

APLICAÇÃO DA ANÁLISE FRACTAL NA LINHA DE COSTA COMO SUBSÍDIO
À CONFECCÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMES
DE ÓLEO NO LITORAL AMAZÔNICO

Aline Maria Alvarez de Moura

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Luiz Bevilacqua
Fernando Pellon de Miranda

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

APLICAÇÃO DA ANÁLISE FRACTAL NA LINHA DE COSTA COMO SUBSÍDIO
À CONFEÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMES
DE ÓLEO NO LITORAL AMAZÔNICO

Aline Maria Alvarez de Moura

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Luiz Bevilacqua, Ph.D.

Prof. Fernando Pellon de Miranda, Ph.D.

Prof. Marcelo Cancela Lisboa Cohen, D.Sc.

Prof. Paulo Márcio Leal de Menezes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2017

Moura, Aline Maria Alvarez de

Aplicação da Análise Fractal na Linha de Costa como
Subsídio à Confecção de Mapas de Sensibilidade Ambiental
a Derrames de Óleo no Litoral Amazônico / Aline Maria
Alvarez de Moura – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XII, 85 p. : il.;29,7 cm

Orientadores: Luiz Bevilacqua

Fernando Pellon de Miranda

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 73-85

1. Costa Amazônica. 2. Dimensão Fractal. 3. Sensibilidade Ambiental. 1. Bevilacqua, Luiz *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. III. Título.

*Lost in thought and lost in time
While the seeds of life and the seeds of change were planted
Outside the rain fell dark and slow
While I pondered on this dangerous but irresistible pastime
I took a heavenly ride through our silence
I knew the moment had arrived
For killing the past and coming back to life*

*I took a heavenly ride through our silence
I knew the waiting had begun
And headed straight into the shining sun
(Coming Back To Life - Pink Floyd)*

Agradecimentos

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro prestado e a todos os profissionais do Programa de Engenharia Civil PEC/COPPE/UFRJ pelo apoio acadêmico e institucional.

Ao Professor Dr. Fernando Pellon de Miranda por toda ajuda, incentivo e apoio desde o início até o fim deste trabalho. Obrigada pela paciência, compreensão e empatia, além da sugestão do tema deste trabalho. Minha sincera gratidão.

Aos Professores Dr. Luiz Landau (LAMCE/COPPE/UFRJ) e Professor Dr. Luiz Bevilacqua, por toda atenção e apoio prestados sempre que solicitados.

A toda equipe do LAMCE e LabSAR: Patrícia, Adriano, Carlos, Rosana, Mônica, Sarah equipe de T.I para além dos assuntos pertinentes a dissertação.

Aos amigos e colegas que, de alguma forma, tornaram meus dias melhores e mais felizes na COPPE/UFRJ. Obrigada William, Fernanda, Carol, Cynara, Heliz, Bia, Thales, Breno, Pedro, Renato, Regina, Lucas Amim e tantos outros.

Aqueles que estiveram comigo, sem hesitar, em todos os momentos desta longa caminhada me ouvindo, aconselhando e confortando quando mais precisei:

Minhas queridas amigas Mariana, Paula, Liuski e amigo Gustavo. Não há palavras neste mundo que expressem minha gratidão e afeto por vocês. Aos antigos e novos amigos, Vitor, Túlio, Antonio, Sebastião e Alan, e aos meus grandes amigos da Geografia (UERJ), Iuri, Joel, Anna, Perla e Carla. Obrigada por cada momento.

Não poderia deixar de registrar minha eterna gratidão aos profissionais Rafael Aquino, Adriana e Silvia. Sem vocês com certeza não teria chegado até aqui.

Por fim, a minha família: a tradução do que é o amor, fé, paciência e compaixão. Obrigada Mãe Sheila, Vó Maria, meus pequenos grandes heróis Eros e Safira, e ao meu grande companheiro, namorado e futuro Geógrafo, Lucas. Dedico este trabalho a vocês.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DA ANÁLISE FRACTAL NA LINHA DE COSTA COMO SUBSÍDIO À CONFECCÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMES DE ÓLEO NO LITORAL AMAZÔNICO

Aline Maria Alvarez de Moura

Dezembro / 2017

Orientadores: Luiz Bevilacqua

Fernando Pellon de Miranda

Programa: Engenharia Civil

Na Costa Norte Brasileira, existe uma infraestrutura ligada à indústria do petróleo, que inclui terminais aquaviários nas proximidades de manguezais, que são muito sensíveis ao derramamento desse poluente. Tal região costeira abrange três macrocompartimentos: “Litoral do Amapá” (LA), “Golfão Amazônico” (GA) e “Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão” (PM). Esse fato sugere a existência de diferentes configurações para o limite entre terra e água, que podem ser caracterizadas através da geometria fractal. Foram obtidas nesta pesquisa as dimensões fractais (D) de 615 segmentos distintos da costa amazônica representativos de diferentes ambientes. Testes de hipóteses demonstraram que o valor médio de D para os manguezais no LA (1,090) é distinto daqueles encontrados para esse ambiente no GA (1,166) e PM (1,167). Nesses dois últimos, os valores de D para os manguezais podem ser considerados estatisticamente iguais. Tal resultado pode indicar diferenças na capacidade de recuperação dos manguezais da costa amazônica na eventualidade de um acidente com derramamento de óleo. Com efeito, foi possível refinar a classe ISA 10C (manguezais de intermaré), através de sua subdivisão em duas novas classes: 10C.1 (com nível intermediário de energia, onde o óleo pode ser removido dias ou meses após o derrame, configurando um ambiente de média complexidade espacial) e 10.C.2 (com baixo nível de energia, no qual a remoção do óleo pode levar um longo período de tempo devido à alta complexidade espacial).

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS ON THE SHORELINE AS AID OF
SENSITIVITY MAPS PRODUCTION ENVIRONMENTAL OIL SPILL IN THE
AMAZONIAN COAST

Aline Maria Alvarez de Moura

December / 2017

Advisors: Luiz Bevilacqua

Fernando Pellon de Miranda

Department: Civil Engineering

In the Northern Brazilian Coast, there is an infrastructure linked to the petroleum industry, which includes waterway terminals near mangroves that are very sensitive to oil spills. This region comprises three macro-compartments: “Litoral da Amapá” (LA), “Golfão Amazônico” (GA), and “Litoral da Reentrância Pará-Maranhão” (PM). This fact suggests the existence of different configurations for the boundary between earth and water, which can be characterized by fractal geometry. The fractal dimension (D) of 615 distinct segments of the Amazon coast representative of different environments were obtained in this research. Hypothesis tests have shown that the mean value of D for mangroves in LA (1,090) is different from those found for this environment in GA (1,166) and PM (1,167). In the latter two, the D values for the mangroves can be considered statistically equal. This result may indicate differences in the recovery capacity of Amazonian mangrove swamps in the event of an oil spill accident. In fact, it was possible to refine the ISA 10C class (intertidal mangrove) by subdividing it into two new classes: 10C.1 (with an intermediate energy level, where the oil can be removed days or months after the spill in an environment with intermediate spatial complexity), and 10.C.2 (with low energy level, in which oil removal may take a long time due to high spatial complexity).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Preliminares	1
1.2 Motivação Científica	4
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo geral	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Visão Geral da Metodologia Proposta.....	8
1.5 Organização da dissertação	9
CAPÍTULO 2 – ÁREA DE ESTUDO	10
2.1 Localização geográfica da área de estudo	10
2.1 Aspectos Fisiográficos.....	12
2.1.1 Generalidades	12
2.1.1 Aspectos fisiográficos dos macrocompartimentos do Litoral Norte Brasileiro	13
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1 Sensoriamento Remoto.....	20
3.1.1 Radiação Eletromagnética	21
3.1.2 O Espectro Eletromagnético	23
3.1.3 O Sensor Radar na Faixa das Microondas.....	24
3.1.4 Características Gerais do Sistema de Radar	26
3.1.5 O Conceito de Rugosidade da Superfície	28
3.3 Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (ISA).....	34
3.3.1 O Projeto Piatam Mar (Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica).....	38
3.4 Fractais e a Natureza.....	43
3.4.1 Dimensão de Hausdorff	47

3.4.2 A Curva Triádica de Koch.....	49
3.4.3 O Método <i>Box-Counting</i> para o Cálculo da Dimensão Fractal	52
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
4.1 Materiais	54
4.1.1 Produtos vetoriais do Projeto Piatam Mar extraídos das imagens RADARSAT-1 e JERS-1 SAR	54
4.1.2 Produtos vetoriais IBGE e MMA	54
4.1.3 Programa <i>ArcGIS</i> 10.5.1.....	54
4.1.4 Programa <i>ImageJ</i>	55
4.1.5 Programa <i>Microsoft Excel</i>	55
4.1.6 Programa <i>RStudio</i>	55
4.2 Métodos	56
4.2.1 Adequação dos dados vetoriais no <i>ArcGIS</i> 10.5.1.....	58
4.2.2 Cálculo da Dimensão Fractal no <i>ImageJ</i>	58
4.2.3 Organização dos dados no <i>Excel</i> seguida por testes estatísticos e geração de gráficos no <i>RStudio</i>	59
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1 Resultados.....	62
5.1.1 Análise exploratória dos dados.....	62
5.1.2 Inferência estatística	68
5.2 Discussão.....	71
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

Lista de Figuras

Figura 1 – Bacias sedimentares brasileiras. Fonte PETROBRAS (2017a). As produtoras de petróleo são Campos, Santos, Espírito Santo, Solimões, Potiguar, Sergipe-Alagoas, Recôncavo, Camamu-Almada, Tucano e Jequitinhonha.....	2
Figura 2 - Fluxograma da metodologia proposta para a presente na dissertação.	8
Figura 3 - Macrocompartimentos do litoral norte brasileiro. Modificado de MUEHE (2006).	11
Figura 4 - Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia. Fonte: SOUZA FILHO <i>et al.</i> (2005).	16
Figura 5 - Mapa de localização dos setores da Zona Costeira e Estuarina do estado do Maranhão (ZCEP). Fonte: EL-ROBRINI <i>et al.</i> , 2006a). Setor 1 – Costa Atlântica do Salgado Paraense; Setor 2 – Insular Estuarino; Setor 3 – Continental Estuarino.....	17
Figura 6- Mapa de localização dos setores da Zona Costeira e Estuarina do Maranhão (ZCEM). Fonte: EL-ROBRINI <i>et al.</i> (2006b). Setor 1 – Golfão Maranhense; Setor 2 – Litoral Oriental; Setor 3 – Litoral Ocidental; Setor 4 – Baixada Maranhense; Setor 5 – Parcel Manuel Luís.....	19
Figura 7 – Propagação da onda eletromagnética. Adaptado de BAGNATO & PRATAVIEIRA (2015).....	21
Figura 8 - Processos de interação entre a energia eletromagnética e os alvos. Modificada de SABINS (1997).	22
Figura 9- Diagrama apresentando o espectro eletromagnético versus a transmitância atmosférica. Fonte: RORIZ (2006).....	24
Figura 10- Penetração no dossel vegetal do pulso incidente para diferentes sistemas de radar (bandas L e C). Adaptado de (BITENCOURT, 2011).	26
Figura 11– Diagrama ilustrando os conceitos de ângulo de incidência e ângulo de depressão. Adaptado de SABINS (1997).	27
Figura 12 – Mecanismos de interação com o terreno do pulso do radar para as bandas X e L em diferentes superfícies. Fonte: RORIZ (2006). A reflexão especular ocorre nas superfícies lisas; o retroespalhamento difuso, nas rugosas.....	29
Figura 13 - Mosaico JERS-1 SAR de parte da costa do Amapá elaborado pelo <i>JERS-1 Global Rain Forest Mapping Project</i> (NASA <i>et al.</i> , 2000).	32
Figura 14 - Mosaico RADARSAT-1 de São Luis (MA). Fonte: Base de Dados Projeto Piatam Mar II, 2008.	
.....	33

Figura 15 - Área de estudo do Projeto Piatam Mar. Fonte: SOUZA FILHO <i>et al.</i> (2005).	39
Figura 16 - Aumento da escala visual do brócolis romanesco: 1x; 2,5x; 10x; 25x. Fonte: http://cargocollective.com/annabelking/Fractal-1-Romanesco-Broccoli	45
Figura 17- Linha reta dividida em $N=1, 2, 3$ e 4 partes iguais. Fonte: SILVA & SOUZA (2010).	47
Figura 18 - Quadrados divididos em N^2 partes iguais, com $N=1, 2$ e 3. Fonte: SILVA & SOUZA (2010).	48
Figura 19- Cubos divididos em N^3 partes iguais, com $N = 1, 2$ e 3. Fonte: SILVA & SOUZA (2010).	48
Figura 20- Construção da curva triádica de Koch. Fonte: FEDER (1989).	51
Figura 21- Exemplo de um objeto coberto pelas “caixas” do método <i>box counting</i> . Fonte: (MACEDO <i>et al.</i> , 2017).	53
Figura 22- Fluxograma da metodologia empregada na pesquisa.	57
Figura 23- Histogramas dos valores da dimensão fractal dos manguezais por macrocompartimento.	64
Figura 24- <i>Boxplot</i> dos valores da dimensão fractal dos manguezais por macrocompartimento.	65
Figura 25– Dimensão fractal dos macrocompartimentos do Litoral Norte Brasileiro. ..	66

Lista de Tabelas

Tabela 1– Bandas na faixa das microondas. Adaptado de SABINS (1997).....	25
Tabela 2 - Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (ISA) adaptado para a costa amazônica. Fonte: SOUZA FILHO <i>et al.</i> (2008).	41
Tabela 3- Segmentos que ocorrem nos diferentes ambientes de cada macrocompartmento.	62
Tabela 4 - Média e desvio padrão da dimensão fractal (D) obtida para os segmentos de cada ambiente por macrocompartmento.....	63
Tabela 5 - Testes estatísticos para verificação da normalidade do conjunto amostral dos manguezais por macrocompartmento. No caso de $p\text{-valor} < \alpha$, H_0 é rejeitada.	68
Tabela 6– Teste estatístico da Análise da Variância (ANOVA) para o conjunto amostral dos manguezais por macrocompartmento. H_0 é rejeitada, pois $\Pr(>F) < \alpha$, onde $\alpha = 0,05$	69
Tabela 7- Teste T de Tukey para comparação do conjunto amostral dos manguezais por macrocompartmento, que serve como um complemento para o estudo da Análise de Variância (ANOVA).....	70
Tabela 8 - Proposta de refinamento do Ambiente 10C do Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA).	72

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Preliminares

O Brasil possui em seu território importantes bacias sedimentares propícias à atividade de exploração e produção petrolífera. Esse processo industrial envolve desde a prospecção até o transporte final do produto extraído de tais bacias, com potenciais impactos para os recursos socioambientais situados próximos a essas operações, principalmente no caso de derrames de petróleo.

Sérios acidentes com poluição por vazamento de petróleo foram registrados ao longo dos últimos 20 anos. Um dos piores casos no Brasil aconteceu em 2000, com o derrame, na Baía de Guanabara, de 1.292.000 litros de óleo combustível provenientes da REDUC (CONAMA & MMA, 2001). Neste mesmo ano, ocorreu um vazamento de quatro milhões de litros de óleo cru na refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), localizada no município de Araucária (PR), contaminando rios importantes da região como o Barigui e o Iguaçu (PILCHOWSKI, 2003). Em 2000, a balsa Miss Rondônia afundou no Rio Pará com cerca 1,9 milhões de litros de óleo do tipo A1 (derivado de petróleo usado em caldeiras), próximo ao terminal da Vila do Conde, no Pará (BERRÊDO *et al.*, 2001). No ano de 2010, houve o maior acidente por derrame de óleo no continente norte americano (Golfo do México). Na ocasião, aproximadamente 4,9 milhões de barris de petróleo bruto vazaram entre abril e julho, em parte atingindo o litoral (GRAY *et al.*, 2014).

É fundamental que as atividades petrolíferas sejam realizadas com total segurança para que não ocorra o contato de poluentes com os recursos naturais do meio ambiente onde há operações. Porém, não há garantia absoluta de que não ocorram vazamentos de óleo, mesmo existindo políticas de segurança para prevenção, monitoramento e controle dessas atividades. Na eventualidade de um derrame, é fundamental que a empresa responsável haja com prontidão nas situações de emergência.

O litoral brasileiro encontra-se potencialmente vulnerável às consequências das atividades exercidas pela indústria do petróleo em diferentes regiões geográficas. Uma região de produção ativa, mesmo distante do litoral, pode impactar significativamente os habitats e as feições costeiras. Existem trinta bacias sedimentares em todo o território brasileiro, sendo dez delas produtoras de petróleo (Figura 1). A maior parte das reservas encontra-se em campos marítimos, embora haja acumulações terrestres nas bacias do Solimões, Potiguar, Sergipe-Alagoas, Recôncavo, Tucano e Espírito Santo.



Figura 1 – Bacias sedimentares brasileiras. Fonte PETROBRAS (2017a). As produtoras de petróleo são Campos, Santos, Espírito Santo, Solimões, Potiguar, Sergipe-Alagoas, Recôncavo, Camamu-Almada, Tucano e Jequitinhonha.

Embora danos ambientais causados por vazamentos de petróleo e derivados possam atingir as diversas feições geomorfológicas existentes em nossa costa, o presente trabalho concentra-se em avaliar estes impactos no litoral norte brasileiro. Com efeito, a região amazônica conta com a operação de terminais petrolíferos, onde o petróleo é transportado por meio de embarcações até os consumidores ou refinarias (SOUZA FILHO *et al.*, 2009).

1.2 Motivação Científica

Pela costa norte brasileira circulam produtos provenientes de importantes áreas operacionais como a província petrolífera de Urucu na Bacia do Solimões, Estado do Amazonas, e, em águas rasas, a Bacia Potiguar, abrangendo os estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

As refinarias responsáveis por processar o petróleo bruto também se localizam em ambientes sensíveis da nossa costa equatorial. A Refinaria Potiguar Clara Camarão localiza-se no litoral do Rio Grande do Norte e a Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor), na costa do Ceará. Embora estas unidades não pertençam ao litoral amazônico, as mesmas utilizam rotas de transporte em tal ambiente. Além disso, influenciando diretamente a costa norte brasileira, existe a Refinaria Isaac Sabbá (Reman), situada na margem esquerda do Rio Negro, em Manaus, atendendo diversos estados da Amazônia (PETROBRAS, 2017b).

A indústria do petróleo conta com operações importantes em terminais marítimos e fluviais. Esses são responsáveis por armazenar e distribuir o petróleo e seus derivados às refinarias e por escoar a produção. A porção setentrional do país conta com os terminais aquaviários de Macapá, Belém, Manaus e Coari. Na extremidade oriental do litoral norte, está o terminal aquaviário São Luís. (PETROBRAS, 2017c).

Na legislação brasileira existe a lei nº 9.966, de 28 de abril de 2000, conhecida como “lei do óleo”, cujo artigo 1º estabelece “os princípios básicos a serem obedecidos na movimentação de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em portos organizados, instalações portuárias, plataformas e navios em águas sob jurisdição nacional”. Por sua vez, seu artigo 2º explicita as definições adotadas para efeito da Resolução (BRASIL, 2000).

A partir desta lei, foram atribuídos ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) “responsabilidades na identificação, localização e definição dos limites das áreas ecologicamente sensíveis com relação à poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional”.

Com isso, a Secretaria de Qualidade Ambiental (SQA/MMA), em conjunto com Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), órgão regulador do setor petrolífero, elaborou as “Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo na Zona Costeira e Marinha - Cartas SAO” (MMA, 2002). Tal documento foi elaborado com base nas normas internacionais sugeridas pela Organização Marítima Internacional (IMO), pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e pelo Manual Básico para Elaboração de Cartas de Sensibilidade no Sistema PETROBRAS, produzido pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) da Petrobras (ARAÚJO *et al.*, 2002).

Nesse contexto, o Projeto PIATAM MAR elaborou cartas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo (cartas SAO), nas escalas 1:250.000, 1:50.000 e 1:10.000, com o objetivo de mapear os ambientes e feições costeiras, tendo como finalidade determinar o Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) nas três escalas supracitadas com o uso de imagens de sensores remotos orbitais ativos (RADARSAT-1 e JERS-1 SAR) (SOUZA FILHO *et al.*, 2008). Com a consolidação de tais produtos cartográficos, foi gerado o “Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo para a Zona Costeira Amazônica” (SOUZA FILHO *et al.*, 2008) permitindo identificar as áreas mais sensíveis a derrames de tal poluente com base em aspectos naturais, físicos e biológicos. Assim, os ambientes costeiros amazônicos foram divididos em uma escala ISA variando de 1A a 10D, onde o primeiro nível é o menos sensível e o último tem sensibilidade máxima. Este projeto foi pioneiro na identificação de ambientes sensíveis ao óleo na costa amazônica, fornecendo importantes subsídios para a elaboração de planos de contingência na região.

Entretanto, a definição do ISA depende, dentre outros fatores, da análise da morfologia da linha de costa, o que vem sendo feito, tanto pela NOAA como pela Petrobras, de um modo puramente qualitativo. Uma abordagem possível para avançar no tratamento dessa questão é empregar a dimensão fractal da interface terra-água na descrição da complexidade espacial da zona litorânea. A esse respeito, vale mencionar que o conceito de dimensão fractal já foi adotado em diversos estudos em regiões costeiras de todo o mundo (DAI *et al.*, 2004; TANNER *et al.*, 2006; AZEVEDO & MARQUES, 2004; GARCÍA *et al.*, 2016; JINYONG *et al.*, 2014; XIAOHUA *et al.*, 2004; MANDELBROT, 1967.).

De fato, a divisão da costa amazônica em cinco macrocompartimentos, como sugerido por SILVEIRA (1964), indica a existência de diferentes arranjos geomorfológicos para o limite entre terra e água. A esse respeito, MANDELBROT (1967) afirmou que a linha de costa, assim como outras feições geométricas da natureza, não pode ser descrita utilizando apenas a geometria euclidiana. As coisas do mundo, segundo tal autor, são em grande parte rugosas e fragmentadas; existem mesmo certas formas, como os fractais, nas quais cada parte é igual ao seu todo, porém em menor escala.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo propor uma métrica alternativa para o mapeamento, na escala 1:250.000, da complexidade das feições na interface “terra-água” do litoral amazônico, empregando a dimensão fractal dos ambientes dispostos ao longo da linha de costa.

1.3.2 Objetivos específicos

A partir dos objetivos específicos abaixo, pretende-se atingir o objetivo geral desta pesquisa, como segue:

- Selecionar dados vetoriais extraídos de imagens RADARSTAT-1 e JERS-1 SAR correspondentes aos ambientes geomorfológicos e ecossistêmicos do litoral amazônico, conforme mapeado pelo Projeto Piatam Mar;
- Delimitar os limites vetoriais correspondentes à linha de costa e à foz dos rios da região investigada, reconhecendo os macrocompartimentos propostos por SILVEIRA (1964);
- Adequar cada dado vetorial à escala cartográfica 1:250.000 e calcular a dimensão fractal (D) de cada vetor;
- Realizar testes estatísticos de comparação de médias de cada ambiente geomorfológico por macrocompartimento e entre os macrocompartimentos;
- Caracterizar a complexidade espacial e sensibilidade ambiental dos diferentes ambientes geomorfológicos (Campos, Manguezais, Várzea e Planalto Costeiro) com base no cálculo de sua dimensão fractal e nos resultados dos testes estatísticos.

1.4 Visão Geral da Metodologia Proposta

A Figura 2 apresenta, através de um fluxograma, a metodologia proposta para a presente dissertação.

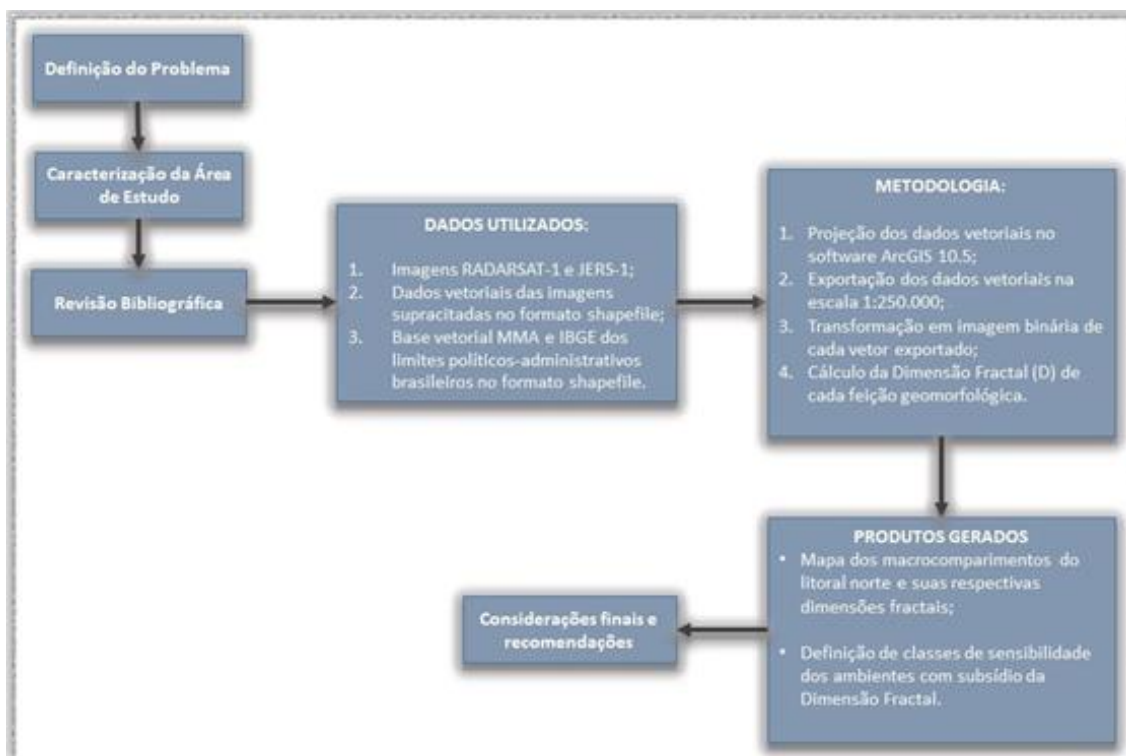


Figura 2 - Fluxograma da metodologia proposta para a presente na dissertação.

1.5 Organização da dissertação

O capítulo 1 tece considerações preliminares sobre a indústria do petróleo na costa norte brasileira e sobre a necessidade de monitoramento de suas atividades e de subsídio à decisão na ocorrência de desastres com derrames de óleo. Em seguida, é apresentada a motivação científica para a realização da pesquisa, seus objetivos gerais e específicos, bem como o fluxograma resumido da metodologia proposta.

No capítulo 2 é efetuada uma descrição da área de estudo, incluindo sua localização geográfica, seus aspectos geomorfológicos e geológicos, além de sua inserção no bioma Amazônia.

No capítulo 3, são sumarizados os fundamentos teóricos relevantes à execução do trabalho, com a definição dos conceitos de geometria fractal, índice de sensibilidade ambiental, sensoriamento remoto por radar, mapeamento da linha de costa e testes estatísticos por diferenças de médias.

O capítulo 4 aborda os materiais e a metodologia utilizados na dissertação, incluindo as imagens dos sensores ativos RADARSAT-1 e JERS-1 SAR, assim como o emprego do *software* Image J para a aplicação do método *box-counting* na estimativa da dimensão fractal da linha de costa.

No capítulo 5, são discutidos os mapas gerados na presente dissertação, bem como são apresentados os resultados nela obtidos e as discussões sobre seu significado.

No capítulo 6, estão as conclusões da pesquisa e as recomendações para futuros trabalhos dentro desta temática. Finalmente, no capítulo 7, encontram-se as referências bibliográficas aqui empregadas.

CAPÍTULO 2 – ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização geográfica da área de estudo

O litoral brasileiro estende-se desde a zona equatorial do hemisfério Norte até as latitudes subtropicais do hemisfério Sul a 30°S, perfazendo aproximadamente oito mil quilômetros ao longo do Oceano Atlântico em sua porção ocidental (MUEHE, 2006; AB’SÁBER, 2001 & SILVEIRA, 1964). A área de estudo da presente dissertação se localiza nessa região litorânea.

Para fins de contextualização, vale registrar que SILVEIRA (1964) subdividiu o litoral brasileiro em cinco grandes regiões: Norte, Nordeste, Leste ou Oriental, Sudeste e Sul. Com base nesta proposta, a presente pesquisa limita-se ao estudo da região litorânea Norte, embora a mesma não coincida com a divisão geográfica estabelecida pelo IBGE (MUEHE, 2006). Este autor, com base na classificação de SILVEIRA (1964) e em trabalhos mais recentes, subdividiu todo o litoral brasileiro em “macrocompartimentos”. A região Norte é composta por três deles, abrangendo os estados do Amapá e Pará, bem como a parte a oeste do Maranhão: Litoral do Amapá, Golfão Amazônico e Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão (Figura 3).

Assim, a área aqui investigada situa-se na Zona Costeira Amazônica (ZCA), com cerca de 2700 quilômetros de extensão, estendendo-se do Rio Oiapoque, no extremo norte do Amapá (Cabo Orange), fronteira com a Guiana Francesa, até a Baía de São Marcos, na porção setentrional do Maranhão.

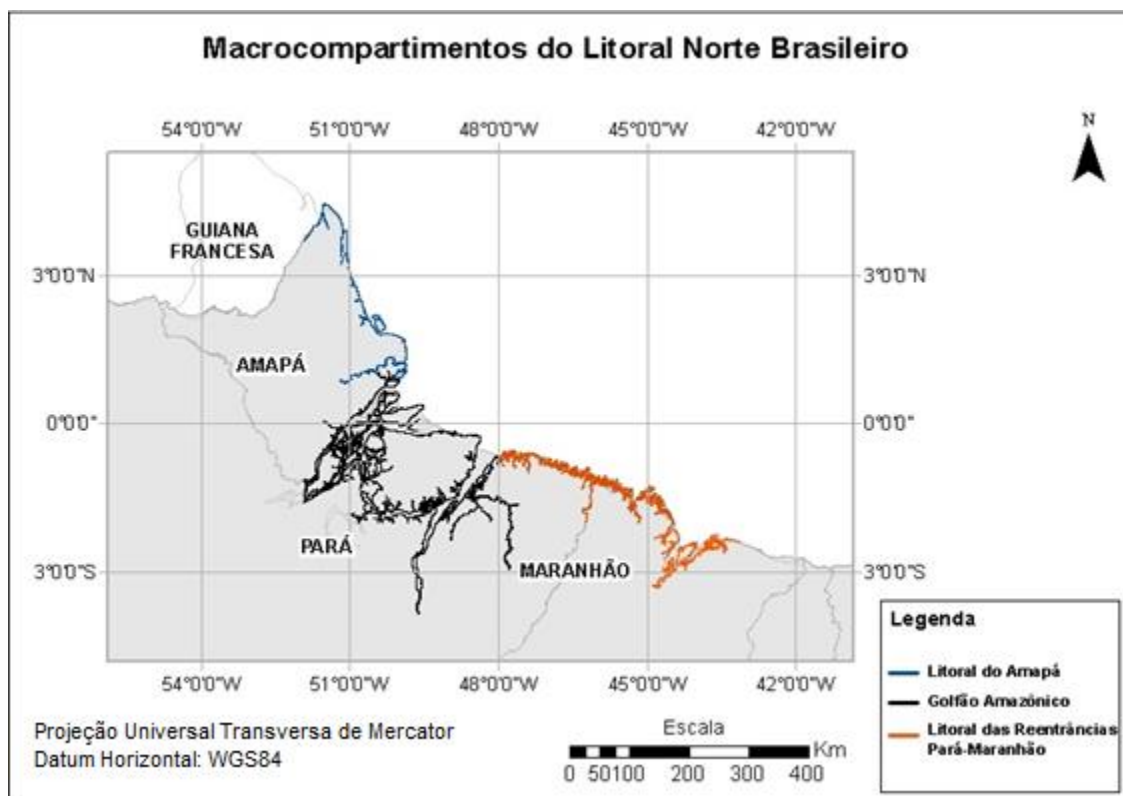


Figura 3 - Macrocompartimentos do litoral norte brasileiro. Modificado de MUEHE (2006).

2.1 Aspectos Fisiográficos

2.1.1 Generalidades

O litoral norte está localizado em uma plataforma continental com 330 km de largura (PEREIRA *et. al.*, 2009; MUEHE, 2006), a qual sofre influência direta da descarga de água doce do Rio Amazonas (AB'SÁBER, 2001). O volume de água médio por ele vertido é de 6,3 trilhões m³/ano (OLTMAN, 1968), saturado de partículas finas de sedimentos (AB'SÁBER, 2001), sendo considerado o maior rio do mundo em carga dissolvida (DEGENS, 1991, *apud* SOUZA FILHO *et. al.*, 2005). O Rio Amazonas é responsável por transportar grande quantidade de nutrientes, sedimentos e matéria orgânica, recursos fundamentais para a formação e manutenção de uma das maiores áreas contínuas de manguezais do planeta (SOUZA FILHO *et. al.*, 2009).

Conforme explica AB'SÁBER (2001), o acúmulo de sedimentos finos (argila) na ZCA ao longo de milhares de anos deu origem à formação do ecossistema de manguezais com distintos tipos bióticos, assim como a uma das maiores costas lamosas do mundo (SOUZA FILHO *et. al.*, 2006).

O litoral norte brasileiro apresenta elevada precipitação anual, com até 3.300 mm, além de temperaturas acima de 20° C, baixa variação térmica ao longo do ano e regime de macromarés (PEREIRA *et. al.*, 2009). Predomina na região o clima Equatorial Úmido e Semiúmido. No entanto, na porção noroeste do Maranhão, ocorre o clima Tropical Zona Equatorial (IBGE, 2002). Ambos são controlados substancialmente pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pela atuação dos ventos alísios (CONTI & FURLAN, 2003). De acordo com esses últimos, a massa equatorial marítima (Em) e a ZCIT exercem influência principalmente no Médio e Baixo Amazonas, como também no litoral.

Para que a área de estudo seja mais bem compreendida, faz-se necessária a descrição de cada macrocompartimento que a compõe, levando em conta aspectos relacionados ao clima, relevo, geomorfologia e biomas.

2.1.1 Aspectos fisiográficos dos macrocompartimentos do Litoral Norte Brasileiro

2.1.1.1 Litoral do Amapá

Este macrocompartimento tem início no Cabo Orange e termina no flanco sul do Cabo Norte (MUEHE, 2006). Segundo tal autor, o litoral do Amapá e a plataforma continental sofrem influência direta dos sedimentos finos despejados pelo Rio Amazonas em sua foz. Parte desses sedimentos circula para o norte do Amapá por meio de correntes oceânicas e se deposita na porção interna da plataforma continental. Como resultado da dinâmica do oceano, esses sedimentos são remobilizados pelo efeito das ondas, o que aumenta a carga em suspensão naquela região.

A linha de costa dos cabos Orange e Cassiporé abarca sedimentos marinhos e fluvio-estuarinos do Quaternário (BATISTA et.al., 2008). Este trecho do litoral amapaense, apesar do grande aporte de sedimentos, encontra-se em regime erosivo por razão dos processos hidrodinâmicos locais (BATISTA et.al., 2008; MUEHE, 2006). Todavia, no sul do litoral do Amapá, há uma ampliação do depósito de sedimentos ocasionado principalmente pelo transporte dos rios Araguari e Amazonas (MUEHE, 2006). Os rios Oiapoque e Caiporé abrigam ecossistemas de planícies aluviais, ocasionais beiradas de diques marginais e vegetação densa (AB'SÁBER, 2001). O Cabo Orange, mais a sul, apresenta drenagem entrecruzada na região infrapraiana em regime de maré baixa. O ecossistema de manguezais frontais ocorre em toda porção retilinizada da costa do Amapá, não havendo similar em nenhuma outra parte do litoral brasileiro (AB'SÁBER, 2001).

O delta do Rio Araguari é formado por planícies fluviomarinhas e fluviolacustres do Amapá (IBGE, 2004), com a presença do arquipélago de Bailique, a sudeste, e da Ilha de Maracá, a nordeste. Neste ambiente deltaico, ocorrem sedimentos finos com presença de mangues costeiros (AB'SÁBER, 2001).

2.1.1.2 Golfão Amazônico

Este macrocompartimento se localiza a nordeste do Estado do Pará, desde o flanco sul do Cabo Norte até a Ponta Taipu, fazendo a divisa com o Amapá através da barreira geográfica Rio Amazonas (MUEHE, 2006). Com base nos dados da FAPESPA (2015), o Golfão Amazônico encontra-se na mesorregião do Marajó e parte da mesorregião Nordeste Paraense (mais detalhadamente, nas microrregiões de Arari, Furos de Breve, Portel e Cametá). A região inclui a foz do Amazonas, constituída pelos estuários dos rios Amazonas, a oeste, e Pará-Tocantins, a leste, separados pela Ilha de Marajó (AB’SÁBER, 2001; 2002).

O Golfão Amazônico é responsável por receber toda a drenagem das bacias hidrográficas Tocantins-Araguaia e Amazonas, sendo delimitado pelos rios Amazonas, a oeste, Pará, a sul, Tocantins-Baía do Marajó, a leste, e Oceano Atlântico, a norte (SOUZA & ROSSETTI, 2011).

De acordo com AB’SÁBER (2001), o Golfão Amazônico é um ambiente híbrido com 330 quilômetros, estendendo-se de norte a sul. De leste a oeste, a região abrange o lago de “terras firmes” de Caxiuanã e Portel, até a porção oceânica de Marajó por 300 quilômetros.

De acordo com AB’SÁBER (2001), o grande volume de água doce despejado no oceano pelo Rio Amazonas impede, de certa maneira, a formação de manguezais naquela região, devido à baixa salinidade que caracteriza este ambiente estuarino deltaico.

O relevo da Ilha de Marajó e das demais a ela adjacentes é plano e muito baixo (MUEHE, 2006), sob domínio das planícies amazônica, litorâneas de Marajó, fluviais, além dos Tabuleiros Paraenses e do Leque Aluvial do Tocantins. (IBGE, 2004). O clima do Golfão Amazônico é tropical úmido com temperatura média anual de 27° C e alta pluviosidade na primeira metade do ano (SOUZA & ROSSETTI, 2011).

2.2.2.3 Litoral de Reentrâncias Pará-Maranhão (Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia)

O Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão (LRPM) é composto pelo ecossistema de manguezais em toda sua extensão, desde a costa nordeste do Estado do Pará à costa noroeste do Maranhão. SOUZA FILHO *et al.* (2005) afirmaram em seus estudos que esta é a maior região de manguezais do país, com aproximadamente 7591 km², ocupando 56% das áreas de manguezais do território brasileiro.

A Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA) se estende da Baía de Marajó, no Estado do Pará, até a Ponta de Tubarão, na Baía de São José, no Maranhão, avançando cerca de 650 km em linha reta no litoral (NASCIMENTO *et al.*, 2012; SOUZA FILHO *et al.*, 2005). Este é o último compartimento da costa norte brasileira no sentido oeste-leste, fazendo limite a oeste com o “Golfão Amazônico”. É nesta região que ocorre uma das maiores exposições contínuas de manguezal do mundo, inferior apenas à da Indonésia (SPALDING *et al.*, 1997).

Conforme colocado por NASCIMENTO *et al.* (2012), o LRPM possui inúmeras penínsulas, marcadamente reentrantes, cada uma com extensão de 30 km até o Oceano Atlântico e até 10 km de largura no sentido oeste-leste (Figura 4).

Os manguezais existentes nesse macrocompartimento caracterizam-se pela presença de relevos baixos, variando de 0 a 80 metros de altitude, extensas planícies costeiras, com até 70 km de largura, e plataforma continental com aproximadamente 200 km de largura. Essa última não possui regularidade, com a presença das reentrâncias acima mencionadas e delineada por vários estuários (SOUZA FILHO *et al.*, 2005).

AB’SÁBER (2001) descreveu esta região litorânea como sendo formada por costas de antigas rias do Holoceno Inferior, mascaradas pela sedimentação argilosa do Grupo Barreiras, que serve de suporte ecológico para os manguezais nas margens dos estuários (MUHUE, 2006). Essa sedimentação data do Quaternário. Tal região sofre influência do regime de macromarés semidiurnas, o qual exhibe amplitudes que variam de quatro a oito metros (SILVA *et al.*, 2009).

A região é cortada por centenas de rios formando uma rede de drenagem que deságua no Oceano Atlântico. Esta grande malha hidrográfica favoreceu a formação de dezenas de estuários ao longo de toda a costa (ANA, 2006).

O clima varia de acordo com as mudanças sazonais da posição da ZCIT, a qual controla a precipitação na zona equatorial amazônica, que aumenta para oeste variando de 2250 mm a 2950 mm entre os meses de janeiro e abril. Entretanto, nos meses entre setembro e novembro, a média da precipitação tende a zero (NASCIMENTO JÚNIOR *et al.*, 2012).

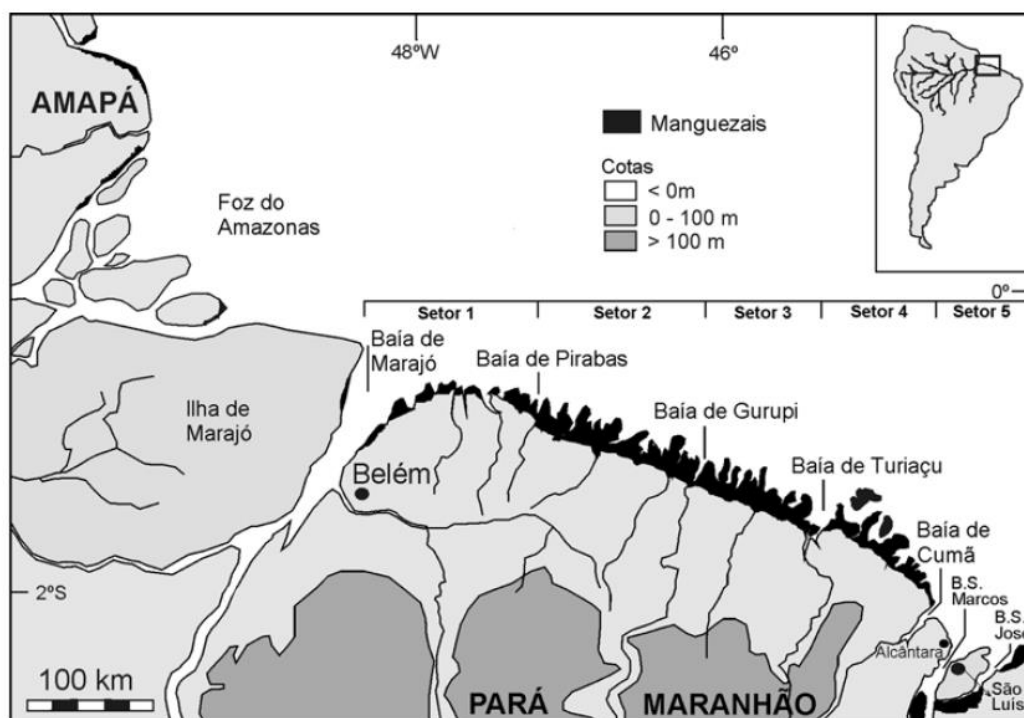


Figura 4 - Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia. Fonte: SOUZA FILHO *et al.* (2005).

A descrição do LRPM indica o quanto tal macrocompartimento é mais complexo que os anteriores, pois abrange características fisiográficas distintas de porções costeiras dos dois estados. Com efeito, o litoral abrangendo Pará e Maranhão pode ser subdividido conforme sugerido por EL-ROBRINI *et al.* (2006ab).

Com relação ao litoral paraense, este é segmentado em três setores distintos, onde apenas um deles faz parte do LRPM, o “Setor da Costa Atlântica do Salgado Paraense”, que vai da Baía do Marajó até o Rio Gurupi (EL-ROBRINI *et al.*, 2006a). De acordo com tais autores, este setor é formado por “falsas rias”, ou seja, um complexo de reentrâncias (Figura 5). A região é habitada por 531.614 pessoas, cujas atividades econômicas resultam em agricultura, pesca predatória e soterramento de manguezais (EL-ROBRINI *et al.*, 2006a).

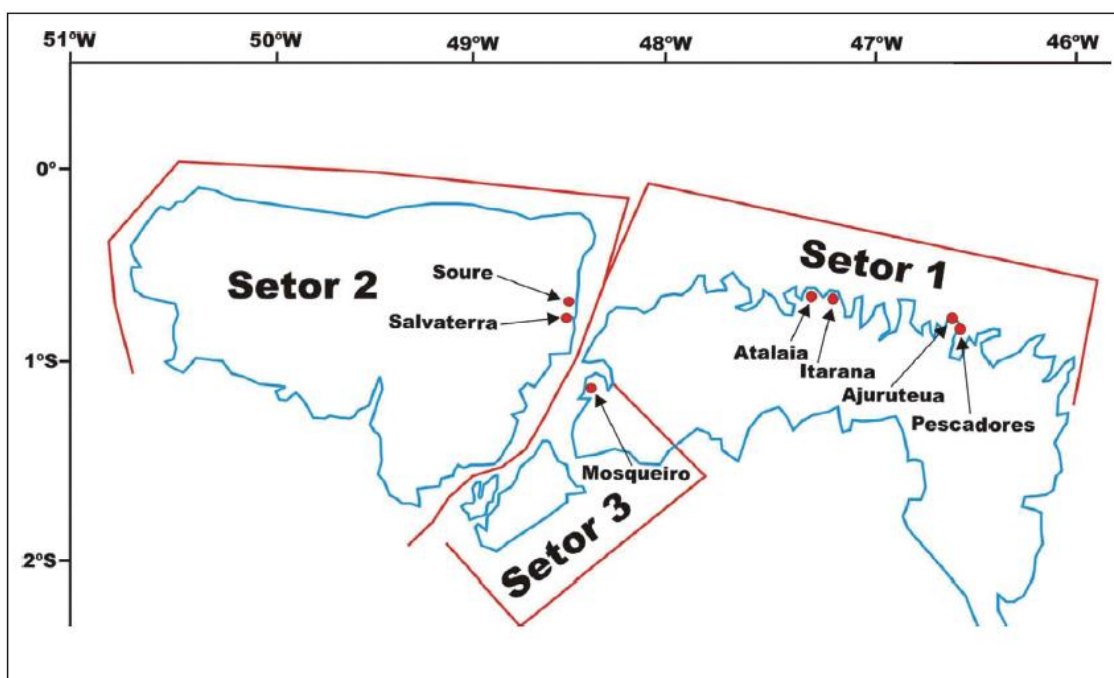


Figura 5 - Mapa de localização dos setores da Zona Costeira e Estuarina do estado do Maranhão (ZCEP). Fonte: EL-ROBRINI *et al.*, 2006a). Setor 1 – Costa Atlântica do Salgado Paraense; Setor 2 – Insular Estuarino; Setor 3 – Continental Estuarino.

O Setor 1 da Zona Costeira e Estuarina Paraense (ZCEP), como ilustrado na Figura 5, abrange o nordeste do Estado do Pará e sofre influência da macromaré semidiurna com amplitude de 5 metros (FEMA, 1997 *apud* EL ROBRINI *et al.*, 2006a). Nele ocorrem vales estuarinos estreitos esculpidos em terrenos do Grupo Barreiras. A geomorfologia local é composta por planaltos costeiros e planícies costeiras com dinâmica transgressiva, formando ambientes como praias, dunas e manguezais. Neste recorte, há também a presença de um maciço residual com elevação de até 200 m (EL-ROBRINI *et al.*, 2006a). O clima aí é tropical úmido, com temperatura média anual de 27° C.

Por sua vez, a Zona Costeira e Estuarina do Maranhão (ZCEM), segundo EL-ROBRINI *et al.* (2006b), é subdivida em cinco setores, onde apenas aqueles designados por 1, 3 e 4 fazem parte do LRPM: Golfão Maranhense (setor 1), Litoral Ocidental (Setor 3) e Baixada Maranhense (setor 4), conforme a Figura 6. A população do Golfão Maranhense (981.972 habitantes) é maior que a dos outros setores, os quais possuem menos de 300 mil habitantes cada (EL-ROBRINI *et al.*, 2006b). Vale registrar que o Litoral Ocidental se destaca por ser entremeado por recortes profundos conhecidos como “reentrâncias maranhenses”, onde ocorrem planícies costeiras ocupadas por florestas de manguezais. Finalmente, quase desvinculado do macrocompartimento LRPM, encontra-se o Golfão Maranhense, que, de acordo com AB’SÁBER (2001), é formado pelas baías de São Marcos e São José, no extremo norte do Estado do Maranhão. Está presente neste setor a Ilha de São Luís, desassociada dos tabuleiros costeiros pelo persistente fenômeno de erosão fluvial. O clima da região é tropical úmido, com pluviosidade acima de 1.500 mm anuais e temperaturas acima de 20°C (NITTROUER *et al.*, 1995).

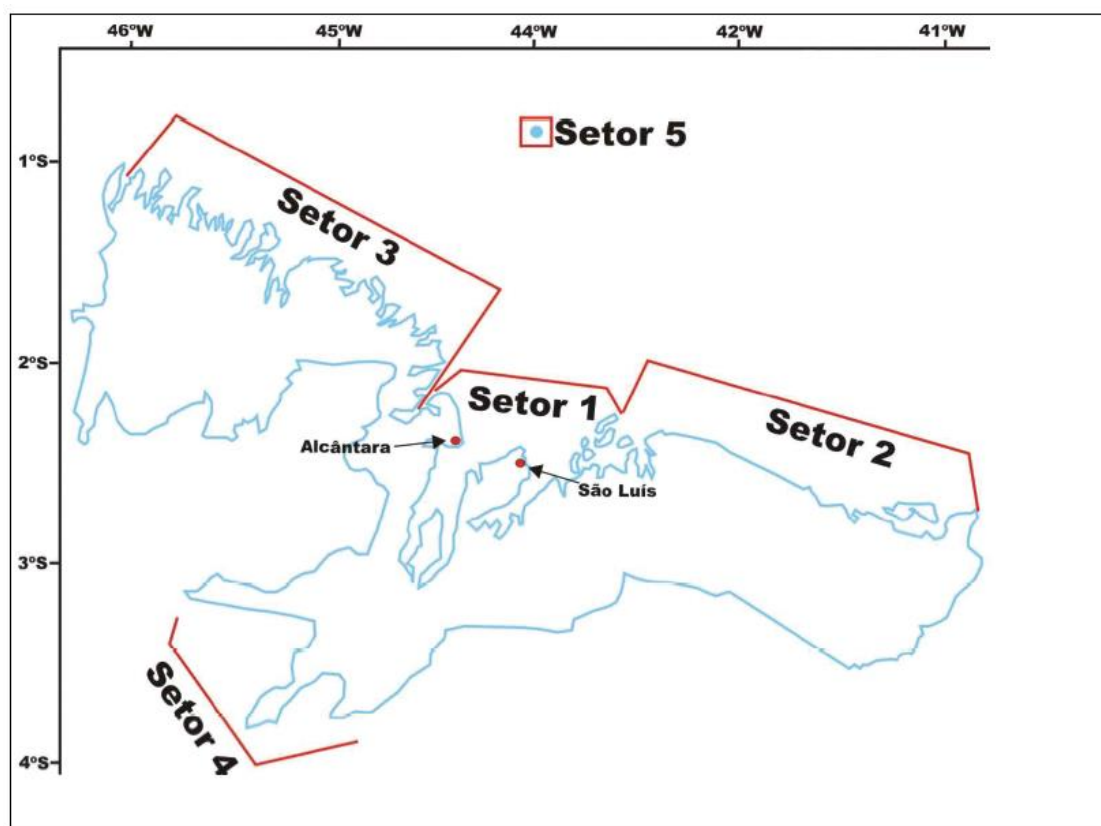


Figura 6- Mapa de localização dos setores da Zona Costeira e Estuarina do Maranhão (ZCEM). Fonte: EL-ROBRINI *et al.* (2006b). Setor 1 – Golfão Maranhense; Setor 2 – Litoral Oriental; Setor 3 – Litoral Ocidental; Setor 4 – Baixada Maranhense; Setor 5 – Parcel Manuel Luís.

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Sensoriamento Remoto

Para que se possa compreender o sensoriamento remoto, é necessário antes de tudo definir tal conceito. Vários autores entendem essa tecnologia como a utilização de sensores para a aquisição de informações sem contato direto sobre objetos ou fenômenos na superfície terrestre, o que se dá através da captação e do registro da energia eletromagnética por eles refletida ou emitida (MORAES, 2002; FLORENZANO, 2007; JENSEN, 2009).

O sensoriamento remoto é muitas vezes crucial na realização de um trabalho ou pesquisa acadêmica, pois permite o acesso a informações de difícil aquisição no campo, como, por exemplo, sobre os diferentes usos do solo em uma área de dimensões territoriais amplas. Outra aplicação refere-se a situações politicamente complexas, como a fronteira entre países beligerantes, onde o acesso a imagens e/ou produtos provenientes de sensores remotos é fundamental. MORAES (2002) enfatizou que os sensores remotos são imprescindíveis na realização do mapeamento e monitoramento do espaço geográfico alterado ou não pelo homem.

Os sensores devem ser instalados em uma plataforma para que possam captar a radiação eletromagnética oriunda da superfície terrestre, executando aerolevantamentos (transportados em aeronaves ou *drones*) ou obtendo de imagens por meio de satélites. Por sua vez, a energia envolvida no processo poderá ser transmitida pelo próprio sistema, como utilizada pelos sensores ativos, ou ainda proveniente do sol, como empregada pelos sensores passivos.

É importante ressaltar que o presente trabalho usou o sistema de sensoriamento remoto ativo por radar, em razão das condições atmosféricas da área de estudo. A presença de nuvens na região da costa amazônica é constante durante todo o ano; assim, sensores remotos passivos captam a energia eletromagnética originada nestes alvos, o que impede a obtenção de imagens da superfície terrestre nos locais com nebulosidade. A utilização de sensores ativos de microondas elimina tal limitação, pois são sistemas que atuam na faixa do espectro eletromagnético onde as nuvens não interferem no sinal, o que possibilita adquirir informações do terreno.

3.1.1 Radiação Eletromagnética

No entender de SABINS (1997), a energia na radiação eletromagnética se desloca com a velocidade da luz em um padrão de ondas harmônicas, as quais são caracterizadas por um só comprimento de onda e uma só frequência (Figura 7). Tal energia é percebida pelo sensor em função de sua interação com os alvos, que ocorre segundo os processos de espalhamento (dispersão), reflexão, emissão, transmissão e refração (Figura 8). Como será visto adiante, as feições rugosas provocam o espalhamento do pulso de microondas proveniente do sensor ativo, enquanto que os corpos lisos provocam a reflexão especular dessa energia.

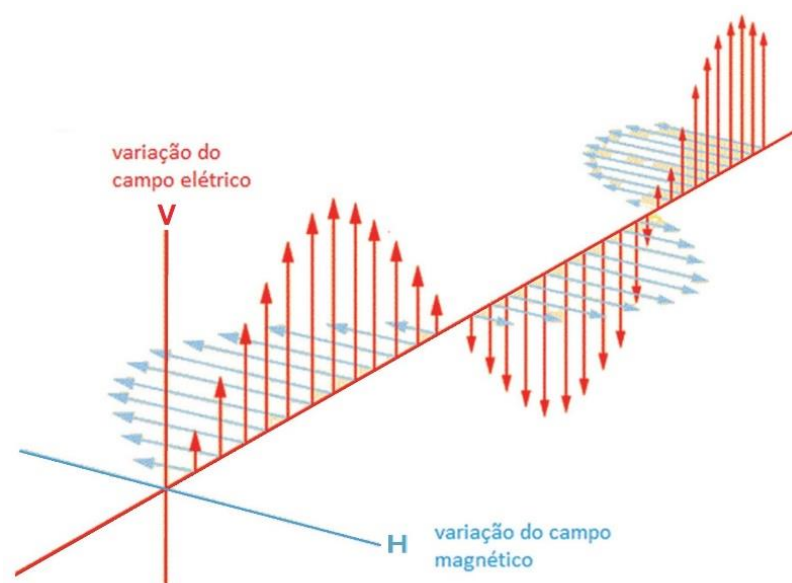


Figura 7 – Propagação da onda eletromagnética. Adaptado de BAGNATO & PRATAVIEIRA (2015).

As ondas eletromagnéticas são descritas com relação a seu comprimento de onda e frequência. Elas se propagam com a velocidade da luz (c), que equivale a $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ no vácuo (SABINS, 1997). Este autor afirma que, diferentemente da velocidade (c) e do comprimento de onda (λ), os quais variam de acordo com diferentes meios, a frequência (f) não se altera, sendo assim uma propriedade fundamental. Tais grandezas se relacionam de acordo com a equação $c = \lambda f$ (Equação 1).

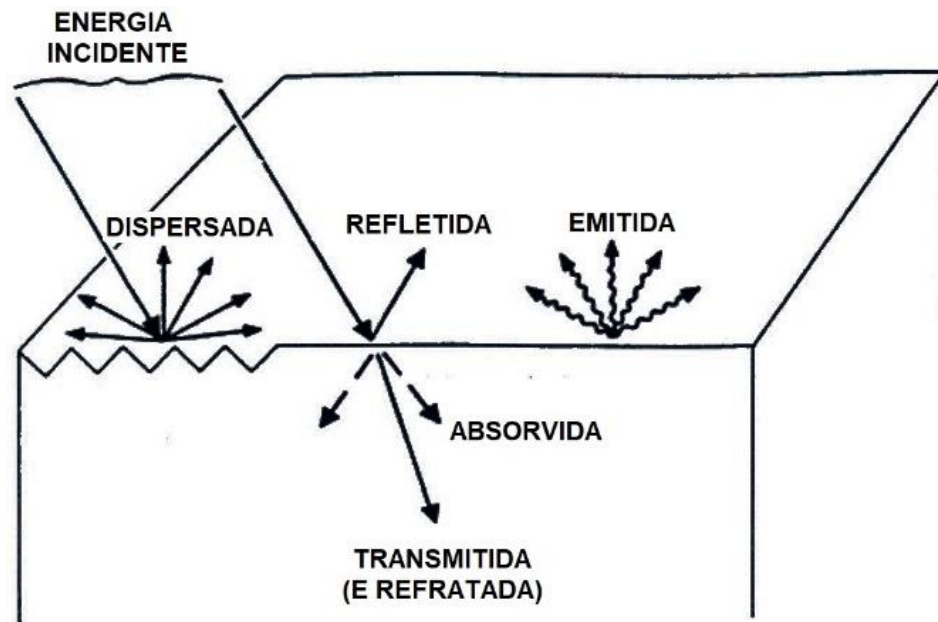


Figura 8 - Processos de interação entre a energia eletromagnética e os alvos. Modificada de SABINS (1997).

3.1.2 O Espectro Eletromagnético

O espectro eletromagnético é um contínuo de energia que abrange desde metros a nanômetros (10^{-9} m) em comprimento de onda, sendo dividido em diferentes regiões, como segue: radiação gama, raios x, ultravioleta, visível, infravermelho, microondas e ondas de rádio (Figura 9).

As regiões da radiação gama, raios-x e ultravioleta de pequeno comprimento de onda não são utilizadas no sensoriamento remoto por apresentarem transmitância atmosférica nula. Nesses casos, gases presentes da atmosfera (O_3 , H_2O e CO_2) absorvem a energia eletromagnética, configurando bandas de absorção. A detecção de alvos na superfície terrestre é possível nas janelas atmosféricas de alta transmitância situadas nas microondas, infravermelho, visível e nas porções do ultravioleta com maiores comprimentos de onda (Figura 9).

Nas bandas K, X, C, S, L e P da faixa das microondas (Tabela 1), que interessa ao presente trabalho, há uma extensa janela atmosférica (Figura 9). Por isso, é possível afirmar que a energia eletromagnética nessa região é capaz de penetrar nas nuvens sem sofrer interferência atmosférica.

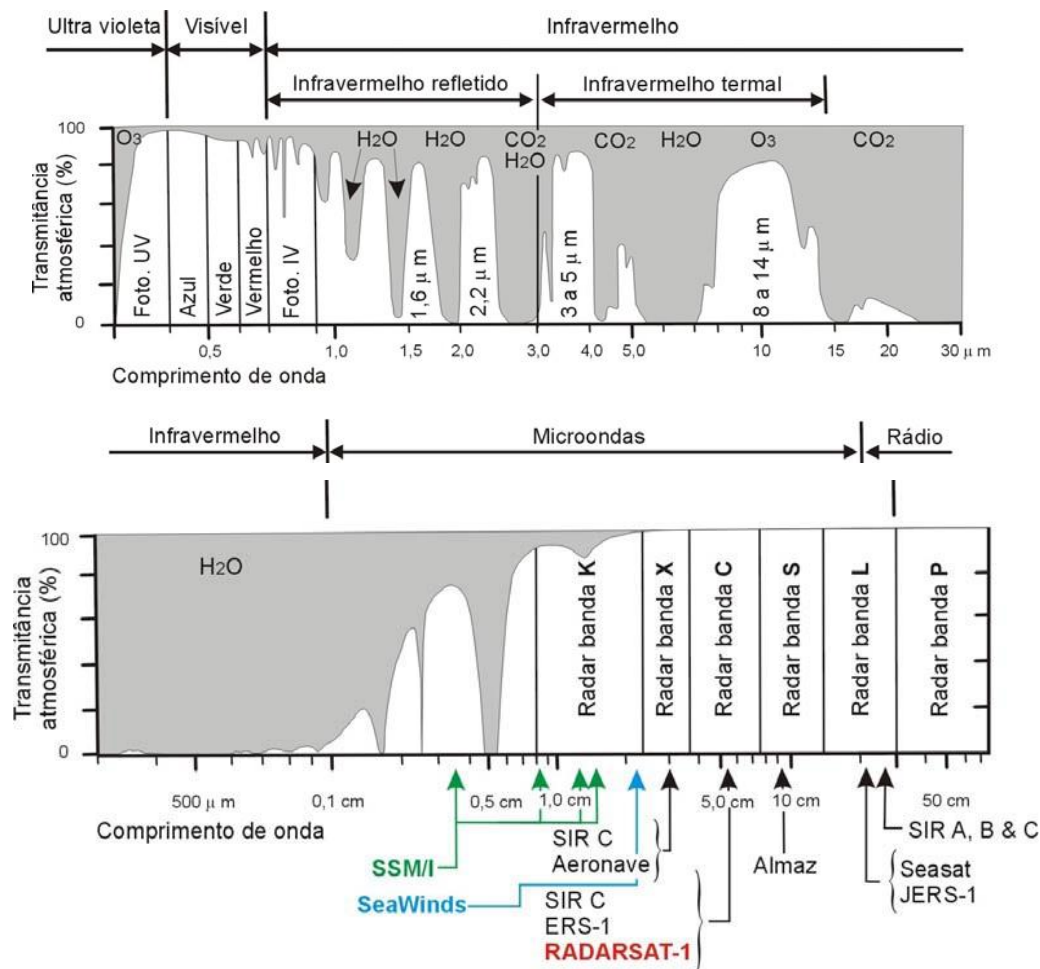


Figura 9- Diagrama apresentando o espectro eletromagnético versus a transmitância atmosférica. Fonte: RORIZ (2006).

3.1.3 O Sensor Radar na Faixa das Microondas

Os valores de λ nas microondas variam de 0,1cm a 100 cm; entretanto, o intervalo espectral possível de ser empregado nesta faixa pelos sensores remotos varia de 3,0 mm a 100 cm (MENESES et al. 2012). De acordo com tais autores, esta região correspondente ao sensor ativo denominado radar, que utiliza energia eletromagnética desenvolvida artificialmente. Assim, além de adquirir imagens em qualquer condição atmosférica, esse sistema pode obter dados durante o dia ou noite.

Com a permanente instabilidade atmosférica da costa amazônica, é muito difícil adquirir imagens desprovidas de nuvens dessa região na faixa do visível e/ou infravermelho em qualquer período do ano. Este fato coloca como requisito para a realização de um bom mapeamento a escolha de sensores remotos ativos tais como o radar.

BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA (CM)	FREQUÊNCIA (GHz)
K	0,8 - 2,4	40 - 12,5
X	2,4 - 3,8	12,5 – 8,0
C	3,8 - 7,5	8 – 4
S	7,5 - 15,0	4 – 2
L	15 – 30	2 – 1
P	30 – 100	1 – 0,3

Tabela 1– Bandas na faixa das microondas. Adaptado de SABINS (1997).

Cabe ressaltar que, em condições atmosféricas adversas, tais como células convectivas que provocam fortes chuvas, fica prejudicado o uso de imagens com comprimento de onda menor que 4,0 cm nas bandas K e X, (GONÇALVES *et al.*, 2009; JENSEN, 2009).

Na presente dissertação foram empregados os sensores JERS-1 SAR e RADARSAT-1, os quais operam, respectivamente, nas bandas L e C. A banda L é capaz de penetrar todo o dossel vegetal (BITENCOURT, 2011), o que a torna adequada ao mapeamento de áreas com manguezais inundados (e.g., MIRANDA *et al.*, 1992).

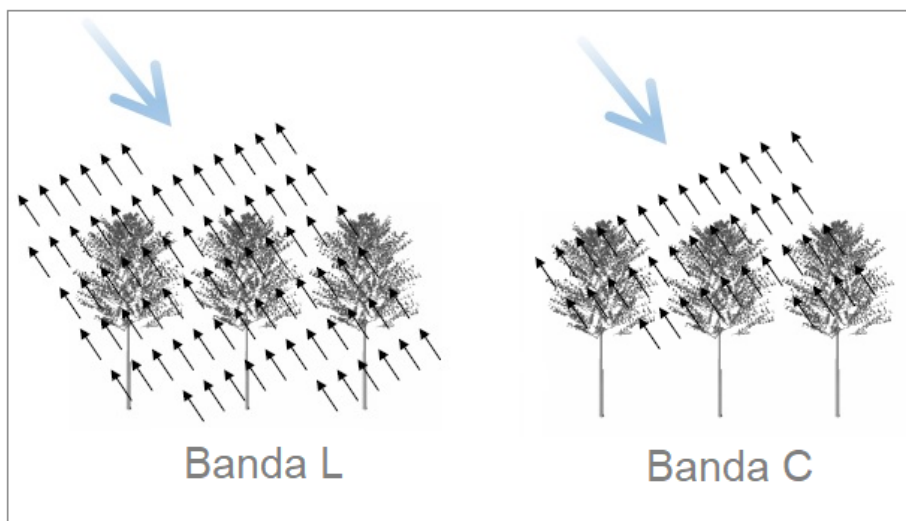


Figura 10- Penetração no dossel vegetal do pulso incidente para diferentes sistemas de radar (bandas L e C). Adaptado de (BITENCOURT, 2011).

Os sistemas de radar também possuem como característica a polarização do seu sinal. O vetor do campo elétrico dos pulsos transmitido e recebido pode se orientar nos planos vertical ou horizontal em relação ao eixo da antena (SABINS, 1997). Desse modo, na polarização paralela, o sinal pode ser transmitido e recebido somente nos planos vertical (VV) ou horizontal (HH). Por sua vez, na polarização cruzada, existem duas possibilidades de transmissão e recepção do sinal: HV ou VH. Na primeira delas, o sinal é transmitido horizontalmente e recebido verticalmente; na segunda, ocorre o oposto (SABINS, 1997).

3.1.4 Características Gerais do Sistema de Radar

A palavra “RADAR” é um acrônimo da designação em inglês “*Radio Detection and Ranging*”, que se refere a um sistema desenvolvido para detectar a presença de objetos, determinar sua distância em relação ao sensor e verificar sua posição angular. O dispositivo funciona emitindo pulsos eletromagnéticos na faixa das microondas em direção ao alvo de interesse e registrando posteriormente a energia que retorna à antena. LILLESAND & KIEFER (1994) ressaltaram que o sistema de radar pode ou não produzir imagens. SABINS (1997) afirmou que o pulso pode ser enviado ao terreno, desde uma

plataforma aerotransportada ou orbital, empregando a geometria de aquisição mais adequada ao objetivo do estudo.

Os sistemas de radar aerotransportados e orbitais possuem uma antena fixa com visada lateral, podendo ser de abertura real (*Real Aperture Radar - RAR*) ou sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*). Em um sistema RAR, a resolução espacial na direção de deslocamento da plataforma (azimute) é dependente do comprimento físico da antena (L). Assim, quanto maior o valor de L , maior será a resolução em azimute. No sistema SAR, é empregada uma antena mais curta. Entretanto, através de técnicas de processamento baseadas no efeito Doppler, é possível sintetizar uma antena com valor de L muito grande, o que melhora significativamente a resolução em azimute. Segundo RORIZ (2006), a utilização do RAR se restringe a aeronaves, enquanto que o SAR é operacional tanto em plataformas aerotransportadas como em satélites.

Além da capacidade de obter informações sobre os alvos em distintas faixas de frequência (Tabela 1) e empregar diferentes modos de polarização, os sistemas de radar apresentam uma geometria específica, que os distinguem dos outros tipos de sensores ópticos com visada no nadir (JENSEN, 2009). Nesse contexto, o ângulo de depressão (γ) é formado entre o pulso do radar e um plano horizontal que passa pelo eixo da antena (Figura 11). O ângulo de incidência (θ) é definido pelo pulso do radar e pela normal à superfície do terreno. Somente no caso de uma superfície horizontal do terreno, γ e θ são complementares.

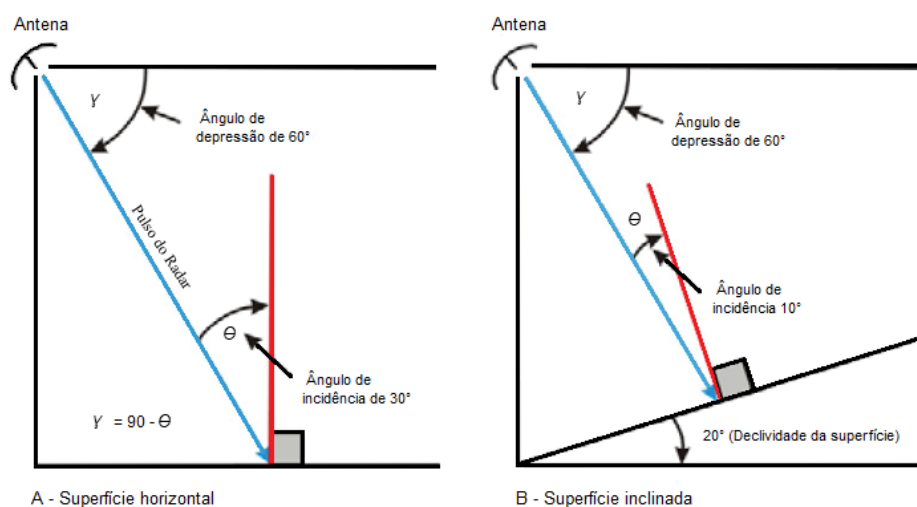


Figura 11– Diagrama ilustrando os conceitos de ângulo de incidência e ângulo de depressão. Adaptado de SABINS (1997).

3.1.5 O Conceito de Rugosidade da Superfície

De acordo com SABINS (1997), a rugosidade da superfície é medida em centímetros, ou seja, na mesma ordem de grandeza do comprimento de onda (λ) do pulso incidente do radar. Sua determinação ocorre, portanto, levando em conta características de textura comparáveis ao valor de λ , as quais definem a altura do micro-relevo em centímetros. O retorno do sinal do radar varia de acordo com a rugosidade da superfície que compõe o alvo. O citado autor classificou a rugosidade da seguinte maneira:

- (a) Superfície lisa, que reflete toda a energia incidente do pulso do radar com ângulo de reflexão igual e oposto ao ângulo de incidência (Figura 12);
- (b) Superfície com rugosidade intermediária, que reflete parte da energia incidente do radar e promove o retroespalhamento difuso da parcela restante;
- (c) Superfície rugosa, na qual a energia incidente é inteiramente retroespalhada de maneira difusa.

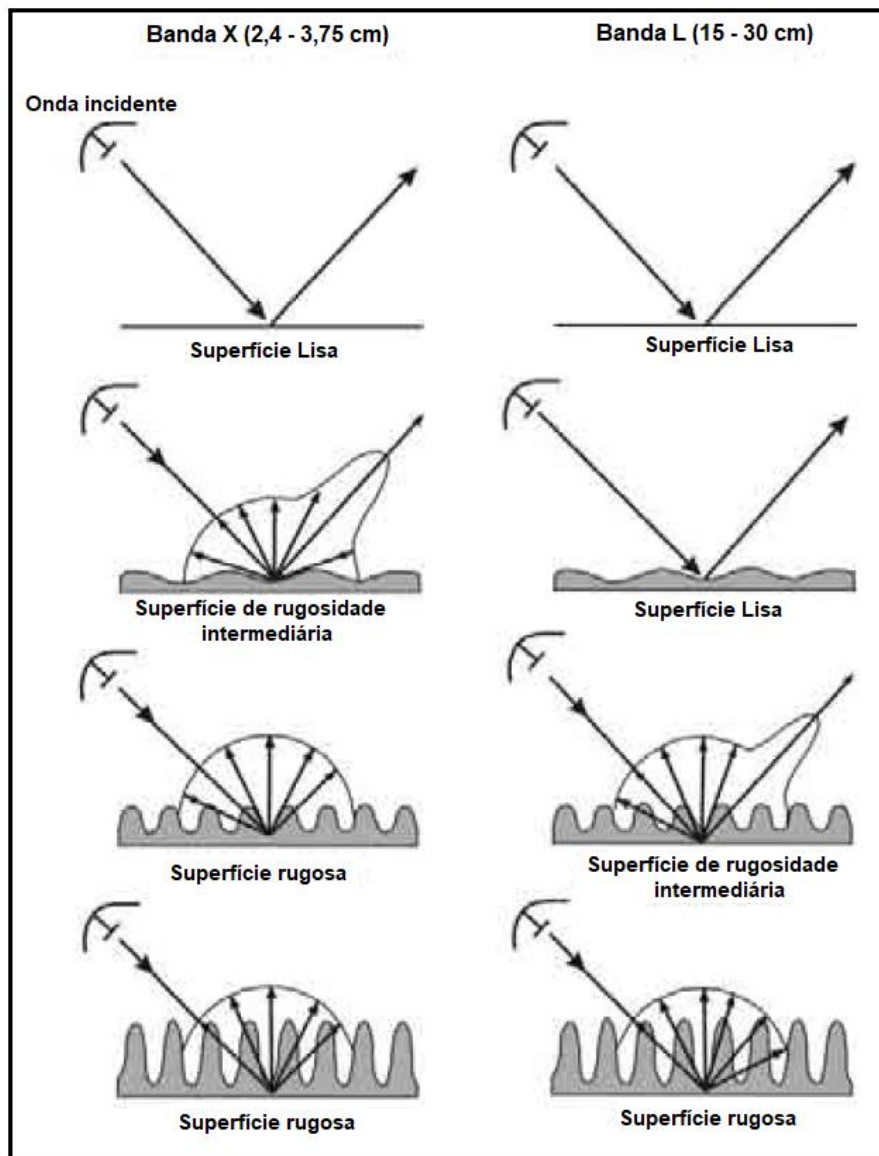


Figura 12 – Mecanismos de interação com o terreno do pulso do radar para as bandas X e L em diferentes superfícies. Fonte: RORIZ (2006). A reflexão especular ocorre nas superfícies lisas; o retroespalhamento difuso, nas rugosas.

De acordo com SABINS (1997), o critério proposto por Rayleigh propõe apenas as categorias lisa e rugosa, estabelecendo um limiar divisório de classificação para a altura em centímetros do micro-relevo vertical (h). Assim, a superfície é considerada lisa quando expressa por $h < (\lambda) / (8 \text{ sen } \gamma)$; Equação 2.

Por outro lado, o critério proposto por PEAKE & OLIVER *in* SABINS (1997) contempla a classificação das superfícies entre lisa, rugosa e intermediária, como segue:

(a) o limiar entre superfícies lisas e intermediárias é dado por

$$h < (\lambda) / (25 \text{ sen } \gamma); \text{ Equação 3;}$$

(b) o limiar entre superfícies intermediárias e rugosas é dado por

$$h > (\lambda) / (4,4 \text{ sen } \gamma); \text{ Equação 4.}$$

Uma discussão dos critérios acima relatados pode ser efetuada com base na Figura 13, que mostra o mosaico de imagens JERS-1 SAR (banda L, polarização HH), elaborado pelo *Global Rain Forest Mapping Project*, na porção correspondente à costa do Amapá. Na presença de ventos com velocidade acima de 3 m.s^{-1} , a superfície do mar torna-se rugosa devido ao efeito Bragg, que provoca o retroespalhamento difuso do pulso incidente do radar. Tal fenômeno é bem documentado nas bandas X e C, quando os valores do ângulo de incidência (θ) são inferiores a 40° (*e.g.*, MIRANDA *et al.*, 2004). Por outro lado, na banda L, em razão de seu maior comprimento de onda (λ) se comparada à banda C, a superfície do mar se apresenta mais lisa nesses intervalos de velocidade do vento e ângulos de incidência (θ). Tal situação é representada esquematicamente na Figura 12, onde uma superfície que possui rugosidade intermediária na banda C se comporta como uma superfície lisa na banda L. Por sua vez, as áreas com floresta densa emersa estarão sempre associadas ao retroespalhamento difuso nas bandas X, C e L.

Os valores dos pixels na imagem JERS-1 SAR são proporcionais à amplitude do sinal de retorno e respondem às diferenças acima relatadas em tonalidades de cinza. Áreas escuras podem corresponder a corpos d'água lisos em lagos ou no oceano, como também a áreas com planícies lamosas lisas na zona costeira. As porções na imagem com retorno muito alto (pixels saturados) estão associadas ao efeito de *double-bounce* típico de florestas inundadas na banda L/polarização HH. A floresta que se desenvolve em terrenos emersos espalha difusamente a energia transmitida pela antena e aparece na imagem em tons de intermediários de cinza.

A definição do limite terra-água na imagem da Figura 13 torna-se, portanto, muito adequada, pois distingue os ambientes aquáticos dos não-aquáticos devido à rugosidade da superfície. Esse mosaico JERS-1 SAR foi utilizado no projeto PIATAM MAR (SOUZA FILHO *et al.*, 2009). Percebe-se que, em tal produto que as superfícies mais lisas correspondem, em grande parte, à área oceânica e as mais rugosas à porção continental.

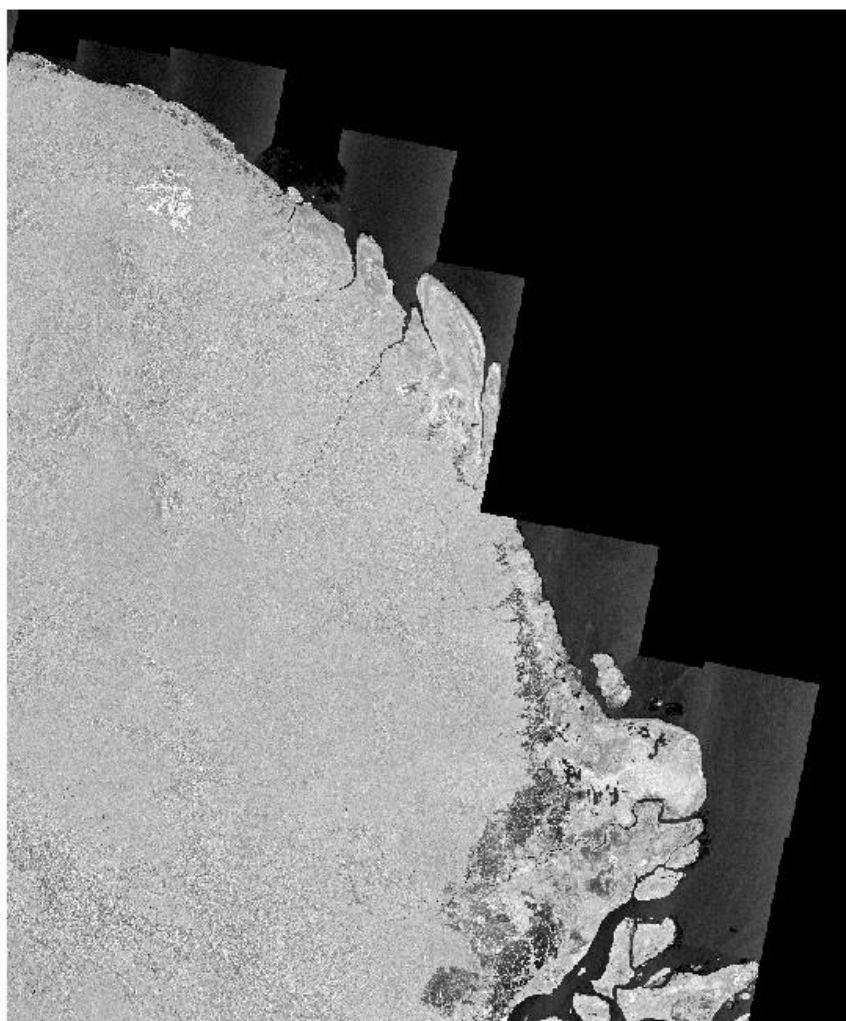


Figura 13 - Mosaico JERS-1 SAR de parte da costa do Amapá elaborado pelo *JERS-1 Global Rain Forest Mapping Project* (NASA *et al.*, 2000).



Figura 14 – Mosaico RADARSAT-1 de São Luis (MA). Fonte: Base de Dados Projeto Piatam Mar II, 2008.

É possível observar através da banda C da imagem Radarsat-1, o efeito *double-bounce* na área urbana (pixels mais claros), seguido de reflexão especular no limite terra-água, retratando bem esta diferenciação (Figura 14).

3.3 Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (ISA)

HAYES & GUNDLACH (1975) foram os pioneiros na preocupação em mapear ambientes atingidos por desastres ambientais provocados por derramamentos de óleo, quando elaboraram o relatório a respeito do vazamento de 51 mil toneladas de petróleo cru em Metula, Arábia Saudita, em agosto de 1974. Este trabalho teve como objetivo realizar o estudo de reconhecimento da geomorfologia costeira e da sedimentação no local impactado.

A NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), uma agência governamental norte-americana, atua no estudo sistemático da estrutura e comportamento do oceano, atmosfera e seus correspondentes ecossistemas. Esse órgão realiza a integração de pesquisa e análise, executa observações e monitoramento, bem como desenvolve a modelagem ambiental, com o objetivo de contribuir na preservação do meio ambiente (NOAA, 2017).

A NOAA utiliza ainda sua autoridade para regular e amparar a pesca marinha e os ecossistemas envolvidos, como também assegurar a proteção de espécies marinhas ameaçadas, proteger e recuperar ecossistemas e habitats, além de preservar santuários marinhos e locais protegidos, agindo em emergências ambientais e auxiliando na recuperação de possíveis desastres.

Em 2002, a NOAA produziu sua terceira versão das diretrizes do Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) para a elaboração de mapas com essa finalidade. Tais produtos subsidiam, desde 1979, planos de contingência e resposta a derramamento de óleo. Curiosamente, os primeiros mapas ISA foram elaborados poucos dias antes de um vazamento de óleo que ocorreu no Golfo do México (NOAA, 2002). De acordo com a citada agência, desde tal acidente os mapas ISA foram elaborados para toda a costa dos Estados Unidos da América.

A NOAA (2002) estabelece algumas diretrizes a serem seguidas na elaboração destes mapas contemplando os seguintes aspectos:

- a) Classificação da linha de costa;**
- b) Recursos biológicos;**
- c) Recursos de uso humano.**

A seguir, serão apresentados, de maneira sucinta, os critérios adotados pela NOAA (2002) na elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo, os quais foram adaptados pelo Projeto Piatam Mar II às peculiaridades da costa amazônica (SOUZA FILHO *et al.*, 2008). Além disso, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) empregou a abordagem da NOAA nas “Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo” (MMA, 2002), com a finalidade de contemplar os ambientes costeiros brasileiros. É importante frisar que todas as considerações realizadas neste tópico foram baseadas nos manuais elaborados pela NOAA (2002) e MMA (2002).

a) Classificação da linha de costa

Este aspecto é classificado de acordo com a escala de sensibilidade da costa (pois existem margens mais sensíveis que outras), persistência natural do óleo e facilidade de limpeza. Com relação à classificação das margens, são considerados 4 tipos de ambientes: fluvial, lacustrino, estuarino e palustrino, todos variando na escala de 1 a 10, onde 1 é o ambiente menos sensível e 10 o mais sensível.

O sistema de classificação da sensibilidade das margens considera aspectos biológicos e físicos, e não apenas o tipo de substrato e sua granulometria. Existe uma simbiose entre o tipo de substrato, processos físicos e biota, produzindo, assim, margens com características ecológicas, geomórficas e de transporte de sedimentos específicas, que são relevantes para a previsão de como será o impacto biológico, caso ocorram acidentes por derramamentos de óleo. (NOAA, 2002).

De acordo com NOAA (2002), são quatro os fatores que controlam o ISA com relação à linha de costa:

- Exposição às ondas e energia das marés;
- Declividade da costa;
- Tipo de substrato;
- Produtividade biológica.

Exposição às ondas e energia das marés

O primeiro fator faz menção ao grau de exposição do ambiente às ondas e energia das marés, onde, quanto maior a amplitude das ondas e mais fortes as correntes de maré, menor será o impacto no habitat atingido pelo derramamento. Neste caso, o óleo é removido rapidamente (MMA, 2002). Além disso, os organismos vivos que habitam este tipo de ambiente são adaptados às perturbações de curto prazo (NOAA, 2002).

A energia das marés e as ondas definirão o tempo de permanência do óleo em uma determinada costa, como segue: alta energia significará remoção rápida, em dias; com baixa energia também existe a capacidade de remoção, porém pode demorar anos. Já no caso da energia média, o óleo será removido assim que ocorrer o próximo evento de alta energia, o que pode acontecer em dias ou meses (NOAA, 2002).

Declividade da costa

A declividade da costa é expressa pela medida de inclinação entre as marés alta e baixa. De acordo com a (NOAA,2002), pode-se classificá-la como íngreme (acima de 30 graus), moderada (entre 30 e 5 graus) ou plana (inferior a 5 graus). Áreas mais íngremes tendem a romper as ondas (com alta energia) de maneira brusca. O material em contato com aquela superfície de alta inclinação poderá ser removido mais rapidamente do que se estivesse em outra superfície de menor inclinação (planícies de marés e faixas de mangues). As áreas mais planas da região intermarés tendem a dissipar a energia das ondas, permitindo assim uma maior permanência do óleo (NOAA, 2002).

Tipo de substrato

A NOAA (2002) classifica três tipos de substratos: base rochosa, sedimentos (intervalos granulométricos desde lama, areia, seixo e pedregulho) e materiais sintéticos. A porosidade e a permeabilidade dos sedimentos facilitam a maior penetração do óleo, tornando tal substrato mais sensível quando comparado aos demais.

Produtividade Biológica

O último fator a definir a sensibilidade da costa é a produtividade biológica. Os ecossistemas de manguezais e pântanos são os mais sensíveis à penetração do óleo. Nesses habitats, o tempo de remoção do poluente pode durar décadas. Tais ambientes apresentam alta sensibilidade no ISA, pois fornecem recursos alimentares aos peixes e aves.

b) Recursos Biológicos

A NOAA (2002) considera animais, plantas e habitats como passíveis de risco ao derramamento de óleo e, por este motivo, propôs sua subdivisão em sete grandes grupos taxonômicos. O mapeamento indicando a distribuição total de um amplo número de espécies muitas vezes não é suficiente, quando o objetivo é identificar sua sensibilidade ao contato com o óleo. Considerando esta variável, a NOAA propõe a classificação de risco por espécie, estágio de desenvolvimento e habitat em que vivem.

Acredita-se que os recursos biológicos são mais sensíveis à presença do óleo quando (MMA, 2002):

- Grande número de indivíduos está concentrado em uma área relativamente pequena;
- Espécies marinhas ou aquáticas encontram-se na costa durante estágios ou atividades especiais do ciclo de vida, tais como anidamento, nascimento, descanso/ invernada, migração ou muda;
- Estágios iniciais do ciclo de vida ou atividades reprodutivas ocorrem somente em uma determinada área;
- Existem áreas restritas de importância para um estágio de vida específico ou de rota migratória;
- Áreas específicas são conhecidas como fontes vitais para a germinação ou propagação;
- Constituem espécies ameaçadas, em risco de extinção ou raras;
- Um grande percentual da população está significativamente exposto ao óleo.

c) Recursos de uso humano

Por fim, a NOAA (2002) e o MMA (2002) destacaram que as atividades socioeconômicas envolvendo recursos costeiros (pesca, turismo, extrativismo, dentre outras) são vulneráveis a desastres ambientais por derramamento de óleo. Estes recursos são agrupados em quatro categorias, a saber:

- Áreas recreacionais e locais de acesso;
- Áreas sob gerenciamento especial;
- Locais de cultivo e extração de recursos naturais;
- Recursos culturais.

3.3.1 O Projeto Piatam Mar (Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica)

Segundo SALES *et al.* (2004), o Projeto Piatam Mar foi desenvolvido como uma parceria estratégica da Petrobras com instituições de ensino e pesquisa que atuam na Zona Costeira Amazônica (Universidade Federal do Pará, Universidade Federal Rural da Amazônia, Universidade Federal do Maranhão, Universidade Estadual do Maranhão, Museu Paraense Emílio Goeldi, Instituto Evandro Chagas, Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia/COPPE da UFRJ).

A primeira fase do projeto teve início em 2004, com o objetivo foi levantar dados ambientais e sociais pretéritos da costa amazônica brasileira (Figura 15), em uma área que se estende desde a Baía de São Marcos, no Maranhão, até o Cabo Orange, no Amapá, ao longo de 1.110 km (SALES *et al.*, 2004). Tal acervo abarcou tópicos sobre geologia, oceanografia, biologia, pesca, doenças tropicais e atividades socioeconômicas (SOUZA FILHO *et al.*, 2008).

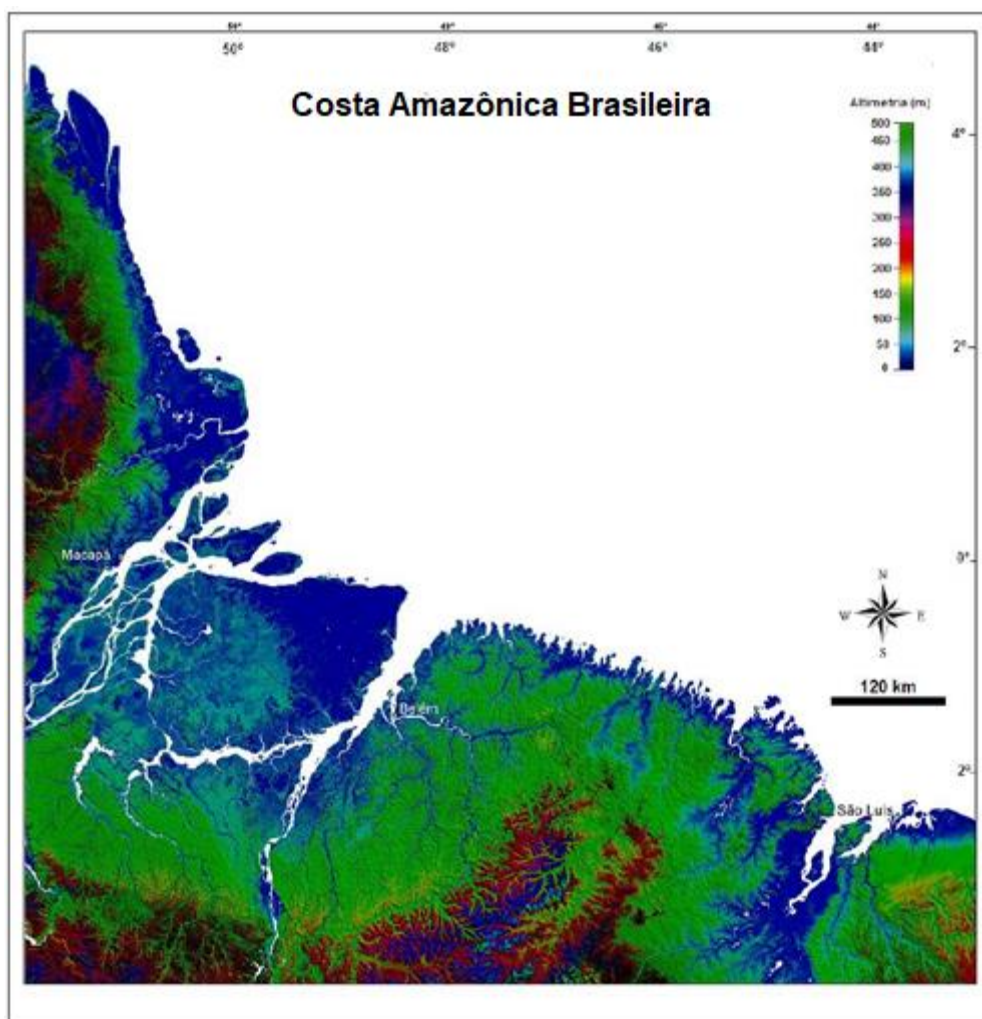


Figura 15 - Área de estudo do Projeto Piatam Mar. Fonte: SOUZA FILHO *et al.* (2005).

No período de 2006 a 2008, o Piatam Mar iniciou sua segunda fase, com ênfase nas zonas portuárias da área de estudo, onde se localizam terminais de abastecimento de petróleo e derivados adjacentes a áreas de preservação ambiental. Como resultado, foram elaboradas cartas SAO (Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo) em três diferentes escalas: estratégica, tática e operacional. De acordo com SOUZA FILHO *et al.* (2008), a primeira corresponde ao nível regional (1:250.000), a segunda à escala intermediária (1:50.000) e a terceira à escala de detalhe (1:10.000). Tais produtos foram concebidos como suporte operacional ao mapeamento e monitoramento da costa amazônica brasileira. A metodologia empregada na confecção desses documentos cartográficos foi baseada nas abordagens sugeridas pela NOAA (2002) e ARAÚJO *et al.* (2002) *apud* SOUZA FILHO *et al.* (2008). Para cada escala de mapeamento, foram utilizados conjuntos de distintas imagens adquiridas por sensores passivos e ativos instalados em plataformas orbitais.

Na presente dissertação, foram manipulados os dados vetoriais extraídos pelo Projeto Piatam Mar para a confecção das cartas SAO na escala 1:250.000. Tais vetores foram traçados através da interpretação de imagens RADARSAT-1 *Wide 1*, do mosaico JERS-1 SAR produzido pelo *Global Rain Forest Mapping Project* e do Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Essas feições lineares foram classificadas segundo os critérios do Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) a derramamentos de óleo para a costa amazônica, conforme apresentado na Tabela 2.

ISA	Ambientes costeiros amazônicos
1A	Costas rochosas expostas
1B	Estruturas sólidas expostas construídas pelo homem
1C	Falésias rochosas expostas com talus na base
2	Escarpa exposta em depósito de lama de manguezal e plataformas de abrasão em rochas e sedimentos consolidados
3A	Praias com granulometria fina a média
3B	Escarpas expostas com declives íngremes em areia
4	Praias e planícies de marés arenosas com granulometria grossa
5	Praias e bancos estuarinos de cascalhos e areia
6	Enrocamentos
7	Planícies de marés expostas
8A	Escarpas protegidas em leitos rochosos e sedimentos – paleofalésias
8B	Estruturas sólidas protegidas construídas pelo homem
8C	Enrocamentos protegidos
8D	Costas com turfa
9A	Planícies de maré lamosas e mistas protegidas, terraços de manguezal
9B	Bancos e planícies de marés lamosas vegetados
9C	Campos herbáceos hipersalinos (" <i>hypersalt marsh</i> "), planície de supramaré arenosa
10A	Campos herbáceos salinos e salobros (" <i>salt and brackish water marshes</i> ")
10B	Campos herbáceos doces com vegetação aquática (" <i>freshwater marshes with aquatic vegetation</i> "), floresta de várzea e lagos intermitentes
10C	Manguezais de intermaré
10D	Manguezais de supramaré

Tabela 2 - Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (ISA) adaptado para a costa amazônica. Fonte: SOUZA FILHO *et al.* (2008).

Como pode ser observado na Tabela 2, foram definidos vinte e um índices de sensibilidade ambiental (ISA) para a zona costeira amazônica, onde aquele designado por 1A é o menos sensível ao derramamento de óleo, enquanto o 10D é o mais sensível.

A pesquisa aqui desenvolvida pretende avaliar quantitativamente a complexidade da linha de costa onde foi estabelecido o ISA 10C (manguezais de intermaré; Tabela 2), em razão de sua ampla distribuição no litoral amazônico. Tal índice refere-se a um ambiente de baixa energia em substrato plano, lamoso a arenoso, sendo comum a existência de solos lamosos muito orgânicos. A declividade é inferior a 3 graus, o que resulta em uma zona de intermaré potencialmente extensa. Os sedimentos são saturados por água, moles, com pouca trafegabilidade e permeabilidade, salvo nos locais produzidos pelos animais (SOUZA FILHO *et al.*, 2008).

Além disso, no caso do ISA 10C, o óleo não penetra nos sedimentos por causa de sua baixa permeabilidade, sendo, todavia, capaz de afetar a vegetação e de entrar em contato direto com os organismos bênticos e raízes, impedindo assim sua oxigenação. Os óleos leves intoxicam a biota, enquanto os mais pesados a asfixiam (SOUZA FILHO *et al.*, 2008).

Os autores supracitados relataram ainda que, considerando o ISA 10C, a supressão natural do óleo ocorre de forma muito lenta em função da baixa energia do ambiente e da natureza anaeróbica do substrato. Eles ressaltaram que os manguezais de intermaré constituem “os habitats de maior sensibilidade devido à elevada riqueza e valor biológico”. Este tipo de ambiente retém intensamente o óleo; a dificuldade ou até mesmo a impossibilidade de limpeza se dá pela presença do substrato mole, que intensifica os impactos negativos quando há tentativa de remoção, pois o poluente pode penetrar mais ainda nos sedimentos.

Mesmo com todo o controle e preocupação com os acidentes ocasionados por derramamentos de óleo, estes ainda podem ocorrer. Em alguns ambientes costeiros, há possibilidade de remoção completa (como no índice 1A). Entretanto, nas áreas onde predomina o índice 10C, não há praticamente solução de remoção caso o óleo entre em contato com o ecossistema. Portanto, é necessária atenção redobrada das empresas de petróleo e dos órgãos fiscalizadores nesta circunstância. Segundo SOUZA FILHO *et al.*

(2008), ocorre nas zonas portuárias o transporte do petróleo e seus derivados. Tais atividades são executadas em regiões amazônicas onde existem unidades de conservação ambiental, tais como a Reserva Biológica do Lago Piratuba (Amapá), a Reserva Extrativista Marinha de Soure (Pará) e a Área de Preservação Ambiental da Ilha dos Caranguejos (Maranhão).

3.4 Fractais e a Natureza

A geometria da natureza é um tema de grande interesse científico. Na tentativa de defini-la, alguns autores como MANDELBROT (1983) e FEDER (1983) dissertaram sobre sua complexidade. Em seu livro “The Fractal Geometry of Nature”, MANDELBROT (1983) questionou a descrição de tais feições de maneira “seca” e “fria”. Como resposta, afirmou que a geometria euclidiana é incapaz de representar determinadas formas da natureza como o litoral, as montanhas e as árvores.

FEDER (1989) relativizou a geometria da natureza quando disse que os objetos que a compõem variam de tamanho, desde a escala atômica até as dimensões do universo. De acordo com este autor, as estruturas geométricas, a exemplo das ondas, grãos nas rochas, paisagens, ilhas, linhas de costa, rios, montanhas, plantas, células, cristais e proteínas, são características tão centrais em vários campos científicos, que os pesquisadores consideram suas formas como definidas.

No entanto, MANDELBROT (1983) afirmou que “a geometria euclidiana é incapaz de descrever formas como nuvens, montanhas, litorais ou árvores, pois nuvens não são esferas, montanhas não são cones, costas não são círculos e nem um relâmpago viaja em linha reta”. TURCOTTE (1997), a esse respeito, colocou que tal limitação ocorre porque a dimensão euclidiana de um ponto é igual a zero, de uma linha igual a um, de um polígono igual a dois e de um cubo igual a três. Não é, portanto, maneira adequada de descrever, por exemplo, uma linha convoluta ou uma superfície extremamente rugosa.

No entender de MANDELBROT (1983), diversos padrões encontrados na natureza são muito fragmentados e irregulares; assim, quando comparados aos objetos euclidianos, exibem nível de complexidade muito superior. A existência dessas mudanças de padrões desafiou MANDELBROT (1983) a estudar feições que, segundo ele, Euclides chamaria de “amorfas”, com a finalidade de encontrar descritores apropriados para as mesmas.

MANDELBROT (1983) relatou que os matemáticos desprezaram tal desafio, optando por não criar teorias geométricas relacionadas à natureza. Com efeito, as feições naturais eram consideradas curiosidades individuais e raramente pensadas como uma classe de objetos à qual uma teoria geral poderia ser aplicável (FALCONER, 1990). Respondendo a este desafio, MANDELBROT (1983) desenvolveu o novo conceito de fractal para a geometria da natureza, demonstrando sua aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento. Verificou, portanto, que formas irregulares representam fenômenos naturais melhor que as figuras da geometria clássica. Desse modo, ficou estabelecido que a geometria fractal constitui uma abordagem de aplicação geral para o estudo desses conjuntos irregulares (FALCONER, 1990). Ao falar de fractais, o discurso de Mandelbrot é interdisciplinar, pois contempla árvores, rios, pulmões, níveis de água, turbulência e economia, dentre tantos outros tópicos (FEDER, 1989).

Quando uma parte de determinada forma geométrica é semelhante a seu todo, tal propriedade é denominada “autossimilaridade” (MANDELBROT, 1983). Esse autor ressaltou que na natureza ocorrem várias feições autossimilares, a exemplo do brócolis romanesco (Figura 16).



Figura 16 - Aumento da escala visual do brócolis romanesco: 1x; 2,5x; 10x; 25x. Fonte: <http://cargocollective.com/annabelking/Fractal-1-Romanesco-Broccoli>.

Conforme BACKES & BRUNO (2005), a mais importante característica de um fractal é a sua dimensão fracionária, a qual representa a irregularidade da forma. Assim, quanto mais irregular for um determinado objeto, maior será sua dimensão fractal. Embora a geometria euclidiana seja vastamente empregada na descrição de fenômenos e formas da natureza, ela é inadequada em alguns estudos, como aqueles cujo foco são vasos sanguíneos, linhas de costa e ramos de árvores, dentre outros (SILVA & SOUZA, 2010).

A partir de MANDELBROT (1967), o estudo e compreensão da teoria dos fractais possibilitou a realização de inúmeros trabalhos na comunidade acadêmica, em diversas áreas das ciências da natureza, incluindo a análise das linhas de costa, foco da presente dissertação (DHANSAY *et al.*, 2016; ANDRONACHE *et al.*, 2016; GARCÍA *et al.*, 2016; DORNELAS, 2013; GUARINO *et al.*, 2010; JUNIOR & CHISTOFOLETTI, 2003; AZEVEDO & MARQUES, 2004; DAI *et al.*, 2004; JINYONG *et al.*, 2014; XIAOHUA *et al.*, 2004; TANNER *et al.*, 2006; LEE *et al.*, 1990).

MANDELBROT (1967) relatou que a costa oeste da Grã-Bretanha, uma das mais irregulares do mundo, apresenta dimensão fractal $D = 1,25$. Por outro lado, o litoral australiano tem $D = 1,13$. O citado autor considera a linha de costa da África do Sul como uma das menos complexas do mundo ($D = 1,02$).

Ao estudar a Amazônia Central, DORNELAS (2013) definiu que a complexidade das feições fluviais baseada na dimensão fractal da interface vegetação-água corresponde aos seguintes níveis de energia:

- $D \sim 0,100$ – 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;
- $D \sim 0,010$ – segmento ribeirinho ou lacustre com nível intermediário de energia, onde o óleo pode ser removido dias ou meses após o derrame, configurando-se como um ambiente de média complexidade espacial;
- $D \sim 0,001$ – 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.

Na pesquisa de DORNELAS (2013), os segmentos fluviais em zonas de confluência de rios e lagos apresentaram valores de dimensão fractal que os enquadram no domínio de alta complexidade espacial, conforme definido pelas variações em suas casas decimais ($D \sim 0,1000$), tanto na seca como na cheia. Por sua vez, os segmentos classificados como escarpas e/ou barrancos (índice 4) exibiram resultados de média complexidade espacial ($D \sim 0,0100$). Esse quadro foi alterado sazonalmente, quando alguns desses segmentos exibiram dimensão fractal de 1,0000 na cheia e 1,0190 na seca. Houve, assim, alteração de baixa complexidade espacial para média. Para um segmento em particular, a dimensão fractal na cheia foi de 1,0753 e de 1,0007 na seca, mudando, assim, de média complexidade para baixa. O valor da dimensão fractal 1,0007 sugere fortemente a presença de controle tectônico visto que é da mesma ordem de magnitude que a dimensão fractal da falha de San Andreas.

Com base em estimativas da dimensão fractal, pretende-se nesta dissertação aplicar para a linha de costa amazônica uma abordagem inspirada no trabalho de DORNELAS (2013), com o objetivo de obter informações relevantes sobre as irregularidades das feições aí presentes.

3.4.1 Dimensão de Hausdorff

BEVILACQUA *et al.* (2007) afirmaram que a teoria de Hausdorff “é a principal referência para descobrir a dimensão geométrica das curvas singulares, uma vez que está bem fundamentada em uma abordagem analítica rigorosa”.

O método de cálculo da dimensão de Hausdorff-Hesicovitch pode ser aplicado para objetos com geometria euclidiana e fractais. Tem-se uma reta de comprimento L dividida em N partes iguais (Figura 17). Seja $N = 1, 2, 3, \dots$ e U o comprimento de cada segmento obtido pela divisão desta mesma reta (SILVA & SOUZA, 2010). Após esta divisão, observa-se que $U = L/N$; Equação 5. Como a dimensão (D) de uma linha é igual a 1, então, ao se aplicar o logaritmo na Equação 5, tem-se

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{L}{U}} = 1 \quad \text{Equação 6}$$



Figura 17- Linha reta dividida em $N=1, 2, 3$ e 4 partes iguais. Fonte: SILVA & SOUZA (2010).

Para uma forma geométrica de dimensão $D=2$, a exemplo de um quadrado, é realizado o mesmo procedimento anterior (Figura 18). Porém, neste caso, para que cada lado do quadrado seja dividido de forma igual, tem-se: $U = L/\sqrt{N}$, então, $N = (\frac{L}{U})^2$. Equação 7. Aplicando-se o logaritmo à Equação 7, tem-se

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{L}{U}} = 2 \quad \text{Equação 8}$$

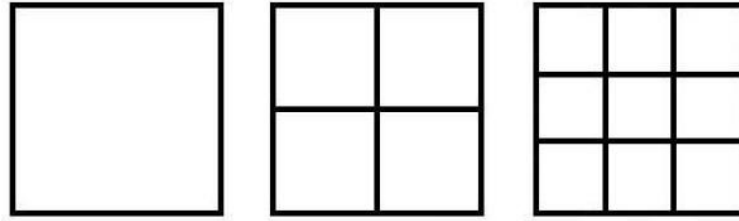


Figura 18 - Quadrados divididos em N^2 partes iguais, com $N=1, 2$ e 3 . Fonte: SILVA & SOUZA (2010).

Por fim, empregando este cálculo para um cubo ($D = 3$) de lado L , e dividindo-se o mesmo em N partes iguais (Figura 18), garantindo que sejam semelhantes ao cubo inicial posteriormente à sua divisão, o lado de cada um deles deve ser $U = L/3\sqrt{N}$. Ao se isolar N , tem-se então $N = (\frac{L}{U})^3$ (Equação 9).

Aplicando-se o logaritmo, obtem-se

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{L}{U}} = 3 \quad \text{(Equação 10)}$$

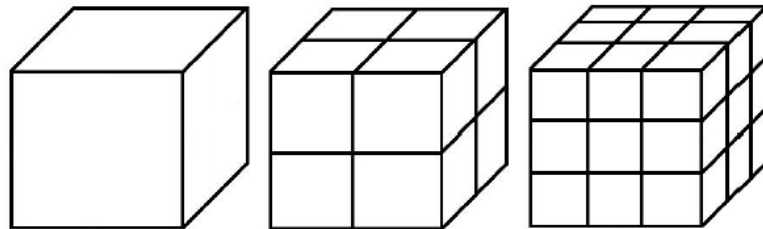


Figura 19- Cubos divididos em N^3 partes iguais, com $N = 1, 2$ e 3 . Fonte: SILVA & SOUZA (2010).

3.4.2 A Curva Triádica de Koch

A curva triádica de Koch (Figura 20) constitui um bom exemplo de uma feição linear com dimensão fractal superior a 1. A curva de Koch representa aproximadamente a complexidade do segmento fluvial mais convoluto estudado por DORNELAS (2013), cujo valor calculado é $D = 1,2928$. A construção desta curva inicia-se com um segmento de comprimento unitário $L(1) = 1$. Esta forma é chamada de “iniciador” e pode ser substituída por um polígono como um triângulo equilátero ou um quadrado, dentre outros (FEDER, 1989). O iniciador define a 0-ésima geração da curva de Koch ($n = 0$ na Figura 20).

A construção da curva de Koch prossegue através da substituição de cada segmento do iniciador pelo “gerador” marcado como $n = 1$ na Figura 20. Assim, é obtida a primeira geração, que é uma curva com 4 segmentos de reta, onde cada um tem comprimento $1/3$. O comprimento total da curva é agora $L(1/3) = 4/3$.

A próxima geração é obtida através da substituição de cada segmento de reta por uma versão reduzida do gerador. Desse modo, na segunda geração há uma curva consistindo de $N = 4^2 = 16$ segmentos, cada um com comprimento $\delta = 3^{-2} = 1/9$. O comprimento total dessa curva é $L(1/9) = (4/3)^2 = 16/9$. Através da aplicação da versão reduzida do gerador a todos os segmentos de uma dada geração curva de Koch, uma nova geração é obtida. Essa curva é denominada pré-fractal.

Serão apresentados agora os detalhes necessários para obter a expressão da dimensão fractal D . O comprimento da n -ésima geração pré-fractal é dado por

$$L(\delta) = (4/3)^n \quad \text{Equação 11}$$

O comprimento de cada pequeno segmento de reta é:

$$\delta = 3^{-n} . \quad \text{Equação 12}$$

Observando que o número de geração n pode ser escrito na forma:

$$n = -\ln \delta / \ln 3,$$

verifica-se que o comprimento pode ser expresso da seguinte forma:

$$L(\delta) = (4/3)^n = \exp \left(- \frac{\ln \delta [\ln 4 - \ln 3]}{\ln 3} \right) = \delta^{1-D}, \text{ Equação 13}$$

onde,

$D = \ln 4 / \ln 3 \sim 1,2628$ é a dimensão fractal da curva triádica de Koch.

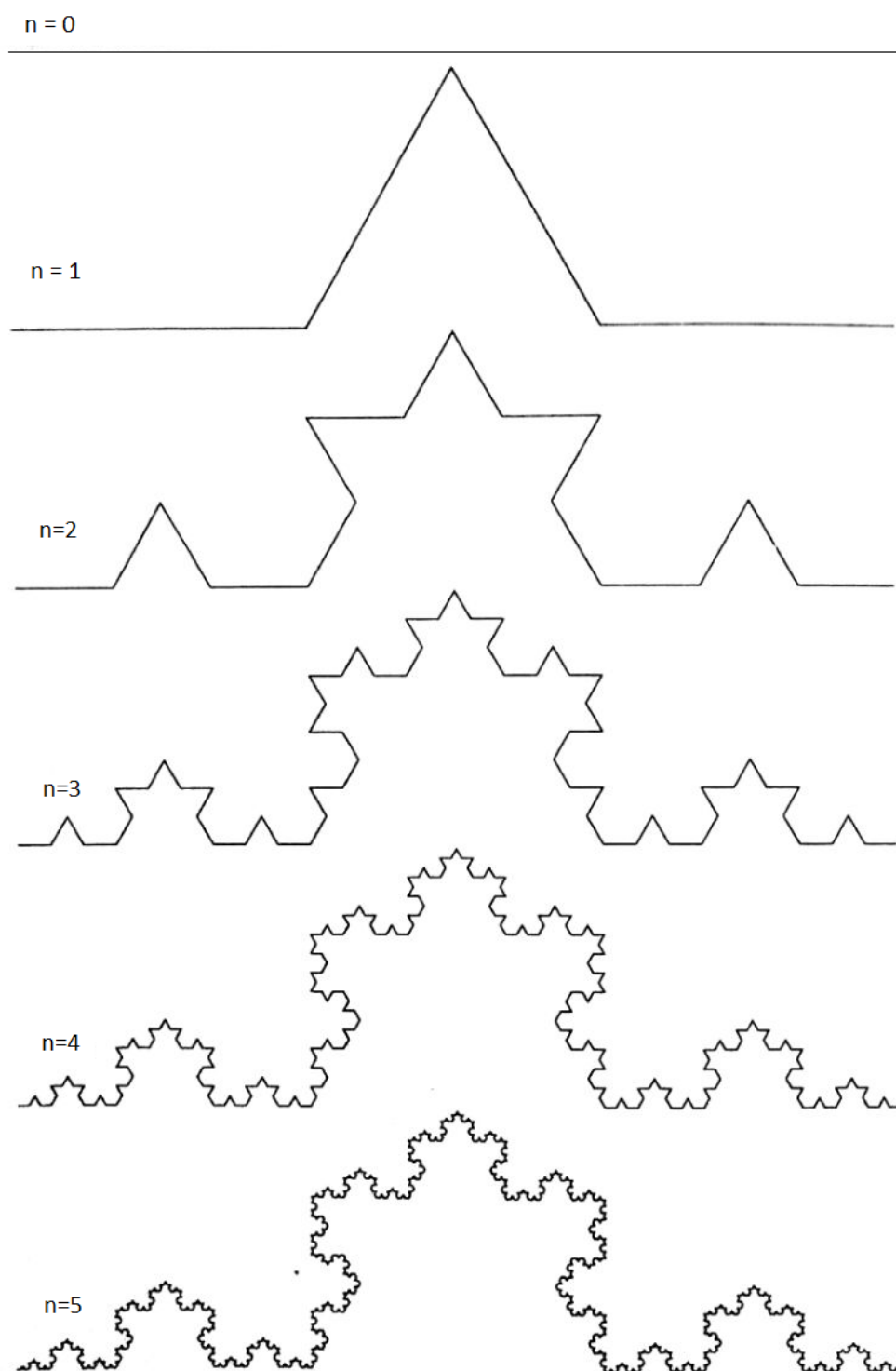


Figura 20- Construção da curva triádica de Koch. Fonte: FEDER (1989)

3.4.3 O Método *Box-Counting* para o Cálculo da Dimensão Fractal

O *box-counting* ou contagem de caixas foi o método utilizado por e DORNELAS (2013) para a estimativa da dimensão fractal de segmentos fluviais na Amazônia Central. Como se pretende aqui aplicar para a linha de costa amazônica uma abordagem inspirada no trabalho de tal autora, será apresentada a seguir uma breve descrição desse procedimento.

De acordo com SILVA e SOUZA (2010), o método *box counting* baseia-se em colocar um objeto sobre uma grade com malha de tamanho U e em seguida o número de caixas que contêm o objeto é contado. Esta contagem é expressa pela quantidade N de caixas contadas a qual depende do tamanho U . Desta forma $N(U)$. Posteriormente o tamanho da grade (U) é diminuída, aumentando assim $N(U)$. Esta malha é novamente redirecionada a tamanhos cada vez menores com o objetivo de obter estruturas com tamanhos ainda menores contando-se novamente o número do objeto $N(U)$ da grade.

Conforme explicam os autores, “para cada iterada n , constrói-se o gráfico no plano $\log(N(U)) \times \log\left(\frac{1}{U}\right)$ (Equação 14)”, onde são marcados os pontos $(\log(N_n(U)); \log\left(\frac{1}{U_n}\right))$ (Equação 15), $(\log(N_{n+1}(U)) ; \log\left(\frac{1}{U_{n+1}}\right))$ (Equação 16) com $n = 0, 1, 2, \dots$, e então encaixa-se uma linha reta nos pontos do diagrama.

A dimensão *box-counting* corresponde a medida da inclinação da linha reta demonstrada pela seguinte equação:

$$D_b = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log(N_{n+1}(U)) - \log(N_n(U))}{\log\left(\frac{1}{U_{n+1}}\right) - \log\left(\frac{1}{U_n}\right)} \quad \text{Equação 17}$$

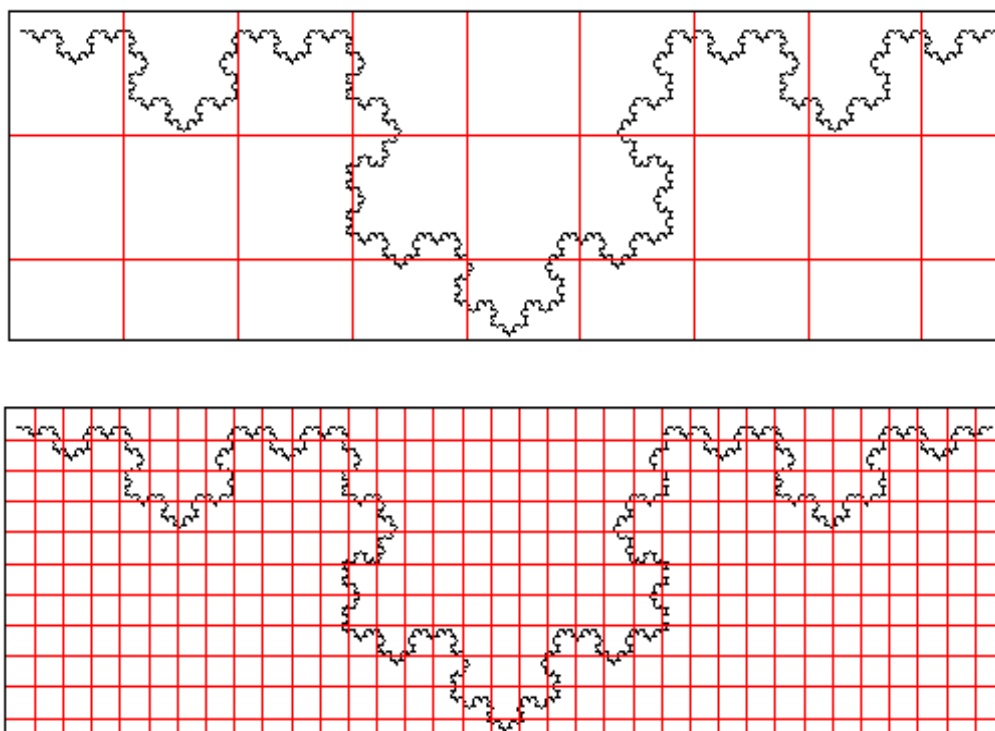


Figura 21- Exemplo de um objeto coberto pelas “caixas” do método *box counting*. Fonte: (MACEDO *et al.*, 2017).

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Produtos vetoriais do Projeto Piatam Mar extraídos das imagens RADARSAT-1 e JERS-1 SAR

Os produtos vetoriais foram adquiridos em formato *shapefile* na base de dados do Piatam Mar armazenada em CD-ROM, sendo utilizados no citado projeto para a confecção das cartas SAO na escala 1:250.000.

4.1.2 Produtos vetoriais IBGE e MMA

Foram também empregados na presente pesquisa os limites políticos-administrativos da base de dados do IBGE e MMA. Tais produtos encontram-se nos seguintes sites: https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm e <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>.

4.1.3 Programa ArcGIS 10.5.1

O ArcGIS 10.5.1 é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) desenvolvido pela empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), usado na elaboração e edição de mapas e na compilação de dados georreferenciados, bem como no gerenciamento e análise de informações geográficas através da elaboração e manipulação de bancos de dados (ESRI, 2017). O *software* foi utilizado neste trabalho com a finalidade de manipular os dados vetoriais disponíveis na base georreferenciada do Projeto Piatam Mar e de adequá-los ao desenvolvimento da metodologia aqui proposta, além da confecção de mapas.

4.1.4 Programa *ImageJ*

Este é um *software* de código aberto projetado para manipular digitalmente imagens científicas multidimensionais (*ImageJ*, 2016). O *ImageJ* é altamente extensível, com milhares de *plugins* e *scripts* capazes de executar uma grande variedade de tarefas, com o objetivo de auxiliar diversos tipos de usuários. Com o emprego deste programa, foi possível estimar a dimensão fractal de cada vetor utilizado no Projeto Piatam Mar através método *box-counting*.

4.1.5 Programa *Microsoft Excel*

O *Excel* é um editor de planilhas desenvolvido pela empresa Microsoft que possibilita ao usuário realizar inúmeras funções, tais como a elaboração de tabelas, diversos tipos de cálculos (incluindo os estatísticos) e a organização de informações, dentre outras. Neste trabalho, o programa foi utilizado para realizar os cálculos estatísticos descritivos.

4.1.6 Programa *RStudio*

Por fim, o *RStudio* é um software livre referente ao ambiente de desenvolvimento integrado para R, uma linguagem de programação voltada a gráficos e cálculos estatísticos (*RStudio*, 2017). Todos os testes estatísticos e gráficos empregados na pesquisa foram elaborados com o auxílio desse programa.

4.2 Métodos

A abordagem científica adotada na presente dissertação teve por objetivo estimar, de maneira geral, a dimensão fractal dos macrocompartimentos do litoral amazônico na escala 1:250.000. Além disso, buscou-se realizar o cálculo da dimensão fractal por macrocompartimento, ainda nessa escala, de cada ambiente presente no limite terra-água, quais sejam: planalto costeiro, várzea, campo e manguezal. A ideia foi verificar a existência de possíveis diferenças na complexidade da linha de costa para os diversos ambientes da região investigada.

Finalmente, procurou-se detalhar os resultados para o ecossistema de manguezais, o mais sensível a derramamentos de óleo segundo os critérios estabelecidos por SOUZA FILHO *et al.* (2008), conforme a Tabela 2. Para tanto, foram efetuados testes estatísticos para dar base quantitativa às comparações dos resultados entre os macrocompartimentos, na tentativa de refinar a classificação do ISA na Tabela 2.

Uma visão geral da metodologia empregada no trabalho está ilustrada no fluxograma da Figura 22. Os resultados preliminares da pesquisa foram apresentados por MOURA *et al.* (2017).

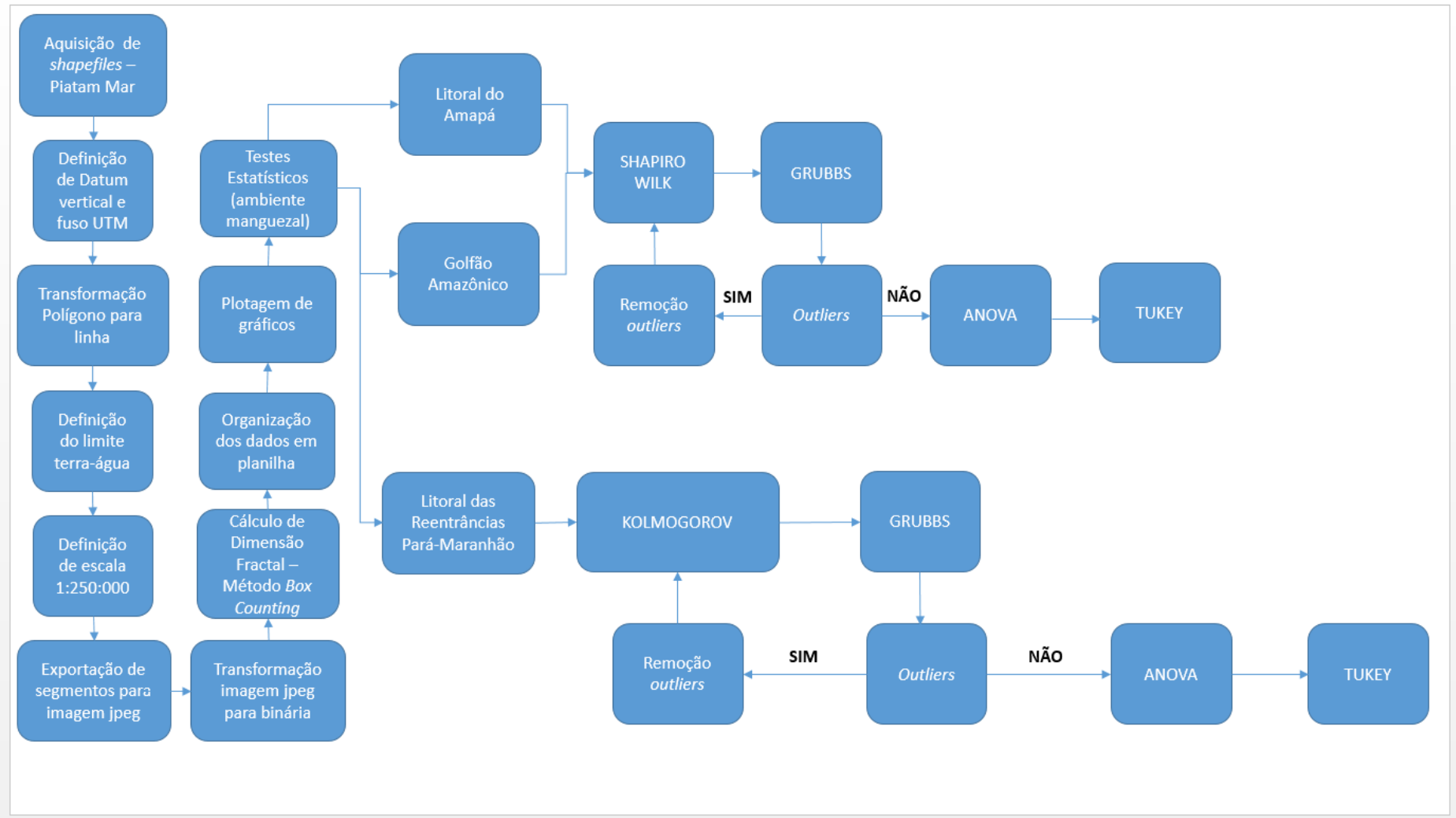


Figura 22- Fluxograma da metodologia empregada na pesquisa.

4.2.1 Adequação dos dados vetoriais no *ArcGIS* 10.5.1

Os dados vetoriais (campo, manguezal, planalto costeiro e várzea) no formato *shapefile* foram obtidos no CD anexo ao atlas do Piatam Mar (SOUZA FILHO *et al.*, 2008). Tais vetores já estavam georreferenciados, sendo necessária apenas sua adequação ao *datum* SIRGAS 2000, assim como a inserção dos fusos no *ArcGIS* 10.5.1, conforme indicação dos metadados do citado projeto. Posteriormente, foram selecionados apenas os vetores que faziam limite com o oceano, procedimento que foi seguido pela edição dos vetores de cada ambiente para delinear apenas o limite terra-água.

Os segmentos foram individualizados e adequados à escala de mapeamento estratégico (1:250.000) do Projeto Piatam Mar. O próximo passo consistiu em sua exportação no formato JPEG para processamento no *Image J*.

Vale ressaltar que o *ArcGIS* 10.5, além de ter sido fundamental na adequação dos dados vetoriais, foi utilizado na elaboração dos mapas que documentam os resultados da pesquisa.

4.2.2 Cálculo da Dimensão Fractal no *ImageJ*

As imagens elaboradas com o uso do *ArcGIS* 10.5.1 em formato JPEG foram importadas pelo *ImageJ*. No entanto, para o cálculo da dimensão fractal neste *software*, foi necessário transformar cada imagem JPEG em binária. Com essa finalidade, utilizou-se a função “*make binary*”. Em seguida, foi aplicado o método “*box-counting*” (*script* já implementado no programa).

4.2.3 Organização dos dados no *Excel* seguida por testes estatísticos e geração de gráficos no *RStudio*

De posse de todos os valores das dimensões fractais calculados no *ImageJ*, tais resultados foram organizados em categorias na planilha *Excel* por macrocompartimentos e ambientes (campo, manguezal, planalto costeiro e várzea). Posteriormente, foram gerados *boxplots* e histogramas no *RStudio* para a verificação prévia do comportamento dos dados de cada ambiente no contexto de cada macrocompartimento.

O próximo passo constou da realização de testes estatísticos, a fim de verificar a normalidade dos dados, a presença de *outliers* (valores discrepantes) e a comparação de médias, procedimentos que foram seguidos pela geração dos gráficos.

Para a realização dos testes de normalidade, foram empregados os métodos estatísticos de aderência à distribuição normal de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov (não-paramétrico), com nível de significância (α) de 0,05 para ambos.

O procedimento de Shapiro-Wilk (SW) é baseado na estatística de teste W , que é calculada da seguinte forma (SHAPIRO & WILK, 1965):

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^h a_i (x_{(n-i+1)} - x_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 18}$$

onde,

n = tamanho da amostra

$h = \text{int}(n/2)$

a_i = constant

x_i = valores ordenados

$\bar{x}$ = media da amostra

O teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov (KS) também tem por finalidade testar, dentre outras aplicações, a normalidade dos dados. Nesse caso, tal procedimento verifica se existe diferença significativa entre a distribuição de frequência na amostra observada e a distribuição normal padrão (LILLIEFORS, 1967). Isto equivale a tornar a média e a variância da distribuição normal iguais àquelas estimadas da amostra. Este pode ser expresso da seguinte forma:

$$T.S. |H_0 = D_n = \text{Max.} |F_e - F_o| \quad \text{Equação 19}$$

onde,

F_e é a frequência cumulativa relativa esperada na distribuição padrão;

F_o é a frequência cumulativa relativa observada na amostra.

D_n é a diferença entre F_e e F_o .

Se a amostra vier da distribuição padrão, então D_n converge a 0 quase certamente no limite quando n vai ao infinito. Assim, ambos os testes SW e KS trabalham com a hipótese de nula (H_0) de que a variável aleatória adere à distribuição normal contra a hipótese alternativa (H_1) de que a variável aleatória não adere à distribuição normal (TORMAN *et al.*, 2012). Neste caso o nível de significância adotado é $\alpha = 0,05$. O nível de significância α representa a probabilidade de se rejeitar a hipótese de nula (H_0) quando ela é verdadeira.

De acordo com TORMAN *et al.* (2012), a forma mais simples de adotar uma decisão é observar o p-valor dos testes e comparar com o nível de significância escolhido. Se o p-valor do teste for menor que o nível de significância escolhido (neste caso $\alpha = 0,05$), a hipótese de normalidade é rejeitada. O p-valor é o menor nível de significância para se rejeitar a hipótese nula (H_0).

O teste SW foi aplicado às amostras da dimensão fractal do Litoral do Amapá e Golfão Amazônico, enquanto que KS foi empregada para o Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão. Embora tais testes tenham o mesmo objetivo, o KS é mais adequado no caso de grandes tamanhos amostrais.

Posteriormente à verificação de normalidade, realizou-se o teste de Grubbs para determinar a presença de *outliers* no conjunto de dados (GRUBBS, 1969). Esses valores extremos em observações amostrais podem ser considerados como uma manifestação da variabilidade aleatória inerente aos dados ou apenas um erro de cálculo durante sua aquisição. O teste de Grubbs é realizado da seguinte forma (BORGES,2006):

- 1º) ordena-se os valores em ordem crescente ($x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_{n-1} < x_n$);
- 2º) hipótese de que o menor valor, x_1 ou se o maior valor, x_n , são suspeitos de serem valores discrepantes;
- 3º) é estimado o desvio padrão de todos os valores;
- 4º) calcula-se T da seguinte maneira:

$$T = \frac{x - x_1}{s} \quad \text{ou} \quad T = \frac{x_n - x}{s} \quad \text{Equação 20}$$

- 5º) selecione o risco desejado de falsa rejeição.
- 6º) deve-se comparar então os valores calculados com os valores tabelados. Se T for maior que o valor tabelado, a rejeição pode ser feita com risco associado (BORGES,2006).

Em seguida, aplicou-se a Análise de Variância (CUEVAS *et al.*, 2004) cujo objetivo aqui foi de comparar as médias das determinações da dimensão fractal para os diferentes ambientes nos diversos macrocompartimentos. Pretende-se, assim, decidir se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por alterações significativas nas populações observadas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral).

Entretanto, a ANOVA não identifica onde ocorrem tais diferenças. Para isso, aplicou-se na presente pesquisa o método TUKEY de comparações múltiplas, que se baseia na *Honestly Significant Difference (HSD)*. Seu princípio é encontrar a diferença mínima estatisticamente significativa que garanta a todas as comparações um nível comum de significância (ABDI & WILLIAMS, 2010). Em outras palavras, é um teste no qual, para todas as possíveis comparações duas a duas, a taxa de erro das mesmas é exatamente α (e o intervalo de confiança exatamente $1-\alpha$). X_1

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados

5.1.1 Análise exploratória dos dados

A análise exploratória dos dados teve por finalidade adquirir informações preliminares como subsídio à realização de testes estatísticos futuros. Nesta etapa, foi computado o total de 615 segmentos nos diferentes ambientes de cada macrocompartimento (Tabela 3). Em seguida, foram calculados a média e o desvio padrão da dimensão fractal (D) obtida para os segmentos de cada ambiente por macrocompartimento (Tabela 4).

Com base nesses resultados, foi possível ter uma primeira ideia da complexidade espacial do ambiente a ser analisado na presente dissertação com mais detalhe, ou seja, o manguezal.

AMBIENTES	SEGMENTOS POR MACROCOMPATIMENTOS		
	Litoral do Amapá	Golfão Amazônico	Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão
Manguezal	25	34	227
Planalto Costeiro	4	27	106
Campo	16	9	6
Várzea	4	157	*

*O ambiente várzea não foi mapeado pelo Projeto Piatam Mar nesse macrocompartimento.

Tabela 3- Segmentos que ocorrem nos diferentes ambientes de cada macrocompartimento.

AMBIENTES	MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA DIMENSÃO FRACTAL (D)					
	Litoral do Amapá		Golfão Amazônico		Reent Pará-Maranhão	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
Manguezal	1,090	0,055	1,166	0,117	1,167	0,105
Planalto Costeiro	1,030	0,017	1,105	0,082	1,097	0,083
Campo	1,062	0,079	1,135	0,104	1,087	0,066
Várzea	1,070	0,064	1,159	0,088	*	*

Tabela 4 - Média e desvio padrão da dimensão fractal (D) obtida para os segmentos de cada ambiente por macrocompartimento.

Na Tabela 4, é possível perceber que as maiores médias correspondem ao manguezal em todos os macrocompartimentos. Por este motivo, a visualização prévia dos dados a partir da obtenção dos histogramas e *boxplots* por macrocompartimento foi aplicada a tal ambiente.

A Figura 23 exibe os histogramas dos valores da dimensão fractal obtidos para os segmentos de manguezal por macrocompartimento. Ao se comparar os três histogramas, é possível perceber alguns comportamentos (Litoral do Amapá e Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão) que sugerem uma distribuição normal; entretanto, para confirmar tal percepção, é necessária a realização de testes estatísticos que verifiquem tal normalidade.

Além disso, é possível observar na Figura 23 como estão distribuídos os dados em cada macrocompartimento. No Litoral do Amapá (LA), percebe-se a concentração dos valores da dimensão fractal entre $D = 1,05$ e $D = 1,10$; no Golfão Amazônico (GA), entre $D = 1,00$ e $D = 1,10$; no Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão (LRPM), entre $D = 1,20$ e $D = 1,25$. Os maiores valores de D estão concentrados do LRPM, o que sugere uma geometria mais complexa dos manguezais neste macrocompartimento em comparação àqueles presentes nos demais.

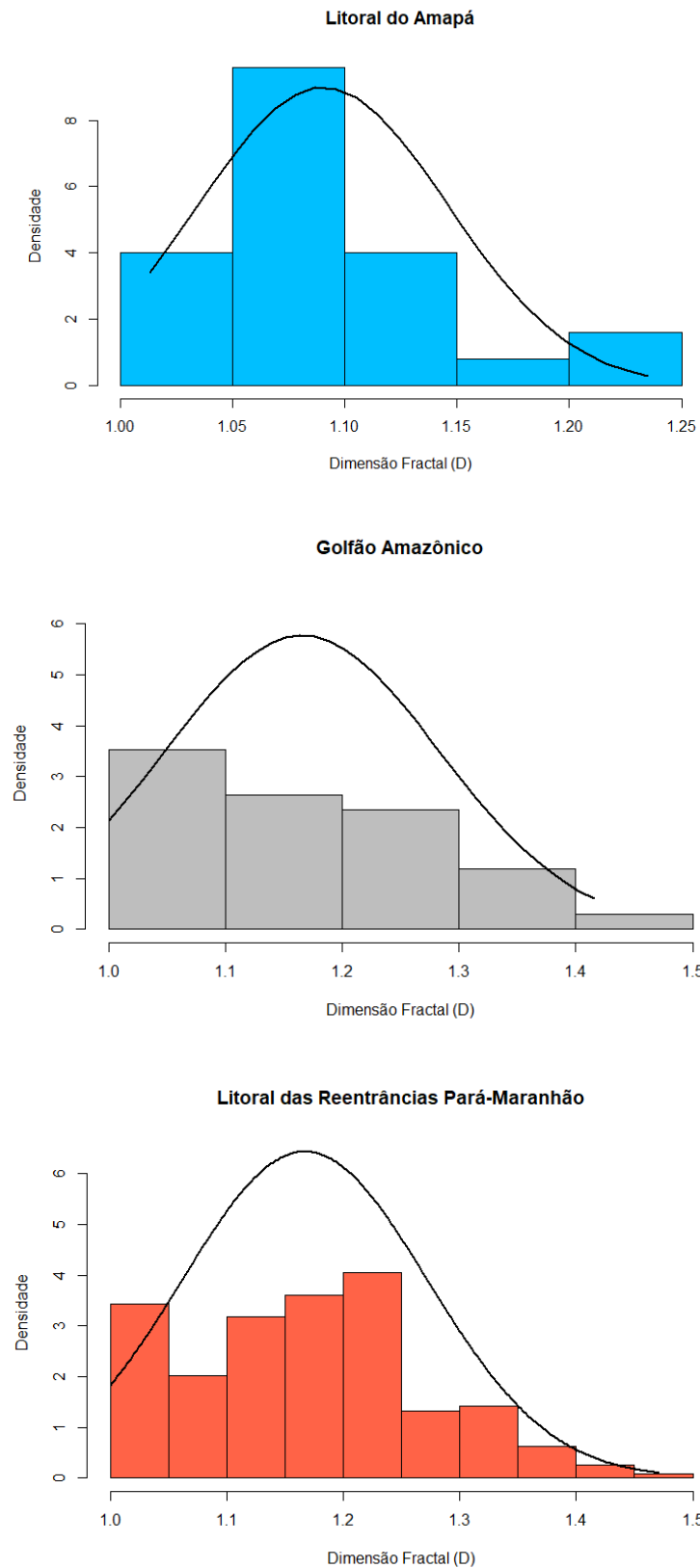


Figura 23- Histogramas dos valores da dimensão fractal dos manguezais por macrocompartmento.

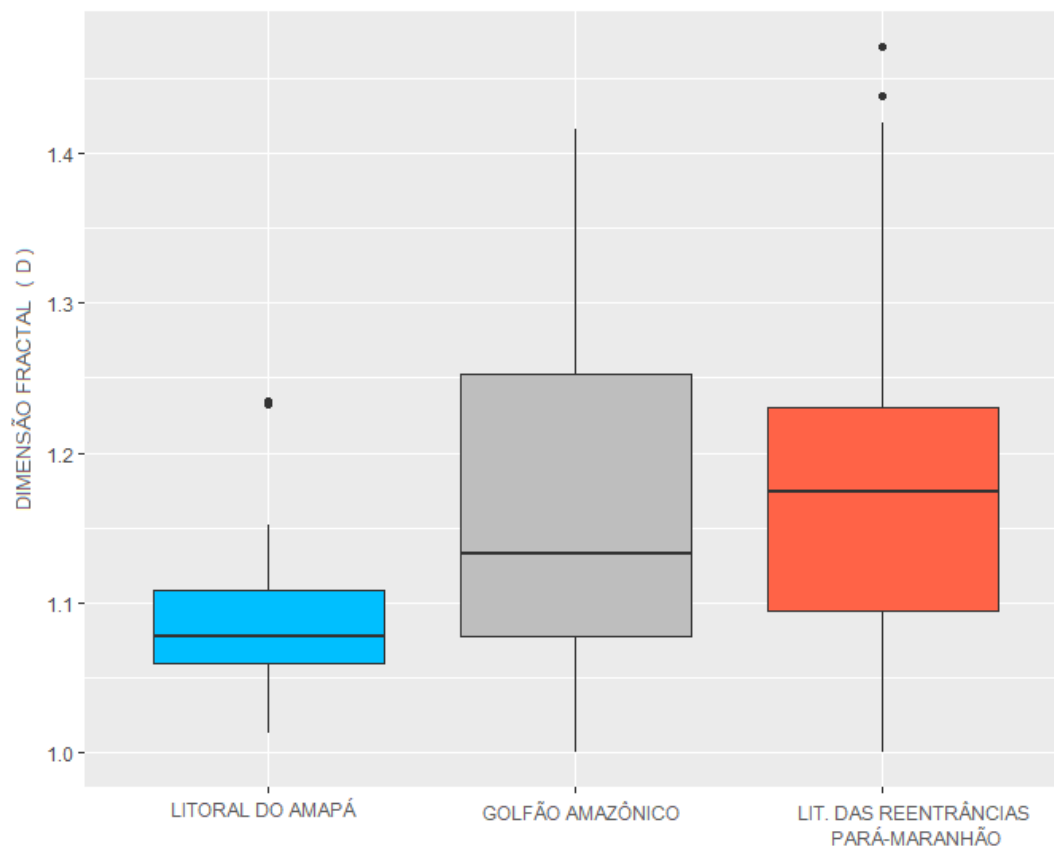


Figura 24- *Boxplot* dos valores da dimensão fractal dos manguezais por macrocompartmento.

Com o uso de diagramas do tipo *boxplot*, também é possível verificar como variam os dados através da observação do segundo e do terceiro quartis (Figura 24, onde o eixo vertical corresponde à dimensão fractal). Os *outliers* são representados como pontos individuais. O *boxplot* não faz qualquer menção a uma distribuição estatística subjacente, identificando apenas onde estão localizados 50% dos valores mais prováveis, assim como a mediana e os *outliers*. Assim, no Litoral do Amapá, constata-se (1) maior homogeneidade dos dados em comparação com os outros macrocompartmentos, (2) menor mediana dos valores da dimensão fractal e (3) presença de *outliers*. No Golfão Amazônico, os valores são mais dispersos, mas inexistem *outliers*. Já no Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão, a mediana é maior do que nos outros macrocompartmentos e também ocorrem *outliers*.

5.1.1.1 Dimensão Fractal dos macrocompartimentos do Litoral Norte Brasileiro

Com a finalidade de se obter uma visão regional, foram estimadas, através do método *box-counting*, as dimensões fractais de cada macrocompartimento (LA, GA, LRPM) da Costa Amazônica, sem caracterizar separadamente os ambientes que os compõem, ou seja, apenas o limite terra-água de maneira contínua. Foram encontrados os seguintes resultados: $D = 1,138$ para LA; $D = 1,192$ para GA; $D = 1,238$ para LRPM. Observa-se um aumento progressivo dos valores de D a partir do extremo norte do litoral do Amapá até a área costeira a leste de São Luis (Figura 25).

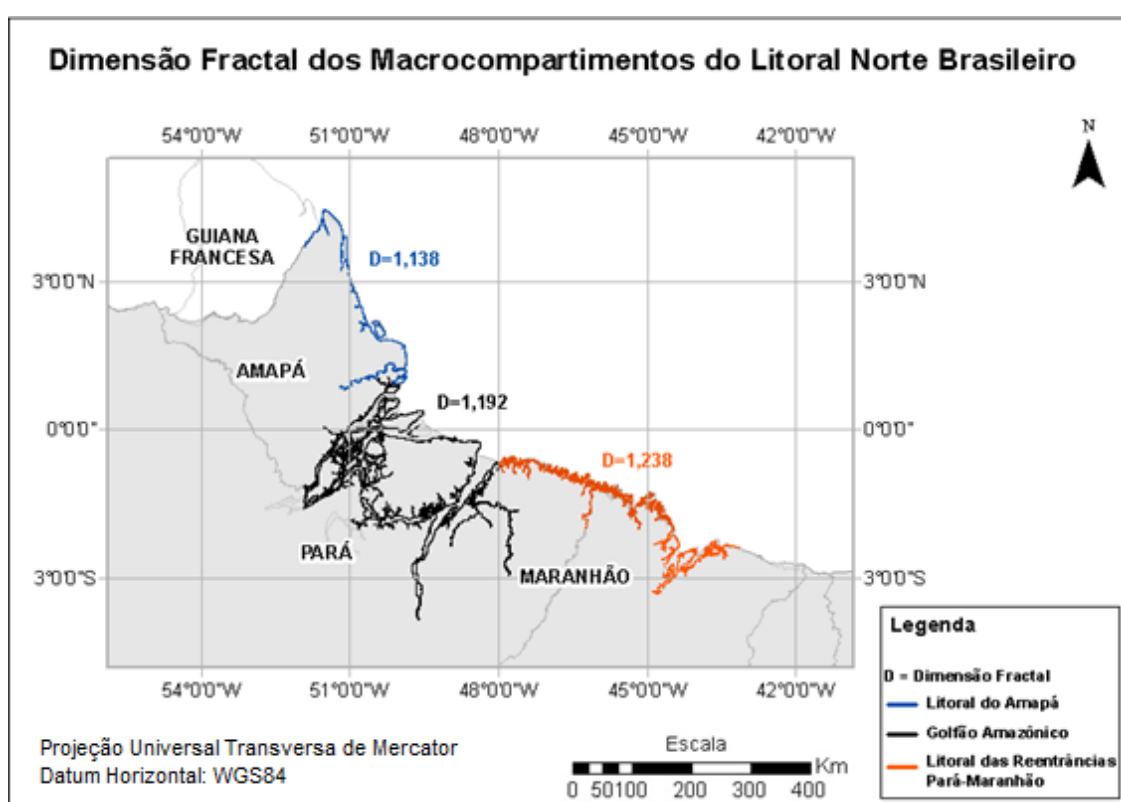


Figura 25– Dimensão fractal dos macrocompartimentos do Litoral Norte Brasileiro.

Com base nos níveis de energia definidos por DORNELAS (2013), é possível estabelecer para os macrocompartimentos do Litoral Norte quais possuem maior ou menor nível de energia. Conclui-se que no Litoral do Amapá todos os ambientes têm média complexidade espacial; no Golfão Amazônico a complexidade é alta para todos os ambientes e por fim, no Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão apenas os ambientes de manguezais são de alta complexidade. DORNELAS (2013) explica que resíduos na casa dos décimos (0,1000) compreendem os segmentos de alta complexidade; na casa dos centésimos (0,010) representam segmentos de média complexidade e na casa dos milésimos (0,001) segmentos com baixa complexidade (vide tabela 4).

5.1.2 Inferência estatística

A seguir, conforme o fluxograma da Figura 22, foram realizados testes estatísticos para verificação da normalidade do conjunto amostral dos manguezais por macrocompartmento (Tabela 5). O teste Shapiro-Wilk (SW) foi aplicado às amostras da dimensão fractal do Litoral do Amapá (com 49 segmentos; Tabela 3) e do Golfão Amazônico (com 227 segmentos), enquanto o de Kolmogorov-Smirnov (KS) foi empregado para o Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão (com 339 segmentos). Embora os citados testes tenham o mesmo objetivo, o KS é mais adequado no caso de grandes tamanhos amostrais. Desta forma, para os testes de normalidade, assume-se que:

H_0 - os dados seguem uma distribuição normal

H_a - os dados não seguem uma distribuição normal.

Como ilustrado na Tabela 5, neste primeiro momento foi descartada a hipótese nula (H_0) para o conjunto amostral do Litoral do Amapá, pois o p-valor $< \alpha$, onde $\alpha = 0,05$. Para os outros macrocompartmentos, H_0 não foi rejeitada, confirmando, assim, a normalidade dos dados.

TESTES DE NORMALIDADE		
Macrocompartmentos	p-valor	Método
Litoral do Amapá	0.007205	Shapiro-Wilk (SW)
Golfão Amazônico	0.07768	
Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão	0.4661	Kolmogorov-Smirnov (KS)
NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA ADOTADO (α)	0,05	

Tabela 5 - Testes estatísticos para verificação da normalidade do conjunto amostral dos manguezais por macrocompartmento. No caso de p-valor $< \alpha$, H_0 é rejeitada.

Posteriormente, foi realizado o teste de Grubbs, que averigua a existência de *outliers* no conjunto de amostras. Os resultados desse teste indicaram a presença de um *outlier* ($D = 1,232$) no Litoral do Amapá. Após se excluir tal valor discrepante, foi realizado novamente o teste de SW, cujos resultados confirmaram a interferência do *outlier* na rejeição da hipótese nula. Assim, o conjunto de segmentos do LA também passou a seguir uma distribuição normal. É de suma importância certificar que os dados pertencem a uma distribuição normal, de modo a se adotar a técnica estatística mais adequada visando à avaliação de diferenças significativas entre os conjuntos de médias amostrais.

O teste da Análise de Variância (ANOVA) foi realizado com a finalidade de comparar múltiplas médias amostrais dos manguezais e verificar se há diferença significativa entre as mesmas nos três macrocompartimentos testados. Na hipótese nula (H_0), as médias populacionais são iguais; na hipótese alternativa (H_1), as médias populacionais são diferentes, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente das demais.

A aplicação da ANOVA confirmou que há variação entre duas médias do conjunto amostral dos manguezais dos três macrocompartimentos, pois rejeitou H_0 . (Tabela 5). No entanto, como já mencionado, este teste não identifica quais médias são diferentes das outras. Seu resultado indica apenas que é possível decidir que as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas nas populações em estudo) e não casuais (simplesmente decorrentes da variabilidade amostral)

Graus de liberdade	Soma do quadrados	Quadrado médio	F calculado	Pr(>F)
2	0,16723	0,083616	7,8614	0,0004764
281	2,98879	0,010636		
Nível de significância estabelecido (alfa)			0,05	
H0:	as médias não diferem entre si.			
H1:	ao menos um par de médias difere entre si.			

Tabela 6– Teste estatístico da Análise da Variância (ANOVA) para o conjunto amostral dos manguezais por macrocompartimento. H_0 é rejeitada, pois $Pr(>F) < \alpha$, onde $\alpha = 0,05$.

O Teste T de Tukey é aplicado quando a Análise da Variância (ANOVA) apresenta como resultado uma diferença significativa entre as médias populacionais. Através desse procedimento, foi possível verificar em quais macrocompartimentos as

médias dos manguezais eram diferentes entre si (Tabela 6). A hipótese nula H_0 para todas as três comparações (GA-AP, LRPM-AP e LRPM-GA) é que as médias são iguais, enquanto que, na hipótese alternativa H_1 , as médias diferem entre si. Considerando no teste o nível de significância $\alpha = 0,05$, foi possível aceitar ou rejeitar a hipótese nula. Se o p-valor encontrado for maior do que o valor estabelecido para α , H_0 é aceita; caso contrário, a hipótese nula é rejeitada.

Desse modo, ao se comparar as médias entre GA e AP, o p-valor $0,0051136 < 0,05$; logo, rejeita-se H_0 e considera-se que as médias diferem estatisticamente entre si (Tabela 7). Para as médias de LRPM e AP, o p-valor $0,0002922 < 0,05$; assim, tais médias também diferem estatisticamente. Por fim, na comparação entre LRPM e GA, o p-valor $0,9970874 > 0,5$, ou seja, H_0 não é rejeitada e as médias então são estatisticamente iguais entre si.

GRUPOS	Estimativa de diferença entre as médias	Limite Inferior	Limite Superior	(p-valor)
GA-AP	0.087732737	0.02212708	0.15333839	0.0051136
LRPM-AP	0.089112239	0.03593811	0.14228637	0.0002922
LRPM-GA	0.001379502	-0.04330687	0.04606588	0.9970874
Nível de significância estabelecido (alfa)			0,05	
H0:	as médias são iguais;			
H1:	as médias são diferentes.			

Tabela 7- Teste T de Tukey para comparação do conjunto amostral dos manguezais por macrocompartimento, que serve como um complemento para o estudo da Análise de Variância (ANOVA).

5.2 Discussão

Os valores da dimensão fractal mostram o quão geometricamente complexa pode ser uma determinada feição linear da Natureza. Os resultados da presente pesquisa indicam que o Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão (LRPM; $D = 1,238$), quando investigado como um todo, é mais convoluto se comparado à linha de costa do Golfão Amazônico ($D = 1,192$) e do Litoral do Amapá ($D = 1,138$).

Esses valores são inferiores àquele encontrado por MANDELBROT (1967) para a costa oeste da Grã-Bretanha, onde $D = 1,25$. Todos os macrocompartimentos exibidos na Figura 25 são, portanto, menos irregulares quando comparados à costa oeste da Grã-Betanha. O que mais dela se aproxima é o Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão, com $D = 1,238$ (diferença da ordem de 1%).

Ainda segundo MANDELBROT (1967), a dimensão fractal da Costa Australiana é $D = 1,13$, enquanto que, para a Costa Sul-Africana, $D = 1,02$. O primeiro valor se aproxima daquele encontrado no Litoral do Amapá ($D = 1,138$). Por sua vez, o Golfão Amazônico ($D=1,192$) situa-se entre o litoral da Grã-Bretanha e a Costa Australiana. Com isso, é possível afirmar que os valores de D encontrados neste trabalho são da mesma ordem de magnitude dos publicados por MANDELBROT (1967), sugerindo ser possível que a complexidade das linhas costeiras siga padrões geométricos similares.

Os resultados obtidos com o teste de Tukey (Tabela 7) indicam que os manguezais situados na zona costeira amazônica possuem médias da dimensão fractal inferiores no Litoral do Amapá (1,090), em comparação com o Golfão Amazônico (1,166) e com o Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão (1,167). Ficou também comprovado que valores de D são estatisticamente iguais para os dois últimos macrocompartimentos.

Com referência ao trabalho de DORNELAS (2013), que definiu três níveis de energia com base na complexidade da interface água-vegetação, pode-se dizer que:

- (a) os manguezais do Litoral do Amapá ($D = 1,090$) encontram-se em nível intermediário de energia, onde o óleo pode ser removido dias ou meses após um eventual derrame, configurando um ambiente de média complexidade espacial;
- (b) os manguezais do Golfão Amazônico (1,166) e do Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão (1,167) encontram-se em nível baixo de energia, no qual a remoção do óleo pode levar um longo período de tempo devido à alta complexidade espacial.

A esse respeito, vale lembrar que os manguezais estudados na presente dissertação estão enquadrados na categoria 10C do ISA (SOUZA FILHO *et al.*, 2008). Entretanto, com os resultados aqui obtidos, é possível sugerir o refinamento desta classe, através de uma subdivisão que leve em conta a diferença estatística nas médias da dimensão fractal (D) dos manguezais nos três diferentes macrocompartimentos, como segue abaixo.

ISA	Características do Ambiente para a Remoção do Óleo
10C.1	Manguezais de intermaré com nível intermediário de energia onde o óleo pode ser removido dias ou meses após o derrame, configurando-se como um ambiente de média complexidade espacial.
10C.2	Manguezais de intermaré com baixo nível de energia no qual a remoção do óleo pode levar um longo período de tempo devido à alta complexidade espacial.

Tabela 8 - Proposta de refinamento do Ambiente 10C do Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA).

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A extensa Costa Norte Brasileira, que abrange desde o extremo setentrional do Estado do Amapá até São Luís do Maranhão, apresenta diferentes tipos de ambientes, como várzeas, campos, planaltos costeiros e manguezais, sendo este último o mais sensível ao contato com petróleo e seus derivados. A presente dissertação buscou fornecer subsídios científicos para estudos sobre a sensibilidade ao derramamento de óleo nessa região, uma vez que a indústria petrolífera atua nas cercanias de áreas onde ocorrem os manguezais.

A Costa Norte Brasileira abrange três macrocompartimentos: “Litoral do Amapá” (LA), “Golfão Amazônico” (GA) e “Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão” (PM). Tal fato sugere a existência de diferentes configurações para o limite entre terra e água, que podem ser caracterizadas através da geometria fractal. Por este motivo, pretendeu-se na pesquisa desenvolver uma metodologia que utilize o conceito de dimensão fractal (D) para indicar a complexidade da linha de costa onde ocorrem os manguezais, assim como os níveis de energia a ela associados.

Primeiramente, efetuou-se o cálculo da dimensão fractal para cada um dos macrocompartimentos. Os resultados permitiram verificar que o Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão é o mais irregular, com $D = 1,238$. Tal valor é próximo daquele estimado na literatura para o litoral da Grã-Bretanha (1,25). A dimensão fractal encontrada para o Litoral do Amapá ($D = 1,138$) aproxima-se daquela da Costa Australiana ($D = 1,13$), enquanto que o valor para o Golfão Amazônico ($D=1,192$) situa-se entre o litoral da Grã-Bretanha e a Costa Australiana.

A seguir, foram obtidas as dimensões fractais (D) de 615 segmentos distintos da Costa Norte Brasileira representativos de seus diferentes ambientes. Testes de hipóteses demonstraram que o valor médio para os manguezais no LA ($D = 1,090$) é distinto daqueles encontrados para esse ambiente no GA ($D = 1,166$) e PM ($D = 1,167$). Nesses dois últimos, os valores de D para os manguezais podem ser considerados iguais. Assim, pode-se afirmar que os manguezais presentes no Litoral das Reentrâncias Pará-Maranhão e no Golfão Amazônico têm geometria menos complexa que os manguezais do Litoral do Amapá. Tal resultado pode indicar diferenças na capacidade de recuperação dos manguezais na região investigada, caso ocorra um acidente com derramamento de óleo.

O Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) já aponta que os manguezais de intermaré no Litoral Norte Brasileiro são muito sensíveis ao derramamento de óleo, pois os mesmos estão incluídos na classe 10 C. A metodologia aqui desenvolvida permitiu propor que esses ambientes podem ser ainda subdivididos como mais ou menos sensíveis segundo sua complexidade geométrica. Um refinamento possível consiste em definir as seguintes classes: 10.C.1, que diz respeito aos manguezais de intermaré com nível intermediário de energia, onde o óleo pode ser removido dias ou meses após o derrame, configurando-se como um ambiente de média complexidade espacial; 10.C.2, que inclui os manguezais de intermaré com baixo nível de energia, nos quais a remoção do óleo pode levar um longo período de tempo devido à sua alta complexidade espacial.

Recomenda-se para estudos futuros verificar a possibilidade de refinamento das outras classes ambientais utilizando métricas alternativas como a dimensão fractal, com a finalidade de agregar valor à definição do ISA na Costa Norte Brasileira.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDI, H., WILLIAMS, L.J, “Tukey’s honestly significant difference (HSD) test”, *Encyclopedia of Research Design. Thousand Oaks, CA: Sage*, pp. 1-5, 2010.
- AB'SÁBER, A. N. “O Litoral do Brasil”, *Metalivros*, São Paulo, p.286, 2001.
- AB'SABER, A. N. “Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira”. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 16, n. 45, p. 7-30, ago. 2002.
- ANDRONACHE, I.C., AHAMMER, H., JELINEK, H. F., PEPTENATU, D., CIOBOTARU, A. M., DRAGHICI, C. C., TEODORESCU, C., “Fractal analysis for studying the evolution of forests”. *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 91, p. 310-318, 2016.
- ARAÚJO, S.I., SILVA, G. H., MUEHE, D. C. E. H. Manual básico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema Petrobras: ambientes costeiros e estuarinos. Petrobras, Rio de Janeiro, 133 p., 2002
- AZEVEDO, T. S., MARQUES, M. L. “As Propriedades Fractais da Representação Cartográfica de Linhas: Um Estudo de Caso para o Litoral do Estado de São Paulo – Brasil”, *GEOUSP - Espaço e Tempo*, São Paulo, n. 15, p. 51-61, 2004.
- BACKES, A. R.; BRUNO, O. M. “Técnicas de estimativa da Dimensão Fractal: Um estudo comparativo”. *Journal of Computer Science*, v. 4, No. 3, pp. 50-58, 2005.
- BAGNATO V.S, PRATAVIEIRA, S. “Luz para o progresso do conhecimento e suporte da vida”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, No 4, pp. 4201-4206. 2015.
- BATISTA, E.M, SOUZA FILHO, P.W.M, SILVEIRA, F.M. “Avaliação de Áreas Depositionais e Erosivas em Cabos Lamosos da Zona Costeira Amazônica Através da Análise Multitemporal de Imagens de Sensores Remotos”, *Revista Brasileira de Geofísica*, pp. 83-96, Jun. 2008.

- BERRÊDO, J.F., MENDES, A.C., SALES, M.E., SARMENTO, J.P., “Nível de contaminação por óleo nos sedimentos de fundo e água no rio Pará, decorrente do acidente com a balsa Miss Rondônia”. In: PROST, M.T. e MENDES, A.C. (Eds.). *Ecossistemas costeiros: impactos e gestão ambiental*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi. pp. 153-165, 2001.

- BITENCOURT, M.D. *Sensoriamento Remoto de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos: Fundamentos*. LEPaC - Lab. de Ecologia da Paisagem e Conservação. Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências. USP, 2011. Disponível em: <http://ecologia.ib.usp.br/lepac/bie426/fundamentos3.pdf>. Acesso em: 12/10/2017.

- BOX, George EP; DRAPER, Norman R. “The Bayesian estimation of common parameters from several responses”. *Biometrika*, v. 52, n. 3-4, p. 355-365, 1965.

- BORGES, R.M.H., “Introdução à validação de métodos”, CGCRE / Inmetro – Dicla, maio, 2006.

- BRASIL. Lei n. 9.966, de 28 de abr. de 2000. Art.1 e 2. Brasília,DF, abr, 2000.

- CONAMA, MMA. *Relatório sobre o Impacto Ambiental causado pelo Derramamento de Óleo na baía de Guanabara*. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 2001.

- CONTI, J.B., FURLAN, S.A., “Geoecologia: o clima, os solos e a biota”. In: Ross, J.L.S., S.P. (Org.), *Geografia do Brasil*, 6 ed., cap. 2, Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

- CUEVAS, A., FEBRERO, M., FRAIMAN, R., “An anova test for functional data”, *Computational statistics & data analysis*, No 1, v. 47, pp. 111-122, 2004.

- ANA. *Dados vetoriais das bacias hidrográficas brasileiras*. Agência Nacional de Águas (ANA), 2006. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>. Acesso em 06/02/2017.

- DAI, Z.J, LI, C.C; ZHANG, Q.L. “Fractal analysis of shoreline patterns for crenulate-bay beaches, Southern China”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 61, n. 1, p. 65-71, 2004.
- AZEVEDO, T. S; MARQUES, M. L. “As propriedades fractais da representação cartográfica de linhas: um estudo de caso para o litoral do Estado de São Paulo Brasil”. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, n. 15, p. 51-61, 2006.
- DHANSAY, T.; BRANDL, G.; DE WIT, M. J. “Fractal geometry of the fault network across the Soutpansberg Mountains”, Limpopo, South Africa. *South African Journal of Geology*, v. 119, n. 1, p. 235-242, 2016.
- DORNELAS, T. S. 2013. *Análise fractal da interface água-vegetação como subsídio à caracterização da sensibilidade ambiental a derrames de óleo na região de Coari (AM)*, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- EL-ROBRINI, M., J. MARQUES., SILVA, M.A.M.A., EL-ROBRINI, M.H.S., FEITOSA, A.C., TAROUÇO, J.E.F., SANTOS, J.H.S., VIANA, J.R. (2006b) – “Maranhão”. In: Dieter Muehe (org.), **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília, DF, Brasil.
- EL-ROBRINI, M., SILVA, M.A.M.A, SOUZA FILHO, P.W.M., EL-ROBRINI, M.H.S., SILVA JÚNIOR, O.G., FRANÇA, C.F. (2006a) – “Pará”. In: Dieter Muehe (org.), **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília, DF, Brasil.
- ESRI, *About ArcGis*, 2017. Disponível em <http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis>. Acesso em outubro de 2017.
- FALCONER, K., 1990, *Fractal geomatry mathematical foundations and applications*, England.

- FAPESPA. “Mapa das Mesoregiões do Estado do Pará”. Anuário Estatístico do Pará 2015. Disponível em: http://www.fapespa.pa.gov.br/anuario_estatistico/imagens/mapas/territorio/mesoregiones.jpg. Acesso em 27 de out 2017.

- FAPESPA. “Mapa das Microrregiões do Estado do Pará”. Anuário Estatístico do 2015. Disponível em: http://www.fapespa.pa.gov.br/anuario_estatistico/imagens/mapas/territorio/microrregioes.jpg Acesso em 27 de out 2017.

- FEDER, J., 1989, Fractals. 4 ed. Department of Physics, University of Oslo. Oslo, Norway.

- FLORENZANO, TERESA, G. *Iniciação em Sensoriamento Remoto*. Oficina de Textos, pp. 101, 2007.

- GONÇALVES, F. D., SOUZA FILHO, P. W. M., PARADELLA, W. R., MIRANDA, F. P. D. “Fusão de dados multisensor para a identificação e o mapeamento de ambientes flúvio-estuarinos da Amazônia”. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, pp. 57-67, 2009.

- GRAY, J.L., KANAGY, L.K., FURLONG, E.T., KANAGY, C.J., MCCOY, J.W., MASON, A., LAUENSTEIN, G. “Presence of the Corexit component dioctyl sodium sulfosuccinate in Gulf of Mexico waters after the 2010 Deepwater Horizon oil spill”, *Journal of Chemosphere*. v. 95, pp.124-130, Set, 2013.

- GRUBBS, F.E, “Procedures for detecting outlying observations in samples”, *Technometrics*, n. 1, v. 11, pp. 1-21, 1969.

- GUARINO, Vincenzo et al. “Image processing and fractal box counting: user-assisted method for multi-scale porous scaffold characterization”. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, v. 21, n. 12, p. 3109-3118, 2010.

- HAYES, M.O., GUNDLACH, E.R. “Coastal geomorphology and sedimentation of the METULA oil spill site in the Straits of Magellan”. *Coastal Research Division*, Department of Geology, University of South Carolina, 1975.

- IBGE. *Mapa de Clima do Brasil*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2002. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/clima.pdf

- IBGE. *Mapas Geomorfológicos*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/geomorfologia.html>

- IMAGE J, *About*, 2016. Disponível em <https://imagej.net/>. Acesso em novembro de 2016.

- JENSEN, J. R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. tradução José Carlos Neves Epiphânio. São José dos Campos, SP, Ed. Parêntese, 598 p. 2009.

- JINYONG, X.U, ZENGXIANG, Z., XIAOLI, Z., QINGKE, W., LIJUN, Z., XIAO, W., LING, Y. “Spatial and temporal variations of coastlines in northern China (2000–2012)”. *Journal of Geographical Sciences*, v. 24, n.1, pp. 18-32. 2014.

- LEE, Y.H., CARR, J.R., BARR, D.J., HAAS, C.J, “The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles”, *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. Pergamon, V.27, No. 6, p. 453-464, 1990.

- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons. ed. 3. p.750, 1994.

- LILLIEFORS, H.W., “On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown”, *Journal of the American statistical Association*, v. 62, n. 318, p. 399-402, 1967.

- MACEDO, M., OLIVEIRA, D., ALBUQUERQUE, M.P., ALBUQUERQUE MÁRCIO, P., *Cálculo da Dimensão Fractal Método de BoxCounting*. Disponível em: <http://www.cbpf.br/~maysagm/>. Acesso em: 22 de setembro de 2017.

- MANDELBROT, B. “How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension.” *Science, New Series*, v. 156, p. 636-638, 1967.

- MANDELBROT, B.B., 1983, *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Company, New York.

- MENESES, P. R, ALMEIDA, T. "Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto." *Embrapa Cerrados-Livros técnicos*. (INFOTECA-E), pp. 266, 2012.

- MIRANDA, F. P.; MACDONALD, J. A.; CARR, J. R. “Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of Borneo”. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, n. 12, p. 2349-2354, 1992

- MIRANDA, F. P., MENDOZA, A., 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.

- MMA, 2002. *Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo*. Ministério do Meio Ambiente, Distrito Federal, p.107.

- MORAES, E.C, FIORIO, P.R. “Fundamentos de sensoriamento remoto”. *São José dos campos*: INPE, 2002.

- MOURA, A.M.A., F. P. MIRANDA, L. BEVILACQUA, R. J. SAMPAIO, A.S. OLIVEIRA, L.C.F.H ALMEIDA. 2017. “Análise da dimensão fractal da Costa Amazônica Brasileira como subsídio à determinação do Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) a derramamentos de óleo”. *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto*. Rio de Janeiro, RJ, 06 a 09 de novembro de 2017.

- MUEHE, D. O. “Litoral Brasileiro e Sua Compartimentação”. In: Sandra Baptista da Cunha; Antonio José Teixeira Guerra. (Org.). *Geomorfologia do Brasil*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil S.A., pp. 273-349, 2006.

- NASA (NATIONAL SPACE DEVELOPMENT AGENCY OF JAPAN), JPL (JET PROPULSION LABORATORY), JRC (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION), AND ASF (ALASKA SAR FACILITY), “JERS-1 Global Rain Forest Mapping Project” *South America*, 1995 – 1996, Volume 1, 2000, CD Data Storage.

- NASCIMENTO JÚNIOR, W. R., SOUZA FILHO, P.W.M, PROISY, C., LUCAS, R.M., ROSENQVIST, A. “Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp. 11, 2012.

- NITTROUER, C.A., BRUNSKILL, G.J., FIGUEIREDO, A.G. “Importance of tropical coastal environments”. *Geo-Marine Letters*, v. 15, n. 3-4, p. 121-126, 1995.

- NOAA. “Environmental Sensitivity Index Guidelines”, National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS OR&R11, version 3.0, p. 192, 2002.

- NOAA. “Mission and Vision”. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Disponível em: <http://www.noaa.gov/our-mission-and-vision>. Acesso em: 22/04/2017.
- OLTMAN, R.E. “Reconnaissance investigation of discharge and water quality of the Amazon River”. *US Government Printing Office*. Circular 552, Washington D.C, pp. 16, 1968.
- PEREIRA, L.C. C, DIAS, J.A, do CARMO, J.A, POLETTE, M., “A Zona Costeira Amazônica Brasileira”, *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 09, pp. 3-7, n. 02, 2009.
- PETROBRAS, 2017a. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/>. Acesso em: 05 set. 2017, 16:03.
- PETROBRAS, 2017b. Disponível em <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/>. Acesso em: 05 set. 2017, 17:32.
- PETROBRAS, 2017c. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/terminais-e-oleodutos/>. Acesso em: 05 set. 2017, 17:38.
- PILCHOWSKI, R.W. 2003. *Avaliação dos impactos de derramamento de óleo sobre a ictiofauna do altíssimo, alto e médio rio Iguaçu, Paraná, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Pós Graduação em Ciências Veterinárias, Universidade Federal do Paraná. Paraná, Brasil, 51p.
- GARCÍA, F.P., GARCÍA, P.R., RUIZ, L.J.M., ÁLVAREZ, P.R., RODRÍGUEZ, H. R. “Determination of Geometry and Measurement of Maritime–Terrestrial Lines by Means of Fractals: Application to the Coast of Cantabria (Spain). *Journal of Coastal Research*, v.32, pp. 1174 – 1183, 2016.

- RORIZ, C. E. D. 2006. *Detecção de exsudações de óleo utilizando imagens do satélite RADARSAT-1 na porção offshore do Delta do Niger*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 267p.
- RSTUDIO, *Take control of your code*, 2017. Disponível em <https://www.rstudio.com/products/RStudio>. Acesso em maio de 2017.
- SABINS, F. F., 1997, *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York, W. H. Freeman and Company, 494 p.
- SALES, M.E.C, SOUZA FILHO, P.W.M, CUNHA, E.R.S.P, MIRANDA, F.P, LANDAU, L. “Projeto Piatam Mar: Experiência de Parceria Universidade/Empresa e Gestão Socioambiental na Zona Costeira Amazônica Brasileira”, *3º Congresso Brasileiro de de P&D em Petróleo e Gás*. Instituto Brasileiro de de Petróleo e Gás – IBP. pp. 6, 2004.
- SHAPIRO, S.S, WILK, M.B, “An analysis of variance test for normality (complete samples)”, *Biometrika*, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.
- SILVA, M. M., SOUZA, W.A., “Dimensão Fractal”, *Revista Eletrônica de Matemática*, No 2, pp.15, 2010.
- SILVA, C.A, SOUZA FILHO, P.W.M, RODRIGUES, S.W.P. “Morphology and modern sedimentary deposits of the macrotidal Marapanim Estuary (Amazon, Brazil)”, *Continental Shelf Research*, v. 29, pp. 619–631, 2009.
- SILVEIRA, J.D. “Morfologia do litoral”, In: *Brasil, a terra e o homem* (Ed.) A. de Azevedo, São Paulo, pp. 253-305, 1964.
- SOUZA FILHO, P.W.M, PROST, M.T.R.C, MIRANDA, F.P, BORGES, H.V, COSTA, F.R, ALMEIDA, E.F, NASCIMENTO JUNIOR, W.R. “Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo em Escalas 1:50.000 e 1:100.000”, *Projeto Piatam Mar II, Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica*. Belém, Pará, Brasil, Set. 2008.

- SOUZA FILHO, P. W. M., PROST, M.T.R., MIRANDA, F. P. , SALES, M. E. C. , BORGES, H.V., COSTA, F. R. , ALMEIDA, E. F., NASCIMENTO JUNIOR, W.R. “Environmental Sensitivity Index (ESI) Mapping of Oil Spill in the Amazon Coastal Zone: The Piatam Mar Project”. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, p. 7-22, 2009

- SOUZA FILHO, P.W.M, PARADELLA, R.W., SOUZA JÚNIOR, C., VALERIANO, D.M., MIRANDA, F.P. “Sensoriamento Remoto e Recursos Naturais da Amazônia”, *Ciência e Cultura*, São Paulo, v. 58, n. 3, pp. 37-41, 2006.

- SOUZA FILHO, P.W.M., GONÇALVES, F.D., BEISL, C.H., MIRANDA, F.P., ALMEIDA, E.F., CUNHA, E.R.S.P., “Sistema de Observação Costeira e o Papel dos Sensores Remotos no Monitoramento da Costa Norte Brasileira, Amazônia”, *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 02, n. 57, pp. 79-86, 2005.

- SOUZA, L.S.B, ROSSETTI, D.F. “Caracterização da Rede de Drenagem na Porção Leste da Ilha do Marajó e Implicações Tectônicas”, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.12, n. 1, pp. 69-83, 2011.

- SPALDING, M., BLASCO, F., FIELD, C. WORLD MANGROVE ATLAS (Eds), *World Mangrove Atlas*. The International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa, Japan. pp. 178, 1997.

- TANNER, B.R, PERFECT, E., KELLEY, J.T. “Fractal Analysis of Maine's Glaciated Shoreline Tests Established Coastal Classification Scheme”, *Journal of Coastal Research*, v. 22, n. 5, pp.1300-1304, Set. 2006.

- TORMAN, V.B.L., COSTER, R., RIBOLDI, J., “Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação”, *Clinical & Biomedical Research*, v. 32, n. 2, 2012.

- TURCOTTE, D.L., 1997, *Fractals and chaos in geology and geophysics*. 2 ed. Cambridge University Press.

- XIAOHUA, Z., YUNLONG, C., XIUCHUN, Y. “On Fractal Dimensions of China’s Coastlines”, *Mathematical Geology*, v. 36, n. 4. China. 2004.