ou seja, aumentando o nível de aleatoriedade da série (**Figura 3**).

A soma das influências de todas as seções transversais em uma superfície resultam na complexidade total da mesma, personificada pela dimensão fractal D_F da superfície.

A estimativa dos expoentes de Hurst demanda muito cálculo, e gera grandes tabelas de resultados. Mas os valores dos expoentes de Hurst são bastante precisos, e a técnica da análise R/S é bastante robusta.

Um exemplo do processo de análise R/S para uma série de dados espaciais é fornecido pelo **Tabela 1 e Figura 4**. Neste exemplo são exibidos os dados obtidos da análise R/S para a seção transversal 307, a qual apresentou um grande valor de expoente H na direção leste-oeste. Observa-se que a linha de tendência da regressão linear se ajusta muito bem aos pontos da relação observada.

Contudo, a determinação de D_F pelo método dos expoentes de Hurst tende direcionalmente, e em se tratando de superfícies auto-afins a análise da anisotropia torna-se necessária.

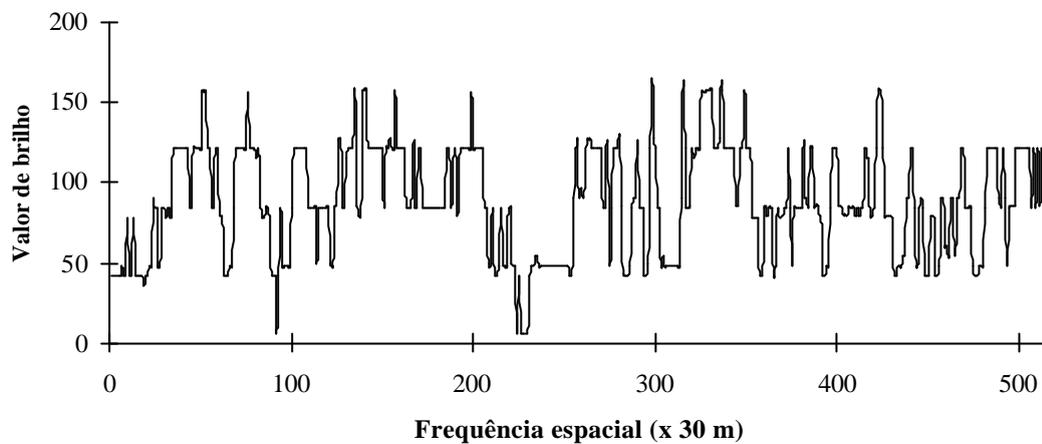


Figura 2 - Perfil da linha transversal 307 da imagem na direção leste-oeste.

Desta forma, foram determinadas as dimensões fractais da imagem original com as seções transversais sendo analisadas na direção leste-oeste e norte-sul. A D_F leste-oeste é igual a 2,173 e a D_F norte-sul é igual a 2,162.

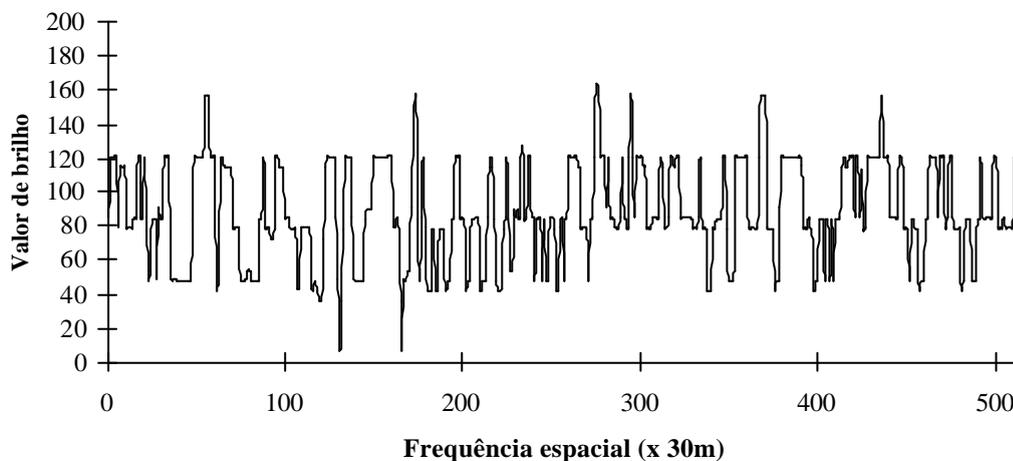


Figura 3 - Perfil da linha transversal 498 da imagem na direção leste-oeste.

Uma complexidade ou rugosidade ligeiramente maior na direção leste-oeste foi constatada. Uma explicação imediata para isto seria que a variação nos valores de brilho na direção leste-oeste é maior, com segmentos de rugosidade homogêneas ocorrendo mais na direção norte-sul. Uma outra explicação para a diferença na dimensão fractal é que os fragmentos de florestas presentes, que detém áreas de menor variação de brilho, tenham sua forma mais alongada, predominantemente, nas direções norte, noroeste e nordeste.

As diferenças direcionais nos desvios-padrão dos vários valores de H são pequenas, mas indicam uma maior heterogeneidade na direção leste-oeste.

Tabela 1 - Valores resultantes da análise R/S para o transecto leste-oeste 307.

Log de d	Log de R/S
0,60206	0,1760178
0,90309	0,4787617
1,20412	0,7372404
1,50515	0,998164
1,80618	1,3191275
2,10721	1,5839376
2,40824	1,8048538

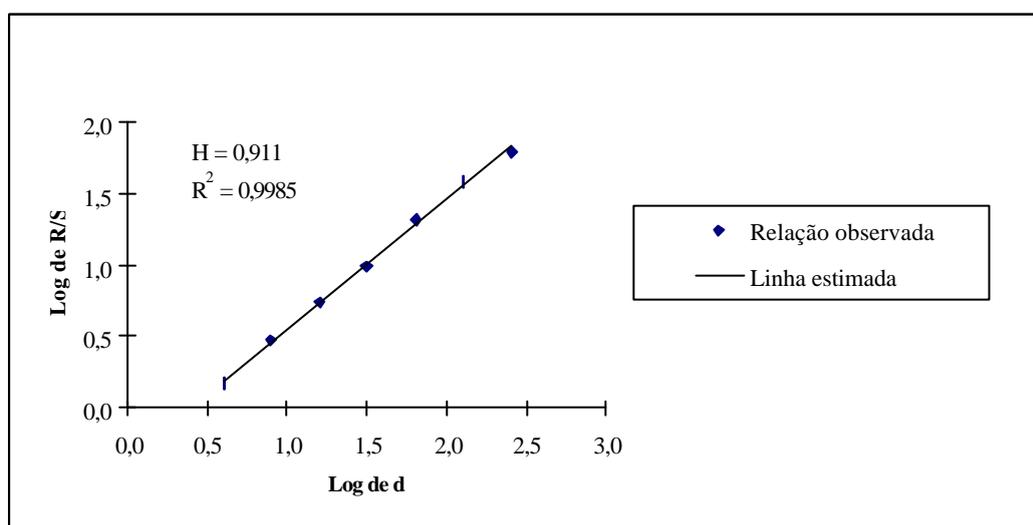


Figura 4 - Gráfico log-log usado na estimação do expoente de Hurst para o transecto leste-oeste 307.

Os parâmetros obtidos (**Tabela 2**) trazem informações sobre variação e padrão de brilho na imagem, e eles podem ser utilizados para muitas finalidades, desde análise de antropia até em modelos de simulação fractal.

A partir dos valores de D_F para cada janela, ordenou-se as faixas de escalas através do escalonamento fractal das escalas geográficas, utilizando-se análise visual pela exposição das D_F 's em quadrantes, em referência à imagem original subdividida. Visualmente, percebe-se na **Figura 5** a existência de quatro faixas de escalonamento fractal auto-afim (seqüência de dois ou mais quadrantes adjacentes com valores de D_F 's próximos), destacadas e diferenciadas em tons de cinza, onde a cor branca representa a ausência de faixa escalonada.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo fractal estimado para a imagem da superfície.

Imagem	H médio	Desvio-Padrão de H médio	DF
leste-oeste	0,827	0,041	2.173
Norte-sul	0,838	0,038	2.162
1/1	0,921	0,062	2.079
2/1	0,934	0,076	2.066
3/1	0,905	0,061	2.095
4/1	0,915	0,072	2.085
1/2	0,904	0,063	2.096
2/2	0,865	0,075	2.135
3/2	0,909	0,073	2.091
4/2	0,884	0,062	2.116
1/3	0,889	0,068	2.111
2/3	0,915	0,061	2.085
3/3	0,917	0,065	2.083
4/3	0,901	0,074	2.099
1/4	0,915	0,068	2.085
2/4	0,891	0,051	2.109
3/4	0,888	0,071	2.112
4/4	0,856	0,062	2.144

Foi constatada a existência de quatro faixas escalonadas, nas quais pode-se inferir que a variação é semelhante. Desta forma, confirma-se a observação feita na análise direcional, que na direção leste-oeste a heterogeneidade é maior.

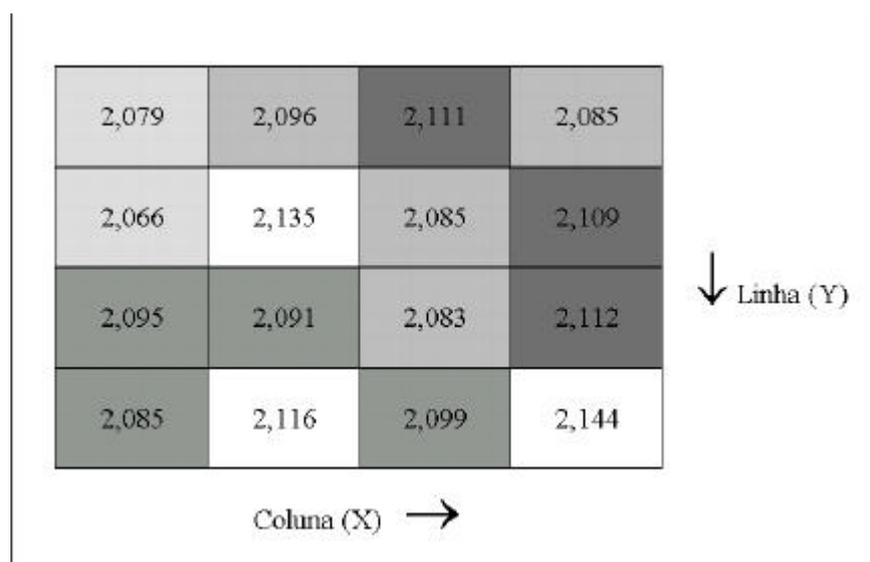


Figura 5 - Dimensões fractais calculadas nas janelas da imagem digital e suas respectivas posições.

A disposição das faixas escalonadas, e os quadrantes com seus valores de D_F 's, indicam suas fases nos vários processos pelos quais passam os fenômenos dinâmicos não lineares, onde a constante mudança nos parâmetros que regem a construção da paisagem promovem a estagnação ou o princípio de processos ecológicos ou antrópicos.

Ainda não se tem o conhecimento de testes estatísticos específicos que façam uma análise padronizada de parâmetros fractais.

As janelas com D_F 's maiores indicam a presença de uma ação antrópica maior, como nas janelas 2/2 e 4/4, onde predominam, respectivamente, área urbana e área agrícola. As janelas com D_F 's menores indicam a presença de uma ação antrópica menor (do ponto de vista destrutivo), como as janelas 2/1 e 3/3, onde predominam maciços de áreas de florestas (ver **Figura 1**).

4. Conclusão

Os valores de dimensões fractais estimados mostraram uma boa relação com os fenômenos que estão sendo retratados na imagem. A partir desses valores e da dinâmica envolvida, bem como das escalas de análise, pôde-se associar as dimensões fractais aos processos de antropização que predominam em cada área da superfície imageada.

5. Referências

- Chen, K. S., Yen, S. K., Tsay, D. W. Neural classification of SPOT imagery through integration of intensity and fractal information. **International Journal of Remote Sensing**, 1997. Vol. 18, nº 4, pp. 763-783.
- Crósta, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. Ver.: Campinas, 1993. 170 p.
- De Jong, S. M.; Burrough, P. A. A fractal approach to the classification of Mediterranean vegetation types in remotely sensed images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 1995. 61: 1041-1053.
- Eastman, J. R. **Idrisi for Windows - versão 2: manual do usuário**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Recursos Idrisi, 1998. 240 p.
- Emerson, C. W., Lam, N. S., Quattrochi, D. A. Multi-Scale fractal analysis of image texture and pattern. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 1999. Vol. 65, nº 1, pp. 51-61.
- Mandelbrot, B. **The fractal geometry of nature**. W.H. Freeman & Co., 1983. 550p.
- Olsen, E. R., Ramsey, R. D., Winn, D. S. A Modified fractal dimension as a measure of landscape diversity. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 1993. Vol. 59, nº 10, pp. 1517-1520.
- Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Gimenez, D. Fractal modeling of airborne laser altimetry data. **Remote Sensing of Environment**, 1997. 61: 150-161.
- Qiu, H., Lam, N. S., Quattrochi, D. A., Gamon, J. A. Fractal characterization of hyperspectral imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 1999. Vol. 65, nº 1, pp. 63-71.
- Russ, J. C. **The image processing handbook**. CRC Press, 1995. 674 p.