

Detecção de óleo na superfície do mar com imagens RADARSAT-1 utilizando o conceito de fractais dinâmicos

Gil Márcio Avelino Silva ¹
Fernando Pellon de Miranda ¹
Luiz Bevilacqua ²
Marcelo Miranda Barros ³

¹ Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - CENPES
Av. Horácio Macedo, 950 - 21941-915 - Ilha do Fundão - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
gilmarcio@petrobras.com.br
fmiranda@petrobras.com.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Caixa Postal 68552 - 21949-900 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil
bevilacqua@coppe.ufrj.br

³ Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Departamento de Estruturas / Engenharia - DEP ETU
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - 25651-075 - Juiz de Fora, JF, Brasil
marcelo.barros@ufjf.edu.br

Abstract. Oil detection on the sea surface with RADARSAT-1 images is an interest topic to the industry. The study mechanism proposed here is based on the dynamic behavior of the spring-mass system, where the geometry of the spring is associated with the sea surface roughness. This geometry is configured from transect lines, i.e., lines that cross the RADARSAT-1 image and provide the DN (Digital Number) value of each pixel that they traverse. The problem is, based on the geometry of the original spring, to build a successive sequence of samples by means of cuts that eliminate parts of the spring. Three types of external forces acting on each spring are considered, as follows: moment M, horizontal force H, and vertical force V. The log-linear relationship between the natural period, $\log(T_i/T_0)$, and the size of the spring measured in pixels, $\log(L_i/L_0)$, demonstrates the pattern of self-similarity of the ocean surface under wind speed ranging from 3 to 8 m/s. The slope of the straight lines defines the dynamic fractal dimension of the investigated geometry. Oceanic portions with oil exhibit values of dynamic fractal dimension lower in the three external stimuli for the transect lines, if compared with the standard pattern of the sea. However, the three average values for the false target zone are greater than those for the sea surface external forces. This result shows the potential of the dynamic fractal approach (physical in nature) to discriminate different objects present in RADARSAT-1 images of the ocean surface.

Palavras-chave: oil slick, RADARSAT-1, dynamic fractals, Gulf of Mexico, mancha de óleo, RADARSAT-1, fractais dinâmicos, Golfo do México.

1. Introdução

O mapeamento de regiões com óleo na superfície do oceano usando imagens RADARSAT-1 é uma tarefa difícil e representa uma importante área de interesse para o desenvolvimento de aplicações. Neste contexto, a geometria fractal tem sido reconhecida como uma ferramenta útil para a detecção de óleo no mar, Marghany et al. (2009). Modelos empregando geometria fractal têm sido utilizados numa variedade de aplicações de processamento de imagens e de reconhecimento de padrões. A base para a análise fractal está na característica de auto-similaridade, que é a propriedade de uma curva ou superfície em que cada parte é indistinguível do todo, onde a estrutura original é feita de cópias de si mesma em escala reduzida, Fukunaga (1990) e Pentland (1984), este caso é classificado como um fractal

genuíno. No caso da superfície do mar, pode-se dizer que ela apresenta um padrão fractal estatístico, não tão perfeito como o fractal genuíno.

O mecanismo para o estudo aqui proposto é baseado no comportamento dinâmico do sistema massa-mola, onde a geometria da mola está associada à rugosidade da superfície do mar, Silva (2013). Tal sistema tem um período natural de vibração, que depende da massa e da capacidade de armazenar a energia elástica da mola, Bevilacqua e Barros (2011), a energia elástica armazenada depende da força externa atuando na mola, bem como da geometria, seção transversal e módulo de elasticidade da mola. Neste trabalho foram consideradas molas com o mesmo módulo de elasticidade e seção transversal. A área de estudo está situada na Baía de Campeche, na porção meridional do Golfo do México, onde ocorre uma proeminente exsudação petrolífera no campo de Cantarell, Miranda et al. (2004).

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia proposta é empregada na análise fractal dinâmica de linhas que cruzam a imagem RADARSAT-1, *transect lines*, que perfazem a geometria da mola a partir de valores de níveis de cinza (DN - *Digital Number*) de cada pixel que elas atravessam. Tais valores formam os picos e vales da geometria da mola.

Cada mola gerada a partir de uma *transect line* é fixada (engastada) em uma extremidade, sendo a outra ligada a uma massa. O problema consiste em, com base na geometria da mola original, construir uma sequência sucessiva de amostras por meio de cortes eliminando partes da mola, como ilustra a Figura 1.

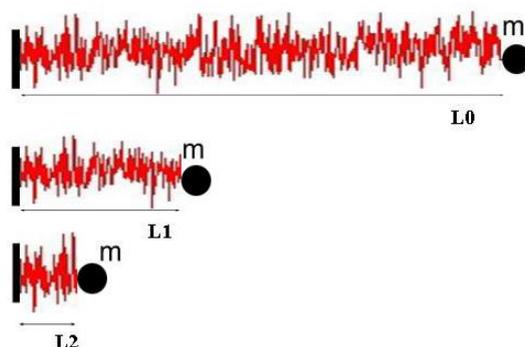


Figura 1. Sequência massa-mola construída a partir de uma *transect line*, onde L_0 se refere a seu comprimento original.

Foram considerados três tipos de forças externas atuando sobre cada mola, os quais são denominados de momento M , força horizontal H e força vertical V (Figura 2). Cada força externa produz um efeito direto correspondente em termos de rotação ou deslocamento de massa. O momento M produz uma rotação θ , a força horizontal H produz um deslocamento horizontal u e a força vertical V produz um deslocamento vertical v .

Uma vez submetida à atuação de um estímulo externo, casos 1, 2 ou 3 na Figura 2, a mola sofre uma deformação até atingir a configuração de equilíbrio. Desse modo, a mola armazena certa quantidade de energia potencial elástica devido à flexão, que é obtida pela Equação 1 abaixo, onde E corresponde ao módulo de elasticidade, I ao momento de inércia da seção transversal, $M(s)$ à distribuição do momento de flexão ao longo da mola e L ao comprimento total da mola.

$$W = \frac{1}{2} \frac{1}{EI} \int_0^L [M(s)]^2 ds \quad (1)$$

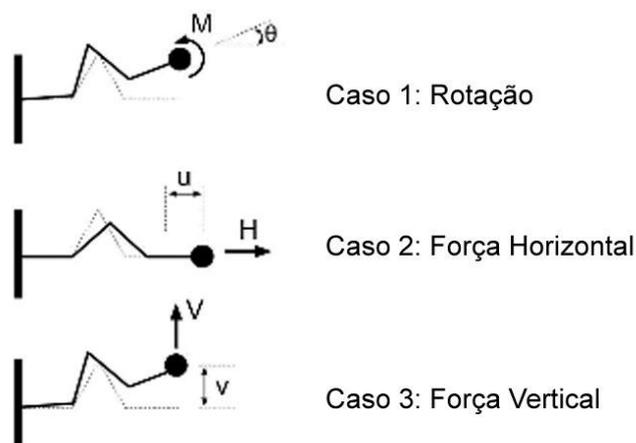


Figura 2. Tipos de estímulos externos (forças).

Os períodos naturais de vibração para cada força externa (momento, força horizontal e força vertical) são estabelecidos pelas Equações 2, 3 e 4, respectivamente:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{J\varphi_1} \quad (2)$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{m\varphi_2} \quad (3)$$

$$T_3 = 2\pi\sqrt{m\varphi_3} \quad (4)$$

Deste modo, a metodologia adotada segue os seguintes passos: (1) seleção da imagem a ser estudada; (2) definição de *transect lines* horizontais e verticais na imagem escolhida, cruzando regiões de interesse; (3) aplicação do algoritmo que avalia o comportamento fractal dinâmico das *transect lines*; (4) caracterização dos alvos através de sua dimensão fractal dinâmica.

3. Resultados e Discussão

Para validar a metodologia proposta, foi utilizada a imagem RADARSAT-1 adquirida em 22/07/2001, no módulo de operação SCN1 (*ScanSAR Narrow-I*). A velocidade do vento medida pelo satélite QuikSCAT na região abrangida pela imagem variou de 1.5 a 9 m/s, Miranda et al. (2004). A seguir, foram nela estabelecidas duas sub-áreas (Figura 3). A primeira delas (canto superior esquerdo) corresponde a uma região oceânica desprovida de alvos. Neste caso, foi estudado o comportamento da dimensão fractal dinâmica analisando apenas a rugosidade da superfície do mar. A outra contém manchas de óleo, um falso alvo e plataformas petrolíferas. Foram definidas, nas duas sub-áreas, *transect lines* verticais e horizontais.

Na primeira sub-área, foram definidas as *transect lines* V1, V2 e V3, assim como H1, H2 e H3 (Figura 4). A Figura 5 exibe a distribuição ao longo de V2 dos valores dos DN's (em 8 bits) da imagem RADARSAT-1 SCN1. Essa distribuição é representativa da geometria da mola no sistema massa-mola, cujo período de oscilação é baseado na lei de conservação de energia. A Figura 6 mostra a relação logarítmica entre o período natural, $\log(T_i/T_0)$, e o tamanho da mola em V2 medido em pixels (Figura 1), $\log(L_i/L_0)$.

Na Figura 6, é observado um comportamento linear no gráfico da citada relação logarítmica. O ângulo de inclinação das retas estabelece a dimensão fractal dinâmica da geometria investigada. Tal comportamento do momento de flexão com referência às forças

ilustradas na Figura 2 atesta o padrão de auto-similaridade estatística da superfície do mar. Os valores da dimensão fractal dinâmica para o momento de flexão e para as forças horizontal e vertical em V2 são apresentados na Tabela 1.

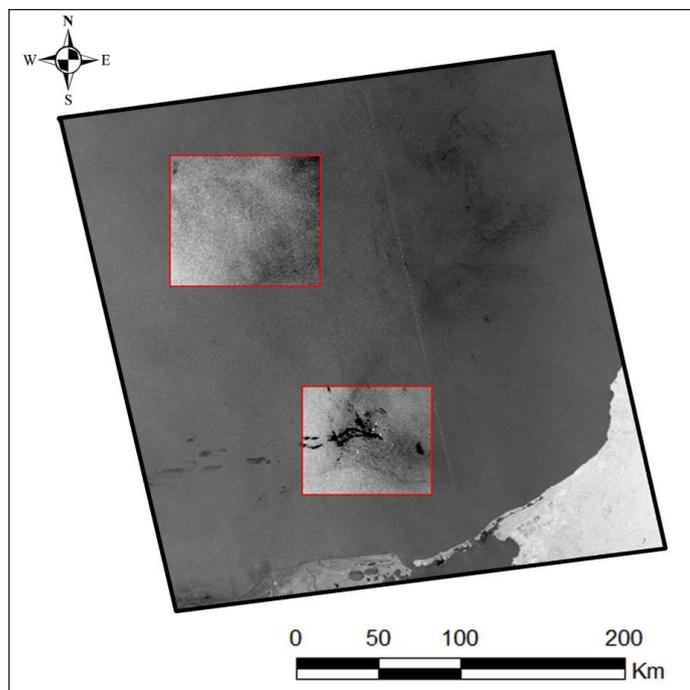


Figura 3. Imagem RADARSAT-1 SCN1 e as duas sub-áreas selecionadas para estudo.

A análise das demais *transect lines* verticais e horizontais da Figura 4 demonstrou a estabilidade dos valores referentes à superfície do mar desprovida de outros alvos de interesse. Com efeito, observa-se um desvio padrão baixo para o momento de flexão e para as forças horizontal e vertical (Tabela 2). No caso do momento e da força horizontal, os valores de dimensão fractal dinâmica ficaram próximos a 0,500 em todas as *transect lines*. Já para a força vertical, os resultados sempre se aproximaram de 1,500. Isso confirma que a superfície do mar apresenta irregularidades na imagem RADARSAT-1 SCN1 que podem ser caracterizadas por padrões de auto-similaridade estatística.

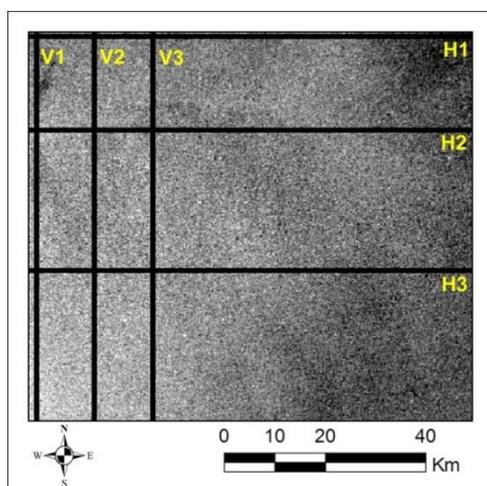


Figura 4. *Transect lines* no mar.

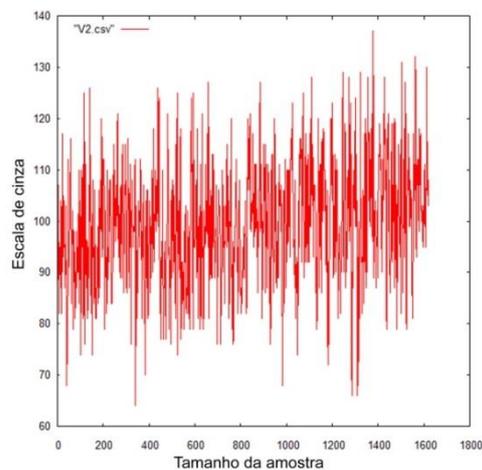


Figura 5. DN's da *transect line* V2.

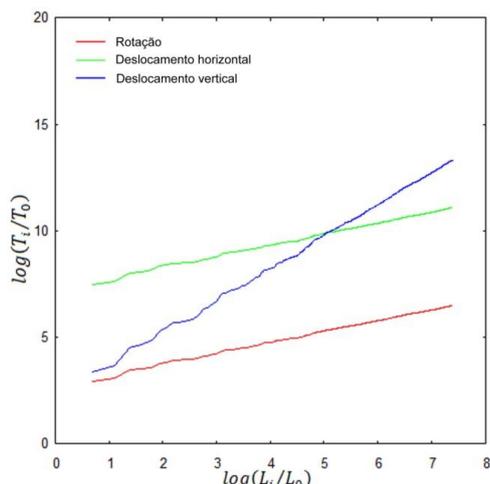


Figura 6. Relação linear entre o período natural, $\log(T_i/T_0)$, e o tamanho da mola em V2 medido em pixels, $\log(L_i/L_0)$. O ângulo de inclinação das retas estabelece a dimensão fractal dinâmica da geometria investigada.

Tabela 1. Valores da dimensão fractal dinâmica para o momento de flexão e para as forças horizontal e vertical da *transect line* V2.

Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical	Pontos
V2	0,507	0,519	1,502	1621

Por sua vez, ao se isolar os trechos das *transect lines* verticais e horizontais correspondentes a óleo, falso alvo e plataformas petrolíferas (Figuras 7, 8 e 9 respectivamente), são verificados resultados substancialmente diferentes (Tabela 2). Em geral, as porções oceânicas com óleo exibem dimensão fractal dinâmica menor nos três estímulos externos para as *transect lines* verticais e horizontais, se comparadas com o padrão do mar.

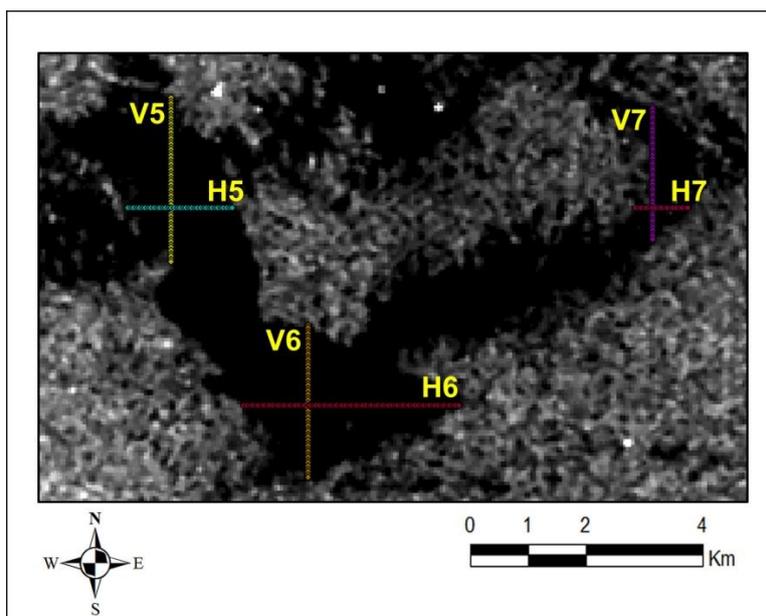


Figura 7. *Transect lines* no óleo.

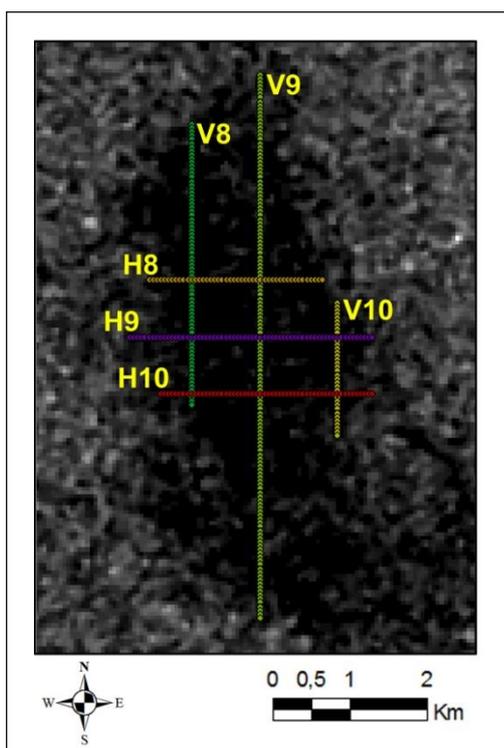


Figura 8. *Transect lines* no falso alvo.

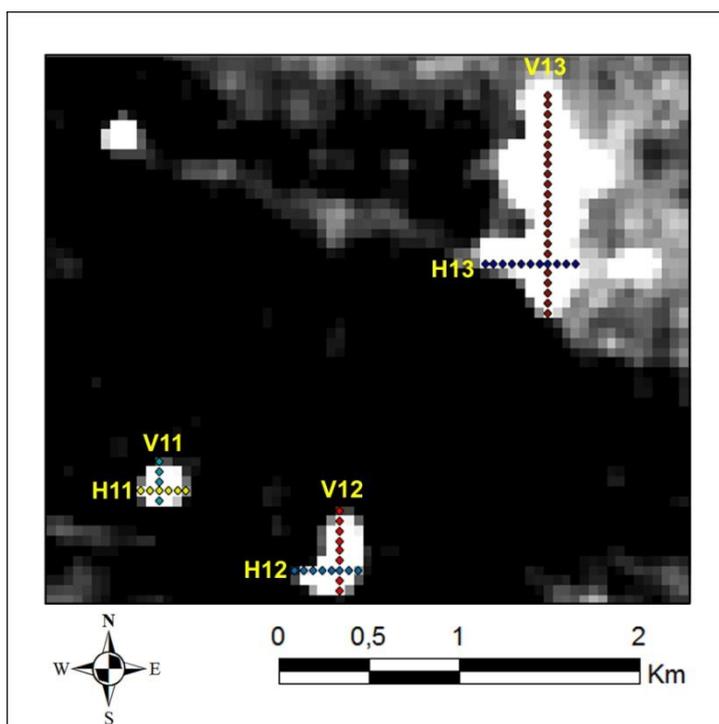


Figura 9. *Transect lines* nas plataformas petrolíferas.

É importante notar que o uso da dimensão fractal dinâmica permitiu caracterizar diferenças entre as manchas de óleo. Por exemplo, as “*transect lines*” V7 e H7, embora continuem indicando a presença de óleo, exibem valores diferentes de V5, V6, H5 e H6. Na verdade, essas “*transect lines*” atravessam uma zona mista de óleo e água, as quais, neste caso, apresentam valores mais elevados para os três estímulos externos que os outros dois casos de óleo.

Por sua vez, os valores de desvio padrão elevados no caso das plataformas de petróleo ocorreram pelo fato das “*transect lines*” V13 e H13 se apresentarem muito diferentes para as três forças externas. Isso pode ser explicado pelo fato das referidas *transect lines* atravessarem um grande complexo (AKAL-C) composto por 23 plataformas de petróleo. Além disso, ao se comparar a dimensão fractal dinâmica das plataformas com o mar, observa-se que, embora os valores do momento de flexão e da força vertical sejam mais baixos que o mar, o valor relacionado à força horizontal é superior a ele.

É importante ressaltar a discriminação, obtida através da análise da dimensão fractal dinâmica, entre a zona de falso alvo e as áreas ocupadas pela mancha de óleo. Tal abordagem mostrou que essas regiões possuem características diferentes. Enquanto a área coberta com óleo apresenta valores de dimensão fractal dinâmica menores que os do mar, a zona de falso alvo possui as médias dos três valores de forças externas maiores do que aquelas da superfície marinha.

Tabela 2. Valores da dimensão fractal dinâmica para o momento de flexão e para as forças horizontal e vertical referentes às regiões de óleo, falso alvo, plataformas e mar desprovido de alvos.

Resultados verticais

Óleo - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
V5	0,275	0,101	1,260
V6	0,352	0,201	1,216
V7	0,490	0,414	1,645
Média	0,372	0,239	1,374
Desvio padrão	0,109	0,160	0,236

Falso alvo - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
V8	0,642	0,485	1,521
V9	0,685	0,564	1,626
V10	0,786	0,540	1,709
Média	0,704	0,529	1,619
Desvio padrão	0,074	0,041	0,094

Plataformas - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
V11	0,435	0,742	1,139
V12	0,408	0,718	1,085
V13	0,208	0,264	0,996
Média	0,350	0,575	1,073
Desvio padrão	0,124	0,269	0,072

Mar - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
V1	0,487	0,503	1,486
V2	0,507	0,519	1,502
V3	0,515	0,522	1,514
Média	0,503	0,515	1,501
Desvio padrão	0,014	0,010	0,014

Resultados horizontais

Óleo - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
H5	0,261	0,178	0,922
H6	0,177	0,020	1,286
H7	0,399	0,565	1,238
Média	0,279	0,255	1,149
Desvio padrão	0,112	0,280	0,197

Falso alvo - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
H8	0,810	0,652	1,742
H9	0,922	0,722	1,847
H10	0,582	0,507	1,568
Média	0,771	0,627	1,719
Desvio padrão	0,173	0,110	0,141

Plataformas - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
H11	0,525	0,619	1,340
H12	0,526	0,948	1,265
H13	0,371	0,507	1,239
Média	0,474	0,691	1,281
Desvio padrão	0,089	0,229	0,052

Mar - Dimensão fractal dinâmica

	Momento	Horizontal	Vertical
H1	0,528	0,519	1,507
H2	0,512	0,487	1,499
H3	0,500	0,467	1,493
Média	0,513	0,491	1,499
Desvio padrão	0,014	0,026	0,007

4. Conclusões

O presente estudo mostrou que é possível identificar manchas de óleo na superfície do mar com imagens RADARSAT-1 SCN1 utilizando um algoritmo que calcula a dimensão fractal dinâmica a partir de *transect lines*. A metodologia é apresentada como uma ferramenta auxiliar nessa tarefa, bem como na detecção e caracterização de outros alvos no oceano. Nesse aspecto, um resultado importante foi a possibilidade de discriminação entre uma zona de falso alvo e as áreas ocupadas por manchas de óleo.

Agradecimentos

Os autores desejam agradecer a Petrobras pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa e pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

Marghany, M.; Cracknell, A. P.; Hashim, M. Comparison between RADARSAT-1 SAR different data modes for oil spill detection by a fractal box counting algorithm. **International Journal of Digital Earth**, v. 2, n. 3, p. 237-256, 2009.

Fukunaga, K., **Introduction to Statistical Pattern Recognition**. 2º ed., New York: Academic Press, 1990.

Pentland, A. P., Fractal-based description of natural scenes, **IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligent**, 6, pp. 661-674, 1984.

Miranda, F. P.; Marmol, A. M. Q.; Pedroso, E. C.; Beisl, C.H.; Welgan, P.; Morales, L.M. Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the Unsupervised Semivariogram Textural Classifier (USTC). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 424-436, 2004.

Silva, G. M. A. **Uso da dimensão fractal dinâmica para caracterização de manchas de óleo no mar a partir da análise de imagens SAR**. 2013. 176 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.

Bevilacqua, L.; Barros, M.M. Dynamical characterization of mixed fractal structures. **Journal of Mechanics of Materials and Structures**, v. 6, n. 1-4, p. 51-69, 2011.