

Análise fractal da interface água-vegetação como contribuição ao refinamento do índice de sensibilidade ambiental (ISA) a derrames de óleo na região de Coari (AM)

Thaís da Silva Dornelas¹
Fernando Pellon de Miranda¹
Luiz Landau²

¹Laboratório de Sensoriamento Remoto por Radar Aplicado à Indústria do Petróleo – LABSAR/COPPE/UFRJ – CT, Bloco I-114, Cidade Universitária – 21941-909 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil
thatadornelas@gmail.com, pellon@labsar.coppe.ufrj.br

²Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia – LAMCE/COPPE/UFRJ – CT, Bloco I-214, Cidade Universitária – 21941-900 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil
landau@lamce.coppe.ufrj.br

Abstract. The improvement of methodologies to establish the environmental sensitivity index (ESI) to oil spills in Amazonia is of paramount importance for the preservation of biodiversity in areas under the influence of the petroleum industry. This topic is the focus of the present paper, whose investigated site is located in the municipality of Coari (Amazonas State in Brazil), embracing part of the Urucu-Coari-Manaus pipeline and the Coari Terminal. Due to the evolutionary character of the landscape in Amazonia, a purely qualitative approach may not cover the corresponding levels of complexity. Thus, the fractal dimension is proposed as a complementary tool to the current methodology for the construction of ESI maps, which is based on a descriptive approach to fluvial geomorphology. Therefore, the following products were used to estimate the fractal dimension of the water-vegetation interface: RADARSAT-1 images and JERS-1 SAR classified mosaics at dry and wet seasons; SWBD mask; SRTM DEM at the flooding season. These products enabled the definition of fluvial segments along the Arauá, Urucu, Solimões and Coari rivers, as well as along the Coari Lake. The fractal dimension values allowed the quantitative characterization of different levels of geometric complexity for the water-vegetation interface, which were instrumental for the refinement of the ISA ranking in the surroundings of Coari.

Palavras-chave: remote sensing, fractal dimension, environmental sensitivity index, oil spill, sensoriamento remoto, dimensão fractal, índice de sensibilidade ambiental, derrame de óleo.

1. Introdução

O avanço da indústria petrolífera sobre áreas sensíveis e de grande importância estratégica, tais como a Amazônia Brasileira, tem tornado indispensável o desenvolvimento de estudos sobre a sensibilidade ambiental a derrames de óleo que levem em consideração as características destes ambientes.

A Amazônia abarca uma planície aluvial sujeita a significativas mudanças sazonais, uma vez que as cotas fluviométricas podem variar em até 18 metros ao longo do ciclo hidrológico. Por esse motivo, o conhecimento de aspectos fisiográficos na Amazônia, incluindo o comportamento periódico do fenômeno de inundação e sua interferência em atividades socioeconômicas, é de crucial importância para a gestão dos recursos naturais e para o desenvolvimento científico da região (Beisl, 2009).

Com efeito, visando identificar e hierarquizar a sensibilidade das feições hidrográficas a derrames de óleo, Araújo et al. (2002) adaptaram à realidade amazônica (Tabela 1) o índice de sensibilidade ambiental (ISA) anteriormente proposto pela NOAA. No entanto, mesmo em tal adaptação, a identificação do ISA se dá por meio da interpretação visual das feições mapeadas, conferindo um alto grau de subjetividade ao processo.

Assim, devido à complexidade da tarefa de reconhecimento visual da rede hidrográfica no ambiente amazônico, o presente trabalho pretende contribuir para o aprimoramento da metodologia de determinação de sensibilidade ambiental a derrames de óleo nessa região a partir da análise da dimensão fractal. Com efeito, a dimensão fractal constitui métrica que pode ser utilizada na caracterização da complexidade dos objetos geográficos, a qual vem

sendo aplicada em diversos estudos ambientais. Desse modo, como avaliação da dimensão fractal em ambientes sensíveis e passíveis de poluição por óleo, foi escolhida uma área no município Coari (Figura 1), a qual abriga parte da infraestrutura da Província Petrolífera de Urucu, nela representada pelo poliduto Urucu-Coari (GARSOL) e pelo Terminal de Coari.

Tabela 1. Índice de sensibilidade ambiental fluvial da região amazônica a derrames de óleo. Fonte: Araújo et al. (2002).	
Índice	Feições Hidrográficas
1	Estruturas artificiais
2	Laje ou afloramento rochoso
3	Corredeira
4	Escarpa/ barranco
5	Praia ou banco de areia/ seixo exposto
6	Praia ou banco de areia/ seixo abrigado
7	Praia ou banco de lama exposto
8	Praia ou banco de lama abrigado
9	Zona de confluência de rios e lagos
10	Vegetação alagada (igapó, várzea, chavascal, campo, etc.)

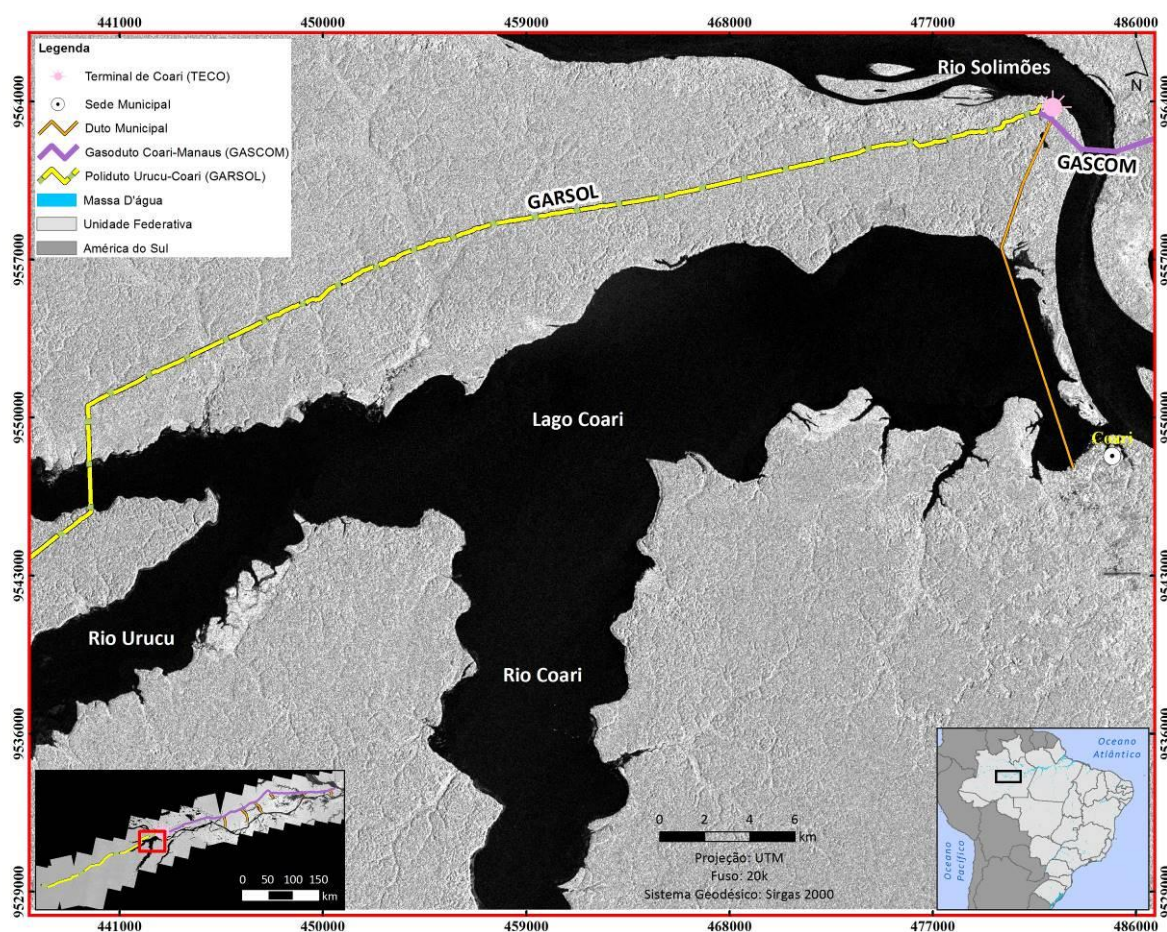


Figura 1. Contextualização geográfica das imediações de Coari empregando imagens RADARSAT-1 (modo de operação Fine 1) do período de seca do ciclo hidrológico.

1.1 Objetivos

Tendo em vista as considerações acima, o objetivo deste estudo é incorporar na definição do ISA a derrames de óleo em regiões fluviais amazônicas um parâmetro quantitativo, de modo a conferir maior acurácia à metodologia. Para tal, foi estimada a dimensão fractal (D) da interface água-vegetação, ou seja, da zona de contato entre água e vegetação, nas feições hidrográficas situadas na região de Coari (AM), as quais englobam os rios Arauá, Urucu, Solimões e Coari, bem como o lago de mesmo nome. Assim, a abordagem envolveu a confecção da interface citada anteriormente nos períodos de seca, enchente e cheia, a partir de imagens de sensoriamento remoto por radar obtidas em diferentes anos e com distintas características técnicas. Desse modo, a pesquisa propõe uma métrica alternativa para o mapeamento da complexidade das feições hidrográficas amazônicas, com o intuito de aprimorar a confecção das Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo na região.

2. Metodologia

2.1 Materiais

Ocorre, na Amazônia, uma perene cobertura de nuvens; por esse motivo, foram utilizados dados de sensores remotos que operam na região de microondas do espectro eletromagnético. Tais produtos, obtidos nos períodos de seca-1995 e de cheia-1996 do ciclo hidrológico, são imagens RADARSAT-1 na banda C (modo de operação Fine 1) e mosaicos classificados JERS-1 SAR na banda L (Beisl, 2009). O tamanho do pixel no produto RADARSAT-1 foi de 12 metros, enquanto que os mosaicos JERS-1 SAR foram usados com pixel de 30 metros. Essas diferenças foram importantes na análise multiescalar e multifrequência do fenômeno investigado. Os mosaicos JERS-1 SAR foram classificados com o algoritmo USTC por Beisl (2009). Devido à grande penetração da banda L no dossel, as imagens desse sensor exibem reflexão dupla no caso da vegetação inundada, retroespalhamento difuso para a floresta em terra firme e reflexão especular para os corpos d'água. Foram também empregados na pesquisa o modelo digital de elevação (MDE) da missão SRTM (banda C, com pixel de 90 metros) e a máscara SWBD (*SRTM Water Body Data*), que constitui um subproduto vetorial onde são definidos os corpos d'água. Na Figura 2, encontram-se representados, em ordem cronológica de aquisição, os mosaicos classificados do JERS-1 SAR, o MDE da missão SRTM e as imagens RADARSAT-1.

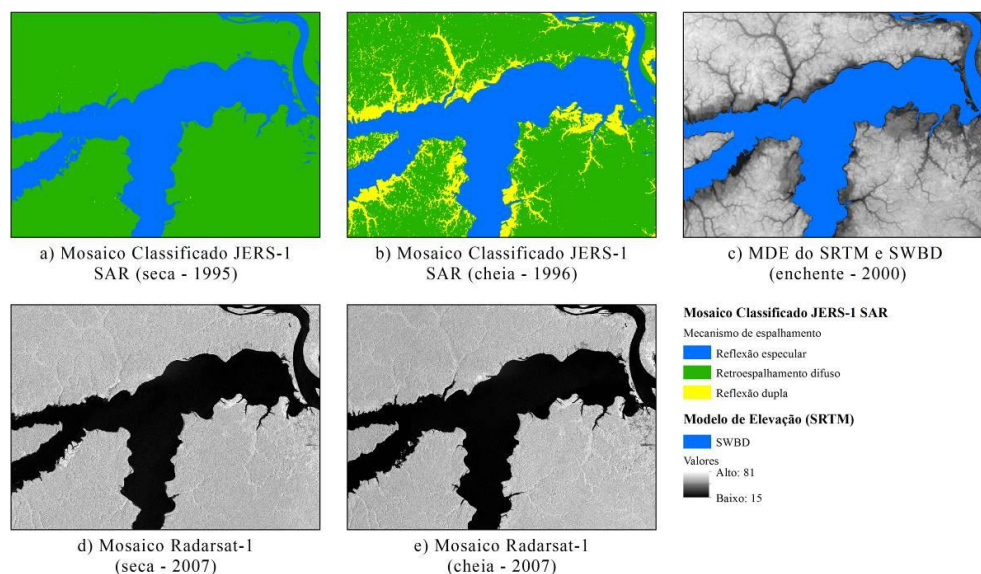


Figura 2. Produtos de sensoriamento remoto utilizados na pesquisa.

As cartas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo (Petrobras, 2004) da área investigada forneceram a classificação ISA conforme recomendado por Araújo et al. (2002). Em tais documentos, verificou-se o predomínio das classes 4 e 9 da Tabela 1.

2.2 Classificação por meio do USTC das imagens RADARSAT-1

O método USTC (*Unsupervised Semivariogram Textural Classifier*) é um algoritmo híbrido que executa a classificação textural não-supervisionada de imagens de radar, incorporando informações variográficas e radiométricas sobre as classes de interesse (Miranda et al., 2004). Esta abordagem foi utilizada para a classificação dos dados RADARSAT-1.

Devido à baixa capacidade de penetração no dossel vegetal da banda C, tanto em áreas de floresta seca como alagada, as classes discriminadas nas imagens RADARSAT-1 foram água (reflexão especular) e vegetação (predomínio de retroespalhamento difuso). Vale mencionar que os valores relativamente altos do ângulo de incidência das imagens Fine 1 (37° a 40°) contribuem para o aumento do espalhamento volumétrico em áreas de floresta. A aparente simplicidade do resultado da classificação USTC não compromete o objetivo de estimar a complexidade das margens dos cursos d'água. Com isso, foi delineada a interface água-vegetação para os períodos estudados (seca-2007 e cheia-2007).

2.3 Elaboração de mapas derivados do SRTM

O modelo digital de elevação (MDE) da missão SRTM (Figura 2c) permite a verificação das características plani-altimétricas do relevo. Neste trabalho, foram elaborados mapas de altimetria e de declividade para auxiliar na análise dos segmentos fluviais que constituem a área de estudo. Para isso, foram utilizadas as ferramentas *create a TIN (Triangulated Irregular Network)* e *slope*, ambas contidas no módulo 3D Analyst do ArcGIS 10.2.

2.4 Estimativa da dimensão fractal (D)

A abordagem atual de definição do ISA depende exclusivamente da observação do especialista, o que confere um alto grau de subjetividade ao procedimento. Desse modo, buscando preencher tal lacuna, a presente pesquisa propõe a utilização da dimensão fractal (D) como métrica complementar à metodologia aplicada atualmente, pois esta sugestão constitui uma alternativa de descrição quantitativa e de fácil replicação da complexidade das margens fluviais ou das linhas de costa. Ademais, a análise quantitativa pode favorecer a diferenciação de feições hidrográficas de mesma natureza. Como exemplo, podem ser citadas as praias abrigadas, que ocorrem segundo distintos níveis de complexidade.

Foram empregados produtos de sensoriamento remoto em escalas diferentes, o que possibilitou verificar a possível ocorrência de auto-similaridade. Esta propriedade é útil na definição do nível de complexidade da interface água-vegetação em cada escala, contemplando fases distintas do ciclo hidrológico. Após consultas à literatura (e.g., Smith et al., 1996), decidiu-se usar o *box-counting* para a estimativa da dimensão fractal (D), por se tratar de um método de mais fácil implementação que os demais (*software Image J*). O cálculo da dimensão fractal (D) foi efetuado para segmentos individuais das margens dos rios e do Lago Coari.

2.5 Dimensão fractal como métrica da complexidade

A compartimentação dos níveis de complexidade das feições fluviais, empregando como parâmetro a dimensão fractal (D), tomou por base as classes estabelecidas por Aviles et al. (1987), num estudo sobre os segmentos que compõem a falha de San Andreas. Assim, definiu-se que os níveis de complexidade de tais feições seriam expressos pela parte fracionária de sua dimensão fractal, ou seja, pelo resíduo que excede o valor euclidiano de 1. Ademais, foi estabelecida uma comparação entre a dimensão fractal e os níveis de energia presentes em rios e lagos. No presente estudo, a complexidade das feições fluviais baseada na parte fracionária da dimensão fractal da interface água-vegetação obedeceu à seguinte

estrutura: a) $D \approx 0,100$ – segmento ribeirinho ou lacustre com baixo nível de energia, no qual a remoção do óleo pode levar um longo período de tempo devido à alta complexidade espacial; b) $D \approx 0,010$ – segmento ribeirinho ou lacustre com nível intermediário de energia, onde o óleo pode ser removido dias ou meses após o derrame, configurando um ambiente de média complexidade espacial; c) $D \approx 0,001$ – segmento ribeirinho ou lacustre com alto nível de energia, no qual o óleo pode ser normalmente removido em períodos de dias ou semanas, em razão de sua baixa complexidade espacial.

3. Resultados

3.1 Classificação das imagens RADARSAT-1 usando o USTC

A Figura 3 apresenta a classificação por meio do algoritmo USTC das imagens RADARSAT-1 nos períodos de seca e de cheia, na qual foram individualizadas as classes de água e de vegetação. É possível observar nos resultados que, em alguns locais, há variação na forma das margens de uma fase do ciclo hidrológico para outra.

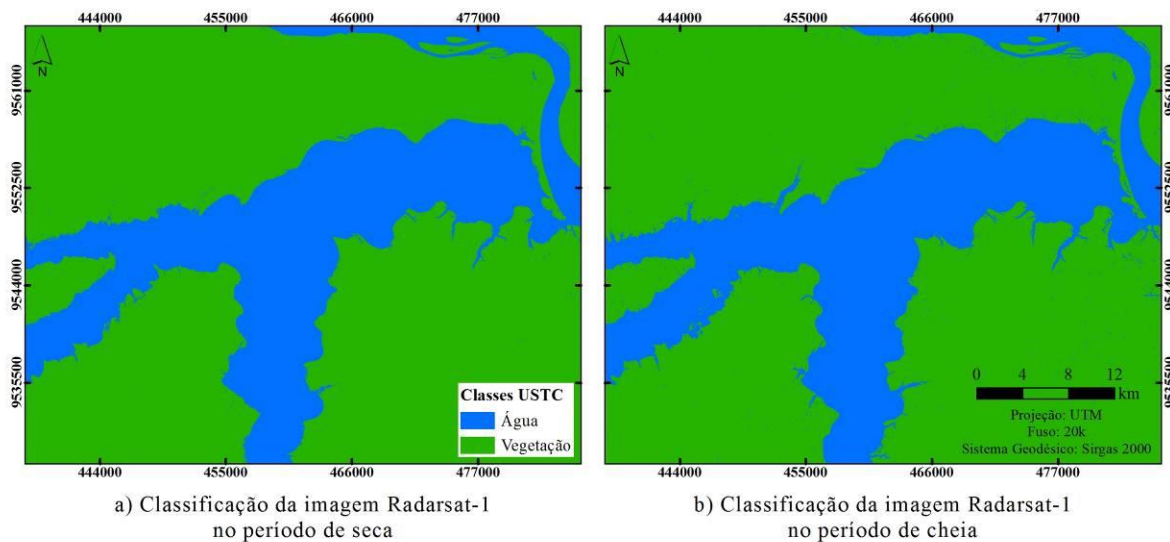


Figura 3. Resultado da classificação USTC das imagens RADARSAT-1 nos períodos de seca e de cheia do ciclo hidrológico.

3.2 Produtos topográficos

A Figura 4 exibe os mapas de hipsometria e de declividade da região investigada. No primeiro, o relevo se apresenta plano, com cotas variando de 0 a 80 metros. Nota-se ainda a formação de platôs nas vizinhanças dos interflúvios, bem como de várzeas com muitas depressões. Em razão de suas características geomorfológicas, a área investigada é passível de inundação no período de cheia. A esse respeito, autores como Silva (2012) e Fuchshuber (2011) consideram que terrenos abaixo de 40 metros são suscetíveis a alagamento, uma vez que a vegetação de terra firme ocorre acima da cota de 40 metros. No que se refere à declividade, o relevo pode ser considerado predominantemente plano; no entanto, há áreas de maior declividade localizadas nas margens dos rios e em parte da borda norte do Lago Coari.

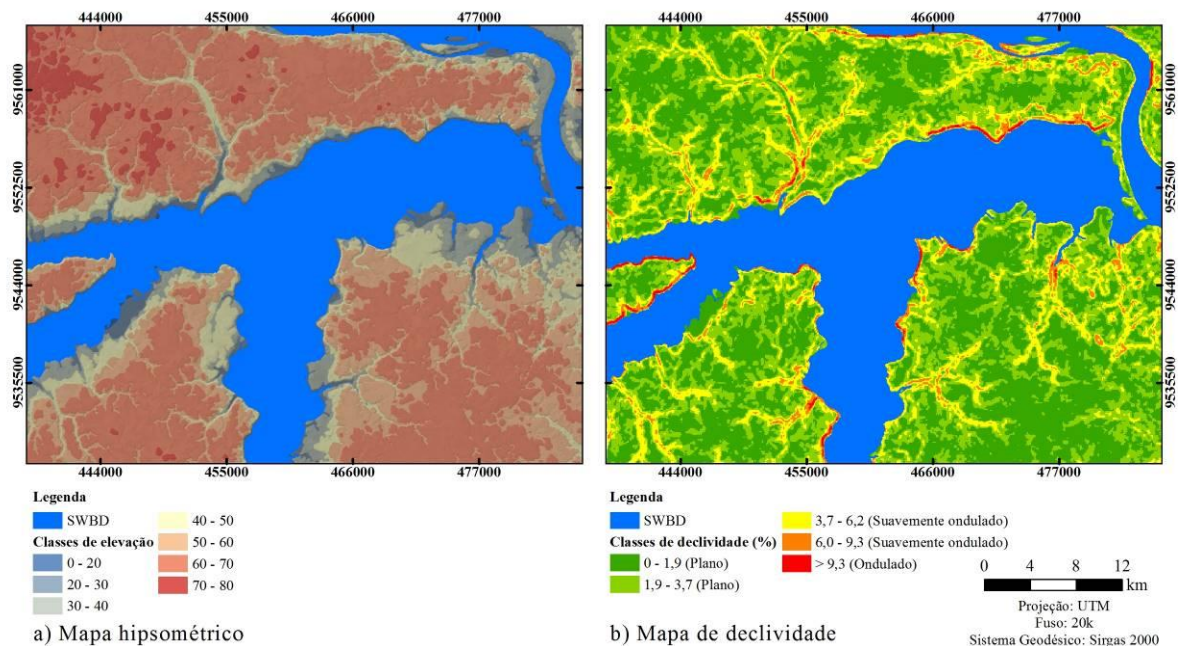


Figura 4. Representação dos mapas hipsométrico e de declividade no período de enchente do ciclo hidrológico (vide Figura 2).

3.3 Definição dos segmentos para análise fractal

Para abarcar todas as feições fluviais na área de estudo, foram individualizados seis segmentos, denominados A, B, C, D, E e F, que se localizam nos rios Solimões, Arauá, Urucu e Coari, bem como no lago de mesmo nome. A Figura 5 exibe esses segmentos nas fases do ciclo hidrológico consideradas nesta pesquisa. Tais segmentos foram classificados pela Petrobras (2004) de acordo com o ISA, havendo predomínio das classes 4 (escarpas e/ou barrancos) e 9 (zona de confluência de rios e lagos). Todavia, a inspeção visual do mosaico JERS-1 SAR na cheia (Figura 5b) indica a existência de porções de florestas inundadas (reflexão dupla) nas margens dos rios e no Lago Coari. Na verdade, tais trechos deveriam ser atribuídos à classe 10 (vegetação alagada) nessa fase do ciclo hidrológico.

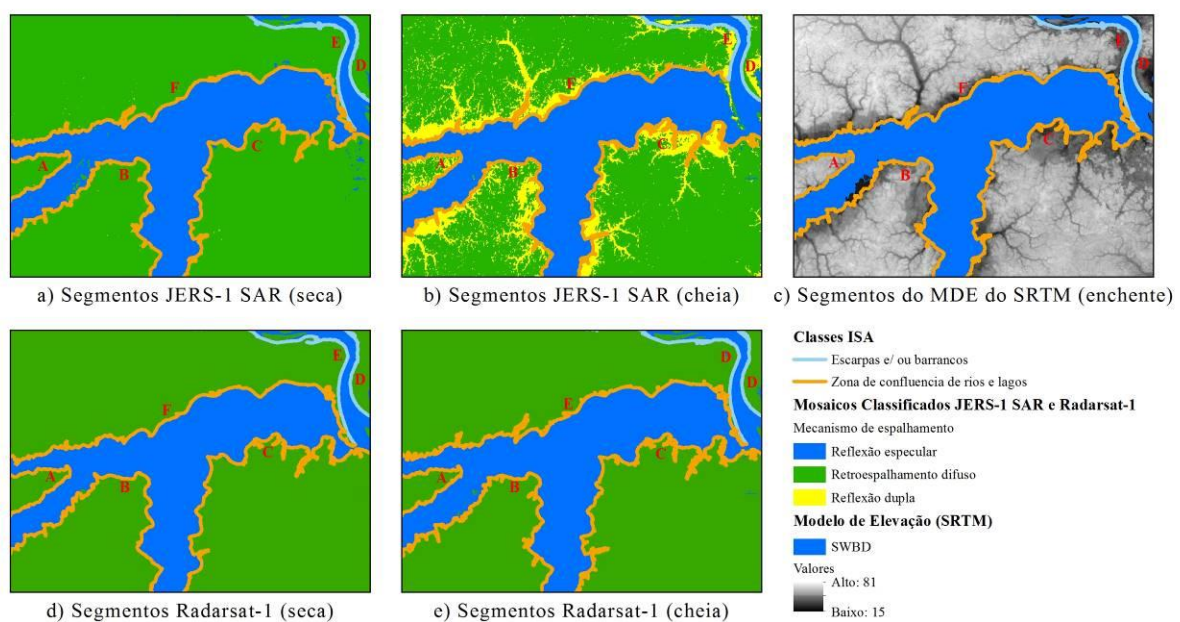


Figura 5. Segmentos fluviais individualizados e sua classificação de acordo com o ISA (Petrobras, 2004), em sobreposição aos produtos de sensoriamento remoto.

3.4 Análise fractal e hipótese para os níveis de complexidade

A curva de Koch é um dos exemplos mais difundidos da geometria fractal (Mandelbrot, 1983). Sua dimensão fractal (D) é, portanto, conhecida (1,26186...). Por esse motivo, este objeto foi utilizado para validar o programa *Image J*, escolhido para a mensuração de D , que apresentou um valor de 1,2644 para a dimensão fractal da curva de Koch. Tal resultado foi considerado um bom indicativo da fidedignidade do programa, confirmando sua adequação para os objetivos deste trabalho.

Uma vez avaliado o *Image J*, foram medidos os valores da dimensão fractal em cada um dos segmentos fluviais ilustrados na Figura 5. A Tabela 2 apresenta os resultados encontrados com esse procedimento. A manutenção do valor da dimensão fractal de cada segmento até a primeira casa decimal, considerando sua expressão nos diferentes produtos de sensoriamento remoto (com pixels variando de 12 a 90 m), indica a ocorrência de auto-similaridade nos segmentos estudados.

Tabela 2. Dimensão fractal dos segmentos fluviais utilizando diferentes produtos de sensoriamento remoto.

Produtos Segmento	JERS-1 (Seca) 30 m	JERS-1 (Cheia) 30 m	SWBD (Enchente) 90 m	Radarsat-1 (Seca) 12 m	Radarsat-1 (Cheia) 12 m	Média	Desvio padrão
Área de estudo	1,2131	1,2338	1,2412	1,2188	1,2563	1,2326	0,0155
Segmento A	1,2858	1,2928	1,2856	1,2972	1,3016	1,2926	0,0063
Segmento B	1,1161	1,1200	1,1000	1,1227	1,1675	1,1253	0,0225
Segmento C	1,2304	1,2810	1,2015	1,2415	1,2830	1,2475	0,0311
Segmento D	1,0000	1,0190	1,0418	1,0399	1,0538	1,0288	0,0226
Segmento E	1,0753	1,0007	1,0759	1,0632	1,0861	1,0602	0,0306
Segmento F	1,1585	1,1431	1,1383	1,1403	1,1886	1,1538	0,0188

A análise da Tabela 2 mostra que, de um modo geral, os valores para os períodos de seca são menores do que na cheia. Somente nos segmentos E e F no JERS-1 SAR essa tendência de complexidade se altera. Para a fase de enchente no SWBD, os resultados são, em geral, menores do que os demais para os segmentos A, B e C, tanto no JERS-1 SAR quanto no RADARSAT-1. No que se refere a D, E e F, essa tendência não se verifica. A dimensão fractal média por segmento permite inferir que as margens A, B, C e F sempre apresentam alta complexidade espacial, enquanto que, para D e E, a complexidade é média nos períodos investigados nesta pesquisa. Quanto ao grau de variação nos segmentos para as distintas fases do ciclo hidrológico amazônico, o desvio padrão para A apresentou a menor mudança (0,0063); aqueles para B, C, D, E e F variaram de 0,0188 a 0,0311. Esse resultado indica que o segmento A merece atenção especial no caso de planos de contingência voltados para o combate a acidentes com derrames de óleo, tendo em vista a manutenção de sua alta complexidade em todos os períodos observados.

A seguir, buscando verificar a existência de uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos valores de dimensão fractal para os vários segmentos fluviais, foi utilizada a teoria de pequenas amostras (*Student – t*), conforme explicitado em Spiegel (1978). Com efeito, para cada segmento, existem cinco amostras ($N=5$), representadas em cada linha da Tabela 2. O teste bilateral no nível de significância 0,01 para os segmentos da área de estudo permitiu concluir que $D_A=D_C$, $D_F=D_B$ e $D_E=D_D$ (hipótese H_0 aceita). Por outro lado, a hipótese H_0 foi rejeitada nos casos em que $D_C \neq D_F$ e $D_B \neq D_E$.

Vale lembrar que os segmentos E e F foram incluídos pela Petrobras (2004) na classe 4 do ISA, enquanto que aos segmentos A, B, C e F foi atribuída a classe 9 (Figura 5). O fato de que $D_B \neq D_E$ é consistente com as diferenças na geomorfologia fluvial entre as classes 4 e 9. Por outro lado, o fato de que $D_C \neq D_F$ (ambos originalmente associados à classe 9) sugere a possibilidade do estabelecimento de uma subdivisão nessa classe com base na complexidade das margens.

4. Conclusões

O resultado deste trabalho permite concluir que a dimensão fractal pode auxiliar na geração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo em sistemas fluviais e lacustres da Amazônia. A manutenção da dimensão fractal dos segmentos fluviais delineados em produtos de sensoriamento remoto com diferentes tamanhos de pixel sugere a existência de auto-similaridade nas escalas avaliadas. Tal determinação permitiu a caracterização quantitativa da interface água-vegetação, uma vez que os valores para as classes investigadas de ISA foram distintos, denotando diferentes níveis de complexidade das margens.

Ademais, os testes de hipótese baseados na teoria de pequenas amostras aplicados nos resultados médios da dimensão fractal dos segmentos fluviais demonstraram o potencial dessa abordagem em identificar diferentes níveis de complexidade em uma mesma classe de ISA. Tal possibilidade foi aventada a partir dos resultados obtidos no teste de *Student* para os segmentos C e F, ambos da classe 9. Dessa forma, vislumbra-se a dimensão fractal como medida de refinamento do índice de sensibilidade ambiental a derrames de óleo na Amazônia.

Referências Bibliográficas

- Aviles, C. A.; Scholz, C. H. Fractal analysis applied to characteristic segments of the San Andreas Fault. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. B1 p. 331-344, 2005.
- Araujo, S. I.; Silva, G. H.; Muehe, D. **Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo - Ambientes Costeiros, Estuarinos e Fluviais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2007. v. 1. 170 p.
- Beisl, C. H. **Utilização de mosaicos JERS-1 SAR e de lógica fuzzy para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental temporal a derrames de óleo na Amazônia Central**. 2009. 196p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2009.
- Fuchshuber, E. M. **Avaliação de técnicas de classificação automática de dados multi-polarimétricos na banda-L do sensor R99B-SAR para o mapeamento de áreas inundadas no Lago de Coari, Amazônia Central**. 2011. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro. 2011.
- Mandelbrot, B.B. **The fractal geometry of nature**. W. H. Freeman and Company, New York, 1983. 480 p.
- 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.
- Petrobras. **Mapa de sensibilidade ambiental fluvial a derramamentos de óleo nas áreas de influência dos terminais da TRANSPETRO na região norte do país (Coari – AM): Folhas 1 e 2**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2004.
- Silva, P. M. **Integração de técnicas computacionais como contribuição para o mapeamento dos índices de sensibilidade fluvial a derrames de óleo na região de Coari**. 2012. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ. 2012.
- Smith, T.G.; Lange, G.D.; Marks, W.B. Fractal methods and results in cellular morphology. **Journal of Neuroscience Methods**, v. 69, p. 1123-1126, 1996.
- Spiegel, M.R. **Probabilidade e Estatística**; tradução de Alfredo Alves de Farias. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil (Coleção Schaum), 1978. 529 p.