



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

TESE DE DOUTORADO

**SENSORIAMENTO REMOTO EM SUPORTE AO MECANISMO DE
DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL) EM MANGUEZAIS DO
LITORAL SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE, BRASIL**

Bruno Cesar Pereira da Costa

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

Natal / RN, Novembro de 2016

**SENSORIAMENTO REMOTO EM SUPORTE AO MECANISMO DE
DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL) EM MANGUEZAIS DO
LITORAL SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE, BRASIL**

Bruno Cesar Pereira da Costa

Natal / RN, Novembro de 2016

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Costa, Bruno Cesar Pereira da.

Sensoriamento remoto em suporte ao mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) em manguezais do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, Brasil / Bruno Cesar Pereira da Costa. - 2016.

127 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal, RN, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

1. Mangue - Tese. 2. LANDSAT-8 - Tese. 3. RADARSAT-2 - Tese. 4. Espectrorradiometria - Tese. 5. Classificação - Tese. I. Amaro, Venerando Eustáquio. II. Título.

RN/UF/BCZM

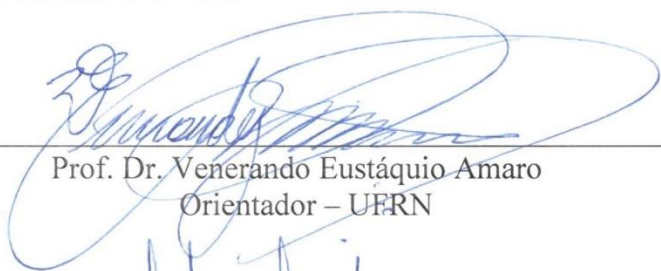
CDU 633.876

Bruno Cesar Pereira da Costa

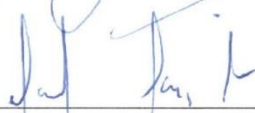
**SENSORIAMENTO REMOTO EM SUPORTE AO MECANISMO DE
DESENVOLVIMENTO LIMPO EM MANGUEZAIS DO LITORAL
SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE - RN, BRASIL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo PPGCEP, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Petróleo.

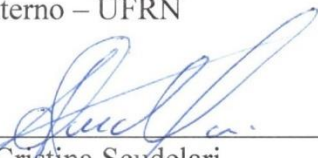
Aprovado em 18 de NOVEMBRO de 2016.



Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro
Orientador – UFRN



Profª. Dra. Marcela Marques Vieira
Membro Interno – UFRN



Profª. Dra. Ada Cristina Scudelari
Membro Interno – UFRN



Profª. Dra. Cynthia Romariz Duarte
Membro Externo – UFC



Prof. Dr. Valdenira Ferreira dos Santos
Membro Externo – IEPA-AP

COSTA, Bruno Cesar Pereira da - Sensoriamento Remoto em Suporte ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) em Manguezais do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, Brasil. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo. Linha de Pesquisa: Meio ambiente na indústria de petróleo e gás natural, Natal – RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – PPGCEP (UFRN)

RESUMO

As imagens de satélites têm sido utilizadas para mapear, monitorar e quantificar a qualidade dos recursos naturais. O mapeamento detalhado da vegetação de mangue é uma demanda crescente por se tratar de um valioso instrumento de conhecimento, manutenção e gestão do ecossistema manguezal em relação às modificações provocadas pelas atuações antrópicas e/ou naturais, frente às mudanças globais. Este trabalho combinou dados multiespectrais da região do visível e infravermelho próximo do sistema LANDSAT-8 com dados monoespectrais do RADARSAT-2, aliado a dados hiperespectrais de espectrorradiometria e Índice de Vegetação na segmentação e classificação de alguns manguezais no Nordeste do Brasil, levando em consideração a diversidade de ambientes presentes na área total do estudo. Como resultado final do processo de segmentação e classificação, calculamos que os manguezais da área estudada ocupam área total de aproximadamente 5.392 ha. A espécie *R. mangle* é a espécie dominante, totalizando uma área de 3.350 ha, representando 62,13% da área total, deste total cerca de 2.861 ha são ocupados pela *R. mangle* I (porte e adensamento convencional), representando 53,06% da área total; 489 ha pela condição fitoestrutural *R. mangle* II (porte baixo e bastante adensado), cerca de 9,07% da área total; regiões mistas de espécies ou de transição entre elas ocupam área de 1.092 ha, cerca de 20,25% da área total, seguida da espécie *A. schaueriana* ocupando uma área de 950 ha, cerca de 17,62% da área total. Este estudo atendeu às expectativas em obter uma maior eficiência no levantamento espacial com alta acurácia para o monitoramento da qualidade desse ecossistema altamente sensível às alterações ambientais: como subsídio à sua preservação e transformação em um Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Para tal, foi realizada a estimativa de CO₂ aprisionado nas florestas de mangue pertencentes a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT) por meio de Método Indireto não destrutivo. As estimativas totais das médias de CO₂ aprisionado em cada hectare ocupado pela espécie *R. mangle* é de 39,93 t, *L. schaueriana* é de 28,47 t e as regiões de espécies mistas é de 34,20 t. Estima-se que a quantificação total de CO₂ aprisionado na RDSEPT seja 17.156,51 t. Mediante os valores obtidos, percebemos que o manguezal da RDSEPT de maneira geral possui um grande potencial de gerar biomassa e conseqüentemente aprisionar CO₂. Podendo gerar uma valiosa oportunidade financeira, justificando a preservação deste ecossistema.

Palavras-Chaves: LANDSAT-8; RADARSAT-2; espectrorradiometria; classificação; mangue.

ABSTRACT

The satellite images have been used to map, monitor and quantify the quality of natural resource. The detailed mapping of mangrove vegetation is an increasing demand because it is a valorous instrument of knowledge, maintenance and management of the mangrove ecosystem in relation to changes caused by anthropic actions and/or natural activities to global changes. This work combined multispectral data from the visible and near infrared of the LANDSAT-8 system with Monospectral data from RADARSAT-2, combined with hyperspectral data of the spectroradiometry and Vegetation Index in the segmentation and classification of some mangroves in the Northeast of Brazil, taking into account the diversity of environments present in the total area of the study. As the final result of the segmentation and classification process, we calculate that the mangroves in the study area occupy a total area of approximately 5.392ha. The species *R. mangle* is the dominant species, totaling an area of 3,350 ha, representing 62.13% of the total area, of this total about 2,861 ha are occupied by *R. mangle* I (size and conventional densification), representing 53.06% of the total area; 489 ha for structural phyto condition *R. mangle* II (short stature and very dense), about 9.07% of the total area; mixed regions of species or transition between them occupy area of 1092 ha, about 20.25% of total area, then the specie *A. schaueriana* occupying an area of 950 ha, about 17.62% of the total area. This study met the expectations to get the greater efficiency in the spatial lifting for monitoring the quality of this highly sensitive ecosystem on the environmental changes: as support their preservation and transformation into a Clean Development Mechanism Project. For such, was made the estimation of trapped CO₂ in mangrove forests belonging to Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT) by Indirect Method nondestructive. The total estimates on the mean of trapped CO₂ in each hectare occupied by the species *R. mangle* is 39.93t, *L. schaueriana* is 28.47t and the regions of mixed species is 34.20t. It is estimated that the total quantification of trapped CO₂ in the RDSEPT is 17156.51t. By the obtained values, we realized that the values of mangrove in the RDSEPT in general have a great potential to generate biomass and consequently imprison CO₂. It is able to generate a valuable financial opportunity, justifying the preservation of this ecosystem.

Key Words: LASAT-8; RADARSAT-2; spectroradiometry; classification; mangrove.

DEDICATÓRIA

Dedico especialmente à minha Esposa Aline David: minha maior incentivadora, principalmente nos momentos mais difíceis. “Eu te amo” essa é a melhor forma de dizer muito obrigado.

*"É bom que a guerra seja tão horrível.
Do contrário, acabaríamos gostando dela."*

Robert E. Lee (1807-1870)

Comandante-chefe do Exército
confederado durante a Guerra de Secessão

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, e faço, aqui, algumas menções de modo especial:

Aos meus pais Joanir Cesar e Odete Pereira e aos meus irmãos Janine Cesar e Breno Cesar por todo amor e pelo apoio constante.

A minha esposa Aline David por estar sempre ao meu lado, me apoiando, incentivando e ajudando a cada dia.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP/UFRN), pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Ao Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro pela confiança, o conhecimento compartilhado, orientação e apoio na realização deste e outros trabalhos.

A CAPES por ter concedido a bolsa de estudos por quatro anos.

O apoio financeiro dos projetos de pesquisa da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste no Monitoramento de Áreas sob Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05 – PETROMAR, CTPETRO – FINEP/PETROBRAS/CNPq): Projetos Cooperativos: HIDROSEMA, MOLECO e CRONALOG.

A minhas tias Lourdes, Beth e Suely pelo carinho e pelo apoio sempre depositado.

Ao meu primo Rodrigo, pelo apoio e incentivo.

Ao Amigo Msc. José Edson, pelo companheirismo, ajuda na aquisição e tratamento dos dados.

Ao Amigo Prof. Dr. André Luís Silva Santos, pelo companheirismo, pela disposição em sempre ajudar e pelas discussões oportunas relacionadas com o trabalho.

Ao Amigo Prof. Dr. Anderson, pelo companheirismo, pela direta ajuda e pelas discussões oportunas relacionadas com o trabalho.

Ao Amigo Raniery Maia, pela ajuda sempre que necessária.

Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia da UFRN (GEOPRO/DG/UFRN), pelo convívio e companheirismo, que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
DEDICATÓRIA	vi
AGRADECIMENTOS	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE QUADROS	xvi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SIGLAS	xviii

CAPÍTULO 1

1. APRESENTAÇÃO	21
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.3 ESTRUTURA DA TESE	23
1.4 ÁREA DE ESTUDO	23
1.5 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	24
1.5.1 Clima	24
1.5.2 Hidrografia	25
1.5.3 Ventos.....	25
1.5.4 Ondas.....	26
1.5.5 Correntes e Maré	27
1.6 CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO	27
1.6.1 Contexto Geológico.....	28
1.6.2 Contexto Geomorfológico.....	29
1.7 MANGUEZAL.....	31
1.8 A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS NATURAL NA ZONA COSTEIRA.....	33
1.8.1 Petróleo e Meio Ambiente.....	34
1.8.2 Processos que acontecem durante um derramamento de óleo	35
1.8.3 Consequências nos ecossistemas.....	35
1.8.4 Consequências nos Ecossistemas Costeiros	36
1.8.5 Manguezais e os impactos provocados por derrame de petróleo	36
1.9 CARTAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO.....	37
1.9.1 A sensibilidade da costa	39
1.9.2 Mapas de Sensibilidade ao derramamento de óleo na área de estudo.....	40

CAPÍTULO 2

APRESENTAÇÃO	49
Resumo.....	51
Abstract	52
1. Introdução	52
2. Área de Estudo	54
3.1 Seleção de Imagens Digitais.....	56
3.2 Processamento Digital de Imagens.....	56
3.3 Filtragem Espacial	57
3.4 Segmentação e Classificação.....	58
3.5 Avaliação da Classificação.....	59
3. Resultados	59
4. Conclusões	71
5. Agradecimentos.....	72
6. Referências.....	72

CAPÍTULO 3

APRESENTAÇÃO	78
RESUMO	79
ABSTRACT.....	79
1. INTRODUÇÃO	80
1.1 Local de Estudo	82
2. METODOLOGIA.....	83
2.1 Coleta de Dados de Campo	84
2.2 Georreferenciamento dos Locais de Coleta de Amostras em Campo	86
2.3 Análise das Assinaturas Espectrais.....	87
2.4 Determinação do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo.....	87
2.5 Processamento Digital das Imagens	88
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
4. CONCLUSÕES.....	100

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO	102
RESUMO	103
ABSTRACT.....	103
1. Introdução	104
1.1 Área de Estudo.....	105
2. METODOLOGIA	106
2.1 Inventário Florestal.....	107
2.2 Unidade amostral.....	108

2.3	Estimativa de biomassa vegetal aérea	110
2.4	Conversão de biomassa em CO ₂	110
3.	RESULTADOS.....	110
3.1	Estimativa da biomassa vegetal aérea	113
3.2	Conversão da biomassa em estoque de CO ₂	113
4.	CONCLUSÕES.....	115
CAPÍTULO 5		
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
5.1	CONCLUSÕES.....	117
5.2.	RECOMENDAÇÕES	117
REFERÊNCIAS		
REFERÊNCIAS.....		120

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1:** Intervenções antrópicas e impactos na vegetação de mangue por meio da alteração da Linha de Costa na área de pesquisa. A: remobilização de sedimento para construção de estrada, B: sonda de perfuração de poço de petróleo, C: avanço sedimentar sobre a vegetação de mangue, D: enrocamento paralelo à linha de costa, E: plataforma de produção de petróleo, F: impacto das ondas diretamente na vegetação de mangue, G: barramento de canal pela construção de talude, H: estação de beneficiamento de petróleo e I: morte total da vegetação de mangue..... 22
- Figura 2:** Mapa de localização da área de estudo..... 24
- Figura 3:** Mapa geológico simplificado e Arcabouço Estrutural da Bacia Potiguar. Fonte: adaptado de Farias (1997). 28
- Figura 4:** Mapa Geomorfológico da área de estudo. Fonte: IDEMA (2007). 30
- Figura 7:** Cartas Táticas para as Bacias do Ceará e Potiguar. Fonte: MMA (2012). 38
- Figura 8:** Cartas Operacionais para as Bacias do Ceará e Potiguar. Fonte: MMA (2012). ... 39
- Figura 9:** Carta Operacional – CEP 105 mostrando os ISL atribuídos à porção Sul da Zona Costeira do município de Macau. Fonte: MMA (2012). 42
- Figura 10:** Carta Operacional – CEP 106 mostrando os ISL atribuídos à porção Norte da Zona Costeira do município de Macau. Fonte: MMA (2012). 43
- Figura 11:** Carta Operacional – CEP 107 mostrando os ISL atribuídos à Zona Costeira dos municípios de Guamaré e Galinhos. Fonte: MMA (2012). 44
- Figura 12:** Fluxograma da metodologia empregada na Tese. 47

CAPÍTULO 2

- Figura 1:** Mapa de localização da área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. Estuários, canais de maré, com respectivos manguezais, e principais vias de acesso..... 55
- Figura 2:** Etapas metodológicas e materiais empregados no processamento dos dados digitais. 56
- Figura 3:** Filtro de convolução de dimensão 5 x5 empregado na imagem híbrida. 58
- Figura 4:** Processo de segmentação e classificação. (A) integração multisensores do LANDSAT-8 e RADARSAT-2 em níveis de cinza. (B) integração multisensores em composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro, com destaque para o realce da vegetação de mangue e das unidades geoambientais, (C) Imagem em Composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro empregada na delimitação das unidades geomorfológicas. (D) Mapa resultante da classificação em classes de cores indicando as diferentes espécies de mangue presentes na área de estudo. 61
- Figura 5:** (A) Área de estudo total com a localização da área representativa escolhida para a análise da exatidão da classificação. (B) Detalhe da área representativa com os locais dos pontos de controle..... 63
- Figura 6:** Detalhe da subárea 1. Nestes estuários observa-se a presença de forte aporte fluvial em todos os estuários desta subárea, promovendo a presença de planícies flúvio-estuarinas..... 65
- Figura 7:** Detalhe da subárea 2. Observa-se a presença de aporte fluvial apenas no estuário localizado ao Oeste desta subárea, promovendo a presença de planícies flúvio-estuarinas, entretanto o estuário, na porção Nordeste, é caracterizado apenas por canais de maré. 66
- Figura 8:** Detalhe da subárea 3. Neste estuário, observa-se a presença de pequeno aporte fluvial intermitente no estuário central desta subárea, porém este está caracterizado basicamente por canais de maré. 67

- Figura 9:** Comparação entre o resultado das respostas espectrais e o resultado da classificação para um segmento de manguezal do estuário de Diogo Lopes: (A) composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro, (B) resultado da classificação. (C) área ocupada exclusivamente pela espécie *R. mangle* (D) e (E) mostram uma área de transição entre duas espécies, onde (D) trata-se de área ocupada pela espécie *R. mangle* e (E) área ocupada pela espécie *A. schaueriana* (F) mostra uma área ocupada exclusivamente pela espécie *A. schaueriana*. 69
- Figura 10:** Condições estruturais das espécies de mangue ocorrentes na área de estudo, bem como as alturas estimadas dos portes florestais. (A) trata-se de *R. mangle* I, (B) *R. mangle* II, (C) *A. schaueriana* e (D) região de espécies mistas: (La) indivíduo da espécie *L. racemosa*, (Rh) *R. mangle* e (Av) *A. schauerian*. 70
- Figura 11:** (A) Valores da cobertura vegetal em hectares referentes às quatro condições estruturais de espécies reveladas através da classificação. (B) Valores em hectares referentes à cobertura vegetal das espécies de mangue ocorrentes. 71

CAPÍTULO 3

- Figura 1:** Mapa de localização e principais vias de acesso à área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil, com os estuários e respectivos manguezais. 82
- Figura 2:** Fluxograma da metodologia empregada no artigo. 84
- Figura 3:** Captura por fibra ótica da assinatura espectral nas folhas das três (3) espécies de mangues predominantes na área de estudo: (a) folha de *R. mangle*; (b) folha de *L. racemosa*; (c) folha de *A. schaueriana*. 85
- Figura 4:** Procedimentos de georreferenciamento do local das árvores utilizadas para coleta de amostras botânicas (ramo/folhas). (a) detalhe da unidade coletora de dados de GPS geodésico *rover* localizada em uma árvore de coleta; (b) detalhe da antena receptadora de dados de GPS geodésico *rover* hasteada e ultrapassando a copa das árvores; (c) detalhe da estação base instalada em marco geodésico. 86
- Figura 5:** Regressão Linear para os dados de reflectâncias referentes às três espécies de mangue presentes na área de estudo. 88
- Figura 6:** Variação do comportamento espectral da reflectância para as 125 folhas das espécies: (a) *R. mangle*; (b) *A. schaueriana*; (c) *L. racemosa* e (d) comparativo das média das reflectâncias. 90
- Figura 7:** Assinaturas espectrais comparadas das três espécies de mangue. No detalhe, as reflectâncias das três espécies estudadas no intervalo referente ao infravermelho próximo. (1) Pico sutil de reflectância no comprimento de onda 755 nm. (2) Pico sutil de absorção no comprimento de onda 765 nm. (3) Pico de reflectância no comprimento de onda específico de 760 nm. 91
- Figura 8:** Mapa resultante da segmentação e classificação das espécies de mangue por meio do modelo SAVI L0,10 LANDSAT-8. 93
- Figura 9:** Mapa resultante da segmentação e classificação das fisionomias/espécies de mangue por meio do modelo SAVI L0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2. 96
- Figura 10:** Mapa comparativo entre os resultados da classificação promovida pelo modelo SAVI 0,10 LANDSAT-8 nos detalhes (a) e (b) e pelo modelo SAVI L 0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2 nos detalhes (c) e (d). 98
- Figura 11:** Comparação das médias referentes aos comprimentos e as larguras das folhas para as espécies na área de estudo: *A. germinans*, *L. racemosa* e *R. mangle*. 99

CAPÍTULO 4

- Figura 1:** Mapa de localização da área de estudo, seu respectivo manguezal, vias de acesso, municípios e localidades pertencentes. 106

Figura 2: Fluxograma da metodol3gia empregada no artigo.....	107
Figura 3: Metodologia de aquisi3o de dados das parcelas 1 e 2 de invent3rio florestal, com dimens3o de 100x100 m. A parcela 3 subdividida em 16 sub parcelas de 25x25 m dispostas no sentido Sul/Norte e Leste/Oeste.	109
Figura 4: Mapa de localiza3o das parcelas 1 (Diogo Lopes) e 2 (Sert3ozinho). Sendo a parcela 1 com a predomin3ncia da esp3cie <i>A. schaueriana</i> e parcela 2 com a predomin3ncia da esp3cie <i>R. mangle</i>	109
Figura 5: Abrang3ncia dos dados e localiza3o espacial das 3rvores inventariadas na parcela 1 - Diogo Lopes.....	111
Figura 6: Comparativo entre as frequ3ncias do tamanho dos Di3metros na Altura do Peito para as duas esp3cies ocorrentes na parcela 1 - Diogo Lopes.....	111
Figura 7: Abrang3ncia dos dados e localiza3o espacial das 3rvores inventariadas na parcela 2 - Sert3ozinho.	112
Figura 8: Comparativo entre as frequ3ncias do tamanho dos Di3metros na Altura do Peito para as duas esp3cies ocorrentes na parcela 2 - Set3ozinho.....	113

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

- Quadro 1:** Tipos de costas com os respectivos índices de sensibilidades e cores associadas.
Fonte: MMA (2004). 40

CAPÍTULO 2

- Quadro 1:** Matriz de Confusão e Erro utilizada na avaliação da exatidão da classificação das diferentes condições estruturais das espécies e o Índice Kappa na avaliação dos dados da matriz. 64

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 1: Dados de reflectância. a: médias e b: dados calibrados das folhas das três espécies de mangue presentes na área de estudada. DP = Desvio Padrão. 87

CAPÍTULO 4

Tabela 1: Resultado do inventário para os dados referentes aos DAP na parcela 1 - Diogo Lopes, tendo a média, máxima e mínima..... 111

Tabela 2: Resultado do inventário para os dados referentes aos DAP na parcela 2 - Sertãozinho, tendo a média, máxima e mínima. 112

Tabela 3: Estoque de biomassa vegetal aérea armazenada nas parcelas 1- Diogo Lopes e parcela 2 - Sertãozinho..... 113

Tabela 4: Análise de estoque CO₂ aprisionado na parcela 1- Diogo Lopes e parcela 2 - Sertãozinho..... 113

Tabela 5: Estoques das médias de CO₂ aprisionado por espécies e a quantificação total para a área total de mangue da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão. 114

LISTA DE SIGLAS

AAS	Amostragem Aleatória Simples
APC	Análises por Principais Componentes
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DN	<i>Digital Number</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HH	Polarização horizontal
HV	Polarização vertical
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	Índices de Vegetação
IVP	Infravermelho próximo
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
NIR	<i>Near Infrared</i>
nm	Nanômetro
OLI	<i>Operacional Land Imager</i>
PC	<i>Particular Computer</i>
PC	Principal Componente
PDI	Processamento Digital de Imagens
PPK	<i>Postprocessed Kinematic</i>
PSRR	<i>Index of Pigment for Simple Reason</i>
R	<i>Red</i>
RDSEPT	Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
RN	Estado do Rio Grande do Norte
SAD-69	<i>South American Datum-1969</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SAVI	<i>Soil Adjust Vegetation Index</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SR	Sensoriamento Remoto
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
V	Vermelho
mm	Micrômetro

Capítulo 1
INTRODUÇÃO

1. APRESENTAÇÃO

Esta Tese de Doutorado faz parte do conjunto de requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Petróleo do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Parte das atividades de pesquisa incluída nesta Tese está vinculada aos Projetos Cooperativos de Pesquisa da REDE 05-PETROMAR, a *Rede Cooperativa Norte-Nordeste de Monitoramento Ambiental de Áreas sob Influência da Indústria Petrolífera*, financiadas pelo CTPETRO–FINEP / PETROBRAS / CNPq, que compreende projetos nos seguintes temas de pesquisa: monitoramento das mudanças de longo prazo e da poluição por óleo nos ecossistemas marinhos costeiros da região Norte e Nordeste do Brasil. Os projetos cooperativos envolveram alunos, professores e pesquisadores desta universidade e de outras instituições nacionais e internacionais. As atividades desta Tese de Doutorado foram desenvolvidas com o apoio logístico e ferramental do Laboratório de Geoprocessamento - GEOPRO do Departamento de Geologia da UFRN.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A área de estudo é composta por um complexo sistema de ilhas barreiras, com praias oceânicas, sistema de dunas, canais de maré e rios, ocupando uma faixa de aproximadamente 70 km de litoral. Ao longo deste litoral apresentam-se notáveis estuários com a presença de expressivas florestas de mangue onde também estão inseridas significativas atividades socioeconômicas para o Estado do Rio Grande do Norte (RN), tais como a carcinicultura, a salineira, a eólica e a petrolífera, além disso, nesta área está inserida a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT), criada pela Lei Estadual nº 8.342 de 18/07/2003, que é de grande importância ecológica e ambiental para a região setentrional do RN. O sistema é caracterizado pela intensa ação de processos costeiros, tais como transporte eólico e litorâneo, alterações no balanço de sedimentos, variações na linha de costa, abertura e fechamento de canais de marés e formação de ilhas barreiras. Tais processos são influenciados por fatores geológicos (elementos tectônicos regionais e locais) interagindo com a ação direta dos agentes dinâmicos costeiros (clima, vento, marés, ondas e correntes marinhas) e pela intensa interferência de atividades antrópicas (Nascimento, 2009; Souto, 2009; Chaves, 2005; Grigio *et al.*, 2005).

Os manguezais são responsáveis por uma função significativa na produção pesqueira

na zona costeira, sendo fundamentais para o desenvolvimento de atividades sócio-econômicas associadas à pesca artesanal e à exploração sustentável dos recursos renováveis costeiros. Assim, este trabalho é justificado principalmente pela insuficiência nos estudos realizados nesse ecossistema, sobretudo no que se refere à distribuição espacial e estrutural das espécies e as associações com o uso do solo relacionado ao desenvolvimento das atividades antrópicas, em particular a indústria petrolífera. Algumas destas intervenções e seus efeitos podem ser observados nas ilustrações da Figura 1.

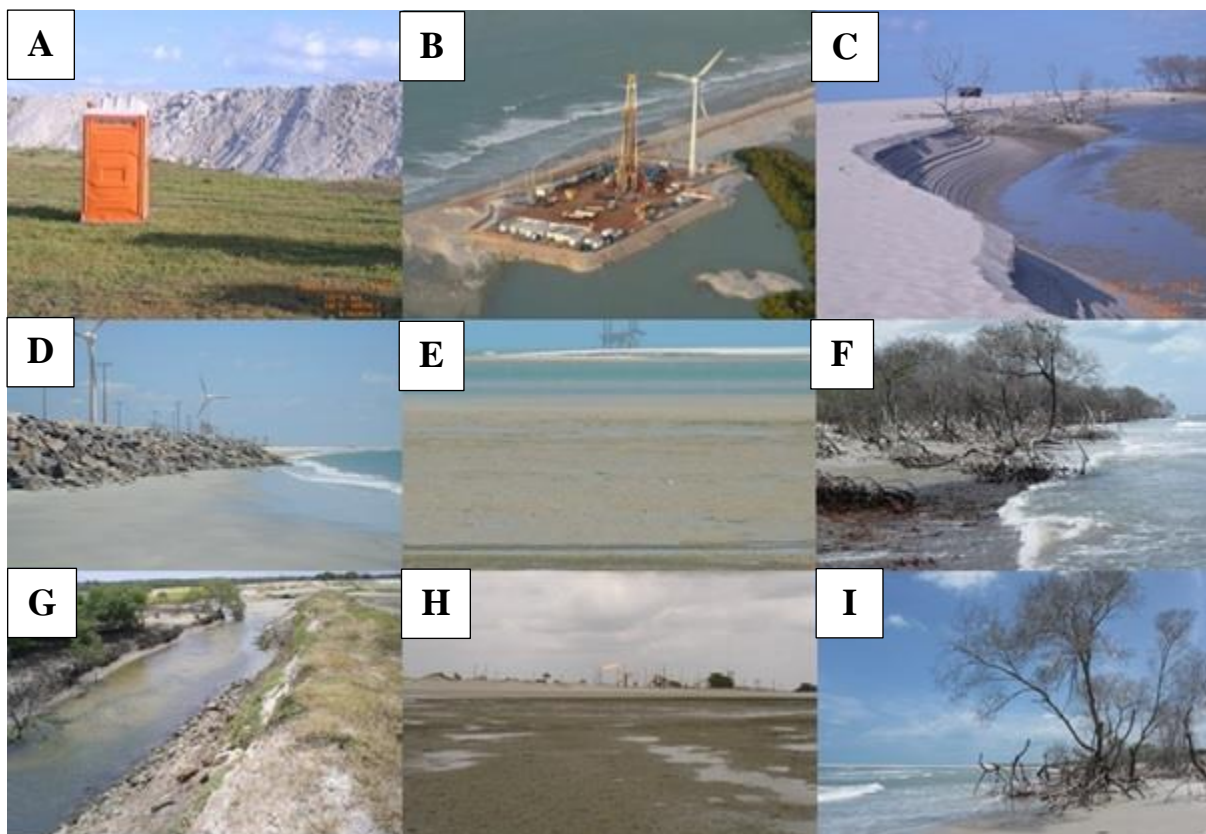


Figura 1: Intervenções antrópicas e impactos na vegetação de mangue por meio da alteração da Linha de Costa na área de pesquisa. **A:** remobilização de sedimento para construção de estrada, **B:** sonda de perfuração de poço de petróleo, **C:** avanço sedimentar sobre a vegetação de mangue, **D:** enrocamento paralelo à linha de costa, **E:** plataforma de produção de petróleo, **F:** impacto das ondas diretamente na vegetação de mangue, **G:** barramento de canal pela construção de talude, **H:** estação de beneficiamento de petróleo e **I:** morte total da vegetação de mangue.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo da Tese de Doutorado é fundamentar a possibilidade de gerar vantagens financeiras oriundas da preservação de manguezais do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte - RN, Brasil. Para tal, foi realizada a identificação, segmentação e classificação em nível de espécies e suas condições fitoestruturais aliado a quantificação da biomassa vegetal aérea e CO₂ aprisionado.

O mapeamento das florestas de mangue serviu como base para atingir o objetivo geral da Tese e foi sistematizada em três etapas:

- 1) A primeira etapa foi a aplicação de uma técnica de Processamento Digital de Imagem (PDI) baseada na resposta espectral da vegetação de mangue que permita a discriminação, segmentação e classificação especializada das espécies de mangue, bem como a detecção das condições fitoestruturais das espécies presentes no ecossistema manguezal estudado.
- 2) A segunda etapa consistiu na obtenção de assinaturas espectrais utilizando espectrorradiometria para cada espécie de mangue, identificando as principais características dessas assinaturas, como se apresentam as faixas espectrais em que as espécies de mangue mais se diferenciam. O Índice de Vegetação (IV) foi correlacionado aos dados de campo, e nas imagens digitais promoveu a segmentação e a classificação das espécies, validadas em campo.
- 3) A terceira etapa tratou do inventário florestal e da aplicação de equações alométricas por meio de Método Indireto para obter a biomassa vegetal aérea e o carbono aprisionado no manguezal da RDSEPT em suporte ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A Tese de Doutorado foi desenvolvida parcialmente no formato de artigos científicos. O Capítulo 1 é a Introdução, que apresenta a área de estudo, os fatores envolvidos e ocorrentes na área de estudo, a floresta de mangue local, o potencial de sequestro de CO₂ por estas florestas e inclui também uma análise sobre as implicações provocadas pela Indústria Petrolífera instalada em relação ao ecossistema manguezal da área da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta o artigo científico que descreve o uso de Imagens Híbridas de Sensoriamento Remoto aplicado à Classificação das florestas de mangue do Nordeste do Brasil. O Capítulo 3 apresenta o uso de Índice de Vegetação, integração multisensores de Sensoriamento Remoto e espectrorradiometria para classificação de espécies de mangue. O Capítulo 4 apresenta o cálculo de biomassa vegetal aérea e o CO₂ aprisionado do manguezal da RDSEPT.

1.4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada na porção setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (Figura 2) e compreende os municípios de Macau, Guamaré, Galinhos e Porto do Mangue. É delimitada pelas coordenadas geográficas: Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000: -5.0517X/-

36.8114Y, -5.0517X/-36.1606Y, -5.1853X/-36.1606Y, -5.1853X/-36.8114Y. O acesso principal a área, a partir de Natal (Capital do Estado), pode ser realizado pela BR-406.

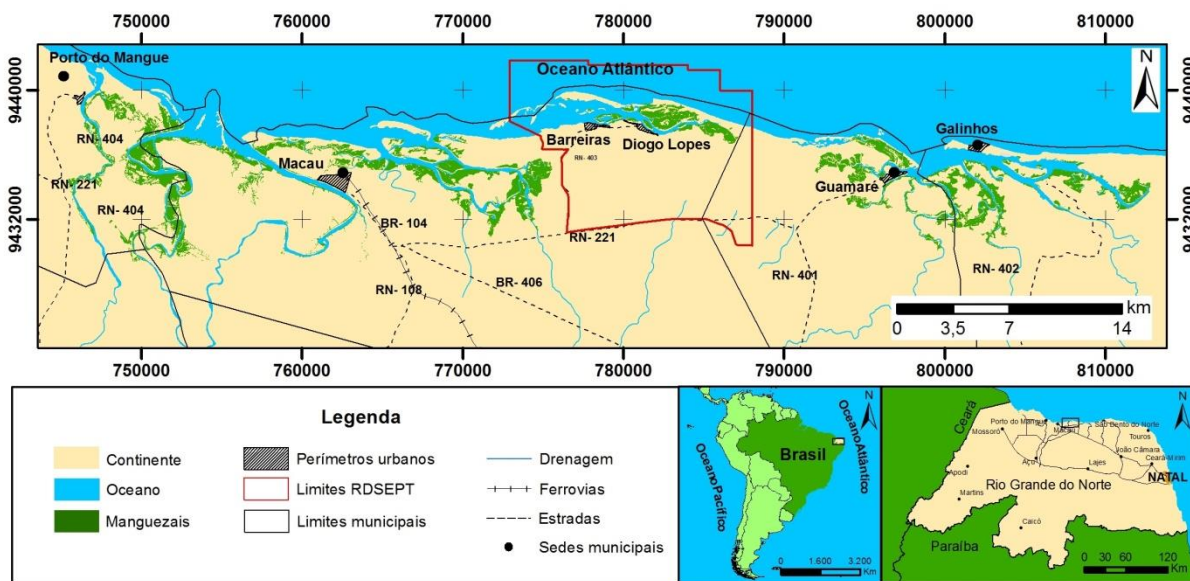


Figura 2: Mapa de localização da área de estudo.

1.5 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Os fenômenos do meio físico, as mudanças climáticas e a geologia são fatores determinantes no entendimento dos processos causadores e transformadores das feições morfológicas (Nascimento, 2009; Santos & Amaro, 2013; Ferreira *et al.*, 2014). Partindo deste princípio é necessário compreender o sistema climático regional, detalhando os parâmetros climáticos e dinâmicos de maior influência, que são imprescindíveis para a caracterização da área de estudo, que foram realizadas a partir da análise dos dados coletados pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET – Macau.

A geomorfologia costeira é reflexo da ação de agentes naturais atuantes nos processos costeiros como ventos, ondas, maré e correntes, pluviosidade, escala de tempo e variação do nível do mar sobre os ambientes costeiros (Bastos & Silva, 2000; Chaves *et al.*, 2006; Chaves *et al.*, 2004). Dessa forma o estudo e entendimento desses agentes se faz necessário para compreender como os processos costeiros atuam na região costeira promovendo a instalação e ocupação do espaço pelas florestas de mangue.

1.5.1 Clima

O Clima da região é definido, segundo Nimer (1989), como Semiárido Quente correspondente ao Clima Tropical Equatorial e, de acordo com a classificação climática de

Köppen, definido como Clima Muito Quente e Semiárido do Tipo SW'h, com temperaturas altas e poucas chuvas dividido em duas estações bem definidas: seca (verão ou estiagem) e chuva (chuvosa ou inverno). A estação chuvosa é curta com duração de 4 meses (fevereiro a maio) e a estação seca é mais longa, de 7 a 8 meses, entre os meses de junho a janeiro. Os maiores índices de precipitação ocorrem no período de março a meados de maio (com uma precipitação pluviométrica anual de até 750 mm) e o período de secas mais rigorosas ocorre entre agosto e dezembro (com uma precipitação média que não ultrapassa 15 mm).

A umidade relativa do ar varia cerca de 20%, permanecendo com média relativa anual em torno de 71% para o período de 2012 (INMET, 2014). A umidade relativa do ar é maior durante o período chuvoso e menor durante o período de estiagem, atingindo mínimas nos meses de novembro. A insolação é uma das mais elevadas do Brasil, com média diária de 7,22 h (mínima de 6,0 h em fevereiro na estação úmida e máxima de 8,3 h em outubro na estação seca) e a média anual em torno de 2.600 horas/ano.

A grande incidência de energia solar corrobora com temperaturas elevadas e pequenas variações ao longo do ano. Assim a temperatura média anual é de 27,2°C, ultrapassando os 40° C no mês de novembro e nos meses mais frios, a temperatura média do ar é cerca de 25°C (entre os meses de junho e julho). A amplitude térmica diária varia entre 8° e 10°C, correspondente a cerca da metade da oscilação da temperatura mensal (INMET, 2014).

1.5.2 Hidrografia

A rede hidrográfica corresponde a Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu e Faixa Litorânea Norte de Escoamento Difuso. Devido as características climáticas, os principais rios da região são intermitentes, ou seja, possuem fluxo apenas durante o período das chuvas (março a maio); a partir de junho, com o início do período seco, o fluxo desses rios diminui continuamente, chegando a ser nulo em novembro, mês de maior temperatura anual, e permanece assim até fevereiro, no final do período seco (Nascimento, 2009; Souto, 2009). Este cenário colabora para que a zona costeira tenha um aporte de sedimentos reduzido.

1.5.3 Ventos

A ação eólica está associada à formação de ondas e correntes, que consiste num agente modelador do ambiente praias, uma vez que influencia o sistema hidrodinâmico (Franco *et al.*, 2012). Os ventos da região podem ser considerados como um dos principais responsáveis pela dinâmica costeira por condicionar formação de ondas e correntes que influenciam os

processos morfodinâmicos de erosão e acreção nas praias (Amaro & Araujo, 2008). Segundo Amaro e Vital (2008), predominam na região os ventos alísios de SE, NE e E, influenciados pela Zona de Convergência Intertropical (ZCI), sendo duas as direções principais: uma SE e outra ENE. Os ventos de SE, mais brandos, ocorrem entre os meses de março a julho com velocidade média de 4,8 m/s, já os ventos de E são de intensidade intermediária e os de NE, que surgem entre os meses de agosto a dezembro, apresentam velocidades mais fortes, com médias mensais de 7,7 m/s (Chaves *et al.*, 2006; Nascimento, 2009) e guiam a deriva litorânea.

De acordo com as informações obtidas da estação meteorológica de Macau-RN A317 do INMET, a velocidade média dos ventos, durante o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2014 foi de $4,81 \pm 2,0$ m/s, com direções variando predominantemente entre NE, E e SE.

1.5.4 Ondas

Na área de estudo, as ondas são predominantemente nordeste (NE), podendo variar conforme a morfologia da própria linha de costa. Na praia de Soledade, por exemplo, Chaves (2005) observou ondas predominantemente de NE, com altura média de 35 cm, variando entre 13 e 72 cm; e um período médio de 5 segundos, variando em torno de 3,6 a 8 segundos. Períodos de ondas com menores valores foram observados entre os meses de maio e agosto. Já os períodos de ondas com maiores valores foram descritos em janeiro, abril e junho. O tipo de arrebentação característica para essa região é do tipo mergulhante.

Lima *et al.* (2012b) mediram ondas de NE com período médio (T_p) de 8,05s e altura significativa (H_s) de 0,89m, podendo chegar a períodos de 22,85s e 2,2m de altura. De novembro de 2010 a janeiro de 2011, maior coleta contínua de dados, os autores observaram período médio de 10,17s, com máximas de 17,29s e mínimo de 4,01s.

Esses resultados são consistentes com os apresentados por Matos *et al.* (2011) em modelagens da agitação marítima com o modelo SWAN. Esses autores conseguiram modelar o comportamento das ondas a partir dos resultados do modelo de previsão da agitação marítima Wavewatch III, encontrando valores muito semelhantes aos parâmetros obtidos *in situ*. De dezembro de 2010 a fevereiro de 2011, eles observaram ondas com alturas significativas médias variando de 0,74 m a 1,15 m e períodos médios em torno de 11 segundos.

1.5.5 Correntes e Maré

Lima *et al.* (2012b) observaram que as correntes de maré vazante são predominantemente de SW com velocidade média de 0,10 m/s, enquanto as correntes de maré enchente (mais intensas) são de NW a NE, com velocidade média de 0,12 m/s. As maiores velocidades de correntes (até 0,37 m/s) ocorrem durante as marés de sizígia durante os meses que os ventos sopram de NE, certamente influenciando nas maiores intensidades das marés enchente, que atingem de fevereiro a abril e de setembro a outubro as maiores amplitudes médias (0,94 m).

De acordo com a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (Velozzo & Alves, 2006), na região do litoral setentrional do RN, o regime de maré é classificado como de meso-maré e semidiurno com nível de maré médio da ordem de 1,3 m, nível médio de maré alta de sizígia de aproximadamente 2,8 m e a amplitude de maré de quadratura em torno de 1,3 m, sendo caracterizado por dois eventos de preamar (maré de enchente) e dois de baixa-mar (maré de vazante). Segundo Nascimento (2009), as marés de sizígia, que ocorrem nos períodos de lua cheia e nova chegam a atingir verticalmente uma amplitude média de 0,93 m enquanto que nas marés de quadratura (que ocorrem no período de lua crescente e minguante) atingem uma amplitude média de 0,32 m.

Segundo Ferreira *et al.* (2014), os processos hidrodinâmicos no litoral setentrional do Rio Grande do Norte ocorrem sob a influência dos ventos alísios de nordeste e sudeste e pela Corrente Norte do Brasil (CNB) que se desloca de leste para noroeste paralelo ao continente com vetores de corrente predominantes em SW, em maré enchente, e N-NE/NW, em maré vazante.

Os processos hidrodinâmicos atuantes são determinados por ondas de energia moderada junto à costa e acompanham as principais direções dos ventos dominantes (NE-E), com alturas de 50 a 118 cm e período entre 4 e 8 segundos (Matos *et al.*, 2011) e regime de mesomarés semidiurnas, com máxima de 2,9 m durante a maré de sizígia (preamar) e mínima de 0,43 m durante a maré de quadratura (Vital *et al.*, 2008). A corrente litorânea é a responsável pelo transporte de sedimentos em suspensão oriundos da ação do retrabalhamento das ondas ao longo do litoral, sendo fundamental para os processos de erosão e acreção.

1.6 CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

A área de estudo é delimitada como zona costeira e, conforme destaca Souto *et al.* (2006), o modelamento das formas de relevo nesta área é resultante da ação constante dos

processos do meio físico, das condições climáticas, das variações do nível do mar, da natureza das sequências geológicas, das atividades neotectônicas e do suprimento de sedimentos carreados pelos rios e oceano, que controlam o desenvolvimento de feições erosivas e construtivas na faixa litorânea. Dessa forma, ressalta-se a importância de caracterizar a geologia e a geomorfologia do local como forma de entendimento dos processos que atuam sobre a mesma sejam eles naturais ou antrópicos, bem como pela sua alta sensibilidade ambiental.

1.6.1 Contexto Geológico

A Bacia Potiguar está instalada na Província Borborema (Almeida *et al.*, 1977), limitando-se, a noroeste, com a Bacia do Ceará; a Sul, com o embasamento cristalino; a Norte, com o Oceano Atlântico, na Plataforma Continental, e, a Oeste, com a Bacia Pernambuco-Paraíba. Ela abrange uma área total de 48.000 km² dos quais 26.500 km² encontram-se submersos e 22.500 km² emersos e distribuídos entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará no Nordeste do Brasil, como mostra a Figura 3 (Bertani *et al.*, 1990).

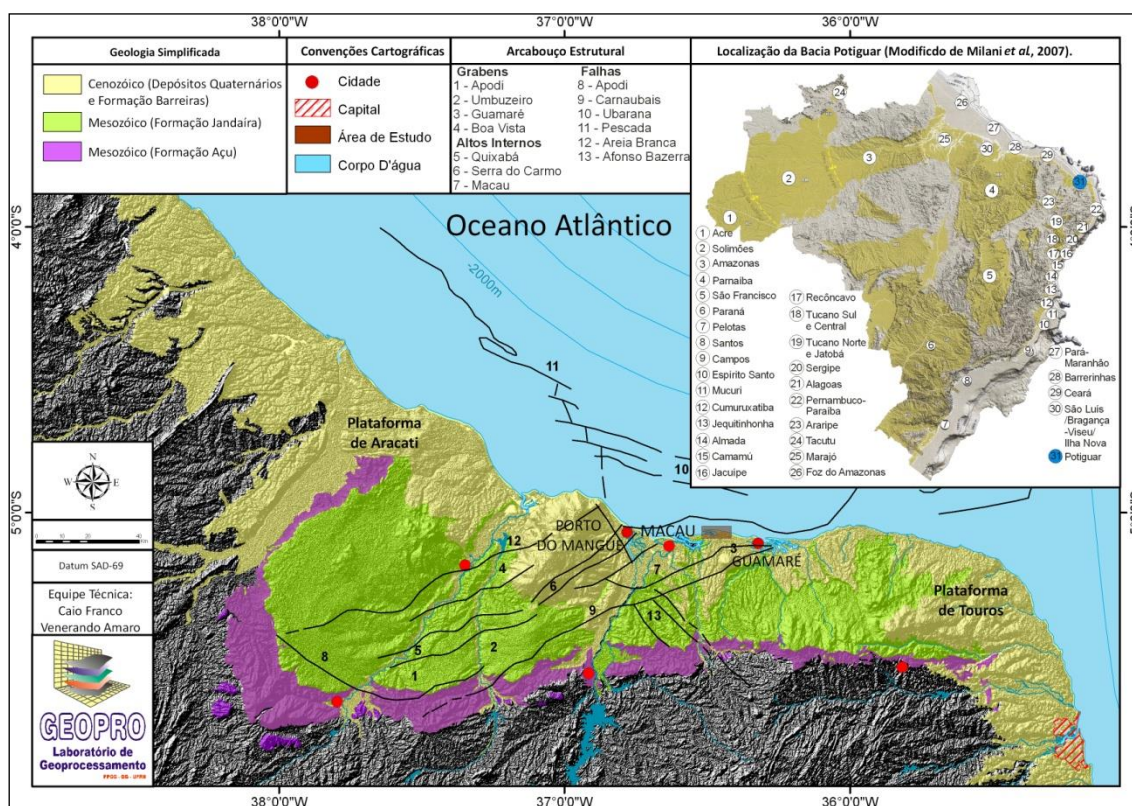


Figura 3: Mapa geológico simplificado e Arcabouço Estrutural da Bacia Potiguar. Fonte: adaptado de Farias (1997).

O arcabouço geológico do local de estudo é composto por rochas sedimentares marinhas e continentais de idade Cretácea, por depósitos continentais que compreendem desde o Terciário até o Quaternário e eventos magmáticos. Estas unidades não afloram no domínio da área estudada sendo que a zona costeira onde está inserida a área de estudo é constituída predominantemente por sedimentos provenientes dos processos deposicionais recentes (leques aluviais, sedimentos de praia, dunas móveis, aluviões, manguezais e coberturas arenosas), caracterizados como depósitos do Holoceno (Depósitos Eólicos Vegetados, Depósitos Eólicos e de Praia, Depósitos de Intermaré e Depósitos de Supramaré) que recobrem as unidades mais antigas ao longo da costa (Silva & Nogueira, 1995; Stattegger *et al.*, 2006).

1.6.2 Contexto Geomorfológico

Amaro (2002) e Souto *et al.* (2004) destacam que a modelagem morfológica do relevo nas zonas costeiras é resultante da ação constante dos processos do meio físico, condições climáticas, variações do nível do mar, natureza das sequências geológicas, atividades tectônicas e do suprimento de sedimentos carregados pelos rios e oceano, fatores que contribuem para o desenvolvimento de feições erosivas e construtivas na faixa litorânea.

A Geomorfologia local é caracterizada, em toda a sua extensão, por praias, dunas e manguezais, definidos por IDEMA (2007) como Planície Costeira e está inserida no compartimento da Costa Semiárida, que se estende desde a Ponta de Itapagé/CE até o Cabo Calcanhar/RN, definido por cristas de praia, dunas, falésias e recifes de arenito (Figura 4). A linha de costa, nesse setor, apresenta orientação geral NW até próximo a Macau/RN, onde assume direção NE até o Cabo do Calcanhar (Silveira, 1964). A Figura 4 mostra o mapa simplificado dos principais domínios geomorfológicos da área de estudo.

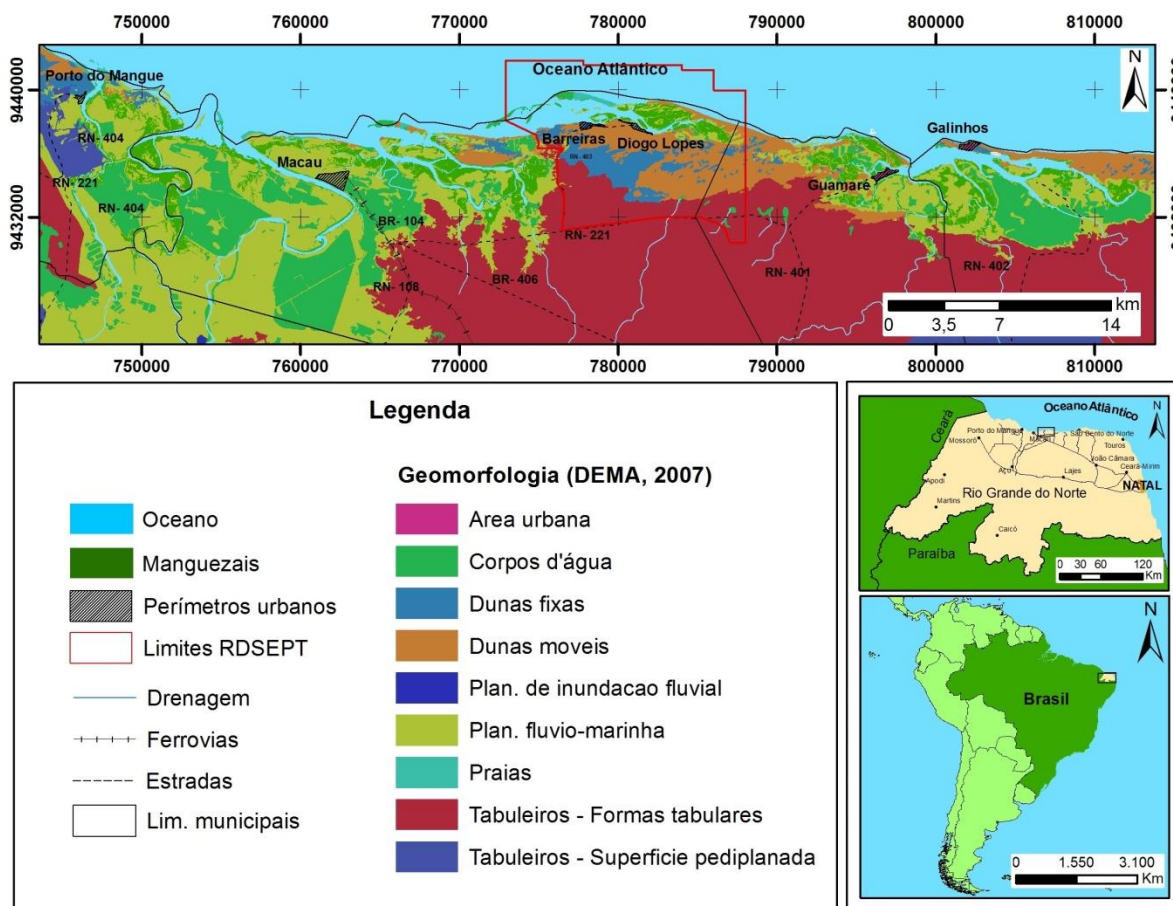


Figura 4: Mapa Geomorfológico da área de estudo. Fonte: IDEMA (2007).

Na área de estudo são identificadas as seguintes feições geomorfológicas: área urbana, dunas móveis e fixas, planície de inundação fluvial, planície flúvio-marinha, praias e tabuleiros.

As Depressões Interdunares estão localizadas nas porções baixas dos campos de dunas, estando geralmente alagadas e em contato com o nível freático. As Dunas Móveis são depósitos eólicos de pouca fixação devido à ausência de vegetação, sendo, portanto, áreas instáveis e vulneráveis à ação dos ventos (Suguió, 2003). Os sedimentos são constituídos por areia fina a média, composta predominantemente por quartzo e fragmentos de conchas de organismos marinhos, apresentando grãos bem arredondados a subarredondados, bem selecionados.

Planície Interdunar e Dunas fixas se caracterizam, principalmente, pela estabilidade em relação ao transporte eólico; essa estabilidade é conferida pela presença de vegetação em ambas as feições (Amaro, 2002 e Amaro, 2004). Representam área entre a zona de praia e o campo de dunas móveis e/ou fixas, com relevo plano caracterizado por ondulações suaves e declividade predominantemente para o oceano e paleodunas. São compostas por sedimentos

eólicos quaternários, constituídos predominantemente por areias finas a médias quartzosas, bem selecionadas e grãos arredondados, onde o modo de transporte principal é por saltação dos grãos, enquanto as partículas finas, como silte e areia muito fina, são levadas em suspensão. Paleoilhas barreiras podem representar linhas de costas pretéritas (Souto *et al.*, 2004) e são semelhantes a ilhas barreiras atuais, porém, com cobertura vegetal e continentalizadas.

Os Depósitos de Mangue recobrem grande parte da área estudada e envolvem as Paleoilhas Barreiras. Estão localizados em áreas protegidas pelos *spits* arenosos e abrigam as zonas de infra, inter e supramaré, encontradas na planície estuarina e são formados por sedimentos finos associados a argilas orgânicas e silte.

Por fim, Planícies Flúvio-Estuarinas são áreas inundadas ao longo dos canais de maré e são caracterizadas por superfícies planas ou com uma pequena inclinação; estão relacionadas aos depósitos de intermaré (Amaro, 2002 e Amaro, 2004) e são constituídos por lamas escuras, ricas em matéria orgânica, restos de troncos de madeira e fragmentos de conchas.

1.7 MANGUEZAL

Na região costeira brasileira os manguezais ocorrem desde a foz do rio Oiapoque, no Amapá, até o município de Laguna, em Santa Catarina (Hers, 1991; Schaeffer-Novelli *et al.*, 2000). Na região Norte do Brasil os manguezais dominam da foz do rio Oiapoque até o Golfão Maranhense representando aproximadamente 70% dos manguezais brasileiros (Souza Filho, 2005; Meneses *et al.*, 2008).

A distribuição desse ecossistema vai depender de variáveis como, nível de inundação, adaptação à salinidade do solo e da água e adaptação às variações de temperatura do ar e da água (Kjerfve, 1990).

Dentre as funções que o manguezal desempenha podemos citar a proteção da linha de costa contra ação erosiva das ondas e marés (Giri *et al.*, 2011), a retenção de sedimentos carregados pelos rios (Eisma, 1986), são áreas de reprodução de várias espécies da fauna aquática e terrestre (Barbier *et al.*, 2011). Porém uma função de extrema importância é a de concentrar nutrientes nas zonas estuarinas permitindo a renovação da biomassa costeira (Dittmar *et al.*, 2006).

O litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte apresenta alguns fragmentos de manguezais ao longo dos seus principais estuários. Nestas regiões ocorre ampla dinâmica costeira, que atua sobre a área de manguezais com rica biodiversidade e elevada sensibilidade ambiental (Amaro *et al.*, 2012; Santos & Amaro, 2013; Santos *et al.*, 2014). As florestas e ilhas de mangue ocupam márgens de rios e canais de maré, como é observado na Figura 5.



Figura 5: Parte dos manguezais da área de pesquisa. **A:** florestas de mangue do distrito de Barreiras em baixamar, **B:** florestas de mangue do distrito de Diogo Lopes em baixamar e **C:** outras florestas de mangue pertencentes a Diogo Lopes em preamar.

Para a área em questão Amaro e Costa (Amaro & Costa, 2012) revelaram a ocorrência de três espécies predominantes: *Rhizophora mangle* L., *Avicennia germinans* L. e *Laguncularia racemosa* L.. Ocorrendo também em várias circunstâncias, regiões de espécies mistas ou de transição entre elas. As características morfológicas de alguns compartimentos espécies podem ser observadas na Figura 6.



Foto A: Morfologia do ramo de *Rhizophora* sp. (folhas, botões, flôr).

Foto B: Morfologia de flores de *Rhizophora* sp..

Foto C: Morfologia de propágulos de *Rhizophora* sp..

Foto D: Morfologia foliar de *Rhizophora sp.*. **D/1** Trata-se da face adaxial (superior), **D/2** face abaxial (inferior).

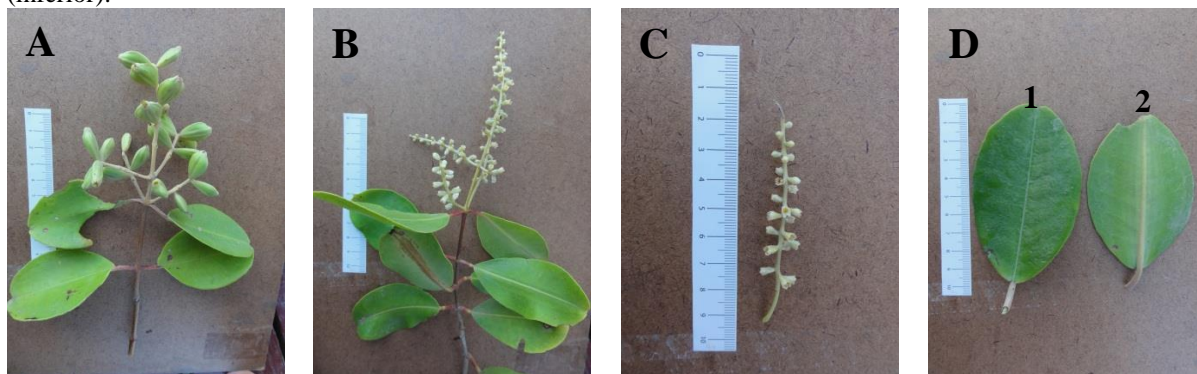


Foto A: Morfologia do ramo de *Laguncularia racemosa* com frutos.

Foto B: Morfologia do ramo de *Laguncularia racemosa* com inflorescência.

Foto C: Morfologia de flores de *Laguncularia racemosa*.

Foto D: Morfologia foliar de *Laguncularia racemosa*. **D/1** Trata-se da face adaxial (superior), **D/2** face abaxial (inferior).

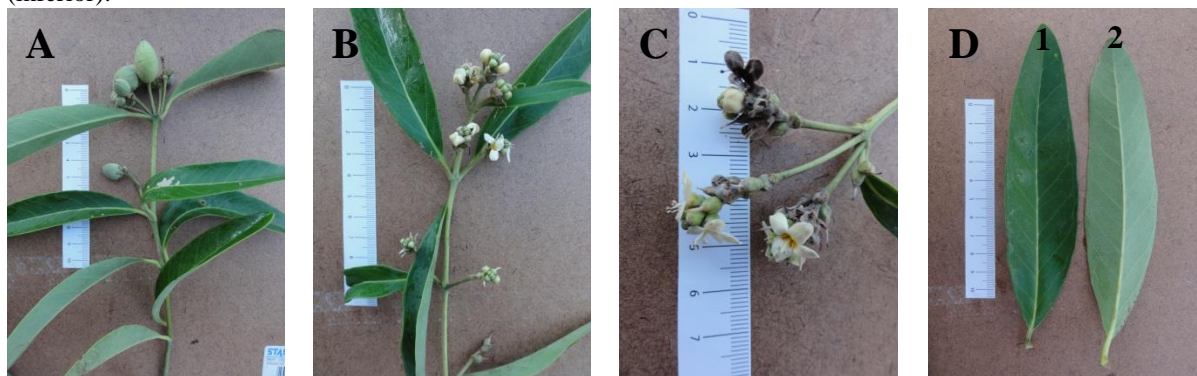


Foto A: Morfologia do ramo *Avicennia schaueriana* com frutos.

Foto B: Morfologia do ramo de *Avicennia schaueriana* com inflorescência.

Foto C: Morfologia de flores de *Avicennia germinans*.

Foto D: Morfologia foliar de *Avicennia schaueriana*. **D/1** Trata-se da face adaxial (superior), **D/2** face abaxial (inferior).

Figura 6: Análise morfológica de alguns compartimentos verdes das espécies de mangue ocorrentes na área de pesquisa.

1.8 A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS NATURAL NA ZONA COSTEIRA

Historicamente, a ocupação do território brasileiro sempre esteve mais concentrada nas regiões próximas ao litoral, e em função disso é nessa área que está localizada boa parte da população, assim como do produto interno bruto - PIB do país. Com a indústria do petróleo e gás natural isso não é diferente, não apenas pela demanda localizada dos mercados consumidores, como também pela própria relevância da movimentação de petróleo cru e derivado por via marítima (PNGC, 2015). 91% da produção nacional de petróleo e 72% da produção de gás natural são provenientes de bacias marítimas (ANP, 2013a). Mesmo para as bacias terrestres, a despeito da sua extensão territorial, 67% do petróleo produzido se origina em municípios localizados na Zona Costeira, nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Bahia e Espírito Santo (PNGC, 2015).

A infraestrutura, a logística de processamento e de movimentação de petróleo e derivados do país foi projetada e instaladas em função do refino do petróleo importado por via marítima. Portanto, em função da otimização dos custos de transporte, tanto na distribuição de derivados, quanto no abastecimento das refinarias, grande parte da capacidade de refino encontra-se próxima ao litoral, nas regiões com maior concentração de mercado consumidor (PNGC 2015).

Para evitar ou minimizar eventuais impactos decorrentes do crescimento das atividades de exploração e produção, predominantemente localizadas nas bacias sedimentares marítimas, é necessário o constante aprimoramento de medidas de prevenção e controle, especialmente por meio da adoção de planos de contingência e de sistemas de gerenciamento de segurança operacional. Estes, quando aprovados pelo órgão ambiental competente, constituem no primeiro recurso para o enfrentamento de incidentes com vazamento de óleo. Esses planos se integram em “Planos de Área” (Decreto nº 4871/2003) e em um Plano Nacional de Contingência-PNC (Decreto nº 8.127, de 22 de outubro de 2013), conforme a magnitude do acidente. Enquanto os planos de área são coordenados pelo Ministério do Meio Ambiente, no PNC, a atuação é compartilhada, com base em um Grupo de Acompanhamento e Avaliação, constituído pelo Ibama, Marinha do Brasil e ANP (PNGC 2015, p 44-45).

No Rio Grande do Norte, com a criação, em 1983, da Coordenadoria do Meio Ambiente (CMA), subordinada à Secretaria de Planejamento do Estado, teve início o programa de preservação e monitoramento do meio ambiente, bem como das atividades poluidoras e degradadoras (Grigio *et al.*, 2005).

No setor do petróleo, uma reavaliação de métodos e culturas gerenciais foi necessária, devido às suas atividades serem de alto risco, potencialmente poluidoras e seus produtos intrinsecamente poluentes (Gomes *et al.*, 2001).

Os impactos que um acidente pode causar são dos mais diversos e abrangem desde danos econômicos, por problemas causados na indústria pesqueira, ou qualquer indústria que utilize recursos marinhos como matéria prima, até a inutilização de regiões turísticas (Paladino, 2000)

1.8.1 Petróleo e Meio Ambiente

De modo geral, a intensidade do impacto e tempo de recuperação tende a ser, diretamente proporcionais à quantidade de óleo presente em um ambiente ou local restrito.

Esta é uma correlação clara, apesar de, na prática, haver exceções, onde vazamentos menores causam maior impacto biológico do que grandes vazamentos. Aspectos como a duração da exposição dos organismos ao poluente e a condição do mesmo durante o contato também são consideráveis.

O contato dos organismos com frações tóxicas do óleo pode levar à morte por intoxicação: os componentes tóxicos do petróleo são solúveis em água, o que torna os organismos marinhos mais vulneráveis uma vez que absorvem estes contaminantes pelos tecidos, brânquias, por ingestão direta da água ou de alimento contaminado (GESAMP 2003). A toxicidade aguda (exposição em curto período de tempo, mas em elevadas concentrações) e a toxicidade crônica (exposição longa e com baixas concentrações) geram respostas diferentes nos organismos e na comunidade como um todo.

1.8.2 Processos que acontecem durante um derramamento de óleo

No caso de acontecer derramamento de óleo no mar; uma série de eventos pode acontecer ao óleo derramado: ele imediatamente sofre alterações da sua composição original, devido a uma combinação de processos físicos, químicos e biológicos chamados conjuntamente de intemperismo. Este se inicia imediatamente após o derrame e se processa a taxas variáveis, dependendo do tipo de óleo e condições ambientais. A taxa do processo não é constante, sendo mais efetiva nos primeiros períodos do derrame (Fernandes, 2001 e Paladino 2000).

1.8.3 Consequências nos ecossistemas

Um derrame de óleo, por menor que seja, tem sempre consequências negativas. Estas consequências são geralmente graves: em nível ambiental e econômico. A extensão dos efeitos de um acidente deste tipo depende de um conjunto de fatores agravantes, como por exemplo, o volume e as propriedades do produto derramado, condições meteorológicas durante o derramamento (vento, agitação do mar), época do ano, sensibilidade do local e medidas de combate implementadas.

Os derramamentos de óleo põem em risco os habitats e ecossistemas, especialmente os mais sensíveis. Isto é particularmente grave quando são atingidas áreas protegidas, povoadas por fauna ou flora raras e em vias de extinção. Estes impactos podem também variar com o tipo de óleo e sua composição, e época do ano em que ocorre o acidente.

Em termos gerais, podem-se referir como algumas consequências para o ambiente o fato de o petróleo impedir as trocas gasosas através da água (menor oxigenação da água e consequente redução de processos de autodepuração) e infiltrar-se em lençóis subterrâneos, destruindo plantas e animais. Além disso, a partir do material derramado, são liberados chumbo e outros metais pesados para a atmosfera, contaminando-a. Também pode haver alteração do pH da água. Podendo os efeitos nos ecossistemas podem variar muito com a época do ano em que ocorre o acidente.

1.8.4 Consequências nos Ecossistemas Costeiros

Esta região é extremamente rica, concentrando grande parte da biodiversidade marinha. Alguns dos ecossistemas costeiros típicos da costa brasileira são os manguezais, marismas, praias, costões rochosos, planícies de marés e recifes de coral. As águas costeiras e os fundos arenosos /rochosos rasos também são considerados ambientes costeiros.

Por serem regiões costeiras, estes ecossistemas são bastante vulneráveis ao impacto dos vazamentos de óleo pelos seguintes motivos: a grande maioria dos acidentes ocorre em águas costeiras, onde se concentram os navios, terminais e operações de carga e descarga. Os ecossistemas costeiros, com sua elevada biodiversidade estão sujeitos a uma variedade de impactos ambientais, especialmente os mais sensíveis como os manguezais, os ambientes abrigados das ondas e os recifes de corais.

Uma vez que o óleo flutua na água do mar, as manchas atingem a zona entremarés destes ambientes, onde os impactos podem ser severos. Os ecossistemas costeiros e seus principais agravantes são reações ocorridas nos: manguezais, marismas, praias arenosas, costões rochosos, recifes de coral, substratos marinhos e em águas oceânicas.

1.8.5 Manguezais e os impactos provocados por derrame de petróleo

O manguezal é um ecossistema costeiro de transição entre os ambientes terrestres e aquáticos, característicos de regiões tropicais e subtropicais e sujeitos a regimes de marés. Ocorre em regiões costeiras principalmente abrigadas, sendo considerado um relevante gerador de bens e serviços.

Entre os ambientes costeiros, o manguezal pode ser classificado, em termos de potencial de vulnerabilidade aos impactos de derramamento de óleo, como o ecossistema mais sensível. Tal vulnerabilidade é baseada na interação da costa com processos físicos relacionados com a deposição do óleo, permanência deste no ambiente e extensão do dano

ambiental. Além disso, é fundamental ressaltar também que não existem técnicas que permitam limpar ou remover completamente o petróleo dos manguezais, podendo oferecer danos adicionais maiores que o próprio óleo. O manguezal sempre apresenta sensibilidade máxima. A penetração do óleo é limitada graças à presença dos sedimentos lamosos com baixa permeabilidade e saturados de água, porém a penetração do óleo pode ocorrer por meio das escavações feitas pelos organismos que habitam nos manguezais constituindo um dos habitats mais sensíveis, devido à elevada riqueza e valor biológico, e funcionam como verdadeiras armadilhas de retenção de óleo, ou seja, o tempo de permanência do óleo é prolongado em função da menor ação de limpeza natural e manual.

O desfolhamento constitui-se na primeira resposta negativa do manguezal ao derrame de óleo, sendo este severo ou moderado, dependendo da espessura da camada de óleo, do tempo de residência do óleo e de sua toxicidade. A perda acentuada de folhas e de brotos após o derrame, não é compensada pela produção de novas folhas, ocorrendo uma ausência progressiva de energia com a redução da superfície fotossinteticamente ativa, impedindo a recuperação vegetal por si só. Pelo menos enquanto houver óleo residual, as plântulas de mangue em desenvolvimento não chegam a atingir a maturidade. A destruição do manguezal reduz a produtividade estuarina e uma vez destruída, sua recuperação natural é muito lenta, mesmo depois de cessado o efeito do agente causador do impacto.

1.9 CARTAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO

As Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (Cartas SAO), constituem ferramentas essenciais e fonte primária de informações para o planejamento de contingência e para a implementação de ações de resposta a incidentes de poluição por óleo, permitindo identificar os ambientes com prioridade de proteção e as eventuais áreas de sacrifício, possibilitando o correto direcionamento dos recursos disponíveis e a mobilização adequada das equipes de contenção e limpeza. Além disto, as mesmas têm um enorme potencial para emprego no planejamento ambiental da zona costeira e marinha, reforçando os instrumentos políticos e administrativos de ordenamento territorial.

Assim sendo, em 2002 foi preparado um Plano Cartográfico para o Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao Óleo da zona costeira e marinha, tomando como unidade cartográfica as Bacias Sedimentares e prevendo o mapeamento em três níveis:

- Estratégico (em escala da ordem de 1:500.000, abrangendo toda a área de uma determinada bacia, ou de bacias contíguas, em caso de bacias menores);
- Tático (em escalas de 1:150.000, para todo o litoral da bacia mapeada) (Figura 7);
- Operacional ou de detalhe (em escalas de 1:10.000 a 1:50.000, para locais de alto risco/sensibilidade) (Figura 8);

Em relação ao conteúdo, as Cartas SAO incluem quatro grupos de informações principais:

- Sensibilidade ambiental do litoral ao óleo;
- Recursos biológicos sensíveis ao óleo existentes na área da carta;
- Atividades socioeconômicas que podem ser prejudicadas por derramamentos de óleo ou afetadas pelas ações de resposta;
- Informações para a implementação de ações de resposta a derrames, como estradas de acesso à costa, aeroportos, rampas para barcos, padrões de circulação oceânica e costeira, fontes potenciais de poluição por óleo e derivados etc.

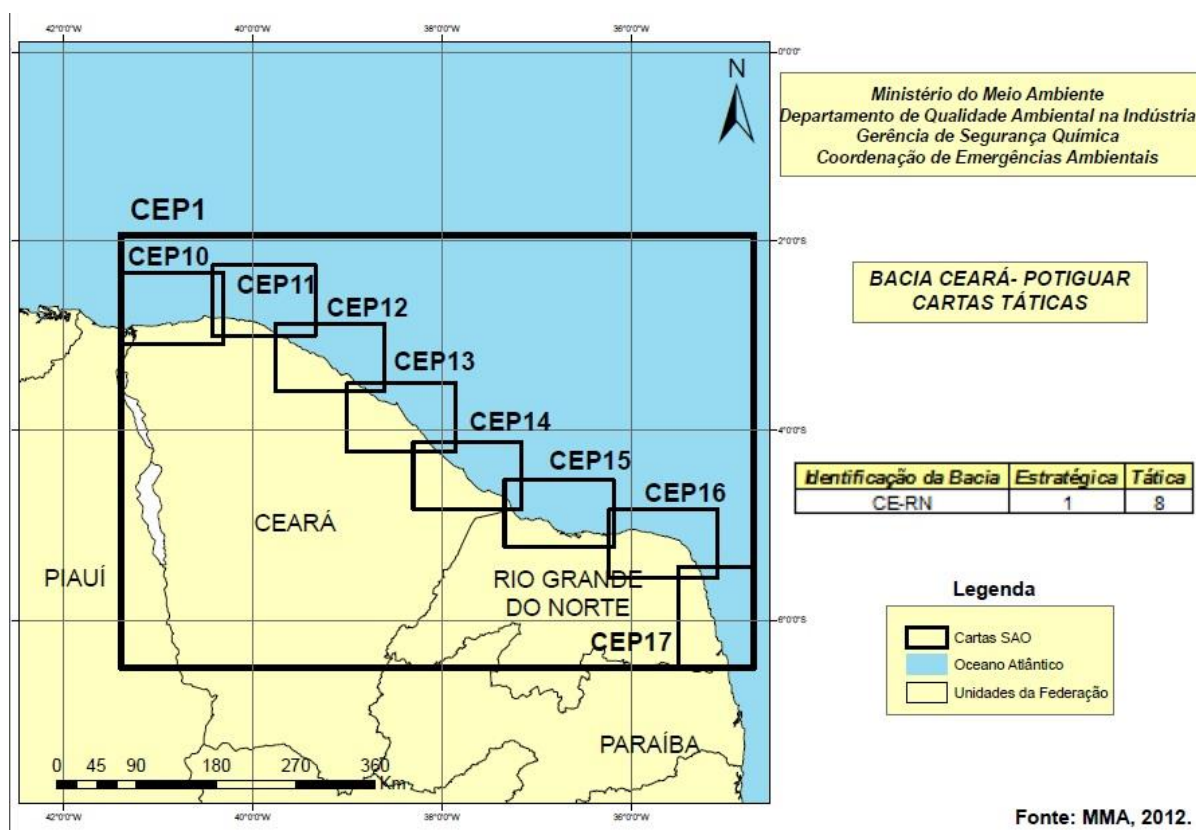


Figura 5: Cartas Táticas para as Bacias do Ceará e Potiguar. Fonte: MMA (2012).

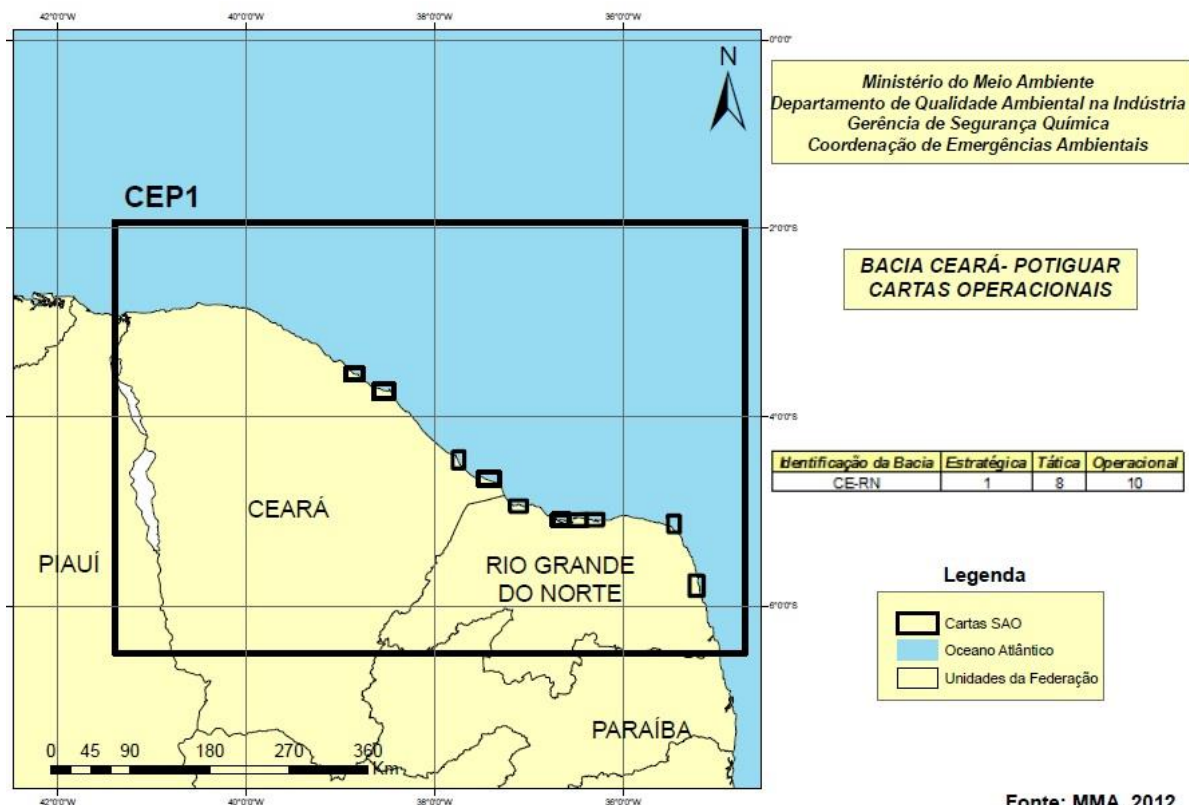


Figura 6: Cartas Operacionais para as Bacias do Ceará e Potiguar. Fonte: MMA (2012).



1.9.1 A sensibilidade da costa

O MMA por meio do *Atlas bacias Potiguar e Ceará (2004)* apresenta as cartas de sensibilidade, especialmente as Cartas SAO operacionais (ou de detalhe) e as cartas táticas de escala intermediária, classificam a linha de costa utilizando um índice de sensibilidade do litoral (ISL). Este índice hierarquiza os diversos tipos de contorno da costa em uma escala de 1 a 10, sendo o índice tanto mais alto quanto maior o grau de sensibilidade.

O ISL é baseado nas características geomorfológicas da costa, fundamentais para a determinação do grau de impacto e permanência do óleo derramado, assim como, em muitos casos, para os tipos de procedimento de limpeza passíveis de serem empregados. A geomorfologia é, também, determinante para o tipo e a densidade das comunidades biológicas presentes na área.

Os manguezais e marismas apresentam elevada diversidade estrutural e funcional, atuando, juntamente com os estuários, como exportadores de biomassa para as regiões adjacentes. Considerando esses elementos, o Quadro 1, apresenta a classificação para as feições costeiras do litoral do Brasil, de acordo com a sua sensibilidade a derramamentos de óleo.

Quadro 1: Tipos de costas com os respectivos índices de sensibilidades e cores associadas. Fonte: MMA (2004).

COR	ÍNDICE	CÓDIGO			TIPOS DE COSTA
		R	G	B	
	ISL 1	119	38	105	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos ▪ Falésias em rochas sedimentares, expostas ▪ Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostas
	ISL 2	174	153	191	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos ▪ Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)
	ISL 3	0	151	212	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias dissipativas de areia média a fina, expostas ▪ Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo "long beach") ▪ Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos), expostos ▪ Campos de dunas expostas
	ISL 4	146	209	241	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias de areia grossa ▪ Praias intermediárias de areia fina a média, expostas ▪ Praias de areia fina a média, abrigadas
	ISL 5	152	206	201	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais ▪ Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação ▪ Recifes areníticos em franja
	ISL 6	0	149	32	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias de cascalho (seixos e calhaus) ▪ Costa de detritos calcários ▪ Depósito de tálus ▪ Enrocamentos ("rip-rap", guia corrente, quebra-mar) expostos ▪ Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)
	ISL 7	214	186	0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planície de maré arenosa exposta ▪ Terraço de baixa-mar
	ISL 8	225	232	0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada ▪ Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada ▪ Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados ▪ Enrocamentos ("rip-rap" e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados
	ISL 9	248	163	0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas ▪ Terraço de baixa-mar lamoso abrigado ▪ Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais
	ISL 10	214	0	24	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deltas e barras de rio vegetadas ▪ Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas ▪ Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado; apicum ▪ Marismas ▪ Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)

1.9.2 Mapas de Sensibilidade ao derramamento de óleo na área de estudo

A prevenção se tornou a melhor estratégia, pois evita o custo elevado das operações de atividades de limpeza, pagamento de indenizações e a restauração dos ambientes impactados por um evento de derramamento de óleo. O conhecimento dos parâmetros ambientais que controlam a dinâmica dos ambientes costeiros local são informações de extrema importância para o entendimento da região.

Sendo assim, desenvolver mapas de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo

em áreas próximas aos locais de exploração petrolífera, passou a ser uma ferramenta necessária como forma de identificar os locais mais sensíveis e que deveriam ser urgentemente atendidos no caso de um derrame de óleo nas redondezas. Na área envolvida nesta pesquisa estão inseridos o Polo Petrolífero de Guamaré e áreas de produção e transporte, estando sujeita a acidentes e/ou vazamentos. Os Mapas SAO dessa área tornaram-se assim imprescindíveis e são apresentados nas Figuras 9, 10 e 11.

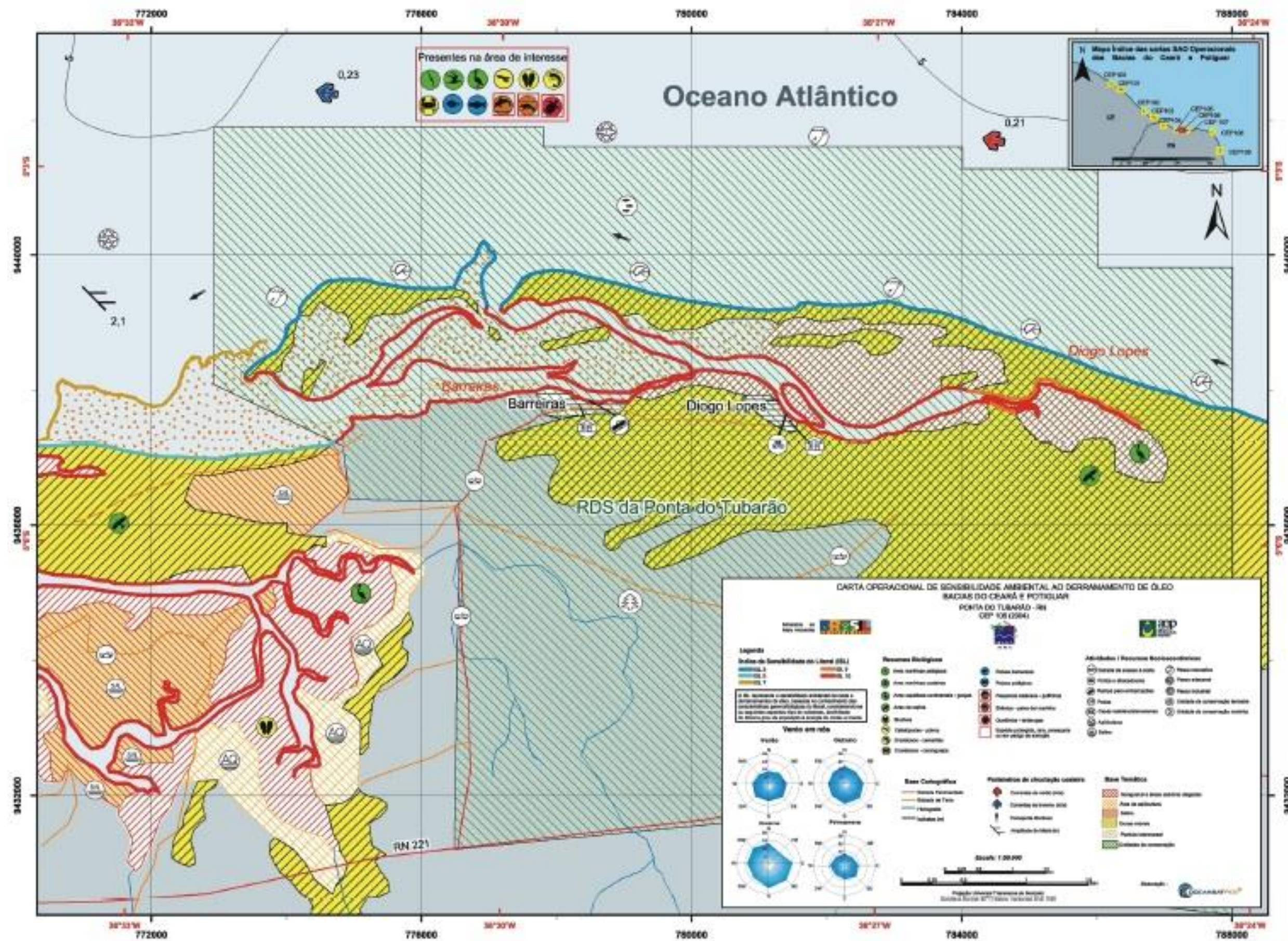


Figura 8: Carta Operacional – CEP 106 mostrando os ISL atribuídos à porção Norte da Zona Costeira do município de Macau. Fonte: MMA (2012).

Com a adoção das Cartas Operacionais, podem-se identificar as áreas prioritárias para as respostas a serem tomadas nos casos de vazamento, logo, o que deve ser considerado, antes de tudo, é a vital importância desses ambientes. A preservação e o uso adequado destes recursos naturais representam um fator para o desenvolvimento local e a sustentabilidade da região.

Os impactos negativos de atividades degradadoras não deveria apenas incentivar nas empresas alocadas e envolvidas, o uso de métodos e técnicas menos agressivos ao meio ambiente, principalmente, no cumprimento da legislação ambiental vigente, como também o incentivo e esforço na preservação dos manguezais. Diante do exposto, evidencia-se que se faz necessário um sistema de Gestão Ambiental como função capaz de contribuir para a construção de uma sociedade cujo desenvolvimento esteja aliado à sustentabilidade, destacando-se a necessidade das empresas responsáveis possuírem qualificação específica para gerenciar os processos produtivos, cuja postura de atuação se oriente numa perspectiva preventiva e/ou mitigadora.

Baseado nesta necessidade Castro (2007) desenvolveu a automação do processo de confecção dos Mapas SAO através do AutoMSA objetivando a minimização das tarefas manuais do usuário e deixar que o sistema processe as informações de entrada, gerando como resultado mapas indexados da linha de costa, que auxiliam na contenção de limpeza e planejamento de contingência em caso de derramamento de óleo na faixa litorânea. Essa automação tende a produzir os mapas digitais com mais rapidez, confiança e precisão nos dados. O AutoMSA pode ser considerado um sistema de apoio à decisão, pois uma vez que se analisam seus resultados, é possível a tomada de providências no sentido de preservar as áreas mais sensíveis e proteger os recursos naturais que possam ser mais prejudicados em curto espaço de tempo. Facilitando a tomada das decisões e direcionando as ações a serem tomadas.

Não só o fato do nível de sensibilidade da costa ser considerado o mais alto quando ocupado por manguezais. A Convenção do Clima e a assinatura do Protocolo de Kyoto, o interesse pelo estudo de fluxos de CO₂ entre ecossistemas terrestres e a atmosfera cresceu substancialmente, principalmente em sistemas florestais das áreas tropicais e sub-tropicais do globo, dentre eles os manguezais. Nessas áreas o crescimento das árvores é mais acelerado, resultando em maiores taxas de fixação de carbono e conseqüente remoção de CO₂ da atmosfera. O Brasil é um dos primeiros países em desenvolvimento a criar regras específicas para obtenção de créditos de carbono dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), espinha dorsal do Protocolo de Kyoto para reduzir as emissões mundiais de gases do efeito estufa. Os MDL são projetos entre os países desenvolvidos com compromisso de

redução de emissões e os países em desenvolvimento, sem compromissos de emissão (Man Yu, 2002).

As regras são bastante claras: projetos de MDL devem promover reduções ou remoções reais, mensuráveis, de longo prazo, assim como ajudar o país a alcançar o desenvolvimento sustentável. Os critérios propostos objetivam auxiliar os projetos de MDL a maximizar a geração de benefícios sociais e ambientais, assegurando mecanismos de proteção para as comunidades envolvidas e o meio ambiente.

A questão que se coloca neste trabalho é transformar a preservação das florestas de mangue da área de pesquisa em um projeto de MDL, que de fato promova o desenvolvimento sustentável da região, baseado no monitoramento destas florestas. Foi verificado que até os dias de hoje o monitoramento recebeu pouca atenção das partes envolvidas relacionadas a projetos de MDL devido ao fato de ser um processo ainda por acontecer.

Na busca da devida atenção e contribuição científica, esta Tese foi estruturada em artigos científicos sequenciados que se completam numa forma lógica e necessária, a possibilitar o monitoramento de forma remota e não destrutiva das florestas de mangue, visando à geração de informações necessárias à criação de um projeto de MDL.

Diante dos novos produtos de sensoriamento remoto e técnicas de processamento digital de imagens, surgem novas idéias voltadas ao mapeamento dos manguezais para superar as limitações impostas pela natureza da imagem (Ótico ou SAR) e pelas ferramentas de processamento de imagem (classificação baseada no pixel). Devido também ao fato do manguezal ser constantemente inundado pelas marés, a presença de água salobra influencia diretamente na reflectância.

Buscando a minimização desses fatores negativos, métodos de classificações apropriados tiveram seu desenvolvimento associado ao avanço das técnicas de segmentação de imagens (Blaschke, 2010). Estas técnicas objetivam dividir imagem digital em regiões homogêneas e espacialmente contínuas, denominadas objetos (Flanders *et al.*, 2003). O processo metodológico utilizado nesta Tese está representado na Figura 12.

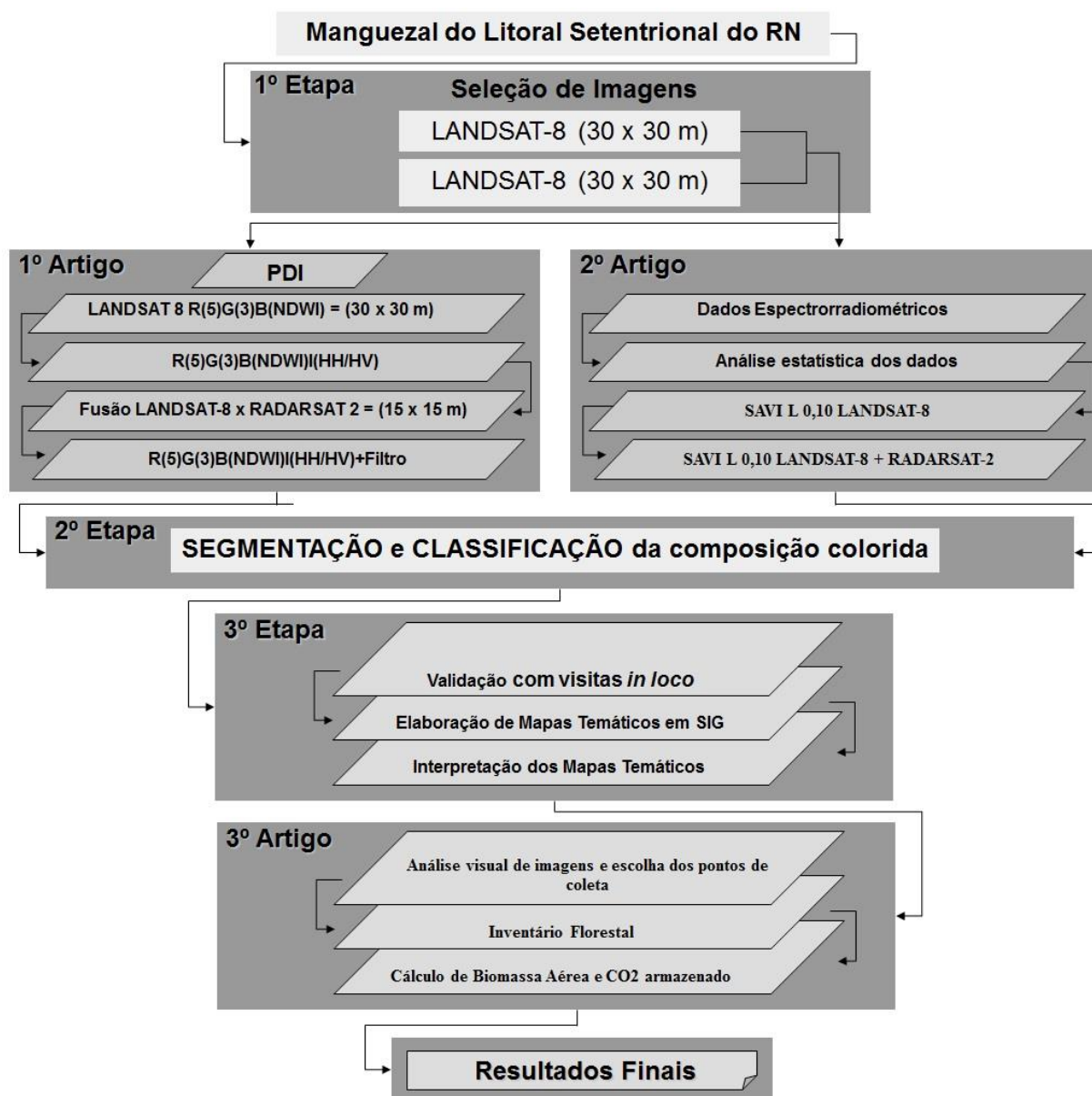


Figura 10: Fluxograma da metodologia empregada na Tese.

Capítulo 2

**CLASSIFICAÇÃO DE ESPÉCIES DE MANGUE NO NORDESTE
DO BRASIL COM BASE EM IMAGENS HÍBRIDAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

CAPÍTULO 2

(1º Artigo)

APRESENTAÇÃO

Este artigo intitulado “**Classificação de Espécies de Mangue no Nordeste do Brasil com Base em Imagens Híbridas de Sensoriamento Remoto**” aceito para publicação no **Anuário do Instituto de Geociências, ISSN 1982-3908** (*Comprovado via Declaração de Aceitação apresentada no final desta Apresentação*). Aborda uma aplicabilidade metodológica baseada em Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto para a identificação, segmentação e classificação de espécies de mangue em manguezais do Nordeste do Brasil.

De modo geral, diversos autores realizam a avaliação ou validação de novas metodologias comparando-as com as já existentes, observando como as novas metodologias superam problemas ou obstáculos que as outras denominadas de clássicas não conseguem superar. Desse modo, este artigo permite avaliar como o método aqui utilizado pode ser aplicado em nível de condições estruturais de espécies de mangue, levando em consideração a diversidade ambiental e da área estudada propriamente dita. Corroborando ao avanço dos estudos e entendimento da dinamicidade dos manguezais desta região.

Este artigo, além de ser o primeiro da Tese, serve de referência metodológica e de base de dados para os artigos subsequentes, não menos relevantes e seguindo uma sequência lógica, complementar e alcançar o Objetivo Geral da Tese.

Neste processo, é fundamental avaliar as potencialidades e limitações de cada imagem utilizada. Este estudo fornece informações e mostra o poder adaptativo e a espacialização das espécies dentro das florestas de mangue e ao longo dos estuários. Corroborando-se também que o Sensoriamento Remoto e o Geoprocessamento são ferramentas fundamentais a serem consideradas no mapeamento e estudo de manguezais, gerando conhecimento para o planejamento e uso sustentável dos manguezais, em face às pressões antrópicas, e para a tomada de decisões na gestão costeira integrada, principalmente em nível local e regional.



Rio de Janeiro, 28 de setembro de 2016.

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o manuscrito “**CLASSIFICAÇÃO DE ESPÉCIES DE MANGUE NO NORDESTE DO BRASIL COM BASE EM IMAGENS HÍBRIDAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**” de autoria de Bruno Cesar Pereira da Costa, Venerando Eustáquio Amaro e Anderson Targino da Silva Ferreira foi aprovado para publicação no Anuário do Instituto de Geociências. O manuscrito tem previsão de publicação para o mês de fevereiro de 2017.

Ismar de S. Carvalho
Ismar de Souza Carvalho
Editor

Classificação de Espécies de Mangue no Nordeste do Brasil com Base em Imagens Híbridas de Sensoriamento Remoto

Classification of mangrove species in the Northeastern of Brazil based on hybrid images of remote sensing

Bruno Cesar Pereira da Costa¹; Venerando Eustáquio Amaro^{1,2} & Anderson Targino da Silva Ferreira³

¹ *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Lagoa Nova, 59078-970, Caixa Postal 1524, Natal /RN, Brasil*

² *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Lagoa Nova, 59078-970, Caixa Postal 1639, Natal/RN, Brasil*

³ *Universidade Guarulhos – UNG. Programa de Mestrado em Análise Geoambiental, Laboratório de Geoprocessamento. Praça Tereza Cristina, 229, Centro, 07023-070, Guarulhos/SP, Brasil*

E-mails: brunocesarpc@hotmail.com; venerandoamaro@gmail.com; atargino@prof.ung.br

Resumo

As imagens de satélites têm sido utilizadas para mapear, monitorar e quantificar a qualidade dos recursos naturais. O mapeamento detalhado da vegetação de mangue é uma demanda crescente por se tratar de um valioso instrumento de gestão, manutenção e conhecimento do ecossistema manguezal frente às modificações provocadas pelas atuações antrópicas e/ou naturais. Este trabalho combinou dados multiespectrais da região do visível e infravermelho do satélite LANDSAT-8 com imagem da faixa espectral das micro-ondas do satélite RADARSAT-2 na segmentação e classificação de manguezais no Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. A composição híbrida entre o sistema óptico e de micro-ondas mostraram excelente desempenho na identificação desta unidade geoambiental e permitiram maior realce das propriedades estruturais e florísticas das espécies de mangue. Os resultados permitiram delimitar a área geral de ocupação dos manguezais em aproximadamente 5.538 ha e revelaram a ocorrência de quatro principais condições estruturais de espécies: *Rhizophora mangle* (porte alto e adensamento convencional), *Rhizophora mangle* (porte baixo e adensado), *Avicennia schaueriana* e regiões de espécies mistas. *R. mangle* é a espécie de mangue mais abundante na área estudada, ocupando área de aproximadamente 3.513 ha, cerca de 63% de todo o manguezal da área estudada. Regiões mistas de espécies ocupam área de 1.142 ha, representando 21% do total. *A. schaueriana* ocupa área de 882 ha, cerca de 16% do total. Os resultados ainda mostraram que a diferença na reflectância das áreas de mangue ocupadas pelas espécies ocorrentes não se dá apenas influenciada pelo teor de clorofila das espécies, pela prevalente condição ambiental, do solo e da água de fundo, mas principalmente pelo espaçamento das copas e densidade do dossel para cada espécie ocorrente. Este estudo buscou atender às expectativas de maior eficiência em levantamentos espaço-temporais com alta acurácia para o monitoramento da qualidade dos ecossistemas manguezais, altamente sensíveis às alterações ambientais e como subsídio à sua preservação.

Palavras-chave: LANDSAT-8; RADARSAT-2; mangue; condições estruturais;

Abstract

Satellite images have been used to map, to monitor and quantify the quality of natural resources. The detailed mapping of mangrove vegetation is a growing demand because it is a valorous management instrument, maintenance and knowledge of the mangrove ecosystem related to human activities and/or natural. This research has combined multispectral data from the visible area and infrared LANDSAT-8 satellite with images of spectral bands of the microwave of RADARSAT-2 satellite in the segmentation and classification of some mangroves in Brazil's Northeastern. The hybrid composition between the optical system and microwave have showed excellent performance in identifying the geoenvironmental unit and allowed greater emphasis on floristic and structural properties of mangrove species. The results allowed the delimitation of the general area of mangrove's occupation approximately in 5.538 ha and revealed the occurrence of four main species structure conditions: *Rhizophora mangle* (high/conventional), *Rhizophora mangle* (low/dense), *Avicennia schaueriana* and regions of mixed species. *R. Mangle* is the most abundant mangrove specie in the studied area occupying approximately an area of 3.513 ha about 63% of all mangrove. Mixed regions of species occupies area of 1.142 ha, representing 21% of total. *A.schaueriana* occupies an area of 882 ha, about 16% of total. The results indicate that the difference in reflectance of mangrove species is not just influenced by chlorophyll content by the species, the prevailing environmental conditions, soil and bottom water, but mainly by spacing of crowns or density of canopy for each occurring physiognomy/specie. This research aims to attend the expectations for greater efficiency in lifting temporal space with high accuracy for monitoring the quality of mangrove ecosystems, highly sensitive to environmental changes, as subsidy for its preservation.

Key words: LANDSAT-8; RADARSAT-2; mangrove; structure conditions

1. Introdução

Manguezal é um termo ecológico que se refere ao habitat com diversos agrupamentos de árvores e arbustos que formam as comunidades de plantas dominantes em marés, zonas húmidas salinas ao longo das costas tropicais e subtropicais abrigadas (Hamilton & Murphy, 1988). Ecossistemas de manguezais são altamente produtivos e proporcionam diversos serviços ambientais e o bem-estar humano (Seto & Fragkias, 2007; Everitt *et al.*, 2008; Barbier *et al.*, 2011; Salem & Mercer, 2012).

As florestas de mangue fornecem recursos comerciais além de serem locais de reprodução e habitação para diversas espécies animais (Dahdouh-Guebas, 2002). Badola & Hussain (2005) também destacaram o papel fundamental desse ecossistema na estabilização da orla litorânea, onde servem como barreiras naturais dissipando a energia destrutiva das ondas e reduzindo o impacto dos furacões, ciclones, tsunamis e tempestades. A extensão das florestas de mangue mundial foi estimada no ano 2000 em aproximadamente 137.760 km², que representava 0,7% do total de florestas tropicais do mundo (Giri *et al.*, 2011). Por sua

vez, a UNEP-WCMC (2006) estima que a dimensão econômica das florestas de mangue, por exemplo, em Matang na Malásia seja da ordem de 250.000 dólares americanos por km²/ano quando avaliados apenas os produtos pesqueiros oriundos deste ecossistema.

As florestas de mangue estão em declínio em todo o mundo (Valiela *et al.*, 2001; Alongi, 2002; Giri & Muhlhausen, 2008; Giri *et al.*, 2011). Cerca de um terço das florestas de mangue do planeta foram perdidas nos últimos 50 anos. Em vários países as áreas de mangue foram rapidamente convertidas em outros tipos de ocupação, mas as principais ameaças aos manguezais são a exploração dos recursos naturais, desmatamento, mineração, poluição e expansão urbana (Alongi, 2002; Barbier, 2006; Kuenzer *et al.*, 2011).

Os habitats típicos de manguezais são áreas alagáveis e frequentemente de difícil acesso por meios convencionais, o que faz com que os métodos de observação de campo e de pesquisas tradicionais sejam por vezes demorados e onerosos. Portanto, na lida com questões como o mapeamento temático desse ecossistema, em diversas escalas, em longo e curto prazo, o Sensoriamento Remoto (SR) se configura como uma ferramenta para o monitoramento eficiente e de baixo custo (Aschbacher *et al.*, 1995; Wang & Sousa, 2009).

O emprego de Geotecnologias envolvendo os produtos de SR, submetidos às técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) e Geodésia de Precisão, e integrados ao Sistema de Informação Geográfica (SIG), tem sido a base de estudo e identificação desse ecossistema em diferentes regiões do mundo e no Brasil, em diferentes escalas de representação cartográfica (Camargo *et al.*, 2000; Prost, 2001; Souza Filho, 2005; Kampel *et al.*, 2005; Mochel & Ponzoni, 2007; Gonçalves *et al.*, 2009; Barros Pereira *et al.*, 2011). O uso dessas Geotecnologias é essencial aos estudos geoambientais pela habilidade na integração das escalas espacial e temporal, que subsidiem a gestão ambiental costeira (Gowda *et al.*, 1995; Ramsey III *et al.*, 1998; Franco *et al.*, 2012; Santos & Amaro, 2013; Ferreira *et al.*, 2014).

As técnicas mais recentes do PDI tem permitido explorar os conjuntos de dados multifontes, como pela integração de imagem de sensores passivos e ativos, além da aplicação de análises matemáticas que favorecem o realce visual e numérico, e consequente mapeamento dos manguezais (Souza Filho & Paradella, 2002, 2005; Giri *et al.*, 2007; Seto & Fragkias, 2007; Gonçalves *et al.*, 2009; Costa & Amaro, 2012). No entanto, é imprescindível a correspondência entre as escalas de análise nas imagens de satélite e a escala em campo do fenômeno sob investigação (Vaiphasa *et al.*, 2006).

Os sensores ópticos estão na origem dos principais esforços de mapeamento quanto ao tipo de cobertura vegetal, mas o imageamento em áreas costeiras é corriqueiramente afetado negativamente pelo ângulo solar, pelo espalhamento atmosférico e cobertura excessiva de

nuvens. Já os sensores ativos, por não serem afetados por tais fatores, são ainda sensíveis ao teor de umidade e às propriedades estruturais da vegetação. Portanto, as imagens de radar de abertura sintética (SAR, de *Synthetic Aperture Radar*), como do satélite canadense RADARSAT-2, por exemplo, tem potencial discriminativo das propriedades estruturais entre diferentes espécies vegetais e do seu arranjo espacial em classes geoambientais (Souza Filho & Paradella, 2002, 2005; Huang *et al.*, 2007; Blanco *et al.*, 2009). Deste modo, a integração entre as imagens ópticas e de micro-ondas, também conhecida como fusão de imagens, vem se firmando como uma técnica para maximizar a extração de informações relevantes que possibilite a espacialização, considerando os aspectos composicionais e estruturais, das espécies de uma floresta de mangue.

Nos principais estuários e canais de maré do Nordeste do Brasil os manguezais estão distribuídos sob a forma de franjas e fragmentos bordejando os cursos d'água, bosques e florestas. Por estarem frequentemente localizadas próximas às áreas de ocupação antrópica (zonas urbanas e/ou de exploração industrial), tais agrupamentos vegetacionais tem sido alvo de pressões, sobretudo de atividades socioeconômicas como a carcinicultura, parques eólicos, bases de exploração petrolífera, empreendimentos imobiliários, turismo e ocupações desordenadas da expansão urbana. Neste contexto, este estudo tem como objetivo principal explorar a resposta espectral da vegetação de mangue através de imagens híbridas de SR (ópticas e de micro-ondas), permitindo a discriminação visual e também automática, assim como a detecção dos estágios de desenvolvimento das espécies presentes no ecossistema, no setor setentrional da faixa litorânea do RN, após segmentação orientada a objetos e classificação não supervisionada.

2. Área de Estudo

A área de estudo situa-se na porção setentrional do RN, inserida na Mesorregião Central Potiguar, delimitada pelas coordenadas: Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000: -5.0517X/-36.8114Y, -5.0517X/-36.1606Y, -5.1853X/-36.1606Y, -5.1853X/-36.8114Y. Ocupando parte dos municípios de Galinhos, Guamaré, Macau e Porto do Mangue (Figura 1). Trata-se de uma faixa litorânea de aproximadamente 70 km de extensão.

Esta zona costeira é composta por sistema de ilhas barreiras e esporões arenosos, com praias arenosas oceânicas e abrigadas, campos dunares, falésias, canais de maré e estuarinos, feições geoambientais submetidas à ação intensa de processos costeiros, que promovem amplas variações na conformação da linha de costa, com setores de intensa dinâmica de

erosão/deposição de sedimentos (Amaro *et al.*, 2012; Santos & Amaro, 2013; Santos *et al.*, 2014). Os transportes eólico e litorâneo são responsáveis pelas alterações no balanço sedimentar dos ambientes arenosos, promovendo a abertura e o fechamento de canais de marés e a formação de novas ilhas barreiras e barras arenosas (Grigio *et al.*, 2005; Chaves *et al.*, 2006; Souto, 2009; Nascimento, 2009; Santos & Amaro, 2013).

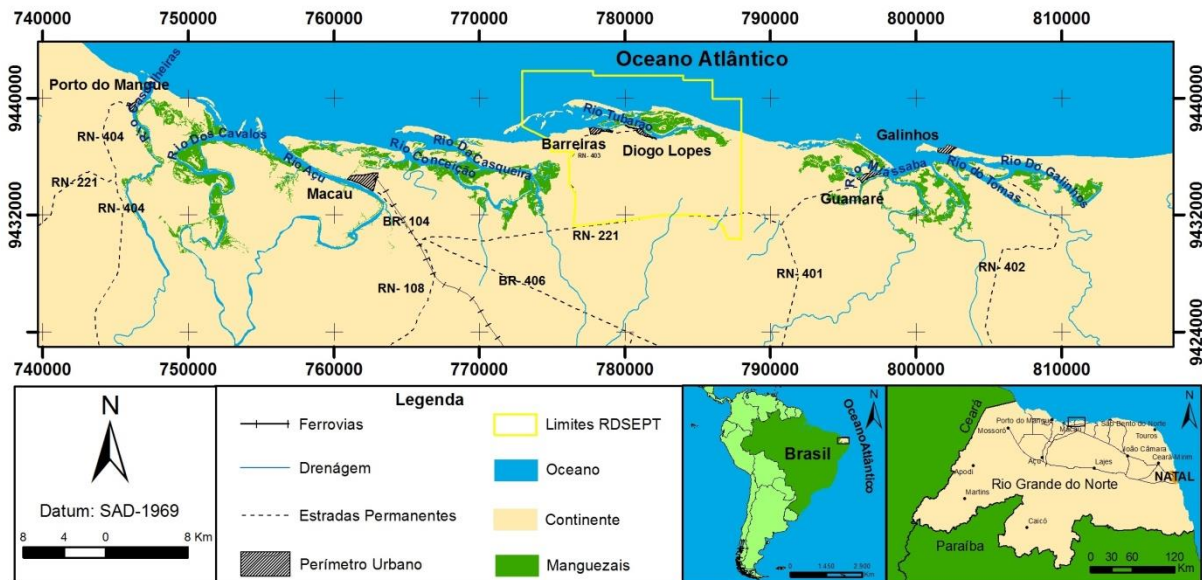


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. Estuários, canais de maré, com respectivos manguezais, e principais vias de acesso.

A proposta metodológica adotada no processamento digital das imagens e na confecção dos mapas temáticos está representada na Figura 2, justificada pela dimensão da área de estudo e sua complexidade geoambiental.

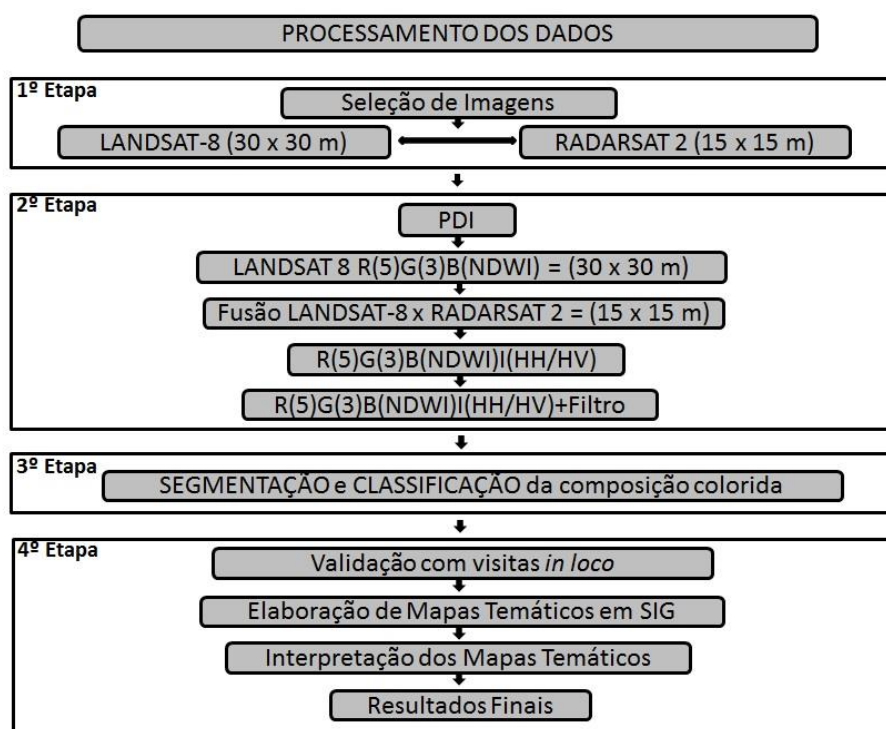


Figura 2 Etapas metodológicas e materiais empregados no processamento dos dados digitais.

3.1 Seleção de Imagens Digitais

As imagens de satélite utilizadas foram aquelas do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite norte-americano LANDSAT-8 (data de imageamento em 17/06/2013), com 8 bandas multiespectrais ópticas entre 0,43-1,39 μm , resolução espacial moderada de 30 m, 16 *bits* de resolução radiométrica, e as imagens do RADARSAT-2 (data de imageamento em 18/04/2012) operacional na banda C (5,55 cm), com polarizações HH e HV e de resolução espacial moderada de 15m. A integração desse conjunto de imagens ópticas e de micro-ondas constitui a confecção das chamadas imagens híbridas. Este conjunto de imagens digitais foram ortorretificadas no Sistema Geodésico *South American Datum 1969* (SAD-69) e tiveram a geometria corrigida a partir de pontos de controle no terreno com o uso de *Differential Global Positioning System* (DGPS).

3.2 Processamento Digital de Imagens

O PDI foi realizados com o objetivo de otimizar a identificação dos alvos de interesse e extração de informações necessárias, seguindo as seguintes etapas: seleção de imagens, processamento digital de imagens, segmentação, classificação, validação e organização de mapas temáticos.

As etapas de PDI foram realizadas no *software* ERDAS IMAGINE[®], como a fusão digital das imagens ópticas e de micro-ondas, além da análise estatística espacial e da interpretação visual das imagens resultantes. Igualmente foram empregadas técnicas de composições coloridas no sistema de cores *Red-Green-Blue* (RGB), razão de bandas e filtragem espacial.

No entanto, a despeito da importância do monitoramento da vegetação presente em áreas alagáveis em grande escala espacial, destaca-se o *Normalized Difference Water Index* (NDWI), sugerido por McFeeters (1996), que se constitui uma alternativa de verificação das condições de ambiente “seco/úmido” e especialmente na identificação do limite terra-água. Como no ecossistema manguezal da área de estudo ocorre ampla variação hídrica, devido aos dois períodos de preamar e baixamar das condições de mesomarés semidiurnas, optou-se pelo uso desta ferramenta, que é calculado usando a Equação 1:

$$NDWI = \frac{R_{NIR} - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}} \quad (1)$$

Na imagem gerada com o uso da ferramenta NDWI utilizaram-se os valores médios dos pixels que se mostraram mais elevados no ambiente “seco”, levando em consideração também que no momento da aquisição das imagens o local de estudo encontrava-se em período de baixamar, e que as imagens NDWI reduzem os efeitos atmosféricos para a interpretação visual.

Assim, com o intuito de aprimorar a discriminação e o reconhecimento dos objetos alvos na superfície do terreno, foi utilizada a razão entre as imagens polarizadas HH/HV do RADARSAT-2. Esta imagem resultante foi submetida ao canal I (Intensidade, do inglês *Intensity*) do sistema de cor IHS (do inglês *Intensity-Hue-Saturation*) que, em seguida, foi integrada às imagens ópticas do LANDSAT-8 combinadas no sistema de cor RGB (do inglês *Red-Green-Blue*), gerando uma imagem híbrida entre os dois sistemas RGB e IHS, o sistema RGBI. Ao final, a combinação incorpora na imagem híbrida a resolução espacial moderada de 15m, possibilitando a melhoria na identificação e consequente mapeamento das diferentes feições das espécies vegetacionais. Este fato ressalta a potencialidade do uso desses sistemas integrados.

3.3 Filtragem Espacial

Nas imagens híbridas resultantes foi aplicado o filtro de convolução de dimensão 5x5 na imagem adicionada no canal do *Intensity* apresentado na Figura 3, que possibilitou realçar

os contatos entre as unidades geomorfológicas, a suavização de sinais indesejáveis e ruídos, gerando uma imagem de mais fácil interpretação.

-1	0	-1	0	-1
0	2	2	2	0
-1	2	-8	2	-1
0	2	2	2	0
-1	0	-1	0	-1

Figura 3 Filtro de convolução de dimensão 5 x5 empregado na imagem híbrida.

O filtro de dimensão 5x5 foi empregado em convolução no domínio da intensidade, de acordo com a Equação 2:

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} x(k_1, k_2)h(n_1 - k_1, n_2 - k_2) \quad (2)$$

Onde n de x é a imagem original, h é o filtro e y , a imagem processada. Esta equação pode ser reescrita de forma compacta (Equação 3):

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2)*h(n_1, n_2) \quad (3)$$

3.4 Segmentação e Classificação

Os processos de segmentação e classificação foram realizados nos *softwares* eCognition Developer® 8.0 e ERDAS ER Mapper 7.1 respectivamente, como estratégia para extrair informações a partir de imagens híbridas usando a hierarquia ou grupos de pixels, baseado principalmente na reflectância.

A classificação foi precedida da etapa de segmentação orientada a objetos realizados com base no grau de homogeneidade do agrupamento de pixels, usando segmentações repetidas, estabelecendo relações baseadas nos diferentes níveis de reflectância, textura e forma entre os objetos das imagens, destacando os limiares mais apropriados dos objetos a serem, em seguida, classificados. A classificação não supervisionada foi obtida por meio da utilização do algoritmo *ISOCLASS*, por vezes reconhecida apenas pelo seu caráter exploratório ao agrupar de forma automática os grupos espectrais sem o auxílio de classes teste, permitiu avaliar a qualidade e o potencial de realce das informações contidas na área estudada.

3.5 Avaliação da Classificação

A análise crítica sobre a classificação foi indispensável na avaliação da qualidade do resultado obtido. Assim, a comparação da exatidão dos resultados das imagens com os dados *in loco*, ou por dados geográficos auxiliares, foi relevante para que o registro dos possíveis erros na classificação empregada e na avaliação da qualidade das imagens híbridas resultantes. Para tanto, utilizaram-se como classe de referência, as áreas mapeadas como vegetação de mangue, de modo que cada elemento mapeado pudesse ser selecionado de maneira casual. Após a classificação, definiram-se o tipo e o tamanho da amostra, através da Amostragem Aleatória Simples (AAS), calculada através da Equação 4:

$$N = (1,96^2 * p*q) / E^2 \quad (4)$$

Onde p e q são, respectivamente, as proporções populacional e amostral. Para uma margem de erro (E) e um intervalo de confiança de 95%.

Uma vez estabelecido o tipo e o tamanho da amostra, a avaliação da exatidão do mapa de classificação foi realizada através da técnica analítica do Índice Kappa (k), expressa pela Equação 5, a partir de pontos de controle (N), a medida da diferença e a probabilidade de concordância entre os dados de referência e da classificação (Congalton, 1991).

$$k = N \sum X_{ii} - \sum X_{i+} X_{+i} / N^2 - \sum X_{i+} X_{+i} \quad (5)$$

Onde, X_{ii} = concordância observada; X_{+i} e X_{+i} (produto das marginais), sendo a concordância esperada e N = total de elementos observados.

Posteriormente, a integração e análise dos dados espaciais foi realizada em ambiente SIG no *software* ArcMap® 9.3 a fim de gerar mapas temáticos propensos à análise e interpretação.

3. Resultados

O emprego das técnicas de PDI permitiu a confecção de algumas imagens híbridas que foram coloridas no sistema RGBI, entre as quais se destacou a imagem colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro (Figura 4). Tratou-se de um procedimento direcionado ao realce das feições de interesse, diferentes espécies vegetacionais e limite terra/água, favorecendo a delimitação das áreas dos manguezais. A imagem híbrida gerada revelou desempenho expressivo na detecção e discriminação das características das unidades geoambientais presentes na faixa litorânea, demarcando as diferentes unidades com cores contrastantes, referentes aos padrões espectrais bem definidos.

Na Figura 4(A), Figura 4(B), Figura 4(C) e Figura 4(D) destaca-se o resultado da classificação não supervisionada da composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro. A Figura 4(A) indica a integração multisensores dos satélites LANDSAT-8 e RADARSAT-2 em níveis de cinza. Na Figura 4(B) da imagem colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro observa-se o realce da vegetação de mangue e das unidades geoambientais ocorrentes na área de estudo. Na Figura 4(C) destacam-se igualmente as unidades geomorfológicas. A Figura 4(D) mostra o resultado da classificação aplicada sobre a imagem colorida, que favoreceu a interpretação visual mais eficiente e precisa nos detalhes. A cada classe identificada após o processamento foi atribuído uma cor específica de identificação das espécies.

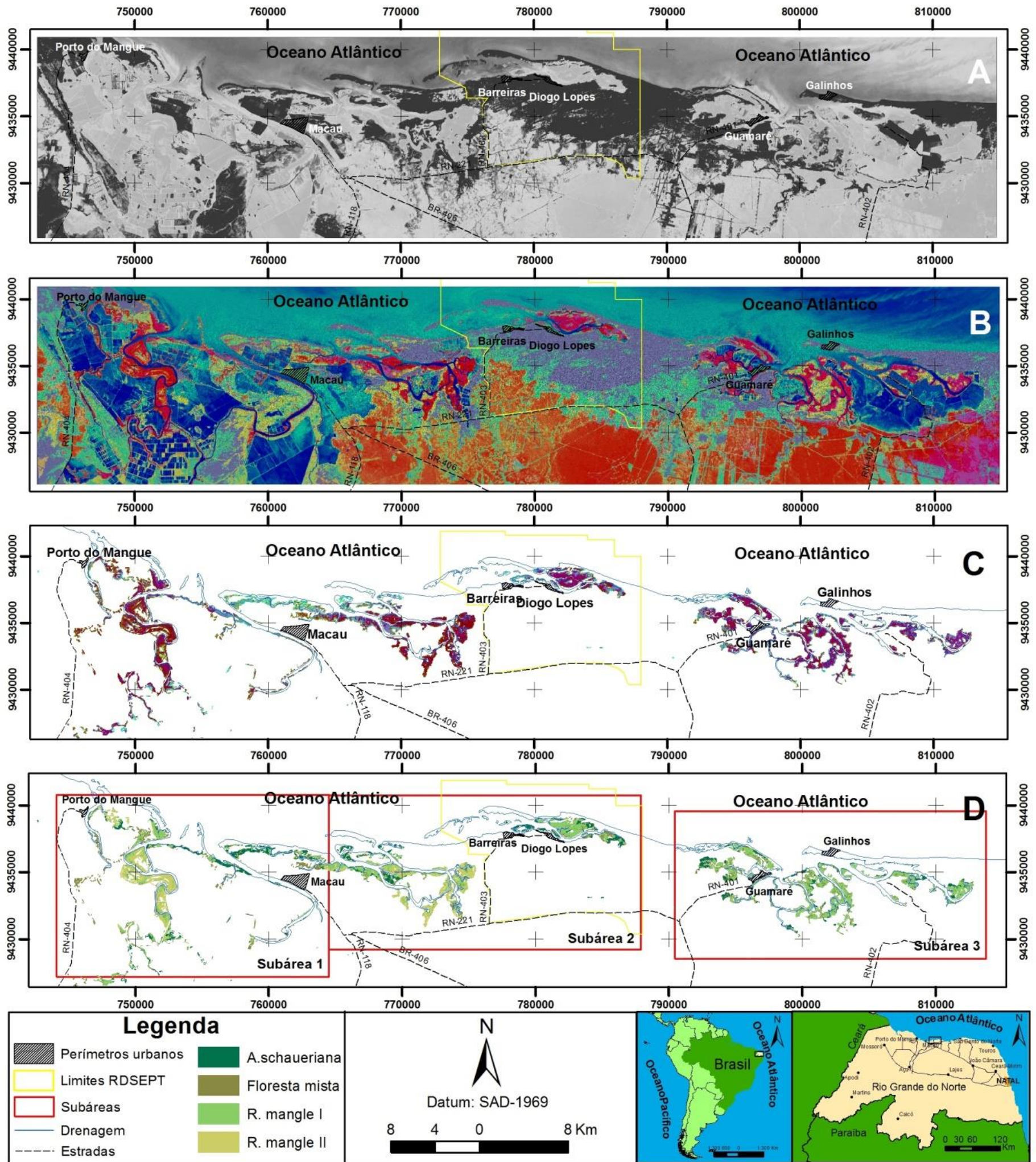


Figura 4 Processo de segmentação e classificação. (A) integração multisensores do LANDSAT-8 e RADARSAT-2 em níveis de cinza. (B) integração multisensores em composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro, com destaque para o realce da vegetação de mangue e das unidades geoambientais, (C) Imagem em Composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro empregada na delimitação das unidades geomorfológicas. (D) Mapa resultante da classificação em classes de cores indicando as diferentes espécies de mangue presentes na área de estudo.

A compartimentação florística e geoambiental, baseada na interpretação de imagens híbridadas, foi seguida do controle em campo através de incursões pelas áreas de mangue (franjas, florestas e bosques) para identificação de grupos fisionômicos e correlação com a integração multisensores, também submetida ao método de classificação não supervisionada. Dados de conhecimento de campo são geralmente necessários para correlacionar os sinais espectrais ou sinais de retroespalhamento com os parâmetros geofísicos. Sem qualquer conhecimento *in loco*, não seria possível diferenciar nível de espécies no manguezal e nem mesmo obter parâmetros florestais qualitativos e quantitativos. Assim, optou-se pela escolha de parte da área de pesquisa para validar a segmentação e classificação da área de estudo como um todo. Para isso foi estabelecida uma área representativa que englobasse as diferentes condições estruturais de espécies no manguezal e que permitisse o acesso ao interior das florestas, como ilustra a Figura 5(A). A quantidade representativa de pontos de controle na área de estudo total depende da quantidade e dos tamanhos dos polígonos gerados na segmentação e seus limiares, definidos com esse propósito, onde foram acatados apenas polígonos iguais ou maiores que 0,2 ha, compreendendo 3 x 3 pixels ou 45 x 45 m. A escolha deste polígono mínimo se deu para evitar o efeito de borda, considerando o pixel central. Portanto, ao final, foram selecionados 326 polígonos na área total, perfazendo cerca de 15,9% referente às áreas mistas de espécies, segmentada por 139 polígonos; aproximadamente 41,7% referente à condição de espécie chamada de *R. mangle* I (definido pelo porte alto e adensamento convencional dos indivíduos), segmentada por 128 polígonos; 28,4% referente à espécie chamada de *R. mangle* II (baseado no porte baixo e adensado das árvores), segmentada por apenas 8 polígonos; e cerca de 13,9% de *A. schaueriana*, segmentada por 51 polígonos. As amostragens foram feitas por meio dos pontos plotados através da AAS, totalizando 13 amostras para regiões mista de espécies, 12 amostras para *R. mangle* I, 5 amostras para *A. schaueriana* e 2 amostras para *R. mangle* II, totalizando 32 pontos amostrais visitados *in loco*, como mostra a Figura 5(B).

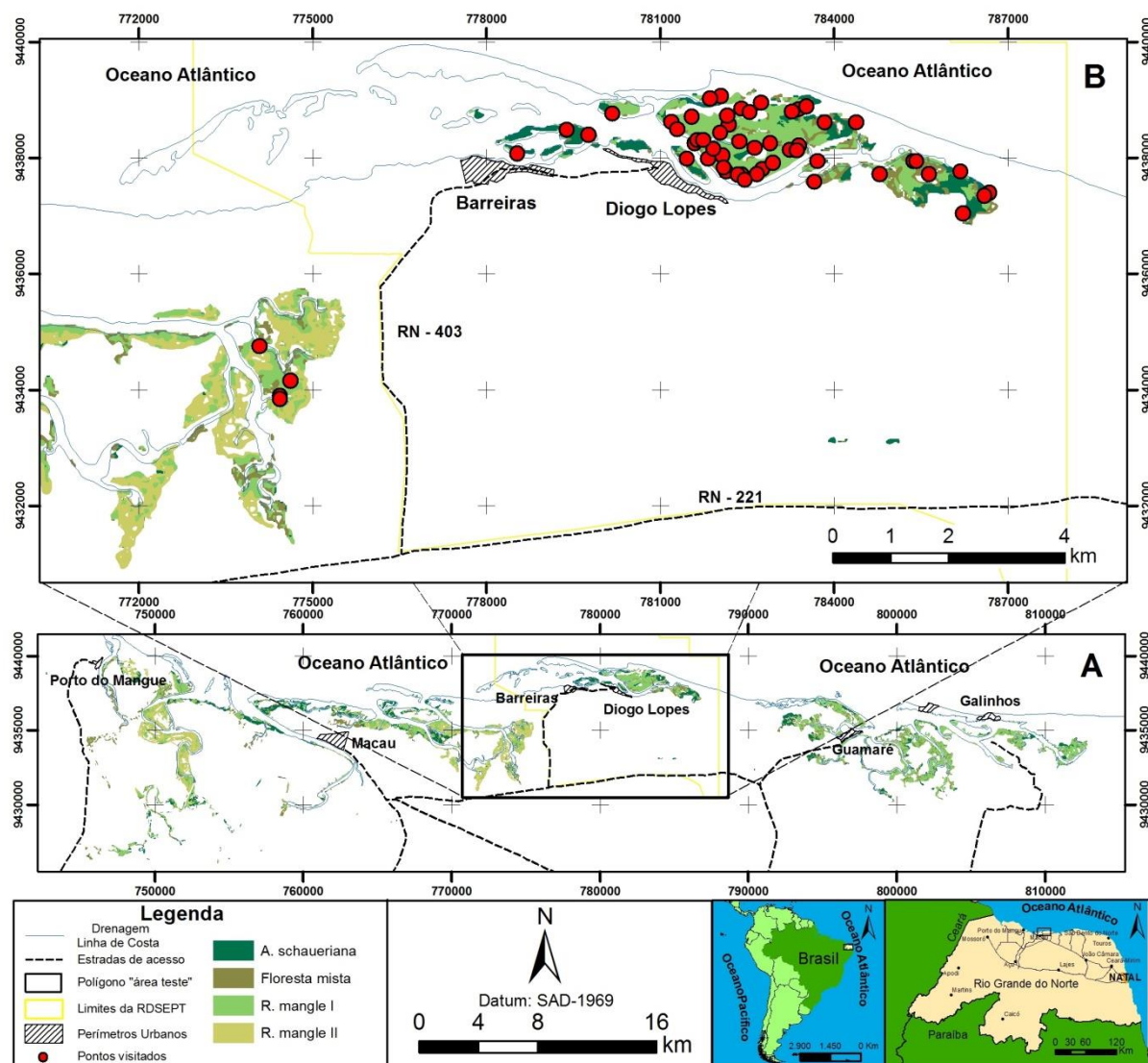


Figura 5 (A) Área de estudo total com a localização da área representativa escolhida para a análise da exatidão da classificação. (B) Detalhe da área representativa com os locais dos pontos de controle.

A avaliação do resultado da exatidão da classificação, realizada com base no índice Kappa, baseou-se nos 32 pontos de controle (N) representativos de feições reconhecidas na floresta de mangue, amostrados aleatoriamente *in loco*. O índice Kappa indicou a probabilidade de 77% das categorias mapeadas terem sido classificadas corretamente, baseadas nos dados da matriz de confusão e erro (Quadro 1). Analisando o resultado do índice Kappa, conforme o agrupamento qualitativo pode-se classificá-lo como “muito bom” (Fonseca, 2000). Desta forma, ficou evidenciado que as amostras coletadas *in loco* foram condizentes com as informações classificadas nas imagens, onde os resultados apontaram para uma alta sensibilidade da metodologia utilizada em qualificar algumas feições geoambientais e grupos fisionômicos de mangues.

Classe	Mista de espécies	<i>R. mangle</i> I	<i>A. schaueriana</i>	<i>R. mangle</i> II	soma linhas
Região mista de espécies	11	1	1	0	13
<i>R. mangle</i> I	1	9	1	1	12
<i>A. schaueriana</i>	0	0	5	0	5
<i>R. mangle</i> II	0	0	0	2	2
Soma colunas	12	10	7	3	
Soma diagonal	27				
N amostras	32				
Soma do produto da soma entre colunas e linhas	317				
Kappa	77%				

Quadro 1 Matriz de Confusão e Erro utilizada na avaliação da exatidão da classificação das diferentes condições estruturais das espécies e o Índice Kappa na avaliação dos dados da matriz.

É certo afirmar que uma classificação coerente ao nível de espécies em floresta de mangue é uma das tarefas mais exigentes no emprego de imagens de SR, demandando muita cautela na análise e interpretação, pois o sinal neste ambiente é composto por vários componentes e é influenciado por grande número de outros parâmetros. Por exemplo, a informação contida num pixel de floresta de mangue é influenciada pelas folhas, caules e ramos. Todos estes componentes respondem diferentemente dependendo da espécie de mangue e de fatores tais como: o vigor, a idade, e a estação do ano do imageamento, assim como do tipo de solo e condições de umidade, entre outros.

O principal parâmetro que influenciou o sinal espectral oriundo da vegetação de mangue foi a própria geometria e características bioquímicas da folha, porque a quantidade de energia absorvida e refletida pelas folhas das árvores que diferenciam uma espécie da outra e podem até serem diferentes dentro da própria espécie. A densidade do dossel imageado em dados SAR, bem como o sinal de retroespalhamento deste ambiente é influenciado pelas propriedades geométricas do suporte (fechamento e a geometria do dossel, estrutura da folha, a estrutura histológica celular e o componente de superfície subjacente) que por sua vez variam de acordo com os diversos componentes florestais já mencionados. Dependendo do comprimento de onda de incidência, bem como, da polarização dos feixes de radar HH e HV, a interpretação dos dados de radar sobre florestas de mangue, algo muito complexo, foi, porém, possível. Portanto, considerando-se todas as informações acima, optou-se por subdividir a área de estudo nas subáreas 1, 2 e 3, com o intuito de facilitar a análise e a interpretação da classificação das imagens em detalhe, como mostram as Figuras 4, 6, 7 e 8.

Subárea 1

A subárea 1 está basicamente caracterizada por planície flúvio-estuarinas com a presença de florestas de mangue bem desenvolvidas localizadas ao longo das margens dos rios e canais. A presença da espécie *R. mangle*, conhecida popularmente como mangue-vermelho ou

sapateiro, é bem marcante e ocorrem nas áreas do mapa representadas pela cor marrom escuro, que refere-se a regiões ocupadas por *R. mangle* I em condição de espaçamento normal entre os indivíduos e de porte médio a alto, e em marrom claro *R. mangle* II, em condição adensada e de porte baixo, como evidenciado na Figura 6. Essa diferenciação de condições estruturais para a mesma espécie está direcionada principalmente ao porte florestal e à densidade do dossel. No exemplo da espécie *R. Mangle* II trata-se de vegetação baixa e bem adensada, que apresentou uma resposta espectral diferente da *R. mangle* I. Então, atribui-se que tal condição florestal esteja pautada no fato deste estuário em particular estar localizado numa região com maior aporte fluvial, que por sua vez tem direta influência na salinidade da água, gênese do solo e na microtopografia, diferentemente dos demais estuários estudados. O manguezal do Município de Porto do Mangue encontra-se totalmente inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu e também estão inseridos na mesma bacia hidrográfica os manguezais do Oeste do Município de Macau.

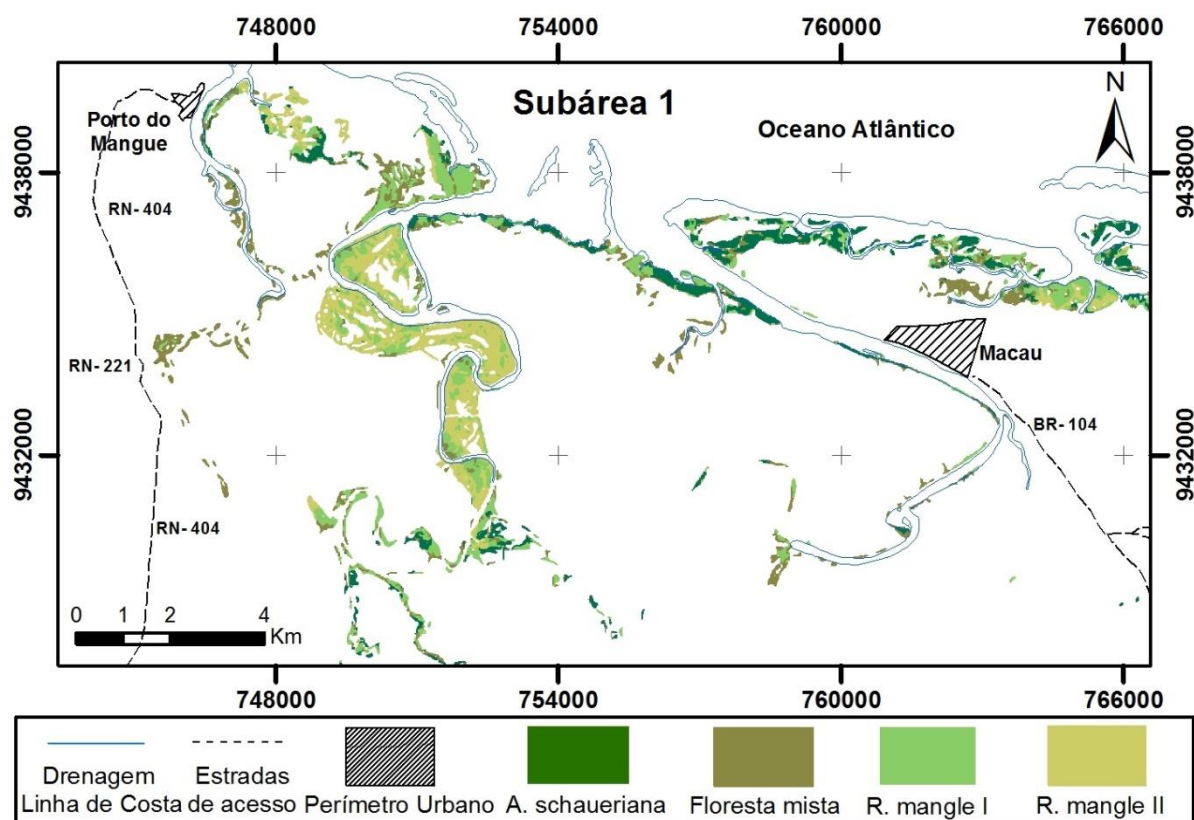


Figura 6 Detalhe da subárea 1. Nestes estuários observa-se a presença de forte aporte fluvial em todos os estuários desta subárea, promovendo a presença de planícies flúvio-estuarinas.

Subárea 2

Na Subárea 2 evidenciada na Figura 7, observa-se a presença de dois estuários em situações distintas, ambos localizados na porção nordeste do Município de Macau, inserida na

Bacia Hidrográfica Litorânea Norte de Escoamento Difuso que, por suas peculiaridades, não apresentam grande aporte fluvial. Estes estuários estão caracterizados basicamente por canais de maré, sendo que os manguezais mais ao Oeste desta subárea apresentam-se semelhantes aos da subárea 1 em decorrência da associação com a Bacia do Rio Piranhas-Açu, possuindo as mesmas características sedimentares e de salinidade, e da presença de desembocadura de pequenos rios temporários. Nas comunidades de Barreiras e Diogo Lopes o ambiente é caracterizado exclusivamente pela ocorrência de canais de maré, com nenhum aporte fluvial acarretando em solo e alta salinidade, diferente dos demais estuários. A vegetação de mangue apresenta um porte mais alto e menos adensado, justificando a menor ocorrência do que consideramos como *R. mangle* II e maior ocorrência da espécie *A. schaueriana*, conhecida popularmente como mangue-branco, canoé ou siriúba, representada pela cor verde claro nos mapas.

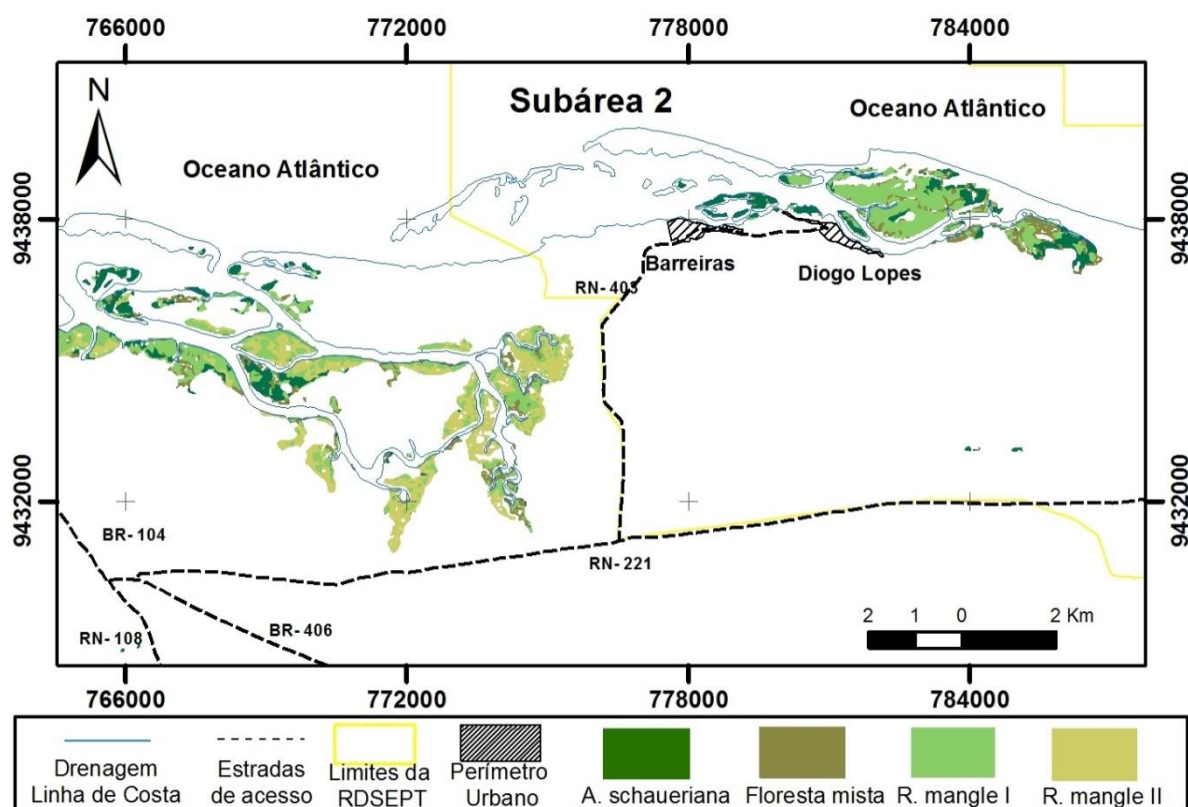


Figura 7 Detalhe da subárea 2. Observa-se a presença de aporte fluvial apenas no estuário localizado ao Oeste desta subárea, promovendo a presença de planícies flúvio-estuarinas, entretanto o estuário, na porção Nordeste, é caracterizado apenas por canais de maré.

Subárea 3

Os municípios de Guamaré e Galinhos encontram-se inseridos também na Bacia Hidrográfica Faixa Litorânea Norte de Escoamento Difuso, obedecendo assim às mesmas características já mencionadas, com um pequeno aporte fluvial intermitente e canais de maré.

Portanto estes estuários possuem características semelhantes ao de Barreiras e Diogo Lopes. Tais semelhanças entre ambos os estuários condiciona a espacialização estrutural de espécies, como pode ser facilmente observado na Figura 8.

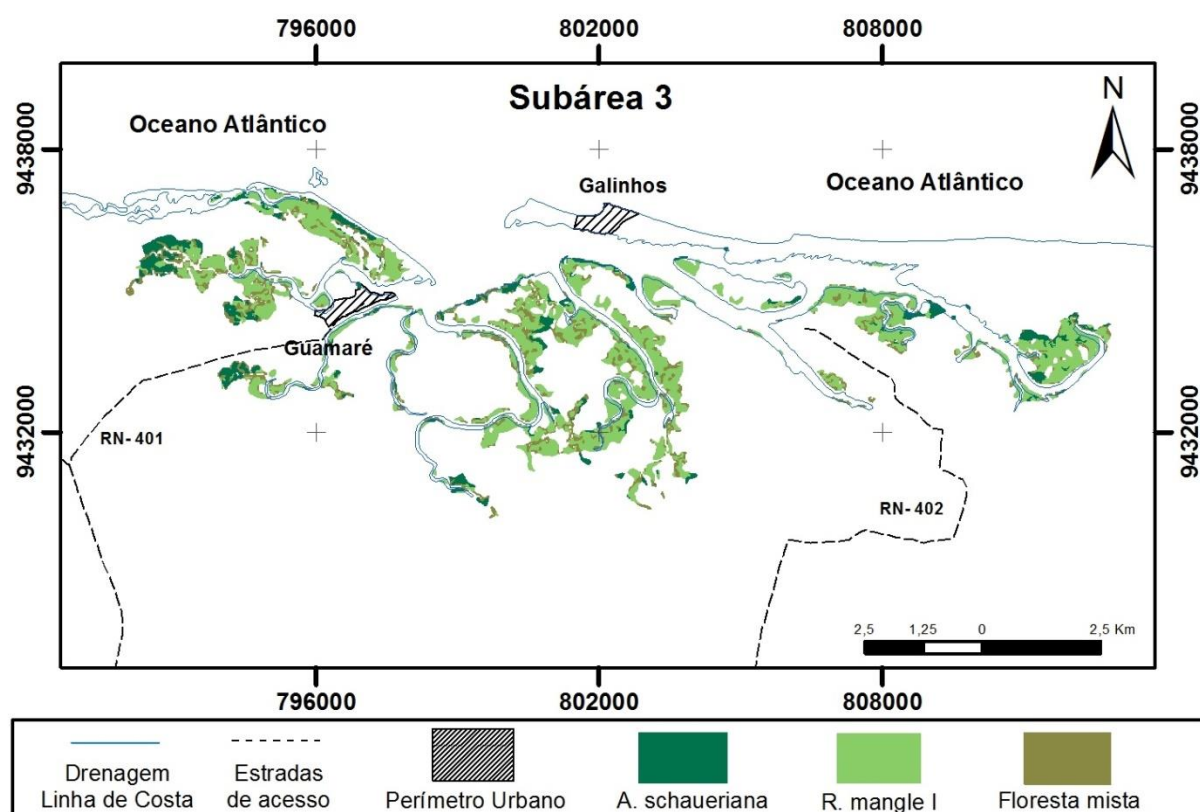


Figura 8 Detalhe da subárea 3. Neste estuário, observa-se a presença de pequeno aporte fluvial intermitente no estuário central desta subárea, porém este está caracterizado basicamente por canais de maré.

O uso de um método de classificação não supervisionada permitiu mapear de forma confiável as áreas de manguezais, como mostra a Figura 9. Numa análise detalhada de um segmento do manguezal de Diogo Lopes (Figura 9A), observa-se o resultado da imagem colorida $R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+\text{filtro}$ que serviu de base para a segmentação e classificação não supervisionada. A Figura 9(B) mostra o resultado desta classificação não supervisionada, indicando as diferentes condições estruturais de espécies ocorrentes na área de estudo. A Figura 9(C), Figura 9(D), Figura 9(E) e Figura 9(F) mostram as posições aonde foram feitos os registros fotográficos para destaque das condições estruturais de espécies nos pontos de controles georreferenciados, que serviram para comprovar a eficiência da classificação através do índice Kappa e Matriz de Confusão e Erro, pontos estes representados pelos sinais de círculo com cruz. A Figura 9(C) destaca uma área ocupada exclusivamente pela espécie *R. mangle*, a Figura 9(D) e Figura 9(E) mostram uma área de transição entre duas espécies, a Figura 9(D) indica a condição de espécie *R. mangle* I, enquanto que a Figura 9(E)

e Figura 9(F) mostram a espécie *A. schaueriana* e a aparência geral dos ambientes ocupados pela espécie, respectivamente.

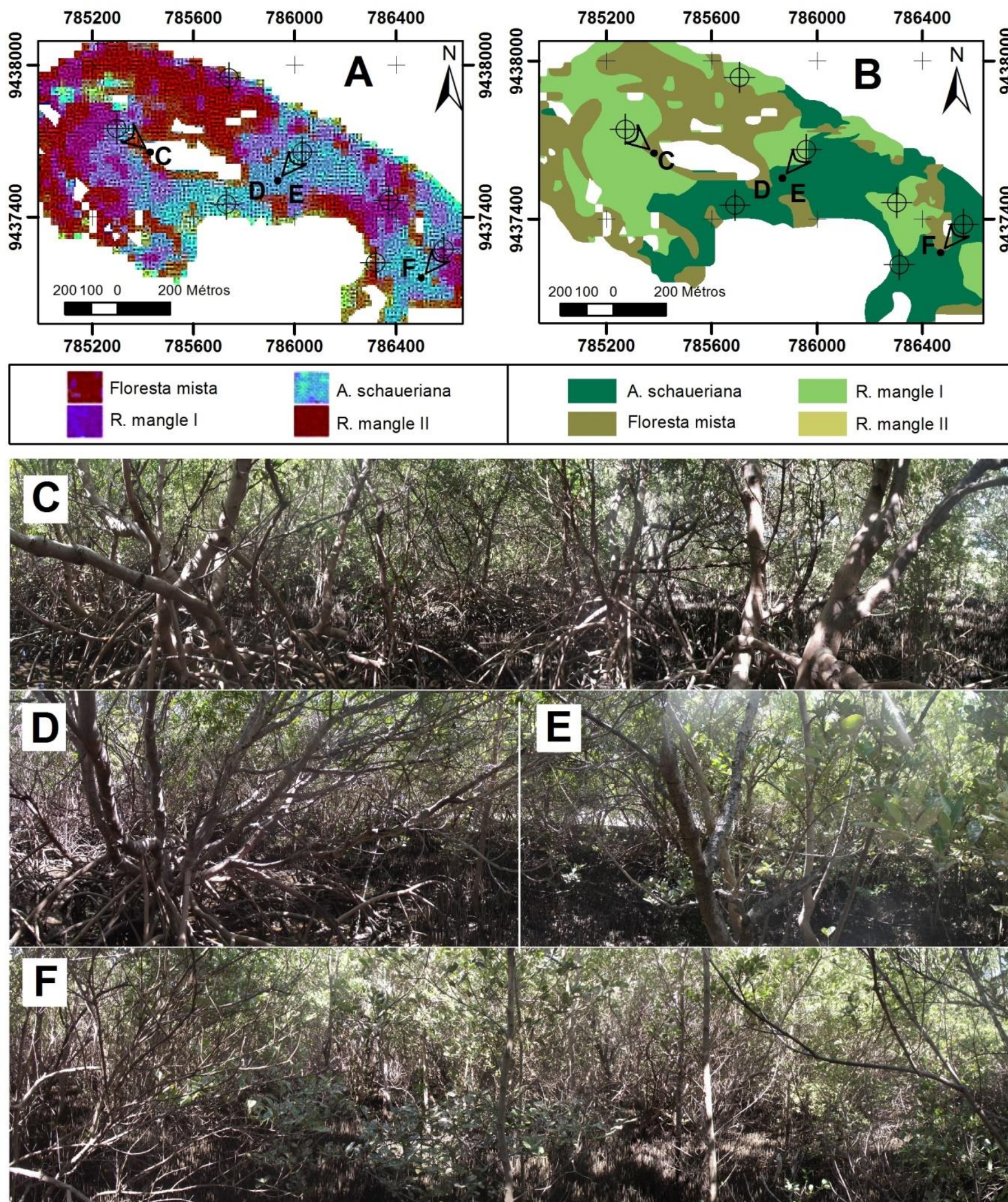


Figura 9 Comparação entre o resultado das respostas espectrais e o resultado da classificação para um segmento de manguezal do estuário de Diogo Lopes: (A) composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro, (B) resultado da classificação. (C) área ocupada exclusivamente pela espécie *R. mangle* (D) e (E) mostram uma área de transição entre duas espécies, onde (D) trata-se de área ocupada pela espécie *R. mangle* e (E) área ocupada pela espécie *A. schaueriana* (F) mostra uma área ocupada exclusivamente pela espécie *A. schaueriana*.

A resolução espacial de 15 m da imagem colorida, utilizada na classificação das florestas de mangue, não possibilitou o mapeamento de árvores isoladamente ou que formam pequenos agrupamentos. Por sua vez, o variado adensamento de copas, similaridade da forma e porte florestal para os diferentes dosséis foi o fator decisivo para a classificação das espécies. A Figura 10 traz ilustrações representativas das principais condições estruturais das quatro espécies ocorrentes na área de estudo, positivamente mapeadas pela metodologia empregada, sendo elas: *R. mangle* I, apresentada na ilustração (A); *R. mangle* II, apresentada na ilustração (B); *A. schaueriana*, apresentada na ilustração (C); e, região de espécies mistas, apresentada na ilustração (D); no detalhe, (D/La) indica indivíduo da espécie *L. racemosa*, o detalhe (D/Rh) mostra indivíduos de *R. mangle* II e o detalhe (D/Av) indivíduos de *A. schaueriana*.

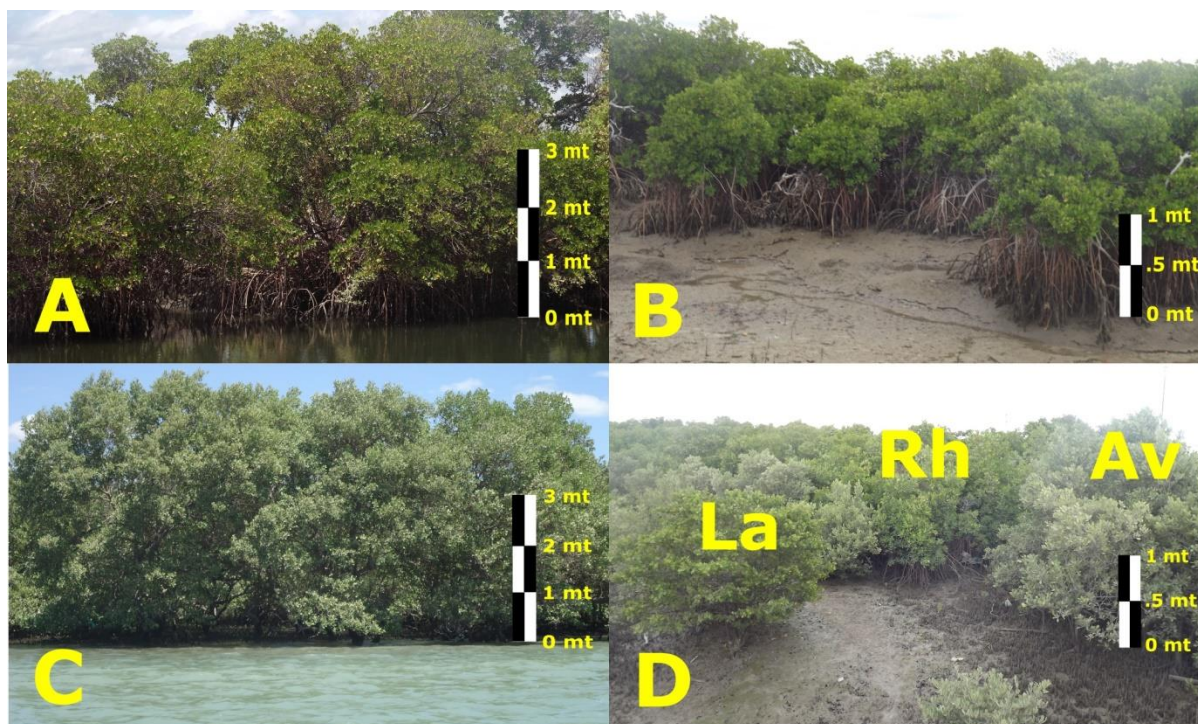


Figura 10 Condições estruturais das espécies de mangue ocorrentes na área de estudo, bem como as alturas estimadas dos portes florestais. (A) trata-se de *R. mangle* I, (B) *R. mangle* II, (C) *A. schaueriana* e (D) região de espécies mistas: (La) indivíduo da espécie *L. racemosa*, (Rh) *R. mangle* e (Av) *A. schaueriana*.

A área total ocupada por florestas de mangue foi de 5.538 ha aproximadamente, podendo possuir um pequeno grau de incerteza nas análises das assinaturas espectrais dos pixels que separam manguezal de outras categorias. Em particular, áreas de fronteira como ocorrência de pirixiu (*Blutaparon portulacoides*), vegetação herbácea associada ao manguezal e solos salinos que ocorre em praticamente toda a área de estudo. Outra possibilidade é o fato do manguezal também ter constituído zonas de transição, onde o solo é recoberto por outros grupos de vegetação.

A espécie *R. mangle* foi a espécie de maior ocorrência, ocupando área geral de aproximadamente 3.515 ha, representando 63,45% da área, seguida de *A. schaueriana* com 882 ha, representando 15,92%. As espécies ocorrentes no mangue sofrem a interferência de muitos fatores da intensa dinâmica desse ambiente, que fazem com que tais espécies ocupem diversos locais ao longo da floresta. Contudo, as espécies também podem coexistir, caracterizando áreas mistas de espécies e/ou de transição entre elas. Estas áreas ocupam cerca de 1.142 ha, representando 20,63%, resultados esses apresentados na Figura 11.

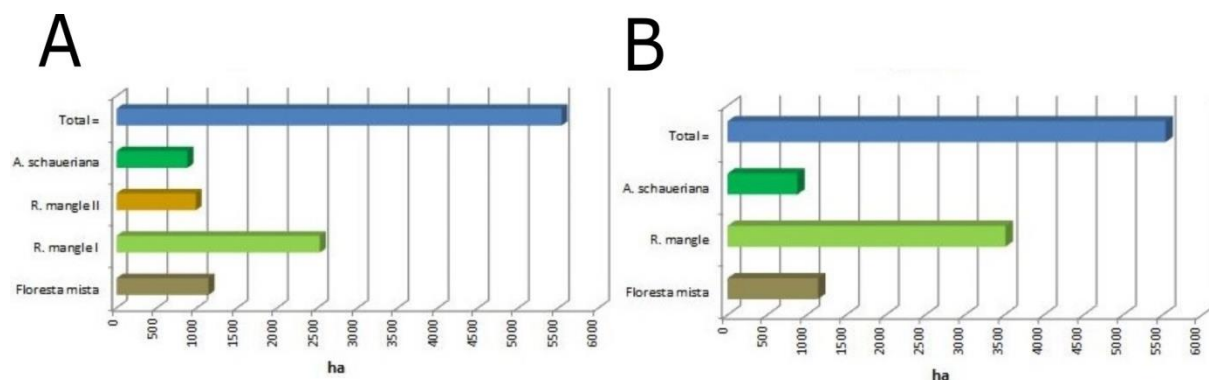


Figura 11 (A) Valores da cobertura vegetal em hectares referentes às quatro condições estruturais de espécies reveladas através da classificação. (B) Valores em hectares referentes à cobertura vegetal das espécies de mangue ocorrentes.

Em função da resolução espacial de 15 m das imagens híbridas resultantes, a metodologia não permitiu segmentar e classificar a espécie *Laguncularia racemosa*, popularmente reconhecida como mangue-ratinho, que pelas suas características adaptativas ocorre exclusivamente nas porções mais externas das florestas de mangue, bordejando-as e em áreas mistas de espécies, como indivíduos restritos ou formando pequenos agrupamentos monoespecíficos.

4. Conclusões

Os resultados obtidos apontaram a relevância do emprego de imagens híbridas entre os sistemas LANDSAT-8 e RADARSAT-2 combinadas aos processamentos digitais que resultou na imagem colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro, confirmados pelo método de classificação empregado.

A probabilidade de coerência de 77% das categorias mapeadas foi considerada boa pelo Índice Kappa, confirmados através dos dados georreferenciados coletados *in loco*, apresentando-se como uma valiosa maneira de caracterizar a fisionomia dos manguezais da área estudada.

A imagem colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro revelou diferenças entre as condições estruturais de espécies de mangue, o que facilitou o mapeamento temático nessas áreas de difícil acesso. Tais possibilidades de diferenciação correspondem também ao poder de penetração e interação das polarizações HH e HV do satélite RADARSAT-2, além topo do dossel das diferentes espécies de mangue, marcado principalmente por características diversas nas densidades do dossel e alturas das árvores, além das propriedades estruturais inerentes.

A notável vantagem da metodologia utilizada foi permitir a eliminação de grande parte das incertezas envolvidas na classificação, com segmentação prévia. Além disso, permitiu alta acuidade na classificação de acordo com o nível de incerteza assumida para essa aplicação específica, levando em consideração as diferentes características de adaptação que promove as situações de espécies ocorrentes, promovidas pela caracterização e heterogeneidade dos ambientes ocupados pelas florestas de mangue.

O método indicou que a área total ocupada por florestas de mangue é de 5.538 há, aproximadamente. A espécie *R. mangle* é a espécie de maior ocorrência ocupando área de aproximadamente 3.515 ha, representando 63,45% da área total; seguida de regiões de espécies mistas, ocupando área de 1.142 ha (20,63% da área total); a espécie *A. schaueriana*, ocupa área aproximada de 882 ha (15,92% da área total).

5. Agradecimentos

O apoio financeiro dos projetos de pesquisa da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste no Monitoramento de Áreas sob Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05 – PETROMAR, CTPETRO – FINEP/PETROBRAS/CNPq): Projetos Cooperativos: HIDROSEMA, MOLECO e CRONALOG. As atividades foram desenvolvidas com o apoio logístico do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia da UFRN (GEOPRO/DG/UFRN) e do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo (PPGCEP) e ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG). Os autores agradecem especialmente a CAPES, pela concessão de Bolsa de Doutorado ao primeiro autor, e aos contribuidores.

6. Referências

Alongi, D.M. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3): 331-349.

Aschbacher, J.; Tiangco, P.; Giri, C. P.; Ofren, R.S.; Paudyal, D.R. & Ang, Y.K. 1995. *Comparison of different sensors and analysis techniques for tropical mangrove forest mapping*. Proceedings of the International Conference IGARSS, p. 2109-2111.

Badola, R. & Hussain, S.A. 2005. Valuing ecosystem functions: an empirical study on the storm protection function of Bhitarkanika mangrove ecosystem, India. *Environmental Conservation*, 32(1): 85-92.

Barbier, E.B. 2006. Natural barriers to natural disasters: replanting mangroves after the tsunami. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4: 124-131.

Barbier, E.B.; Hacker, S.D.; Kennedy, C.; Koch, E.W.; Stier, A.C. & Silliman, B.R. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Society of America*, 81(2): 169-193.

Barros Pereira, B.R.; Amaro, V.E. & Valentim da Silva, D.J. 2011. Radar and optical hybrid images to improve geoenvironmental mapping in Rio Grande do Norte state, Brazil. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 149: 111-122.

Blanco, P.D.; Metternicht, G.I. & Del Valle, H. F. 2009. Improving the discrimination of vegetation and landform patterns in sandy rangelands: a synergistic approach. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 2579-2605.

Camargo, L.P.; Pellerin, J.R.G.M. & Panitz, I.M.N. 2000. *Caracterização e classificação do manguezal do Rio Ratones, através de técnicas de sensoriamento remoto e do sistema geográfico de informações (SIG), Ilha de Santa Catarina, Brasil*. International Conference Mangrove, Recife/PE. Anais, p. 1521-1530.

Chaves, M.S.; Vital, H.; Silveira, I.M. & Santos, D.A.S. 2006. Beach Morphodynamics of the Serra Oil Field (NE, Brazil). *Journal of Coastal Research*, 39: 594-597.

Chuvieco, E.; Riaño, D.; Aguado I. & Cocero D. 2002b. Estimation of fuel moisture content from multi temporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: Applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 23(11): 2145 – 2162.

Congalton R.G. 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.

Costa B.C.P. & Amaro V.E. 2012. Identificação Fitofisionômica Através de Imagens Orbitais Híbridadas do LANDSAT 5-TM e do RADARSAT-1 em Manguezais do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista de Geologia*, 25: 115-127.

Dahdouh-Guebas, F. 2002. The use of remote sensing and GIS in the sustainable management of tropical coastal ecosystems. *Environment, Development and Sustainability*, 4: 93-112.

Everitt, J.H.; Yang, C.; Sriharan, S. & Judd, F.W. 2008. Using high resolution satellite imagery to map black mangrove on the Texas Gulf Coast. *Journal of Coastal Research*, 24: 1582-1586.

Ferreira, A. T. S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2014. Geodésia Aplicada na Integração de Dados Topográficos e Batimétricos na Caracterização de Superfícies de Praia. RBC. *Revista Brasileira de Cartografia*, 66: 167-184.

Fonseca, L.M.G. 2000. *Processamento digital de imagens*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 105 p.

Franco, C.G.M.; Amaro, V.E. & Souto, M.V.S. 2012. Prognóstico da erosão costeira no litoral sententrional no Rio Grande do Norte para os anos de 2020, 2030 e 2040. *Revista de Geologia*, 25: 37-37.

Giri, C. & Muhlhausen, J. 2008. Mangrove forest distributions and dynamics in Madagascar (1975-2005). *Sensors*, 8: 2104-2117.

Giri, C.; Ochieng, E; Tieszen, L.L.; Zhu, Z.; Singh, A.; Loveland, T.; Masek, J. & Duke, N. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20: 154-159.

Giri, C.; Pengra, B.; Zhu, Z.; Singh, A. & Tieszen, L.L. 2007. Monitoring Mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multitemporal satellite data from (1973 to 2000). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73: 91-100.

Gonçalves, F.D.;Souza Filho, P.W.; Paradella, W.R. & Miranda, F.P. 2009. Fusão de Dados Multisensor para a Identificação e o Mapeamento de Ambientes Flúvio-Estuarinos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(1): 57-67.

Gowda, H.H.; Ganesha RAJ, K.; Padmavathy, A.S. & Manikian, B. 1995. Multidate satellite data for study of dynamic of coastal landforms of Uttara Kannada, South India. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 2539-2553.

Grigio, A.M.; Souto, M.V.S.; Castro, A.F.; Amaro, V.E.; Vital, H. & Diodato, M.A. 2005. Method of analysis of the coastline evolution based in remote sensing and geographical information system products: Guamaré District Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, 42: 412- 421.

Hamilton, L.S. & Murphy, D.H. 1988. Use and management of nipa palm (*Nypa fruticans*, *Arecaeae*): a review. *Economic Botany*, 42(2): 206-213.

Huang, H.; Legarsky, J. & Othman, M. 2007. Land-cover classification using RADARSAT and LANDSAT imagery for St. Louis, Missouri. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(1): 37-43.

Kampel, M.; Amaral, S. & Soares, M.L.G. 2005. Imagens CCD/CBERS e TM/LANDSAT para análise multi-temporal de manguezais no nordeste brasileiro. Um estudo no litoral do Estado do Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), v 12, Goiânia. Anais, São José dos Campos/SP: INPE, p. 979- 986.

Kuenzer, C.; Bluemel, A.; Gebhardt, S.; Quoc, T.V. & Dech, S. 2011. Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3(5): 878-928.

Mc Feeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1425-1432.

Mochel, F.R. & Ponzoni, F.J. 2007. Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79 (4): 683-692.

Nascimento, M.C. 2009. *A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, Natal. Dissertação de Mestrado, 229p.

Prost, M.T. 2001. *Manguezais paraenses: recursos naturais, usos sociais e indicadores para a sustentabilidade*. Relatório Final, FUNTEC Convênio 063/98 Belém/PA: CCTE/MPEG, p. 62.

Ramsey III, E.W.; Nelson, G.A. & Sapkota, S.K. 1998. Classifying coastal resources by integrating optical and radar imagery and color infrared photography. *Mangroves and Salt Marshes*, 2: 109-119.

Salem, M.E. & Mercer, D.E. 2012. The Economic Value of Mangroves: A Meta-Analysis. *Sustainability*, 4: 359-383.

Santos, A.L.S. ; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2014. Geodésia de precisão aplicada à análise da evolução morfodinâmica de curto prazo na Ilha Barreira do Corta Cachorro, litoral do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15: 425-442.

Santos, M.S.T. & Amaro, V.E. 2013. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14: 151-162.

Seto, K.C. & Fragkias, M. 2007. Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: A remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands. *Global Environmental Change*, 17: 486-500.

Souto, M.V.S. 2009. *Análise da Evolução Costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Região Sob Influência da Indústria Petrolífera*. Tese (Doutorado em Geofísica e Geodinâmica). Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN. Tese de Doutorado, 117-118p.

Souza Filho, P.W.M. 2005. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 4: 427-435.

Souza Filho, P.W.M. & Paradella, W.R. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, 10: 123-132.

Souza Filho, P.W.M. & Paradella, W.R. 2005. Use of RADARSAT-1 fine mode and LANDSAT-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a

macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31 (3): 214-224.

UNEP-WCMC. 2006. *In the front line: shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs*. Cambridge, UK: UNEP-WCMC, p. 33.

Vaiphasa, C.; Skidmore, A.K. & De Boer, W.F. 2006. A post-classifier for mangrove mapping using ecological data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61: 1-10.

Valiela, I.,J.L. Bowen & York J.K., 2001. Mangrove Forests: One of the world threatened major tropical environments. *BioScience*, 51 (10): 807-815.

Wang, L. & Sousa, W.P. 2009. Distinguishing mangrove species with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 30: 1267-1281.

Capítulo 3

ESPECTRORRADIOMETRIA EM SUPORTE À CLASSIFICAÇÃO FITOESTRUTURAL DE ESPÉCIES DE MANGUE NO NORDESTE DO BRASIL

CAPÍTULO 3

(2º Artigo)

APRESENTAÇÃO

Este capítulo é composto pelo artigo científico em fase de finalização e ainda não submetido intitulado “**Espectrorradiometria em Suporte à Classificação Fitoestrutural de Espécies de Mangue no Nordeste do Brasil**” o que traz uma aplicabilidade do Sensoriamento Remoto, aliado a técnicas estatísticas e matemáticas específicas para o estudo aprofundado em vegetação de mangue, considerando a diversidade de espécies e de ambientes nos manguezais ocorrentes no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte – RN, Brasil. Foram extraídos dados de reflectância espectral que permitiram a distinção das espécies e quando aliado ao Índice de Vegetação, puderam ser utilizados para compreender e analisar a dinâmica da cobertura vegetal presente. Possibilitou um resultado dinâmico, o mais próximo possível da realidade, originando mapas temáticos de densidade e porte da vegetação ao longo da extensão dos estuários pesquisados.

Os dados oriundos deste artigo foram confrontados com os do artigo anterior abordado nesta Tese, e quando comparados, revelaram que a metodologia utilizada neste, se apresentou mais eficiente em relação ao que se foi proposto. Conferindo ao mesmo, nova corroboração no tocante ao estudo e entendimento da dinamicidade dos manguezais desta região. A fim de ser explorado a riqueza de dados e informações oriundas, servirá de base de dados a ser utilizada diretamente no artigo subsequente desta Tese para o alcance do Objetivo Geral desta.

O método empregado e os resultados deste trabalho são diretamente associados à região estudada, com seus ambientes e manguezais possuindo características próprias. Para pesquisas futuras e comparações com regiões distintas, se faz necessária sua reavaliação, antes da replicação direta do método exposto.

**ESPECTRORRADIOMETRIA EM SUPORTE À CLASSIFICAÇÃO
FITOESTRUTURAL DE ESPÉCIES DE MANGUE NO NORDESTE DO BRASIL**

BRUNO CESAR PEREIRA DA COSTA
VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO
ANDERSON TARGINO DA SILVA FERREIRA

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
CCET/UFRN – Centro de Ciências Exatas e da Terra
brunocesarpc@hotmail.com

RESUMO

A crescente aplicação do Sensoriamento Remoto ao mapeamento detalhado e ao monitoramento dos recursos biológicos já se tornou uma prática para a gestão sustentável. Nas últimas décadas, a elaboração de vários métodos para cálculo dos índices de vegetação com base em imagens digitais de Sensoriamento Remoto tem gerado resultados no mapeamento qualitativo e quantitativo dos recursos florestais como, por exemplo, os manguezais, fato relevante frente às mudanças globais, ações antrópicas e os serviços ambientais oferecidos por ele. Neste estudo, o desempenho do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjust Vegetation Index*, SAVI) foi avaliado para o mapeamento de florestas de mangue, baseado em dados multiespectrais do LANDSAT-8, monoespectrais do RADARSAT-2 e espectrorradiometria de campo. Esta metodologia mostra-se como relevante meio para o mapeamento espacial e temporal, atingindo também o nível de espécies, além de contribuir com relevantes estimativas das condições do bosque e à própria árvore. Os resultados revelaram que o modelo SAVI calibrado se apresentou muito eficiente e promissor para uso em segmentação e classificação de três espécies comuns nos estuários do litoral setentrional do Rio Grande do Norte: *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia schaueriana*.

Palavras Chave: SAVI; integração multisensores; estuários;

ABSTRACT

The increasing application of Remote Sensing to detailed mapping and monitoring of biological resources it has become a practice for the sustainable management. In the last decades the elaboration of various methods to calculation of the vegetation indices based on digital images of Remote Sensing has, for example, mangroves, relevant fact to the global

changes, anthropic actions and the environmental services offered by it. In this study, the performance of Soil Adjust Vegetation Index - SAVI was evaluated for mangrove's forest mapping, based on multispectral data from LANDSAT-8, monospectral from RADARSAT-2 and field's spectroradiometry. This methodology shows up as an important means for spatial and temporal mapping, also reaching the level of species, besides contribute to important estimates of forest conditions and the own tree. The results revealed that the calibrated SAVI model has performed very efficient and promising for use in segmentation and classification of three common species in Rio Grande do Norte's Northern Coast: *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia schaueriana*.

Key words: SAVI; multisensor integration; estuary.

1. INTRODUÇÃO

As florestas de mangue estão entre os ecossistemas costeiros mais ameaçados, sucumbindo às diversas formas de uso e ocupação de áreas circunvizinhas e à exploração econômica não renovável de seus espaços geomorfológicos por atividades econômicas e industriais diversas, tais como, pela aquicultura, salinicultura, turismo, especulação imobiliária, indústria petrolífera, parques eólicos, dentre outros. Ellison & Farnsworth (1996) apontam que a extensa ocupação do ambiente costeiro tem resultado no abate e preenchimento de milhares de hectares de manguezais. Além disso, as alterações produzidas pelo homem no ambiente natural derivam também em mudanças no clima global, que tem gerado efeitos nocivos diretos e indiretos sobre o ecossistema manguezal.

Esforços para mapear florestas de mangue têm contado com o suporte de imagens digitais adquiridas a partir de plataformas de Sensoriamento Remoto (SR) convencionais e específicos. Wang & Sousa (2004) apontam que resolução espectral e espacial destes sensores remotos compromete a sua utilidade para discriminar dosséis de mangue, particularmente ao nível de espécie. No entanto, a recente disponibilidade de imagens digitais com melhores resoluções espectral e espacial tem estimulado pesquisadores a desenvolver novos métodos de uso da informação espectral dos alvos em superfície, na produção de mapas temáticos mais detalhados das unidades de paisagem. Por meio desta ferramenta geotecnológica é possível quantificar áreas, analisar as mudanças espaço temporais, estimar o estresse hídrico do ambiente, a senescência das espécies, a segmentação e a classificação espacial de espécies (Boegh *et al.*, 2002; Gitelson *et al.*, 2003a; Doraiswamy *et al.*, 2004; Huang & Asner, 2009; Small, 2011).

Nos últimos anos, muitos Índices de Vegetação (IV) foram desenvolvidos, particularmente com o surgimento de sensores hiperespectrais. Em geral, os IV avaliam por meio de dados multiespectrais os parâmetros químicos e físicos da vegetação (Jackson & Huete 1991), e entre os mais comuns está o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjust Vegetation Index*, SAVI), dentre outros.

Os espectrorradiômetros portáteis para coleta de dados em campo e laboratório favoreceram análises pontuais de indicadores biofísicos e bioquímicos da vegetação, que permitiu avanços significativos na precisão do conhecimento sobre a vegetação de mangue. Contudo, são recentes as análises conjuntas que utilizam imagens orbitais e dados espectrorradiométricos para estudo do ecossistema manguezal no Brasil. A combinação dessas técnicas pode favorecer avanços na análise com precisão e na validação do mapeamento, em termos da identificação e também da diferenciação entre espécies mais comuns na costa brasileira, fator relevante como subsídio ao monitoramento ambiental e à compreensão das alterações nesse ecossistema decorrentes das mudanças climáticas globais e seus efeitos nos ecossistemas costeiros do país.

Considerando-se as folhas como a parte mais importante nas plantas, quanto à interação com a radiação eletromagnética natural, o comportamento espectral de folhas é imprescindível no estudo da copa, permitindo a sua caracterização espectral. Tal fato reforça a convicção de que nos ambientes de mangue seria possível encontrar uma forte correlação entre os níveis de reflectância de folhas, que resultam da resposta espectral, com a caracterização de diferentes espécies de mangues. O completo entendimento do comportamento espectral de cada espécie é o primeiro passo a ser considerado para a utilização de imagens de satélite de sistemas passivos e ativos na discriminação de espécies de mangue. Diante disto, destaca-se o estudo detalhado de parte dos manguezais do Nordeste do Brasil, considerando as análises integradas de multisensores. O objetivo principal deste estudo foi, baseado nessa integração de dados, desenvolver um procedimento metodológico de segmentação e classificação de espécies de mangue para parte dos estuários do litoral setentrional do Rio Grande do Norte (RN). Trata-se de uma região de extrema relevância socioeconômica para o RN, devido à presença de várias atividades econômicas, como a carcinicultura, energia eólica, turismo, pesca artesanal, salineira e petrolífera. A instalação destas atividades tem se tornado um fator preocupante quando analisados os possíveis impactos geoambientais negativos e os riscos a que os ecossistemas estão suscetíveis.

1.1 Local de Estudo

A área de estudo situa-se no litoral setentrional do RN, Nordeste do Brasil (Figura 1) inserida na Mesorregião Central Potiguar e limitada pelas coordenadas: Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000: -5.0517X/-36.8114Y, -5.0517X/-36.1606Y, -5.1853X/-36.1606Y, -5.1853X/-36.8114Y. Compreende faixa de aproximadamente 70 km de setores costeiros e estuarinos dos municípios de Galinhos, Guamaré, Macau e Porto do Mangue, na foz do estuário do Rio Piranhas-Açu.

Esta região setentrional do RN é distinguida pela ocorrência de sistema ilhas barreiras, marcado por praias arenosas abertas ao oceano e outras abrigadas, com canais de maré, rios e campos dunares, submetidos à notável ação de processos costeiros que promovem contínuas variações na linha de costa. O transporte eólico e hidrodinâmico, por meio dos ventos alísios, ondas e correntes sob as condições de mesomaré semidiurnas, provocam intensas alterações no balanço sedimentar, com a abertura e fechamento de canais de maré e a formação de ilhas e barras arenosas oriundas da intensa dinâmica sedimentar sazonal da região (Grigio *et al.*, 2005; Chaves *et al.*, 2006; Souto, 2009; Nascimento, 2009; Santos & Amaro, 2013).

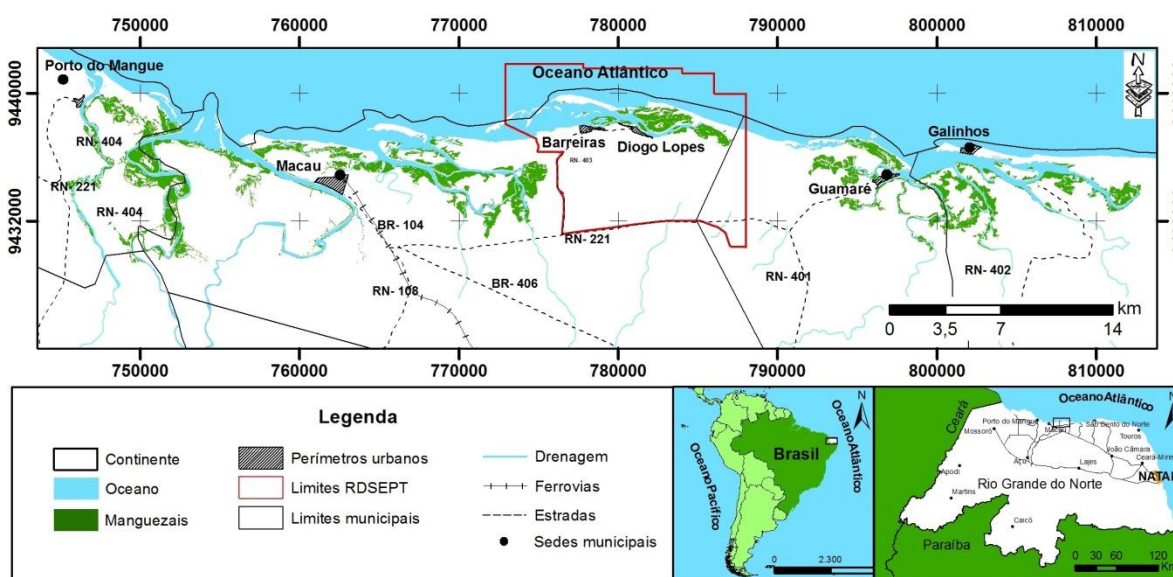


Figura 1: Mapa de localização e principais vias de acesso da área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte - RN, Nordeste do Brasil, com os estuários e respectivos manguezais.

O clima da região é semiárido quente, do tipo *BSh* de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (1948) com altas temperaturas, poucas chuvas divididas em duas estações bem definidas: verão seco e inverno chuvoso (Nimer, 1989). A alta incidência de energia solar contribui para as temperaturas elevadas e pequenas variações ao longo do ano. A temperatura do ar média anual é de 27,2°C, excedendo os 40°C no mês de novembro, e nos

meses mais frios de junho e julho é de cerca de 25°C. A amplitude térmica diária varia entre 8°C e 10°C.

A rede hidrográfica corresponde à porção nordeste da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Assú e Faixa Litorânea Norte de Escoamento Difuso, constituída basicamente pelos rios Casqueira e Conceição na porção sudoeste da área de estudo, que possuem vazões reduzidas majoradas nos períodos chuvosos e que estão subordinados à ação direta das flutuações de marés, e outros canais de marés e rios de pequeno porte. Assim, a vegetação litorânea, definida por algumas espécies de mangue, ocupa os setores que sofrem influência marinha, integrando o sistema dunar e o praial e de restinga. Os manguezais ocupam especificamente as planícies flúvio-marinhas e flúvio-estuarinas, nos trechos abrigados da ação direta das ondas e correntes de mar aberto, mas também no interior de lagunas e ao longo dos cursos de rios e canais de maré.

2. METODOLOGIA

Para cumprir o objetivo desta pesquisa foram utilizadas imagens de satélite orbitais que foram submetidas à segmentação para classificar as espécies de mangue, gerando um mapa das florestas de mangues com a espacialização das espécies e identificação das estruturais ocorrentes, validados a partir de dados de campo. Justificado pela necessidade de desenvolver um conjunto de dados a serem aplicados de forma a promover a sustentabilidade das florestas e melhorar sua gestão. A Figura 2 indica os passos realizados.

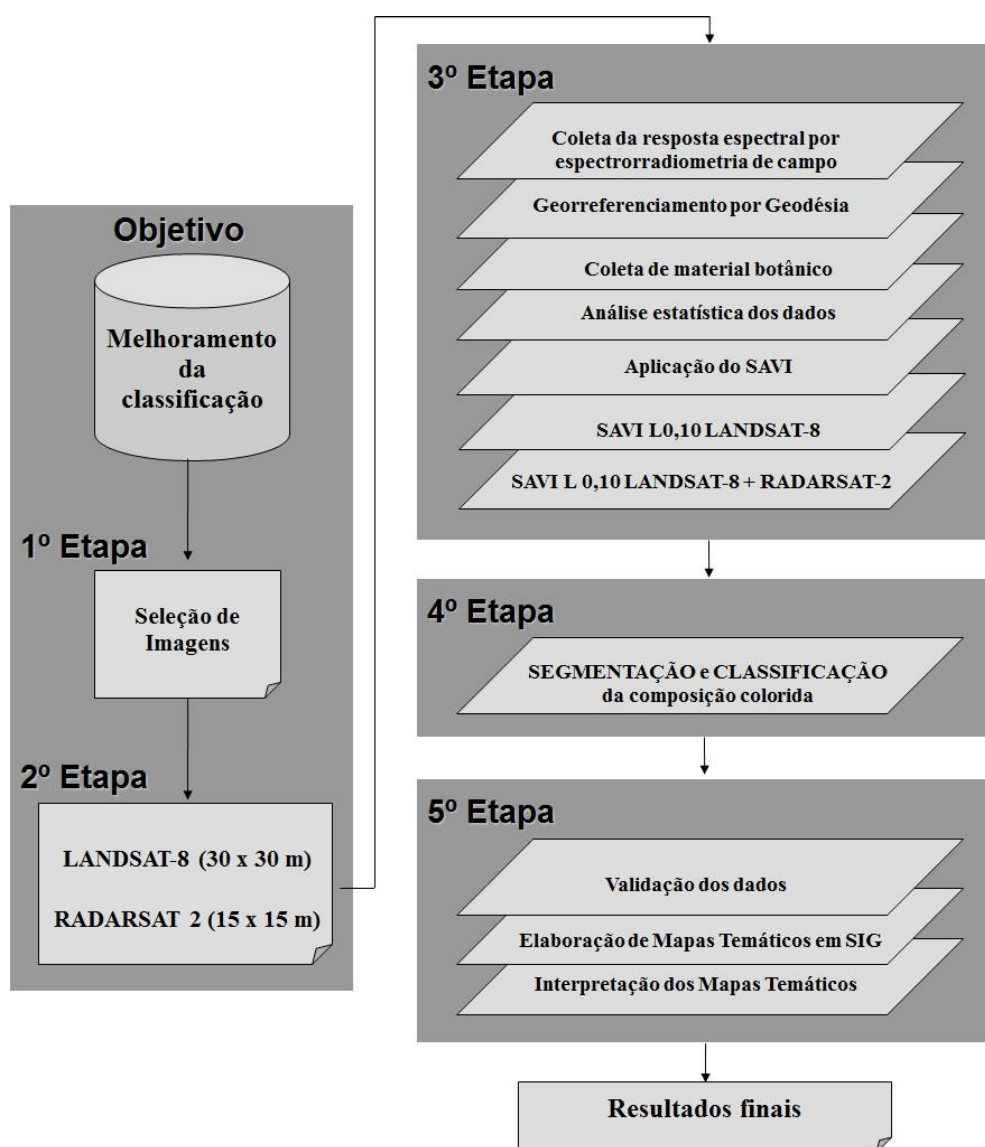


Figura 11: Fluxograma da metodologia empregada no artigo.

2.1 Coleta de Dados de Campo

A medição da assinatura espectral de espécies de mangues naturais foi realizada utilizando um espectrorradiômetro de campo portátil modelo *FieldSpec Handheld RS3* da empresa ASD Inc. Boulder (EUA), que opera na faixa espectral de 325 a 975 nanômetros (nm). A seleção das áreas de coleta se deu em função de características fisiográficas estáveis das amostras, diante das condições de acessibilidade e do regime de inundação diária das marés.

Para cada espécie foram realizadas coletas de amostras botânicas (folhas) em diferentes árvores e locais, entre os dias 19 e 22/novembro/2012 e 18 e 22/agosto/2013, no horário entre 07h00min e 09h00min e 11h00min e 13h00min, sob as condições semelhantes de iluminação solar incidente na copa das árvores, estes horários precederam a captura das

assinaturas espectrais. Foi obtida a reflectância para cinco folhas em 25 árvores de cada uma das três espécies de mangue presentes na área de estudo: *A. germinans*, *L. racemosa* e *R. mangle*; totalizando 125 folhas para cada espécie, considerando um volume amostral suficiente. Os ramos eram sempre compostos por várias folhas e coletados nos altos galhos expostos ao sol, pouco antes da medição espectral das folhas. Os critérios para escolha das folhas foram o aspecto saudável e idades variadas, sendo: 1 jovem, 3 intermediária e 1 madura para cada árvore nas quais foram coletadas as folhas. Levando em consideração que a maioria das folhas de uma árvore saudável de mangue possui a maioria de suas folhas nas idades intermediárias. Foi também realizada a aferição do comprimento e largura para todas as folhas analisadas. As folhas foram envolvidas individualmente em papel filme e embaladas em recipiente plástico de cor preta. Em seguida, foram acondicionadas em uma caixa térmica refrigerada, a fim de preservar a qualidade original das folhas, onde permaneceram até o horário da captura da resposta espectral única para cada folha.

Na captura da resposta espectral das folhas foi utilizado o cabo de fibra ótica, conectado ao espectrorradiômetro, com abertura de 45° apontado diretamente para a superfície adaxial da folha, a distância de aproximadamente 2,0 cm (Figura 3), em ambiente natural e aberto sobre uma bancada armada. Autores como Lillesand e Kiefer (2000) e Vaiphasa (2006) optaram por levantamentos em ambiente laboratorial controlado, visando evitar efeitos do ambiente, como as flutuações da iluminação natural, que podem gerar ruídos sobre os dados nos sensores. Assim, atentando para esses detalhes foram sempre observadas as condições do tempo e duração das capturas, com as leituras espectrais realizadas em ambiente aberto no sentido sol síncrono e sem cobertura de nuvens entre 09h00min e 11h00min e entre 13h00min e 15h00min. As calibrações do espectrorradiômetro foram realizadas por meio de medições de corrente escura (100% de absorção) seguida pela placa branca de referência (100% de reflectância).

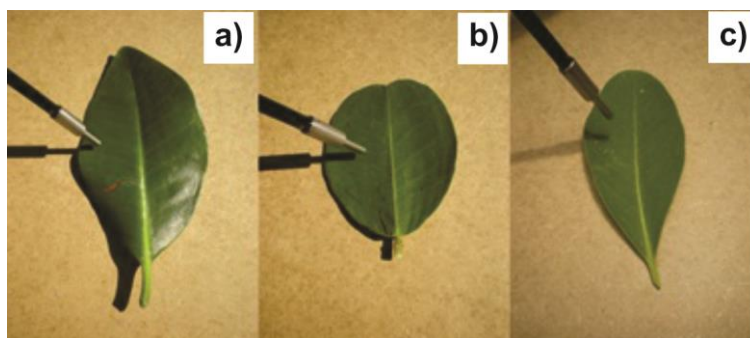


Figura 3: Captura da assinatura espectral nas folhas de três espécies de mangue da área de estudo. **a:** folha de *R. mangle*, **b:** folha de *L. racemosa* e **c:** folha de *A. schaueriana*.

2.2 Georreferenciamento dos Locais de Coleta de Amostras em Campo

Cada árvore de coleta de amostras botânicas (ramos/folhas) foi georreferenciada em campo utilizando um *Global Positioning System* (GPS) geodésico modelo Trimble 5700 pelo método de levantamento de Posicionamento Relativo Cinemático Pós-processado (*Postprocessed Kinematic*, PPK) no qual duas (2) antenas receptoras coletam dados simultaneamente (Figura 4): uma antena de frequência L1-L2 instalada sobre uma estação fixa (base) de coordenadas conhecidas, sobre um marco geodésico de coordenadas geográficas $5^{\circ}4'44.41''\text{S}/36^{\circ}28'34.06''\text{W}$ e de altura ergométrica de 13,314 m, e outra antena de frequência L1 que percorre os pontos de amostras de campo, chamadas de estação móvel (*rover*). A utilização destes equipamentos se deu a partir da real necessidade de se localizar com precisão e acurácia a distribuição espacial das amostras para posterior correspondência com imagens de satélites georreferenciadas. Na Figura 4a observa-se no detalhe a unidade coletora de dados de GPS geodésico *rover* e na Figura 4b o detalhe da mesma antena receptadora acima do dossel das árvores. A elevação da antena receptora GPS *rover* é acompanhada por uma régua graduada ultrapassando a copa das árvores, sendo necessário para maximizar a precisão e acurácia (eliminação do multi caminhamento do sinal de GPS) do ponto coletado e serviu também para a aferição da altura das árvores georreferenciadas. A Figura 4c mostra o GPS geodésico da estação base instalado sobre o marco geodésico local. Este procedimento geodésico justifica-se também no fato de que os pontos coletados devem validar a exatidão da classificação espectral pretendida, baseada nas espécies das árvores e característica dos ambientes.

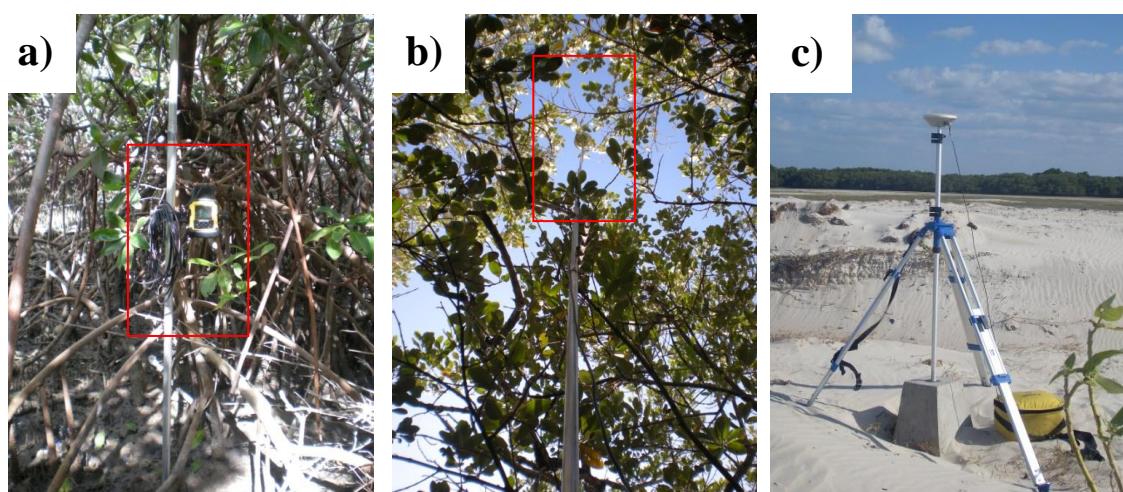


Figura 4: Georreferenciamento das árvores utilizadas para coleta de amostras botânicas (ramos/folhas). **a:** detalhe da unidade coletora de dados de GPS geodésico *rover*, **b:** detalhe da antena receptadora de dados de GPS geodésico *rover* hasteada e ultrapassando a copa das árvores e **c:** estação *base* instalada em marco geodésico.

2.3 Análise das Assinaturas Espectrais

As assinaturas espectrais foram analisadas previamente no programa ASD View Spec Pro 5.6. Em seguida, as respostas espectrais foram exportadas do formato “asd” para o formato "txt" para serem avaliadas em planilhas estatísticas e em curvas de reflectância, na análise das relações entre as espécies individuais de mangue. A curva de reflectância média para cada espécie de mangue foi determinada na análise estatística, com o intuito de se determinar a assinatura espectral significativa para discriminar individualmente as espécies de mangue estudadas.

2.4 Determinação do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo

Os Índices de Vegetação (IV) baseiam-se em transformações lineares de bandas espectrais que realçam, no geral, o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com os seus parâmetros biofísicos (Epiphanyo *et al.*, 1996). Neste trabalho, o SAVI foi escolhido por conter uma constante de ajuste do solo exposto, relevante fator quando se trata de regiões lamosas e úmidas como é o caso das áreas costeiras. Para o SAVI, os níveis de cinza nas bandas utilizadas da imagem multiespectral são convertidos nos valores de reflectância da superfície, além da atmosfera até o nível do sensor remoto, escalonada em níveis de cinza de acordo com a resolução radiométrica da imagem. O SAVI foi proposto por Huete (1988) observada na Equação 1:

$$\frac{(\text{NIR} - \text{R})(1 + \text{L})}{(\text{NIR} + \text{R} + \text{L})} \quad (1)$$

Onde NIR (*Near Infrared*) é a imagem multiespectral na banda do infravermelho próximo, R (*Red*) é aquela da faixa do vermelho e L é um fator que varia segundo as características locais; as áreas com baixa densidade de vegetação é sugerido o valor L= 1,0; áreas com vegetação intermediária o L=0,5 e L< 0,25 para áreas com altas densidades vegetacionais.

Neste trabalho foram realizadas as análises por Principais Componentes (PC) entre os coeficientes SAVI: L= 1,0; L= 0,5; L= 0,25; L= 0,16; L= 0,10. Dentre as PC testadas, o coeficiente que apresentou o maior peso foi a L= 0,10, sendo assim, este o fator utilizado. A Tabela 1 mostra os dados calibrados a partir das médias para esses fatores e m modelo calibrado foi obtido por meio de regressão linear (Figura 5).

Tabela 1: Dados de reflectância. **a:** médias e **b:** dados calibrados das folhas das três espécies de mangue presentes na área de estudada. DP = Desvio Padrão.

a) Médias						b) Calibração					
<i>A. schaueriana</i>		<i>R. mangle</i>		<i>L. racemosa</i>		<i>A. schaueriana</i>		<i>R. mangle</i>		<i>L. racemosa</i>	
Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
0,639	0,039	0,737	0,015	0,715	0,040	0,638	0,034	0,741	0,013	0,720	0,035
Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
0,563	0,697	0,709	0,761	0,632	0,784	0,569	0,682	0,711	0,759	0,648	0,777
DP		DP		DP		DP		DP		DP	
0,600	0,678	0,723	0,752	0,674	0,755	0,604	0,671	0,728	0,755	0,685	0,754

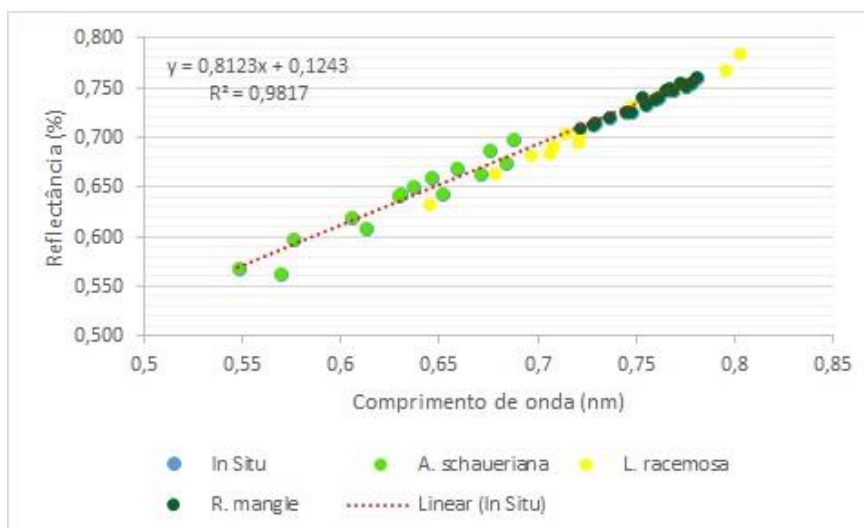


Figura 5: Regressão Linear aplicada aos dados de reflectâncias referentes às três espécies de mangue presentes na área de estudo.

2.5 Processamento Digital das Imagens

As curvas de reflectância foram relacionadas com os dados multiespectrais a partir de imagens do sensor *Operacional Land Imager* (OLI) do satélite LANDSAT-8, que apresenta resolução espacial de 30 m para 8 bandas ópticas entre 0,43–1,38 μm , uma banda pancromática com 15 m de resolução, resolução radiométrica de 16 *bits*, adquirida por meio de *download* gratuito no catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O imageamento ocorreu no dia 17/junho/2013 na ausência de nuvens sobre a área de estudo. É interessante salientar que para a aplicação do SAVI se faz necessário apenas a utilização das bandas 4 (*Red*) e 5 (*Near Infrared*).

Nesta imagem, foi executada a segmentação e a classificação de espécies de mangue usando o SAVI calibrado por meio dos dados de reflectância das folhas obtidos pelo espectrorradiômetro, resultando no modelo denominado SAVI L0,10 LANDSAT-8. Objetivando maior desempenho no uso da segmentação e classificação, optou-se também pelo uso de imagens híbridas entre o modelo SAVI L0,10 LANDSAT-8 e imagem do sensor ativo RADARSAT-2 obtida em 18/abril/2012, com polarizações HH e HV, *Wide Fine* com resolução espacial moderada de 15 m. O emprego apenas das imagens LANDSAT-8, devido à

resolução espacial de 30 m, restringiria parte dos resultados esperados em uma classificação. Tais imagens quando combinadas às imagens do RADARSAT-2 resultam na imagem híbrida com 15 m de resolução. Na ausência de polarizações dominantes na contribuição para os diferentes tipos de mecanismos de retroespalhamento reais em uma floresta de mangue (Saatchi *et al.*, 2007), optou-se pela razão entre as imagens polarizadas HH/HV.

O procedimento de classificação foi realizado no *software* licenciado ArcMap 9.3, utilizando a ferramenta de classificação não-supervisionada *Isocluster* que emprega os intervalos das respostas espectrais de cada imagem e recalcula estatisticamente por meio de análise de agrupamento cada classe gerada, promovendo assim uma auto-organização. Este método de agrupamento utiliza a fórmula da distância mínima espectral na formação de grupos. O número de interação utilizado nas análises foram quatro e o limiar de convergência foi de 0,95, significando que 95% ou mais dos pixels deveriam pertencer ao mesmo cluster entre as interações.

Posteriormente, correlacionou-se o resultado obtido no modelo SAVI L0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2 com os pontos georreferenciados *in loco* para validar a exatidão do método de classificação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 apresenta as variações do comportamento espectral entre 325 e 1075nm das folhas para as 25 árvores coletadas para cada uma das três espécies de mangue: *L. racemosa*, *R. mangle* e *A. schaueriana*. Em geral, na região do visível, a refletância se apresenta maior na faixa do verde. Por sua vez, o infravermelho próximo é a região espectral onde se apresentaram os maiores níveis de refletâncias e que nesse estudo foi levado em consideração na segmentação e classificação das espécies de mangue.

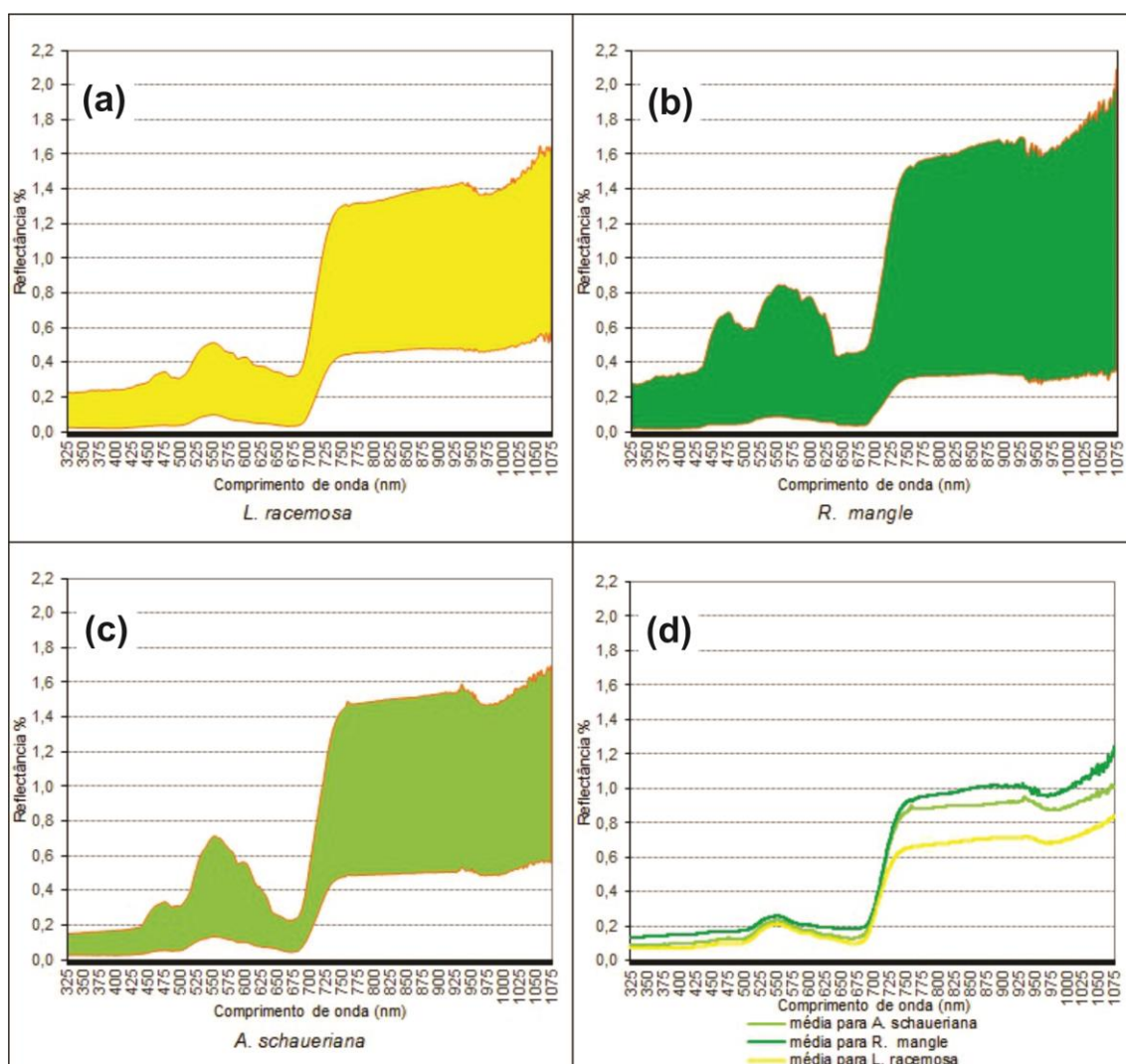


Figura 6: Variação do comportamento espectral da reflectância para as 125 folhas das espécies. **a:** *R. mangle*, **b:** *A. schaueriana*, **c:** *L. racemosa* e **d:** comparativo das média das reflectâncias.

Destaca-se a significativa heterogeneidade em relação aos níveis de reflectâncias para as 125 folhas das espécies analisadas. As folhas consideradas adultas ou velhas possuem valores de reflectâncias bem menores quando comparadas às folhas jovens. Isso se dá pelas diferentes características fisiológicas, histológicas e bioquímicas inerentes às idades das folhas, pois, de maneira geral, as folhas mais jovens possuem cutícula menos espessa e maiores níveis de clorofila. As assinaturas espectrais apontam também informações sobre propriedades bioquímicas da vegetação (Kokaly, 2001; McDonald & Chichester, 2003; Vaiphasa, 2006) e tais características são, por si só, suficientes para justificar tal heterogeneidade nos níveis de reflectância entre folhas jovens e adultas. Sendo assim, os maiores níveis de reflectâncias apresentadas pertencem às folhas jovens, enquanto os menores níveis às folhas mais velhas. O fato é que quando se pretende estudar o comportamento espectral de árvore de uma determinada espécie, essas análises devem ser levadas em

consideração, pois a copa é formada por folhas de diferentes idades; em se estudando várias árvores são possíveis estimativas do dossel de uma floresta.

A Figura 7 destaca que na comparação das respostas espectrais das três espécies de mangues, a espécie *A. schaueriana* apresenta os maiores valores de reflectância ao longo de todas as faixas do visível e infravermelho próximo. A análise detalhada da média geral das reflectâncias das folhas no intervalo da faixa do infravermelho próximo indica pequenas diferenças no comportamento da reflectância nas espécies. O comportamento da reflectância da espécie *L. racemosa* entre 745-775 nm se apresenta de forma estável em todo esse intervalo. A espécie *A. schaueriana* apresenta um forte pico de reflectância no comprimento de onda específico de 760 nm (Figura 7/3). A espécie *R. mangle* apresenta um sutil pico de reflectância no comprimento de onda 755 nm (Figura 7/1) e também um pico de absorção no comprimento de onda 765 nm (Figura 7/2). Valores semelhantes foram encontrados por (Santos *et al.*, 2013) em estudo de mapeamento de gêneros de mangue a partir de espectrorradiometria e comparação com as imagens IKONOS da Ilha de Marajó, no Pará.

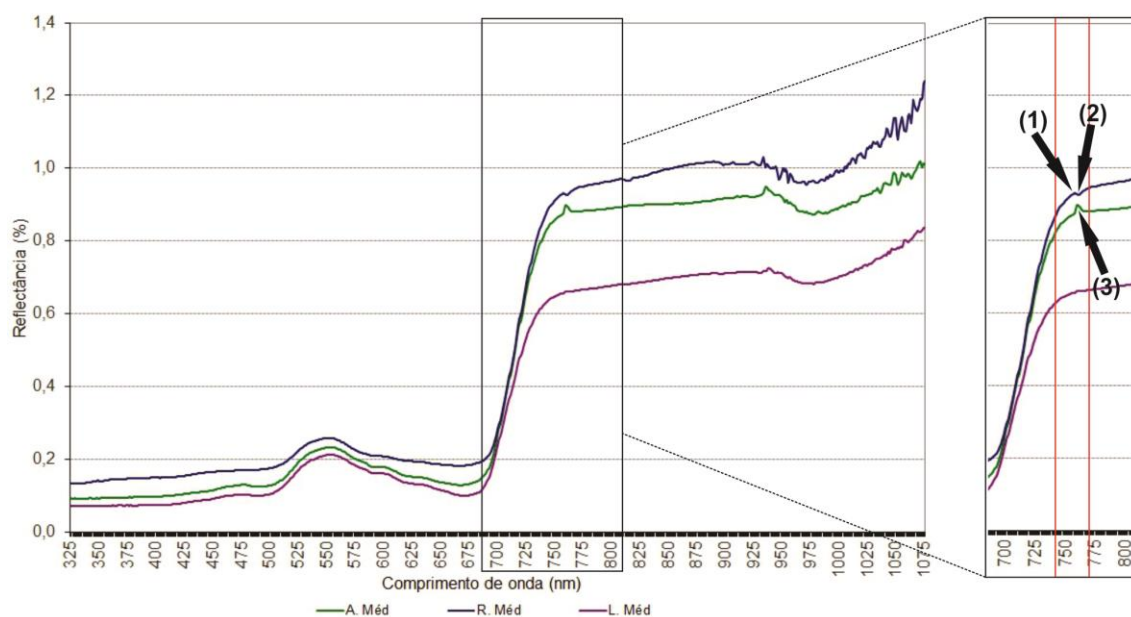


Figura 7: Assinaturas espectrais comparadas das três espécies de mangue. No detalhe, as reflectâncias das três espécies estudadas no intervalo referente ao infravermelho próximo. **1:** pico sutil de reflectância no comprimento de onda 755 nm, **2:** pico sutil de absorção no comprimento de onda 765 nm e **3:** Pico de reflectância no comprimento de onda específico de 760 nm.

Ressalta-se que o modelo SAVI aqui apresentado foi calibrado e aplicado apenas para a segmentação e classificação das espécies de mangue *R. mangle*, *A. schaueriana* e *L. racemosa*, desconsiderando os outros alvos existentes na imagem, inclusive outras formações vegetais. Visava-se melhor resultado na obtenção de classes dessas espécies, com menor

interferência dos demais ambientes em contato direto com as florestas de mangue, e por isso foi realizada previamente a extração das áreas ocupadas apenas por árvores de mangue.

A melhor correlação na classificação para a área de estudo foi aquela envolvendo a PC L0,10, testada a partir do modelo calibrado SAVI L0,10 LANDSAT-8. A Figura 7 mostra os resultados da classificação, onde foram determinadas três classes com intervalos entre 500 a 800 nm. O SAVI foi um passo valoroso para o estabelecimento de um modelo simples que pode descrever o sistema dinâmico existente entre o solo e vegetação em imagens de Sensoriamento Remoto.

A predominância da espécie *R. mangle* nos estuários, detalhado na subárea 2 da Figura 8, sugere uma menor salinidade relativa presente nestes ambientes, mais apropriados à presença do gênero *Rhizophora* em ambientes de salinidade relativamente menor e solo saturado de água, enquanto que espécies do gênero *Avicennia* ocorrerem em solos de elevada salinidade. A colonização de áreas por *A. schaueriana* em detrimento de *R. mangle*, reflete a condição salina e de umidade do ambiente, detalhadas na subárea 1 da Figura 8.

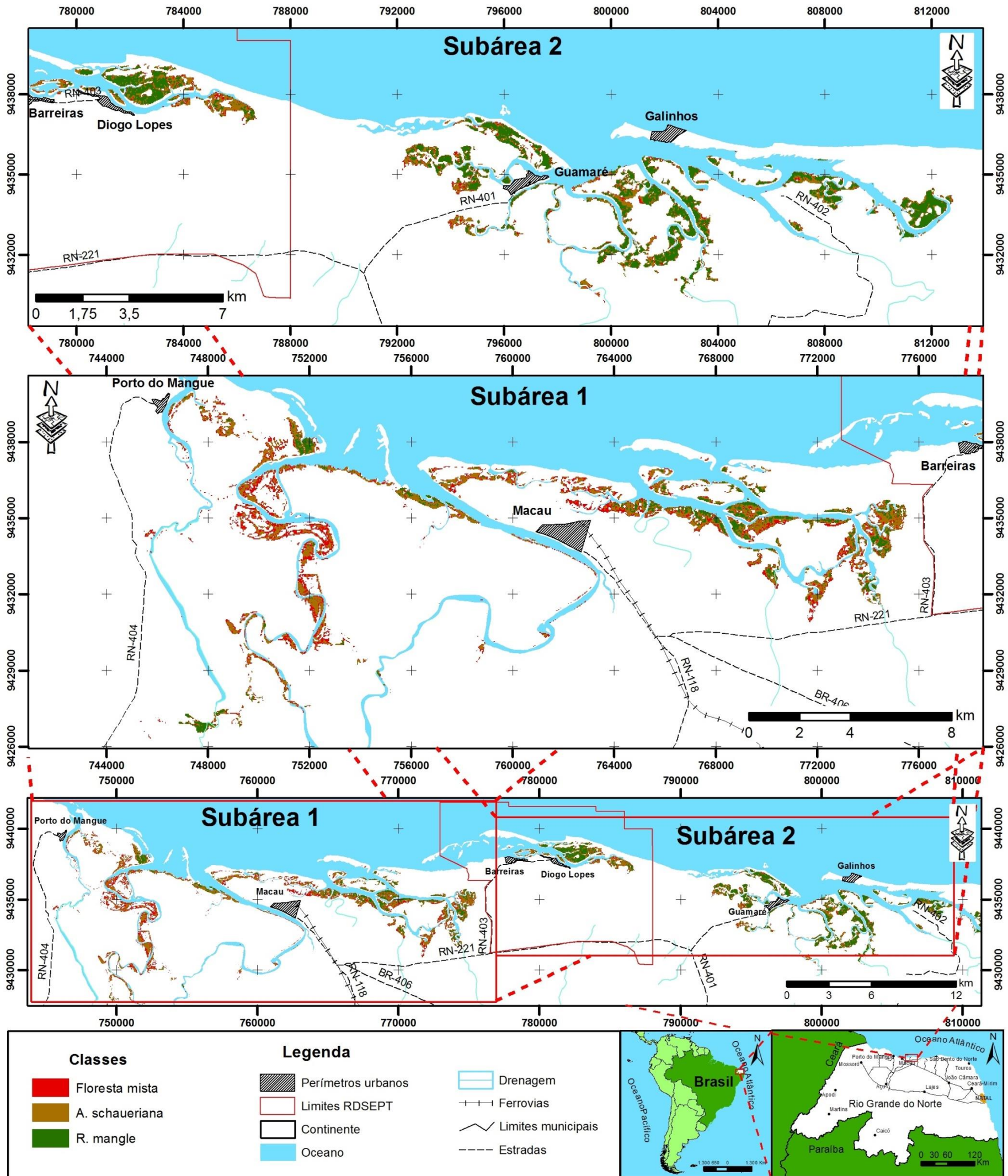


Figura 8: Mapa resultante da segmentação e classificação das espécies de mangue por meio do modelo SAVI L0,10 LANDSAT-8 e detalhe dos resultados nas subáreas de pesquisa.

Este estudo demonstra também que o uso de imagens multiespectrais isoladas, ou combinações multibandas em sistemas de cores, não são adequadas o suficiente para a distinção no nível de espécie e condições ambientais de heterogeneidades, pelo fato de os dados de reflectância atribuídos ao modelo SAVI L0,10 LANDSAT-8 indicarem amplas sobreposições e incertezas entre as situações de espécies de mangue para vários locais da área de estudo, sobretudo em decorrência da adaptabilidade destas espécies ao ambiente, como indica também os dados de GPS coletados *in loco* para esse fim.

Os dados multiespectrais de sensores remoto devem ser comparados à discriminação espectral no nível de folhas e/ou de dossel. As condições atmosféricas e do ambiente estudado, principalmente no tocante a umidade e a complexidade estrutural da floresta podem exigir reavaliação das bandas multiespectrais e ou a associação com dados de radar, que são mais eficazes na distinção de copas de espécies diferentes também. Mediante tais relevantes fatores, buscou-se solucioná-los por meio do modelo SAVI L0,10 LANDSAT 8 + RADARSAT-2, com a utilização das bandas polarizadas HH e HV do RADARSAT-2 (Figura 9).

Nos resultados apresentados observa-se que a razão entre as imagens polarizadas HH/HV foram significativas na discriminação das condições fitoestruturais de espécies de mangue, principalmente entre indivíduos da espécie *R. mangle* segmentando e classificando duas condições fitoestruturais básicas para essa espécie, chamadas de *R. mangle* II, onde as árvores apresentam baixas alturas com a média de aproximadamente 2,0 m e alta densidade de indivíduos (subárea 1 da Figura 9); e de *R. mangle* I quando os indivíduos mais desenvolvidos, com alturas médias de aproximadamente 4,5 m e densidade convencional de indivíduos (subárea 2 da Figura 9).

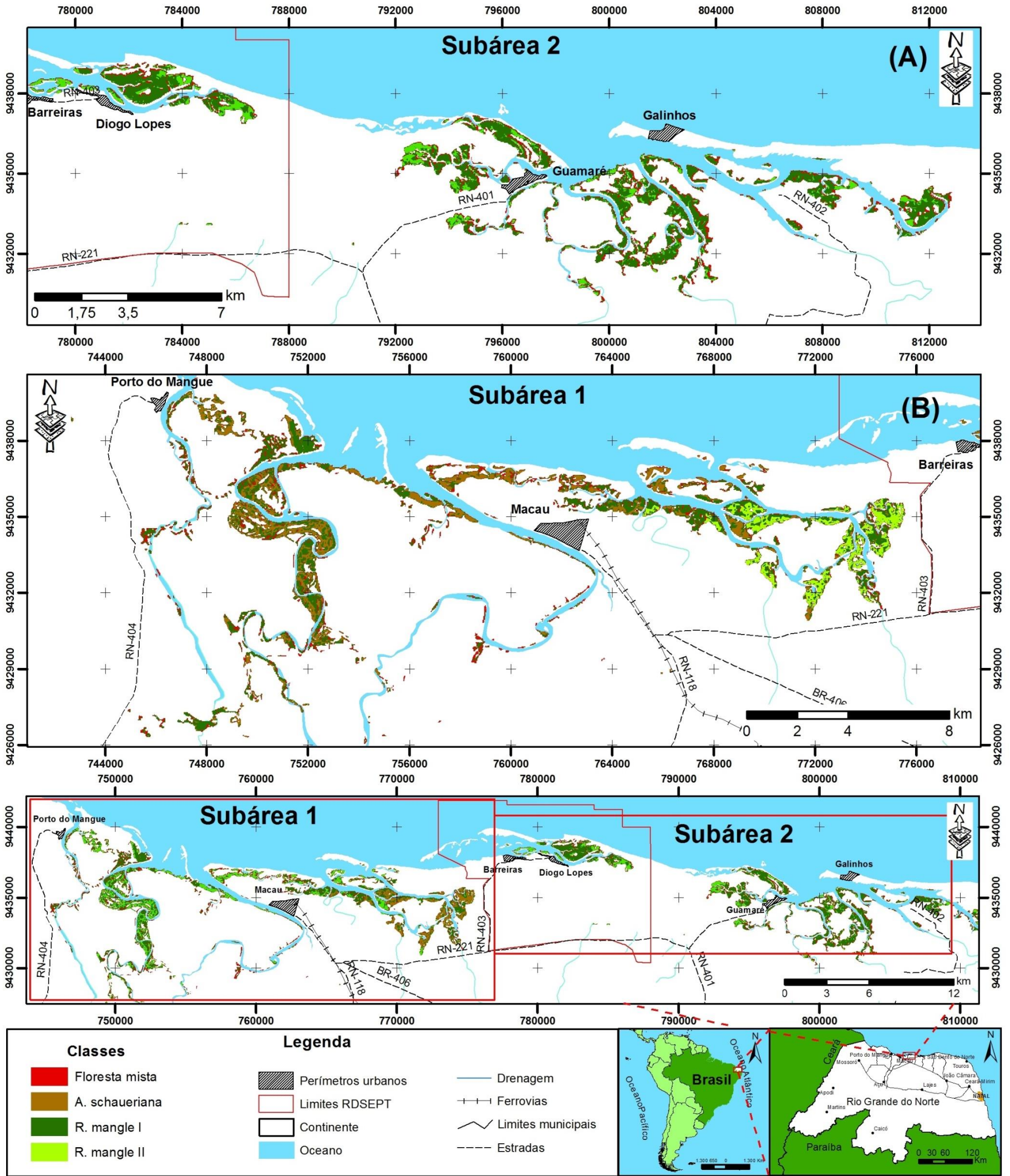


Figura 9: Mapa resultante da segmentação e classificação das fisionomias/espécies de mangue por meio do modelo SAVI L0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2 e detalhe dos resultados nas subáreas de pesquisa.

Como mencionado, a estrutura de um bosque de mangue pode influenciar no comportamento da resposta nas imagens do RADARSAT-2. Mitchell (2003) também demonstrou que os bosques maduros e com baixa densidade de indivíduos apresentam alto retroespalhamento nos sistemas de radar, sugerindo maior interação solo-tronco da micro-onda incidente. Considerando a razão entre as imagens polarizadas HH/HV, os bosques maduros que apresentaram maiores retroespalhamentos foram aqueles localizados nas áreas consideradas como manguezais externos (Figuras 10b e 10d). Este alto retroespalhamento pode ser justificado nas características fisionômicas do bosque que apresentam muitos rizóforos expostos, troncos inclinados e com algumas áreas abertas do dossel. Estas características facilitam maior penetração e interação da onda eletromagnética incidente com os componentes do dossel, ramos, galhos e troncos, sobretudo na polarização HH (Richards *et al.*, 1987). Tais condições de floresta não ocorrem nas áreas representadas nas Figuras 10a e 10c, por exemplo.

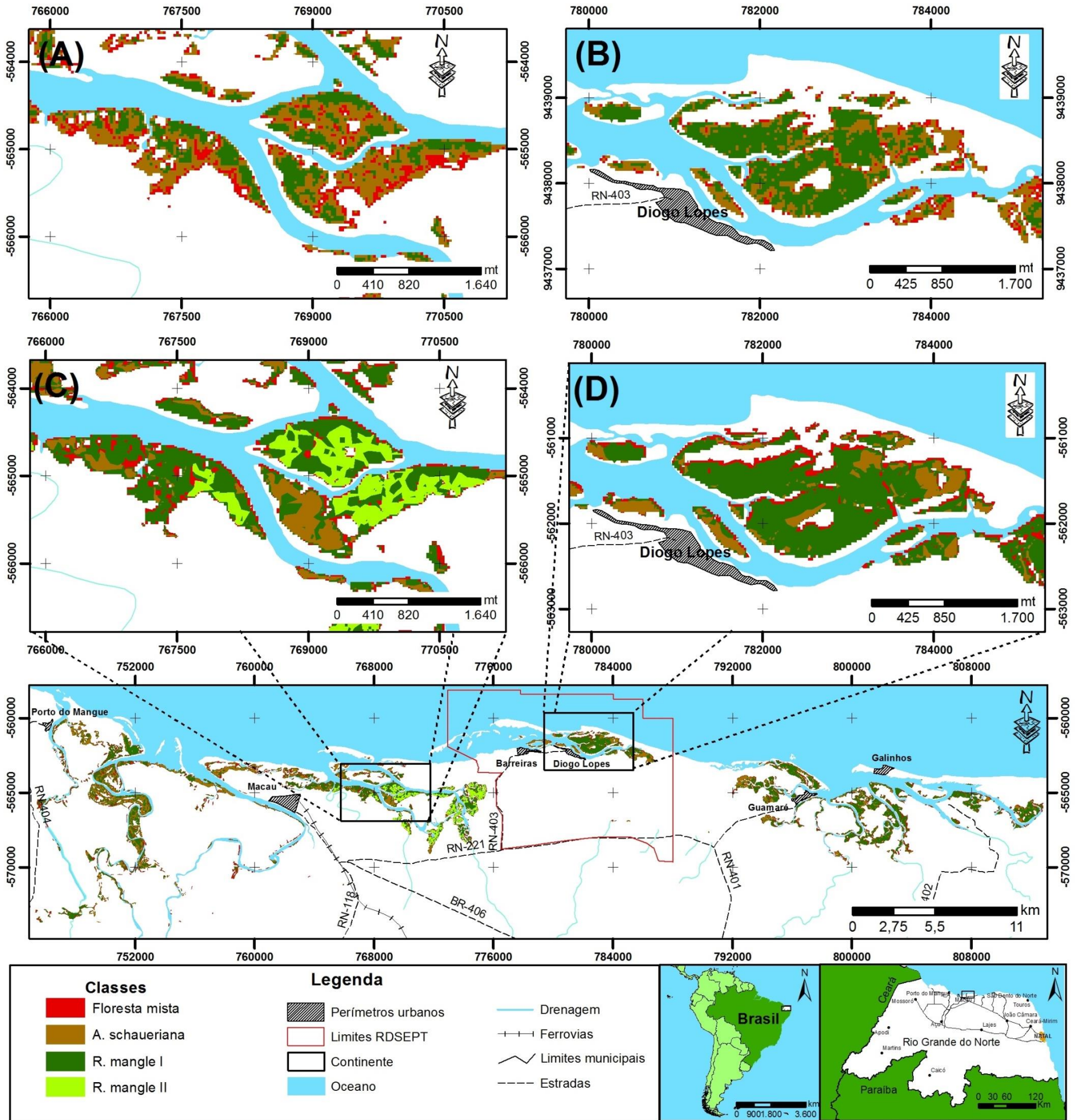


Figura 10: Mapa comparativo entre os resultados da classificação promovida pelo modelo SAVI 0,10 LANDSAT-8 e SAVI L 0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2. a e b: resultados do modelo SAVI L 0,10 LANDSAT-8. c e d: resultados do modelo SAVI L 0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2.

Proisy *et al.* (2002) mostraram que bosques com dosséis fechados apresentaram menor valor de retroespalhamento, aplicando-se aquelas áreas ocupadas pela espécie *R. mangle*. O menor valor de retroespalhamento em áreas ocupadas por esta espécie pode estar relacionado também ao fato desta espécie apresentar maior superfície foliar em relação às demais espécies estudadas. Tal constatação se dá ao comparar as larguras e comprimentos médios das folhas analisadas nesse estudo (Figura 11).

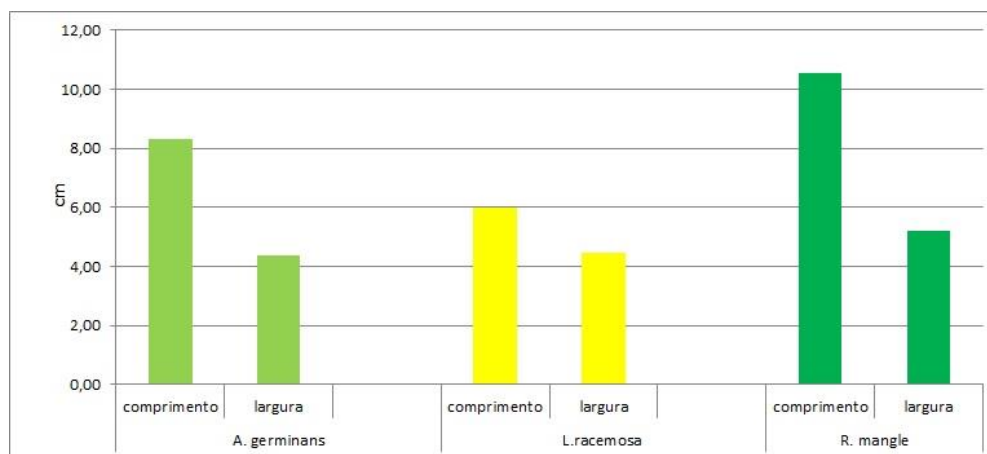


Figura 11: Comparação das médias referentes aos comprimentos e as larguras das folhas para as espécies na área de estudo: *A. germinans*, *L. racemosa* e *R. mangle*.

Como resultado final do processo de segmentação e classificação das condições fitoestruturais de espécies de mangue, a espécie *R. mangle* é a espécie dominante nos estuários estudados, totalizando uma área de 3.350 ha, representando 62,13% da área total. Portanto, nesses estuários os manguezais ocupam área total de aproximadamente 5.392 ha, sendo que deste total cerca de 2.861 ha são ocupados pela *R. mangle* I, representando 53,06% da área total; 489 ha pela condição fitoestrutural *R. mangle* II, cerca de 9,07% da área total; regiões mistas de espécies ou de transição entre elas ocupam área de 1.092 ha, cerca de 20,25% da área total, seguida da espécie *A. schaueriana* ocupando uma área de 950 ha, cerca de 17,62% da área total.

É relevante ressaltar também que, mesmo de posse dos dados do comportamento espectral referentes à espécie *L. racemosa* adquiridos por meio da técnica de espectrorradiometria de campo, que tornou possível a sua diferenciação espectral das demais espécies, não foi possível segmentar e classificar geograficamente esta espécie na área total de manguezais dos estuários estudados. O motivo é que esta espécie não forma agrupamentos de indivíduos da mesma espécie suficientes para gerar cobertura florestal nos estuários estudados, a ponto de ser detectada pelo modelo utilizado SAVI L 0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2 com resolução espacial moderada de 15 m.

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a utilização da espectrorradiometria para a aquisição de dados de reflectância em campo permitiu a captura da assinatura espectral de folhas para as espécies de mangue ocorrentes em estuários de trecho do litoral setentrional do RN. Três espécies predominantes de mangues foram mais bem identificadas e diferenciadas entre si: *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia schaueriana*.

Com base nas assinaturas espectrais, e com vistas à espacialização da ocupação das espécies de mangues nos diferentes setores dos estuários estudados, um modelo ajustado SAVI L0,10 LANDSAT-8 foi utilizado para a segmentação e classificação das espécies *R. mangle* e *A. schaueriana*. Contudo, outro modelo ajustado de imagens híbridas SAVI L0,10 LANDSAT-8 + RADARSAT-2, ou seja, acoplando imagens do sensor ativo RADARSAT-2, apresentou uma estimativa mais coerente com a realidade em relação às situações de porte e densidade das árvores e distribuição das espécies.

Os manguezais estudados ocupam uma área total de aproximadamente 5.392 ha. A espécie *R. mangle* é a espécie dominante ocupando uma área de 3.350 ha, representando 62,13% da área total, seguidas de regiões mistas de espécies ou de transição entre elas ocupam área de 1.092 ha, representando 20,25% da área total, e a espécie *A. schaueriana* ocupando uma área de 950 ha, cerca de 17,62% da área total.

Portanto, reforça-se que a junção de dados espectrorradiométricos, imagens híbridas de sistema passivo multiespectrais (LANDSAT-8) e razões de imagens polarizadas de sistema ativo (RADARSAT-2) apresentam forte potencial para efetuar segmentação e classificação de espécies de mangue em áreas com as características complexas de distribuição de espécies, como aquela encontrada na área de estudo. Tal procedimento também foi relevante na redução satisfatória de ruídos inerentes às imagens de sensores ativos, que frequentemente prejudicam a precisão da detecção e do monitoramento espacial e temporal das espécies, bem como na definição das condições fitoestruturais da vegetação de mangue.

Enfim, o trabalho enfatiza a diversidade ambiental presente nos estuários do litoral setentrional do RN. A distribuição das espécies de mangue, bem como suas inerentes situações fitoestruturais, é influenciada por fatores ambientais diversos, gerando assim florestas de difícil mapeamento espacial, em diversas escalas, e multitemporal com técnicas simples de processamento digital. Neste sentido, a proposta metodológica apresentada vem a atender tal propósito.

Capítulo 4

CÁLCULO DE BIOMASSA VEGETAL AÉREA EM FLORESTAS DE MANGUE EM SUPORTE AO MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

CAPÍTULO 4

(3º Artigo)

APRESENTAÇÃO

Este capítulo é composto pelo artigo científico em fase de finalização e ainda não submetido intitulado “**Cálculo de Biomassa Vegetal Aérea em Florestas de Mangue em Suporte ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**” que traz a estimativa de biomassa vegetal aérea total e a quantificação do teor de carbono orgânico nos compartimentos vegetais das espécies *Rhizophora mangle* e *Avicennia schaueriana* presentes na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RN), Nordeste do Brasil.

Um dos grandes problemas atuais em pauta na ordem mundial é a questão do meio ambiente. Neste sentido, este artigo vem ajudar a atender a demanda e o crescente interesse pela quantificação da biomassa vegetal aérea em manguezais devido ao potencial que estes têm em acumular CO₂ atmosférico e aos altos estoques de carbono orgânico que atribuem ao mangue um papel de extremo valor nas estimativas de carbono global e nos processos de mitigação das mudanças climáticas.

Para estimar a biomassa vegetal aérea total e o teor de carbono orgânico os autores realizaram inventário florestal em parcelas de 100x100 m para aplicar o Método Indireto não destrutivo baseado em equações alométricas específicas para as espécies e os compartimentos vegetais analisados, sendo esta estimativa a primeira a ser realizada na área em questão para esse propósito.

Este artigo vem somar seus expressivos resultados aos contidos nos artigos anteriores presentes nessa Tese, que por sua vez, serviram como base de dados pré-existent para este, formando assim, uma sequência de artigos que se somam e servem de base de dados iniciais para a criação de um Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo possibilitando, num futuro próximo, à comercialização de créditos de carbono, maximizando retornos financeiros e a melhora da sustentabilidade do meio ambiente.

CÁLCULO DE BIOMASSA AÉREA EM FLORESTAS DE MANGUE EM SUPORTE AO MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL)

BRUNO CESAR PEREIRA DA COSTA
VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO
JOSÉ EDSON MOURA

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
CCET/UFRN – Centro de Ciências Exatas e da Terra
brunocesarpc@hotmail.com

RESUMO

Os manguezais são mundialmente reconhecidos como vultosos armazenamentos de carbono, porém a necessidade de reduzir as incertezas na quantificação dos estoques de carbono torna-se cada vez mais enfatizado. Por conseguinte, este estudo analisa a biomassa vegetal acima do solo de *Rhizophora mangle* e *Avicennia schaueriana* localizadas nos manguezais da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT), Nordeste do Brasil. A finalidade desta pesquisa foi determinar por meio do Método Indireto não destrutivo, utilizando equações alométricas para estimar a biomassa vegetal total acima do solo dos compartimentos verdes e lenhosos e CO₂ aprisionado. Para isso, utilizamos medidas estruturais, tais como altura estimada e diâmetro na altura do peito (DAP) para todos os indivíduos no interior das parcelas inventariadas. Por meio dos resultados, obtivemos valores expressivos de CO₂ na biomassa vegetal aérea das espécies estudadas, com os compartimentos lenhosos apresentando o maior percentual de CO₂ armazenado, com destaque para o compartimento tronco enquanto que os menores valores de CO₂ foram registrados nas partes verdes da planta. As estimativas totais das médias de CO₂ aprisionado em cada hectare ocupado pela espécie *R. mangle* é de 39,93 t, *A. schaueriana* é de 28,47 t e as regiões de espécies mistas é de 34,20 t. Estima-se que a quantificação total de CO₂ aprisionado na RDSEPT seja 17.156,51 t.

Palavras chave: biomassa aérea; CO₂; *Rhizophora mangle*; *Avicennia schaueriana*.

ABSTRACT

The mangroves are worldwide known as bulky storages of carbon, however the need to reduce the uncertainties in quantifying of the carbon stocks become increasingly emphasized.

Therefore, this study analysis the biomass above in the soil of *Rhizophora mangle* and *Avicennia schaueriana* located in the mangroves of the Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT), Northeast Brazil. The purpose of this research was to determine through the Indirect Method nondestructive using allometric equations to estimate the total of biomass above the soil of the green and woody compartments and trapped CO₂. For this, we use structural measures such as estimated height and diameter in a breast height (DAP) to all individuals within the inventoried plots. By the results, we have obtained significant amounts of CO₂ in the aboveground biomass of the studied species, with woody compartments presenting the highest percentage of stored CO₂, especially the trunk compartment while lower CO₂ values were recorded in the green parts of the plant. The total estimates of the trapped CO₂ averages in each hectare occupied by the *Rhizophora mangle* specie is 39,93 t, *Avicennia schaueriana* is 28,47 t and the regions of mixed species is 34,20 t. It is estimated that the total quantification of trapped CO₂ in the RDSEPT must be 17.156,51 t.

Key words: aboveground biomass; CO₂; *Rhizophora mangle*; *Avicennia schaueriana*

1. Introdução

Com o aumento das concentrações de gás carbônico (CO₂) atmosférico, existe um interesse cada vez maior na mitigação de seus potenciais impactos sobre o clima. Embora a ênfase seja na diminuição das emissões, cada vez mais se reconhece que as taxas de emissão podem ser mitigadas pela transferência de CO₂ da atmosfera para biosfera (West & Marland, 2002).

Twilley *et al.* (1992) estimaram que o estoque global de carbono na biomassa vegetal de manguezais seria de 403 t/ha e que 70 % desse carbono estaria em regiões entre 0° e 10° de latitude. Assim, estes estudos contribuem com informações que podem gerar estratégias mitigadoras para compensar as emissões de CO₂ (Eamus *et al.*, 2000; Silveira *et al.*, 2007). Além disso, tais estimativas são de considerável importância para a prática da modelagem das consequências das alterações climáticas e para programas nacionais e internacionais de compensação de carbono (Tamaooh *et al.*, 2009).

A biomassa florestal é o resultado da diferença entre a produção primária líquida e o consumo pela respiração, sendo por isso considerada uma medida de mudanças na estrutura da floresta (Brown, 1997). É definida como a quantidade de matéria orgânica total da árvore expressa em massa seca por unidade de área, normalmente toneladas por hectare.

Todo o carbono presente na biomassa deriva, em última análise, a partir de dióxido do CO₂ atmosférico aprisionado através do crescimento da planta. Árvores e arbustos representam a maior parte da biomassa acima do solo em uma floresta. A biomassa total varia acentuadamente dependendo do clima e do solo, e no caso de vegetação de mangue, a frequência e duração da inundação das marés. A idade da floresta e suas ocorrentes espécies constituintes é também um fator. O tamanho das árvores e a sua densidade lenhosa são as principais determinantes da biomassa fixa.

Existe uma ampla discussão sobre qual o melhor método para se estimar a biomassa de uma floresta. O único consenso é que é impossível determinar a biomassa de cada árvore pelo método direto sem gerar uma grande degradação. Por isso, é necessário realizar as análises de regressão para gerar modelos estatísticos que possam ser aplicados para estimar biomassa em regiões maiores (Fearnside *et al.*, 1993; Higuchi *et al.*, 1998).

Este estudo representa a primeira estimativa em nível regional de cálculo de biomassa vegetal aérea em florestas de mangue associado ao aprisionamento de CO₂ em extensa área de manguezais. Especificamente, os manguezais escolhidos se associam a unidades geoambientais da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT), bordejada por intensa atividade da indústria petrolífera, com poços de exploração, dutos de transporte e polos de refino de hidrocarbonetos, salinas, carcinicultura e parques eólicos que ocupam grandes extensões da faixa litorânea e estuarina.

Assim, o presente estudo visa avaliar o potencial de aprisionamento de CO₂ por *R. mangle* e *A. schaueriana* que ocorrem nos manguezais da RDSEPT, através de modelos matemáticos. Com tais ações pretende-se contribuir com a geração, reunião e divulgação de conhecimentos para nortear ações conservacionistas e medidas que permitam a administração racional deste ecossistema, subsidiar discussões e ações de mitigação do efeito estufa no Brasil, estabelecer alternativas de desenvolvimento regional sustentável, contribuir para a inclusão do aprisionamento do CO₂ como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

1.1 Área de Estudo

A área de trabalho localiza-se no Litoral Setentrional do RN e abrange parte dos municípios de Macau e Guamaré (Figura 1). Está limitada pelas coordenadas: Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000: -5.1666X/-36.5773Y, -5.1658X/-36.5773Y, -5.1666X/-36.5774Y e -5.1658X/-36.5774Y. Nesta, está inserida a RDSEPT. O segmento costeiro ocupado pela

Reserva abrange 12.940,07 ha de área total (IDEMA, 2004), a RDSEPT engloba diversos ecossistemas como área marinha, costeira, restinga, canais de maré, campos de dunas, estuário e manguezais e área de caatinga hiperxerófila.

Na porção estuarina da RDSEPT, em trechos abrigados da ação direta das ondas de mar aberto ocupando ilhas e franjas de canais de maré e rios, encontram-se os bosques de mangues, com ocorrência predominante das espécies *R. mangle* (mangue vermelho) e *A. shaueriana* (mangue branco).

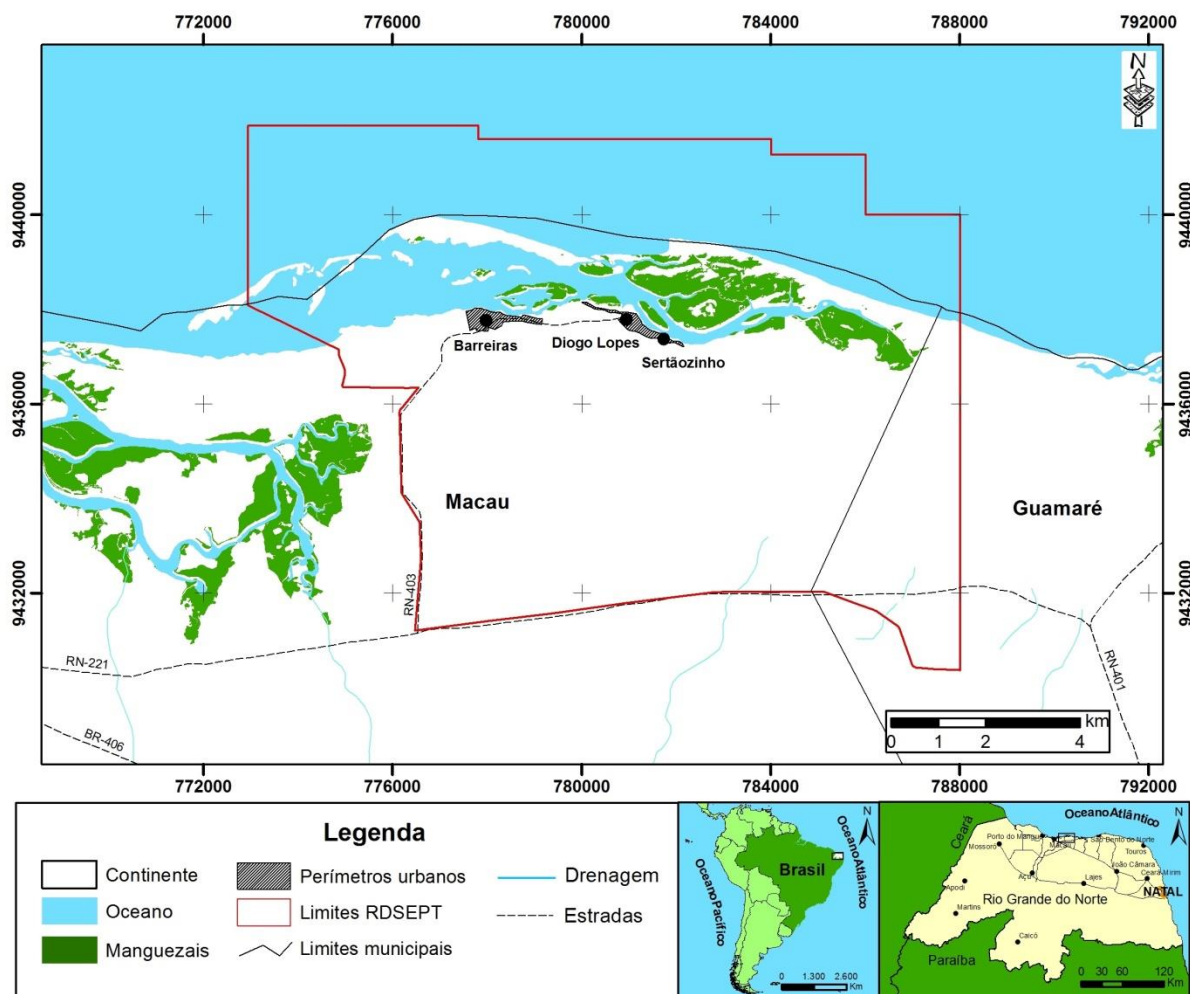


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, seu respectivo manguezal, vias de acesso, municípios e localidades pertencentes.

2. METODOLOGIA

A Hipótese que origina o presente trabalho é fundamentada na afirmação de que há uma boa relação entre a estimativa do sequestro de carbono via métodos indiretos e via geoprocessamento, quando se tratando da biomassa de área de preservação permanente. Assim, o presente trabalho objetiva apresentar uma forma de estimar a quantidade de carbono

a ser sequestrada, utilizando mapas de cobertura vegetal. A Figura 2 resume os passos e sequência metodológica realizada.

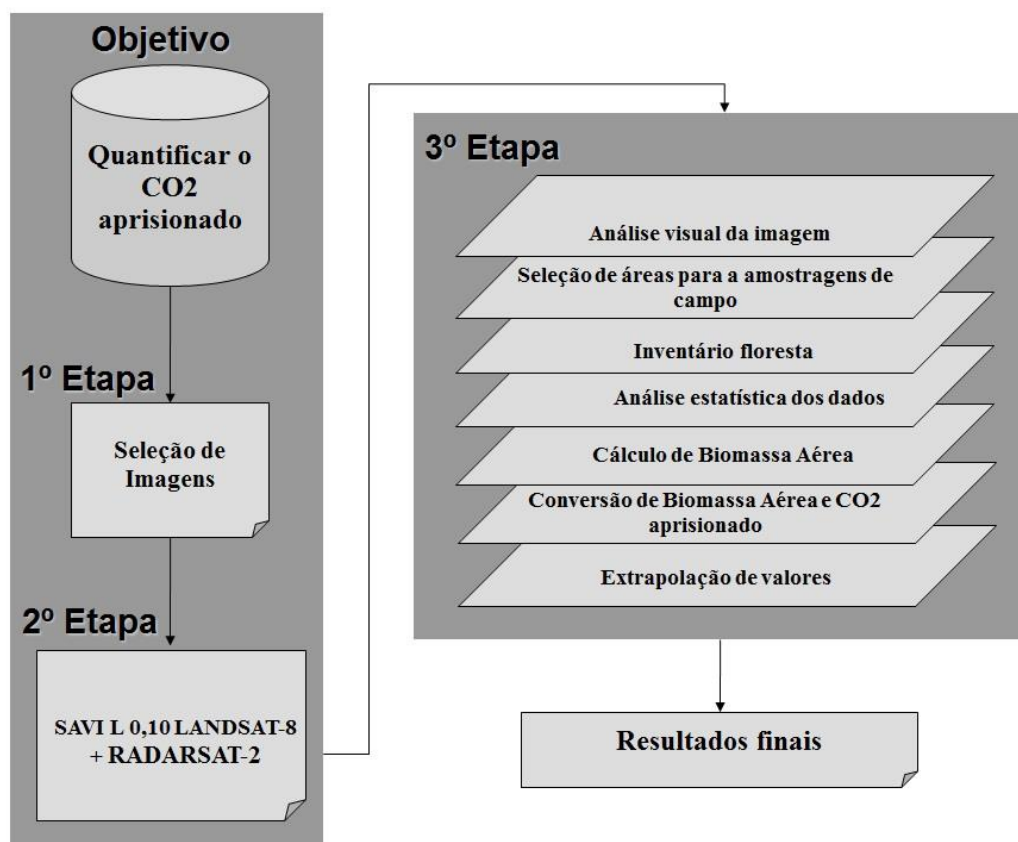


Figura 12: Fluxograma da metodologia empregada no artigo.

2.1 Inventário Florestal

As amostragens de indivíduos de *R. mangle* e de *A. schaueriana* da comunidade pioneira foram realizadas na zona de colonização da planície hipersalina associada a ambiente caracterizado por canais de maré, que fazem parte da RDSEPT, seguindo proposta de Proisy *et al.*, (2000, 2002). Após a análise visual de mapas do local de estudo publicado por (Costa *et al.*, 2017/Submetido), áreas de floresta de mangues foram selecionados para amostragens de campo, de modo a capturar a maior abrangência de fases dinâmicas das espécies, independentemente das dificuldades de locomoção na floresta inundada e densa.

Considerando as condições da área de estudo, optou-se pelo Método de Amostragem com Área Fixa que utiliza o processo de amostragem sistemática baseada na predominância da espécie ocorrente, condição fitoestrutural e porte florestal. A localização da unidade de amostra é facilitada, em geral, quando a amostragem é sistemática, ao invés de aleatória. Em decorrência disso, o tempo gasto em deslocamento para localizar as unidades amostrais é

menor e o custo de amostragem é reduzido (Péllico Netto & Brena, 1997). A caracterização estrutural das parcelas em campo foram realizadas segundo o método proposto por Fromard *et al.* (1998), em que foram medidos em cada unidade de amostra: diâmetro à altura do peito (DAP), altura estimada e informado a espécie, para todos os indivíduos vivos com DAP maior que 10 cm pertencentes às parcelas inventariadas.

2.2 Unidade amostral

A unidade de amostra utilizada teve 100 metros de largura por 100 metros de comprimento, perfazendo uma área de 1 ha ou 10.000 m² (Figura 3). Esta forma e dimensão foram escolhidas para facilitar os trabalhos de campo e gerar dados suficientes a serem extrapolados para toda a área ocupada pelas florestas de mangue da RDSEPT, baseados na imagem de classificação espacial das espécies de mangue (COSTA *et al.* 2017/Submetido). Os vértices iniciais das parcelas foram georreferenciados com a utilização de GPS Geodésico, onde o eixo Y é orientado no sentido Sul para Norte e o eixo X no sentido Leste para Oeste. Os vértices iniciais das parcelas 1 e 2 são respectivamente 779.442,420E/9.438.037,077N e 783.947,756E/9.437.617,852N.

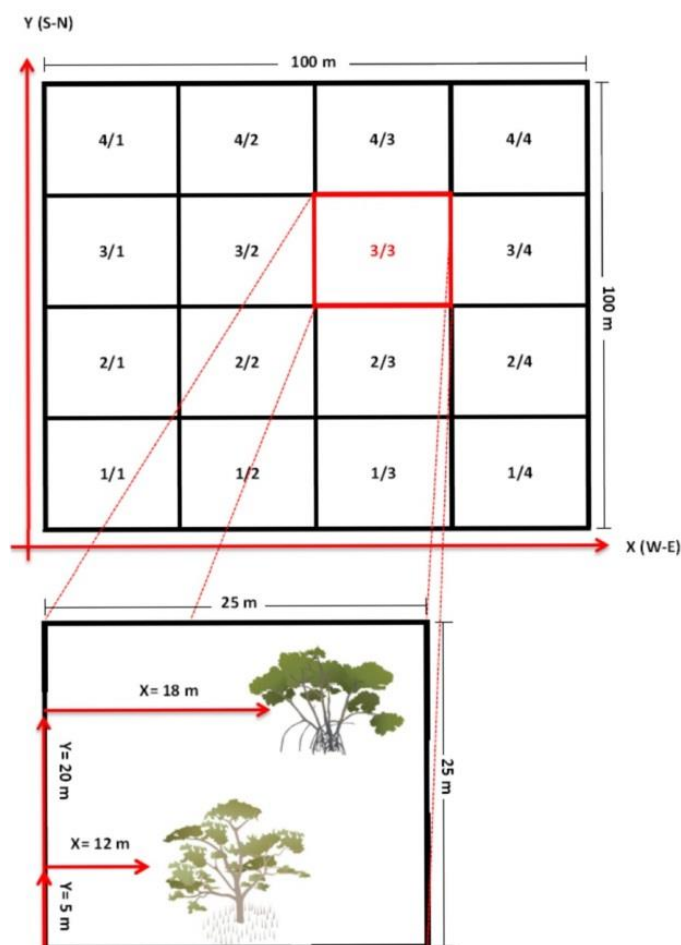


Figura 3: Metodologia de aquisição de dados das parcelas 1 e 2 de inventário florestal, com dimensão de 100x100 m. A parcela é subdividida em 16 sub parcelas de 25x25 m dispostas no sentido Sul/Norte e Leste/Oeste.

Os locais das parcelas foram selecionados de acordo com a localização geográfica e a predominância das espécies em seu interior. A parcela 1 é a mais próxima do oceano, estando na parte externa do estuário (exposto), possuindo uma salinidade mais elevada e um sedimento menos argiloso, sendo recortada por canais de maré. Esta parcela encontra-se em floresta ribeirinha que possui grande contribuição de *A. schaueriana*. A parcela 2 encontra-se em zona localizada no interior do estuário (abrigado), com salinidade mais reduzida e sedimento com uma porcentagem maior de argila, apresentando maior contribuição de *R. mangle* (Figura 4). Tais fatores são oriundos da dinâmica ambiental local e a adaptação destas espécies a esta.

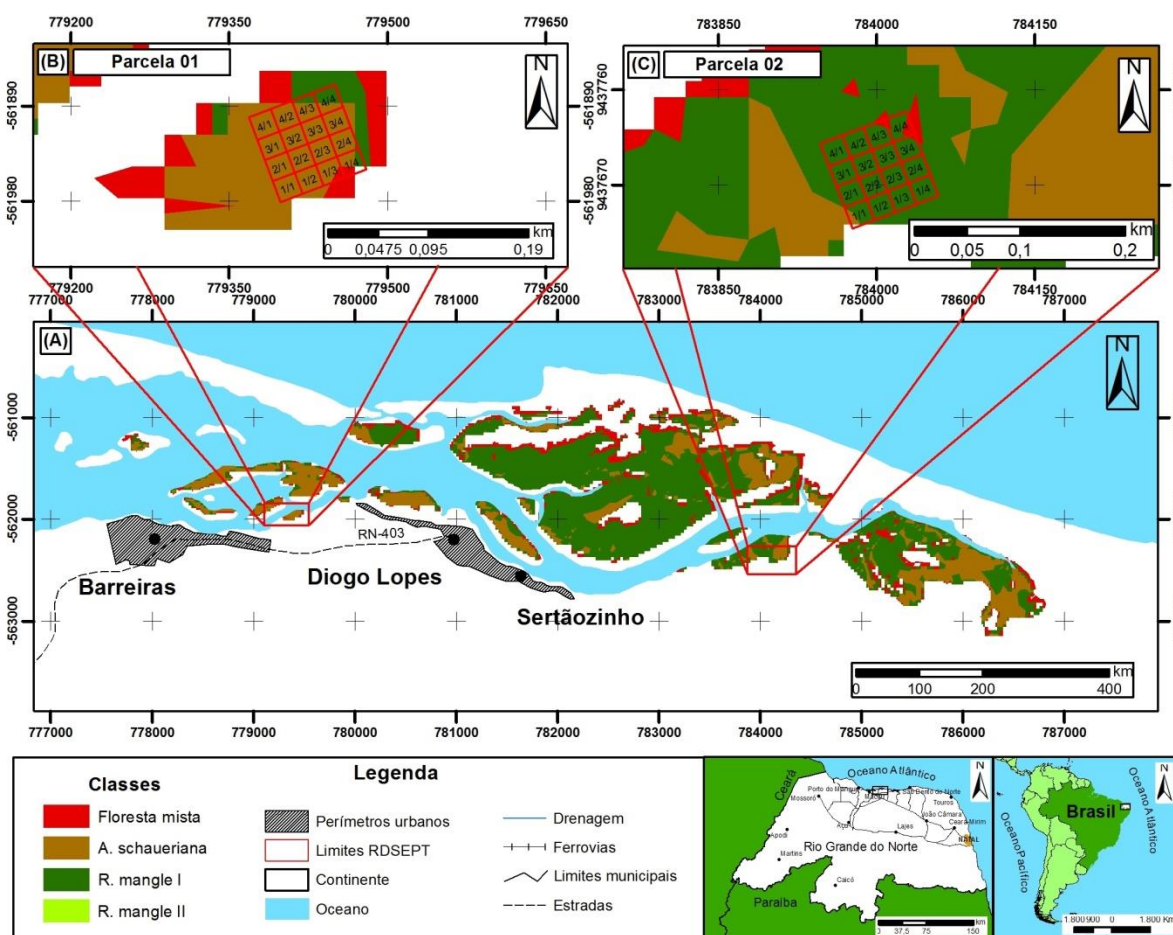


Figura 4: Mapa de localização das parcelas 1 (Diogo Lopes) e 2 (Sertãozinho). Sendo a parcela 1 com a predominância da espécie *A. schaueriana* e parcela 2 com a predominância da espécie *R. mangle*.

2.3 Estimativa de biomassa vegetal aérea

Para a estimativa de biomassa vegetal aérea total dos indivíduos de *A. schaueriana* foi aplicado diretamente à equação alométrica específica (Equação 1) proposta por Estrada *et al.* (2014), por possuir menor desvio médio em comparação com outras equações desenvolvido anteriormente para a espécie em questão.

$$\ln (\text{BAS}) = 4.8017 + 2.5282 * \ln (\text{DAP}) \quad (1)$$

Onde, ln = logaritmo neperiano, BAS = biomassa acima do solo, DAP = diâmetro a altura do peito.

Para a estimativa de biomassa vegetal aérea total dos indivíduos de *R. mangle* foi aplicado diretamente a equação alométrica proposta por Soares & Schaeffer-Novelli (2005), por ser composta de regressões múltiplas, que visam melhorar a estimativa de cálculo de biomassa vegetal aérea:

$$\ln (\text{Biomassa}) = 4.89219 + 2.61724 * \ln (\text{DAP}) \quad (2)$$

2.4 Conversão de biomassa em CO₂

Considerando que o desvio resultante da utilização de índices genéricos quando geralmente é aplicado o fator de 50% de conversão de biomassa específica em estoque de carbono pode atingir níveis indesejáveis, de até 13,6% para a biomassa acima do solo e até 25% para a biomassa radicular, objetivando a minimização de erros indesejáveis, a conversão de biomassa em carbono foi obtida através da divisão de biomassa pelas frações de carbono, como proposto por Rodrigues *et al.* (2014). Estes autores recomendaram para as partes lenhosas das duas espécies o valor específico de 44,1%, para as partes verdes de *A. schaueriana* valores de 42,6% e de *R. mangle* valores de 44,9%.

3. RESULTADOS

Parcela 1, Setor de Diogo Lopes

Os dados obtidos para a parcela 1 mostrou que a maioria dos indivíduos inventariados pertence à espécie *A. schaueriana*, seguida da espécie *R. mangle* (Figura 5, Tabela 1). Tais resultados indicam que as condições ambientais locais favorecem a estabilização da espécie *A. schaueriana* em detrimento da *R. mangle*.

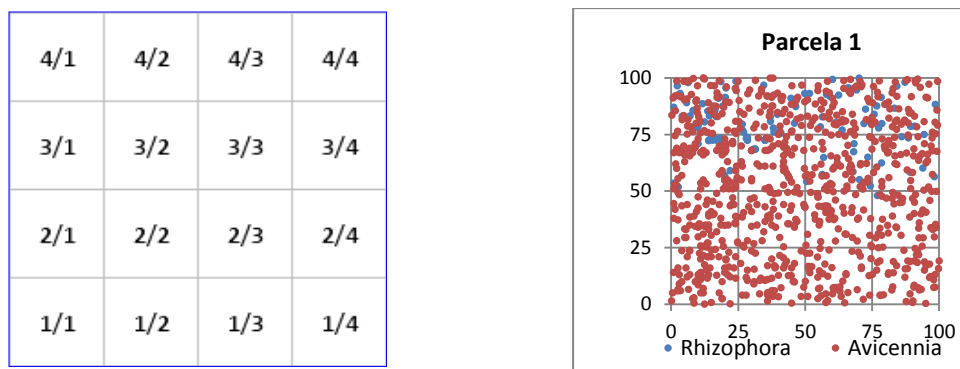


Figura 5: Abrangência dos dados e localização espacial das árvores inventariadas na parcela 1 - Diogo Lopes.

Tabela 1: Resultado do inventário para os dados referentes aos DAP na parcela 1 - Diogo Lopes, tendo a média, máxima e mínima.

Espécie	Contagem de DAP	Média de DAP	Máxima de DAP	Mínima de DAP
<i>A. schaueriana</i>	819	14.60	39.79	3.18
<i>R. mangle</i>	127	8.64	28.65	0.64
Total Geral	946	13.80	39.79	0.64

Em relação à espécie *A. schaueriana*, trata-se da maioria de indivíduos com o DAP entre 10 e 20, enquanto para *R. mangle* o DAP está entre 0 e 10 (Figura 6). Esses resultados eram esperados, pois as duas espécies possuem morfologias caulinares bem distintas, onde em condições normais os caules de indivíduos da espécie *A. schaueriana* se apresentam de modo único e sinuosos, com pouca ramificação e com desenvolvimento lateral considerável. Já os caules de indivíduos da espécie *R. mangle* se apresentam, na maioria das vezes, de modo multicaulinar e sinuoso, muito ramificados e com desenvolvimento lateral normal.

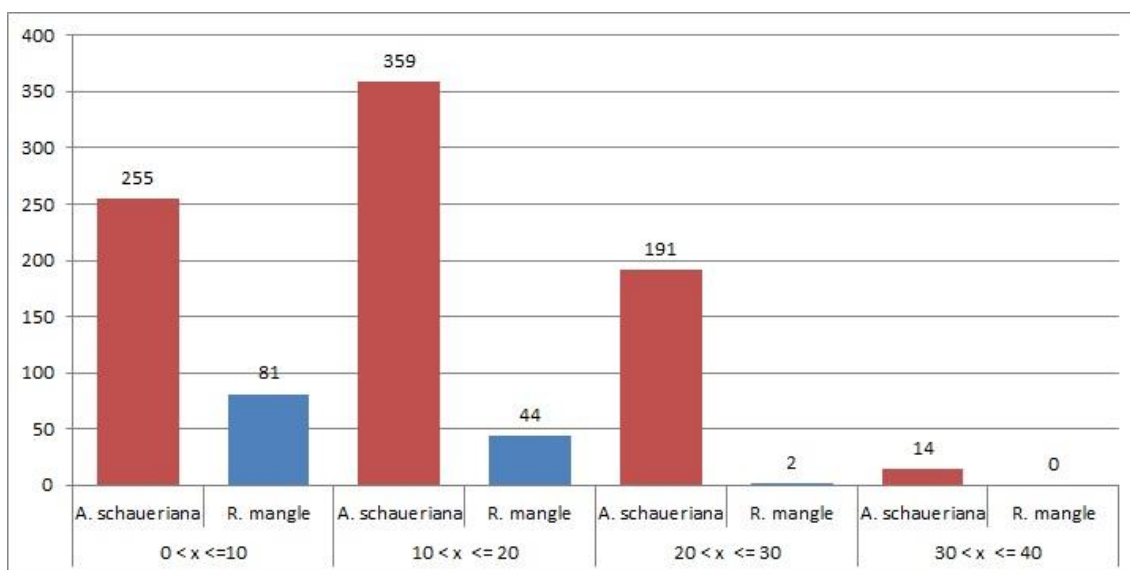


Figura 6: Comparativo entre as frequências do tamanho dos DAP para as duas espécies ocorrentes na parcela 1 - Diogo Lopes.

Parcela 2, Setor de Sertãozinho

Na análise dos dados para a parcela 2, percebe-se que a grande maioria dos indivíduos inventariados pertence à espécie *R. mangle*, com minoria de indivíduos da espécie *A. schaueriana* (Figura 7, Tabela 2). Tais resultados apontam que as condições ambientais locais favorecem a estabilização da espécie *R. mangle* em detrimento da *A. schaueriana*.

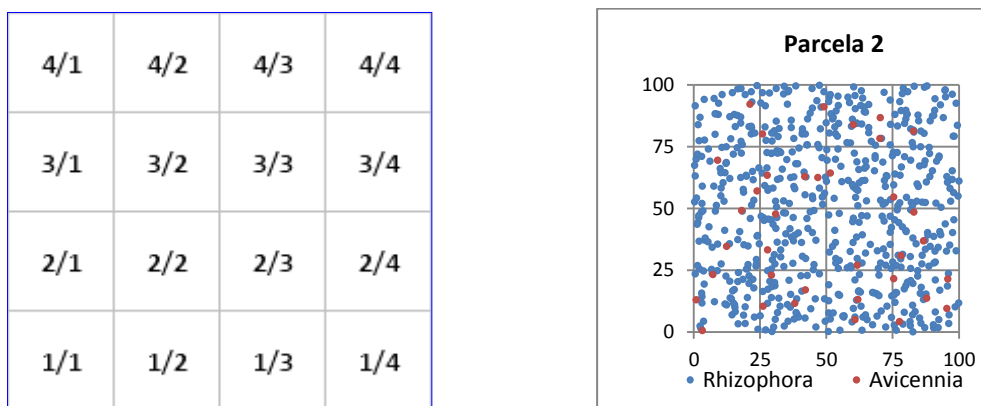


Figura 7: Abrangência dos dados e localização espacial das árvores inventariadas na parcela 2 - Sertãozinho.

Tabela 2: Resultado do inventário para os dados referentes aos DAP na parcela 2 - Sertãozinho, tendo a média, máxima e mínima.

Espécie	Contagem de DAP	Média de DAP	Máxima de DAP	Mínima de DAP
<i>A. schaueriana</i>	36	15.34	43.68	5.04
<i>R. mangle</i>	622	15.80	43.68	3.18
Total Geral	658	15.77	43.68	3.18

Quanto ao DAP, à espécie *A. schaueriana* apresentou maioria de indivíduos com valores entre 10 e 20 e a espécie *R. mangle* entre 10 e 20 (Figura 8). O aumento significativo no DAP para a *R. mangle* em relação a parcela 1 é outro indicativo que confirma este ambiente como mais favorável ao desenvolvimento desta espécie. A morfologia caulinar dos indivíduos das duas espécies apresentam-se similares a da parcela 1.

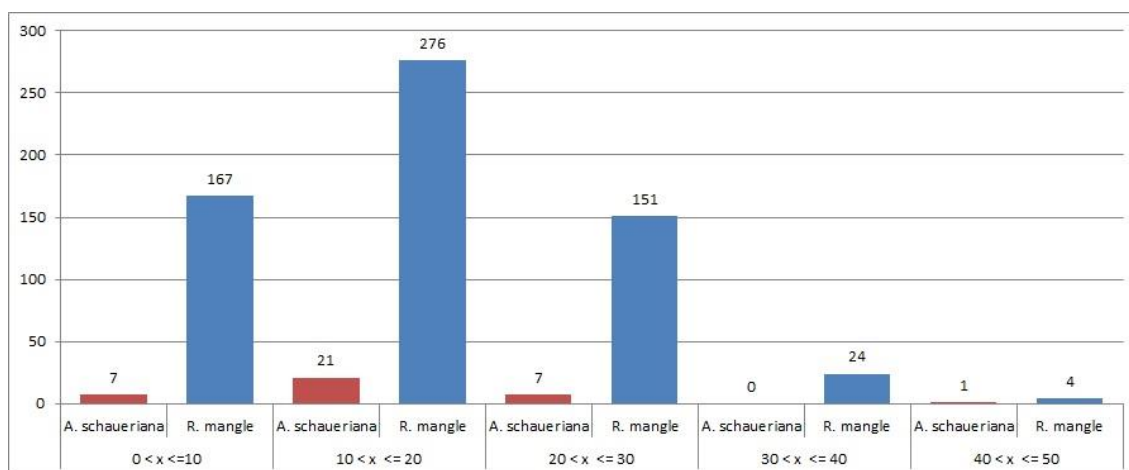


Figura 8: Comparativo entre as frequências do tamanho dos DAP para as duas espécies ocorrentes na parcela 2 - Setãozinho.

3.1 Estimativa da biomassa vegetal aérea

Foram analisados os dados provenientes do inventário aos quais, foram aplicados às equações alométricas mencionadas para obtenção da biomassa vegetal aérea das parcelas inventariadas. O resultado para o cálculo de biomassa aérea (t/ha) em ambas as parcelas esta apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Estoque de biomassa vegetal aérea armazenada nas parcelas 1- Diogo Lopes e parcela 2 - Sertãozinho.

Parcela 1		Parcela 2	
Espécie	Biomassa total (t / ha)	Espécie	Biomassa total (t / ha)
<i>A. schaueriana</i>	126,48	<i>A. schaueriana</i>	6,71
<i>R. mangle</i>	7,51	<i>R. mangle</i>	170,86
Total Geral	133,99	Total Geral	177,57

O cálculo de biomassa vegetal aérea em ambas as parcelas, tem-se que a parcela 2 possui uma biomassa maior que a parcela 1, mesmo esta possuindo montante inferior de árvores no seu interior em relação à parcela 1. Isso confirma o potencial diferenciado da espécie *R. mangle* em produzir biomassa vegetal aérea em seus compartimentos, quando comparado à espécie *A. schaueriana*. O maior potencial em produzir biomassa da espécie *R. mangle* esta diretamente relacionado à sua morfologia caulinar, já mencionada previamente, e também à presença de grande volume de raízes aéreas que possui esta espécie.

3.2 Conversão da biomassa em estoque de CO₂

Para a conversão da biomassa vegetal aérea em CO₂ considerou os fatores de conversões propostos por Rodrigues *et al.* (2014) já mencionados. Desta forma, o montante de CO₂ aprisionado (t/ha) presente nas parcelas 1 e 2 foi apresentado nas Tabelas 4.

Tabela 4: Análise de estoque CO₂ aprisionado na parcela 1- Diogo Lopes e parcela 2 - Sertãozinho.

Espécie	Carbono partes verdes (t / ha)	Carbono partes lenhosas (t / ha)	Carbono total (t/ha)
Parcela 1			
<i>A. schaueriana</i>	2,21	51,82	54,02
<i>R. mangle</i>	0,18	3,15	3,33
Total Geral	2,39	54,96	57,35
Parcela 2			
<i>A. schaueriana</i>	0,11	2,82	2,92

<i>R. mangle</i>	2,99	73,54	76,53
Total Geral	3,10	76,35	79,45

A diferença nos valores de CO₂ aprisionado nas duas parcelas está justificado pelo fato da parcela 2 ser composta na sua maioria por indivíduos da espécie *R. mangle*, que devido às características já mencionadas mostra-se com maior capacidade em produzir biomassa. Aliado a isso se tem que a essa espécie é aplicado um fator de conversão de = 44,9% para as partes verdes, sendo este maior quando comparado ao fator aplicado à espécie *A. schaueriana* = 42,6%. Assim, esta espécie também possui uma maior capacidade de aprisionar CO₂ em partes verdes.

Para estimar o total de equivalente CO₂ aprisionado dentro das florestas de mangue da RDSEPT, a área de mangue total em ha foi multiplicada pelas médias ponderadas equivalente de CO₂ total por ha ocupados por ambas às espécies de mangue e as regiões de espécies mistas apontadas pelo mapa de classificação utilizado.

O manguezal ocupa área total de 471,88 ha na RDSEPT, desta área: 296,78 ha representando 63% da área total é ocupada pela espécie *R. mangle*, 118,97 ha representando 25% da área total é ocupada pela espécie *A. schaueriana* e 56,16 ha representando 12% da área total é ocupada por área de espécies mista. As estimativas totais das médias de CO₂ em t aprisionado em cada hectare ocupado por cada espécie e a quantificação total de CO₂ em t aprisionado na RDSEPT são baseadas numa extrapolação CO₂ aprisionado conhecido nas parcelas de inventário e podem ser melhores analisados na Tabela 5.

Tabela 5: Estoques das médias de CO₂ aprisionado por espécies e a quantificação total para a área total de mangue da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão.

Espécies	Área (ha)	%	Média CO ₂ por ha (t)	CO ₂ total da RDSEPT (t)
<i>A. schaueriana</i>	118,97	25%	28,47	3.387,38
Floresta mista	56,13	12%	34,20	1.919,69
<i>R. mangle</i>	296,78	63%	39,93	11.849,44
Total Geral	471,88	100%	36,36	17.156,51

Schaeffer-Novelli *et al.* (1990) mostraram em seu estudo que todos os manguezais brasileiros apresentam capacidades diferenciadas de produzir biomassa consequentemente de aprisionar CO₂, principalmente porque os mesmos apresentam alta variabilidade estrutural decorrente de sua distribuição em grande amplitude latitudinal — desde o Estado do Amapá (4°30'N) até o Estado de Santa Catarina (28°30'S). Em uma análise global, Twilley *et al.* (1992) descreveram que a biomassa aérea localizada em regiões de latitudes baixas é de 283,6

t/ha em média, próximo ao equador, para as altas latitudes é 140,2 t/ha em média, entre 30 e 40°. Quando comparados os valores de biomassa vegetal aérea obtidos nesta pesquisa (222,78 t/ha em média) percebemos que o manguezal da RDSEPT de maneira geral possui um grande potencial de gerar biomassa e conseqüentemente aprisionar CO₂, aproximando-se ao potencial das regiões de baixas latitudes como os encontrados na Costa Norte Quaternária, mesmo encontrando-se incluída na Costa Nordeste Semiárida. Podendo gerar uma valiosa oportunidade financeira.

4. CONCLUSÕES

As equações alométricas adotadas, de acordo com as espécies, se mostraram bastantes adequadas para a quantificação da biomassa vegetal aérea presente nas parcelas inventariadas. Os modelos desenvolvidos e validados neste estudo geraram uma boa estimativa de confiabilidade da estimativa da biomassa seca (t/ha) para as árvores *R. mangle* e *A. schaueriana* no estuário da RDSEPT. A variável DAP apresenta-se como a variável mais considerável na estimativa de biomassa, apresentando-se sozinho ou associado com a altura (H). Contribuindo como base para trabalhos futuros que vislumbrem a conservação deste ecossistema.

O principal reservatório de carbono para ambas as espécies estudadas foi o compartimento tronco, visto que, apresentou o maior percentual médio de concentração do CO₂ aprisionado entre todos os outros compartimentos.

Verificou-se que o estoque de CO₂ aprisionado nas espécies possui relação direta com o tamanho e muito provavelmente com a idade da árvore, verificado pelo aumento do percentual de carbono com o aumento do DAP.

As estimativas totais das médias de CO₂ aprisionado em cada hectare ocupado pela espécie *R. mangle* é de 39,93 t, *L. schaueriana* é de 28,47 t e as regiões de espécies mistas é de 34,20 t. Estima-se que a quantificação total de CO₂ aprisionado na RDSEPT seja de 17.156,51 t.

Capítulo 5
CONCLUSÕES

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Os manguezais do litoral setentrional do RN estão sob constantes ameaças, tanto por questões naturais e/ou antropogênicas. Neste sentido as informações geradas a partir deste estudo irão servir como uma linha de base para o desenvolvimento de estratégias adaptativas e de gestão, em antecipação a esses eventos, de modo a determinar prioridades para a conservação, salvaguardar áreas significativas, monitorar a degradação florestal, possibilitar o aumento da capacidade de aprisionar carbono e gerar divisas a partir desta preservação.

O presente estudo corresponde a um mapeamento abrangente e detalhado das florestas de mangue para a área estudada, baseado em imagens de satélite com 15 m de resolução espacial, validação *in situ* com métodos de precisão geodésica, caracterização detalhada de espécies por métodos não destrutivos, sempre considerando a diversidade de ambientes da região costeira local.

Tais resultados fornecem uma visão geral e consistente da extensão e distribuição das florestas de mangue, com melhoria na resolução espacial e nos detalhes temáticos em relação aos conjuntos de dados anteriormente produzidos. Essa avaliação forneceu o primeiro mapa de distribuição espacial das espécies e suas condições estruturais para toda a extensão dos manguezais nos estuários estudados.

5.2. RECOMENDAÇÕES

Estudos detalhados sobre o acúmulo de carbono (na forma biomassa vegetal aérea) são imprescindíveis como subsídio a projetos de conservação e reflorestamento do manguezal, nesta ou em outras regiões com características fisiográficas similares, que vislumbrem contribuir na mitigação de eventuais efeitos nocivos das mudanças climáticas, podendo torná-los um exemplo de MDL. Embora o estudo mostre valores consistentes e consideráveis de acúmulo de carbono pelas espécies *R. mangle* e *A. shaueriana*, existe a necessidade de aferição do acúmulo de carbono nas outras espécies ocorrentes. Acrescenta-se ainda a necessidade de aferição também sobre o acúmulo de carbono pelo ecossistema de manguezal em todos os estuários do RN.

O estudo da viabilidade de projetos desse tipo está preditos na Convenção do Clima e no Protocolo de Quioto, que antecipa a formação de um mercado internacional em que o sequestro de CO₂, promovido pelo crescimento e manutenção de florestas que podem ser

transformadas em títulos negociáveis entre governos e empresas dos países signatários, entre os quais está o Brasil. Cada tonelada de CO₂ equivale a 1 crédito de carbono e o conceito de MDL é que cada tonelada de CO₂ não emitida ou retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento possa ser negociada no mercado mundial por meio de Certificados de Emissões Reduzidas (CER).

Destaca-se que o sequestro de CO₂ somente ocorre enquanto as árvores e a floresta estão crescendo, tornando assim fundamental e atrativo a recuperação dos ecossistemas naturais em áreas degradadas, por meio da regeneração, adensamentos ou reflorestamento, aumentando consideravelmente a biomassa, conseqüentemente o estoque de CO₂ aprisionado.

Como anteriormente mencionado; os manguezais do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte historicamente vêm sofrendo fortes pressões, porém deve-se lembrar de que a possível ocorrência de um acidente ambiental envolvendo derrame de petróleo ou seus derivados em áreas *offshore* ou *onshore* pode causar ao manguezal danos catastróficos e irreversíveis.

Portanto, o mapeamento remoto de manguezais baseado em detecção e monitoramento, deve ser também focado na proteção desses ecossistemas únicos, cujo valor não pode ser subestimado, especialmente com relação às mudanças climáticas. Com isso, a elevação do nível do mar teria um grave impacto sobre as comunidades costeiras locais. Ecossistemas de mangue naturais é sim um escudo protetivo e extremamente valioso contra esta ameaça. O primeiro passo na mitigação contra o desmatamento dos manguezais e salvaguardar seu entorno é quantificar a sua extensão e contextualizar as razões e conseqüências da sua perda. Por meio deste trabalho temos avançado em relação ao mapeamento, classificação, quantificação e contextualização, apresentando um mapa de vista ecológico significativo e estimativa do estoque de CO₂. Questões científicas abertas são inevitáveis em si tratando de área costeira onde, “tudo muda o tempo todo”. Sendo estas, dependentes de constantes aprimoramentos por meio de novas pesquisas. Em função principalmente das mudanças no estoque de CO₂, mudanças climáticas e Valoração Ambiental. Lançando futuros desafios. Porém, a compreensão desses processos requerem análises mais detalhadas em escalas temporais menores e necessitam de mais dados sobre os impactos socioambientais das atividades econômicas também.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B. & Fuck, R.A. 1977. *Províncias Estruturais Brasileiras*. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande, Atas, p. 363-391.
- Amaro, V.E. & Araújo, A.B. 2008. Análise multitemporal da morfodinâmica da região costeira setentrional do Nordeste do Brasil entre os municípios de Grossos e Tibau, estado do Rio Grande do Norte. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 8 (2): 77-100.
- Amaro, V.E. 2002. *Diagnóstico e vulnerabilidade ambiental dos estuários do litoral norte e seus entornos*. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente - IDEMA. Projeto de Zoneamento Ecológico-Econômico dos estuários do Estado do Rio Grande do Norte e dos seus entornos. SUGERCO/IDEMA, Natal/RN. Amaro, V.E. (Org.) Relatório Final.
- Amaro, V.E. 2004. *Mapas Temáticos do Uso e Ocupação do Solo e das Unidades Geoambientais dos Estuários Apodi-Mossoró, Açú-Piranhas e Guamaré-Galinhas/RN, na escala de 1:10.000, baseado em imagens IKONOS de 2000 a 2003*. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente- IDEMA/RN. Projeto de Zoneamento Ecológico Econômico dos Estuários do Rio Grande do Norte. SUGERCO/IDEMA. Amaro, V.E. (Org.) Relatório Final. Natal/RN.
- Amaro, V.E. & Vital, H., 2008. Porto Ilha – *Plataforma Continental Setentrional do Rio Grande do Norte*. GGEMMA/GEOPRO/UFRN. Relatório Final. p. 106.
- Amaro, V.E. & Costa, C.P., 2012. Identificação Fitofisionômica Através de Imagens Orbitais Híbridas do LANDSAT 5-TM e do RADARSAT-1 em Manguezais do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista de Geologia*, 25: HIDROSEMA - UFRN, 115-127.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2003. Disponível em: www.anp.gov.br, acessado em: 28 maio 2015, 2003.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E., Stier, A.C., Silliman, B.R., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.* 81, 169e193.
- Bastos, A.C. & Silva, C.G. 2000. Caracterização morfodinâmica do litoral Norte Fluminense, RJ, Brasil. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48(1): 41-60.
- Bertani, R.T.; Costa, I.G. & Matos, R.M.D. 1990. *Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e "habitat" do petróleo na Bacia Potiguar*. In: Raja Gabaglia, G.P. e Milani, E.J., (eds.), *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro, PETROBRAS, pp. 291-310.
- Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2–16.

REFERÊNCIAS

- Boegh, E.; Soegaard, H. & Thomsem, A. 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environmental*, 79: 329-343.
- Brown, S. 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. Rome: FAO. p. 55.
- Castro A.F. 2007. *Sistemas Computacionais Espaço-Temporais para tomada de decisão em questões ambientais relacionadas à indústria de petróleo e gás*. Tese (Doutorado em Geofísica e Geodinâmica). Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.
- Chaves, M.S.; Vital, H.; Silveira, I.M. & Santos, D.A.S. 2006. Beach Morphodynamics of the Serra Oil Field (NE, Brazil). *Journal of Coastal Research*, 39: 594-597.
- Chaves, M.S. 2005. *Dinâmica costeira dos campos petrolíferos Macau/Serra, Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte*. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal.
- Chaves, M.S.; Vital, H.E. & Silveira, I.M. 2004. *Beach Morphodynamic of the Serra Oil Field, northeastern Brazil*. *Journal of Coastal Research*. (Proceedings of the VII Congresso da Abequa. Mariluz-Imbé, RS, p 594-597.
- Dittmar, T., Hertkorn, N., Kattner, G., Lara, R.J., 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. *Global Biogeochem. Cycles* 20 (GB1012), 1-7.
- Doraiswamy, P.C.; Hatfield, J.L.; Jackson, T. J.; Akhmedova, B.; Prueger, J. & Sterna, A. 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 92: 548–559.
- Eamus, D.; McGuinness, K & Burrows, W. 2000. *Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia*. Environment Australia Cataloguing – in- Publication, p 64.
- Eisma D. 1986. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research* 20: 183-199.
- Ellison, A.M. & Farnsworth, E.J. 1996. Anthropogenic disturbance of Caribbean mangrove ecosystems: Past impacts, present trends, and future predictions. *Biotropica*, 4: 549–565.
- Epiphanyo, J.C.N.; Glerian, J.; Formagio, A.R. & Rudorff, B.F.T. 1996. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 31(6): 445-454.
- Estrada G.C.D.; Soares M.L.G.; Santos D.M.C.; Fernandez V.; Almeida P.M.M.A.; Estevam M.R.M. & Machado M.R.O. 2014. Allometric models for aboveground biomass estimation of the mangrove *Avicennia schaueriana*. *Hydrobiologia*, 734: 171–185.

REFERÊNCIAS

- Farias, P.R.C. 1997. *Geologia de Superfície da Área de Macau-RN. Relatório Final*. PETROBRÁS/GEXP/GELAB, Relatório Interno, 76 p.
- Fearnside, P. M.; Leal Filho, N. & Fernandes, F.M. 1993. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research*, 98(9): 16733-16743.
- Fernandes R. 2001. *Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos*. Trabalho Final de Curso, Licenciatura em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, 124.
- Ferreira, A.T.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2014. Geodésia Aplicada na Integração de Dados Topográficos e Batimétricos na Caracterização de Superfícies de Praia. RBC. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, 66: 167-184.
- Flanders, D., Hall-Beyer, M., & Pereverzoff, J. 2003. Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(4), 441-452.
- Franco, C.G.M.; Amaro, V.E. & Souto, M.V.S. 2012. Prognóstico da erosão costeira no litoral sententrional no Rio Grande do Norte para os anos de 2020, 2030 e 2040. *Revista de Geologia (Fortaleza)*, 25: 37-37.
- Fromard, F.; Puig H.; Mougín E.; G. Marty, J.L. & Cadamuro L. 1998. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia*, 115: 39–53.
- GESAMP. 2003. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Report of the thirty-third session, Rome, 5-9 May 2003. *Reports and Studies*, 74: 36.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., Duke, N. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using Earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, p. 1-6.
- Gitelson, A.A.; Gritz U. & Merzlyak M.N. 2003a. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves, *J. Plant Physiology*, 160: 271 – 282.
- Gomes A.N.; Gomes M.N.; Marques Junior S. & Ramos R.E. 2001. *Sistema de Gestão Integrada: Uma estratégia competitiva para o setor do petróleo*. In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 1º. Natal. Anais... Resumos. Natal / RN, v. 1, p. 254.
- Grigio, A.M.; Souto, M.V.S.; Castro, A.F.; Amaro, V.E.; Vital, H. & Diodato, M.A. 2005. Method of analysis of the coastline evolution based in remote sensing and geographical information system products: Guamaré District Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, 42(2): 412- 421.
- Herz, R. 1991. *Manguezais do Brasil*. São Paulo. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 227 pp.

REFERÊNCIAS

- Higuchi, N.; Santos, J.; Ribeiro, R. J.; Minette, L. & Biot, Y. 1998. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. *Acta Amazônica*, 28(2): 153-166.
- Huang, C. & Asner G. P. 2009. Applications of Remote Sensing to Alien Invasive Plant Studies. *Sensors*, 9: 4869-4889.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environ.*, 25: 53-70.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do RN. Informativo Municipal – Macau. Natal/RN, v. 05, p.1-14. 1998.
- Jackson, R.D. & Huete, A.R. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive veterinary medicine*, 11: 185-200.
- Kjerfve, B. 1990. Manual for investigation of hydrological process in mangrove ecosystems. UNESCO Publication Ras/86/120. 79 p.
- Kokaly, R.F. 2001. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. *Remote Sensing of Environment*, 75(2): 153-161.
- Köppen, W. 1948. Con um estúdio de los climas de la Tierra. México: Fondo de Cultura Economica. *Climatologia*, p. 478.
- Lillesand, T. M. & Kiefer, R. W. 2000. Remote sensing and image interpretation. Seventh Edition.
- Lima, F.G.F.; Matos, M.F.A. & Amaro, V.E. 2012b. *Contribuição para os Estudos Sobre Influência das Forçantes Meteoceanográficas na Morfodinâmica Costeira do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte – Brasil*. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 9, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Anais... Rio de Janeiro, RJ (CD-ROM).
- Man Yu, C. 2002. Caracterização e tipologia dos projetos de sequestro de carbono no Brasil. In: Sanqueta, C. R. et al. (editores). *As florestas e o carbono*. Imprensa Universitária da UFPR. Curitiba, 265p.
- Matos, M.F.A.; Fortes, C.J. ; Amaro, V.E. ; Scudelari, A.C. & Neves, C.F. 2011. *Análise de Dados a partir de Medições in situ no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte - Brasil*. In: VI Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, 2011, Boa Vista, Cabo Verde. *As Zonas Costeiras em Risco*. Lisboa: APRH., p. 73.
- Menezes, M. P. M.; Berger, U.; Mehlig, U. 2008. Mangrove vegetation in Amazonia: a review of studies from the coast of Pará and Maranhão States, north Brazil. *Acta Amaz.* [online]. vol.38, n.3, pp. 403-420. ISSN 0044-5967.
- McDonald, M.S. & Chichester W. 2003. Photobiology of higher plants.

REFERÊNCIAS

- Ministério do Meio Ambiente - MMA, Cartas de Sensibilidade ao Óleo - Cartas SAO Atlas bacias Potiguar e Ceará, 2004. Disponível em: www.mma.gov.br, acessado em: 30/08/2016.
- Mitchell, A. 2003. *Remote sensing techniques for assessment of mangrove forest structure, species composition and biomass and response to environmental change*. PhD thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente -, Cartas de Sensibilidade ao Óleo. Cartas SAO Disponível em: www.mma.gov.br, acessado em: 29/08/2016.
- Nascimento, M.C. 2009. *A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais*. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Departamento de Geologia, Programa de Pós- Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, Natal.
- Nimer, E. 1989. *Climatologia do Brasil*. IBGE, Rio de Janeiro, 2ª Ed., p. 442.
- Paladino E.E. 2000. *Modelagem matemática e simulação numérica de trajetórias de derrames de petróleo no mar*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 126 p.
- Péllico Netto, S. & Brena, D.A. 1997. *Inventário Florestal*. Curitiba: UFPR., v.1, p.316.
- PNGC - Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro: 25 anos do gerenciamento costeiro no Brasil / Flávia Cabral Pereira e Márcia Regina Lima de Oliveira, organizadoras. Brasília: MMA, 2015. 181 p.
- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F. & Karam, M.A. 2000. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sensing of Environment*, 71: 56-66,
- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F.; Trichon, V. & Karam, M.A. 2002. On the influence of canopy structure on the radar backscattering of mangrove forest. *International Journal of Remote Sensing*, 23(20): 4197-4210.
- Richards, J.A.; Woodgate, P.W. & Skidmore, A.K. 1987. An explanation of enhanced radar backscatter from flooded forests. *International Journal of Remote Sensing*, 8(7): 1093–1100.
- Rodriguesa D.P.; Hamacherb C.; Estrada G.C.D. & Soares M.L.G. 2014. Variability of carbon content in mangrove species: Effect of species, compartments and tidal frequency. *Aquatic Botany*, 120: 346–351.
- Saatchi, S.S.; Houghton, R.A.; dos Santos Alvala R.C. & Soares, J.V. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Glob Change Biol*: 816–837.
- Santos, D.C.; Souza Filho, P.W.M. & Silva, A.Q. 2013. *Reconhecimento e mapeamento de gêneros de mangue a partir de dados espectrorradiométricos e imagens ikonos na Ilha de Marajó-Pa*. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Foz do Iguaçu*. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR.

- Santos, M.S.T. & Amaro, V.E. 2013. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14: 151-162.
- Schaeffer-Novelli, Y.G. Cintron-Molero, R.R.; Adaime T.; & Camargo M. 1990. Variability of mangrove ecosystems along the Brazilian coast. *Estuaries* 13: 204–218.
- Schaeffer-Novelli, Y., Cintron-Molero, G., Soares, M.L.G., Rosa, T., 2000. Brazilian mangroves. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 3, 561-570.
- Silva, R.L. & Nogueira, A.M.B. 1995. *Estratigrafia da Porção Emersa da Costa do Rio Grande do Norte*. In: Simpósio sobre processo sedimentares e problemas ambientais na zona costeira nordeste do Brasil, 1. Recife, p 44-147.
- Silveira, J.D. 1964. *Morfologia do litoral*. In: Brasil, a terra e o homem. São Paulo, p. 253-305.
- Silveira, P., Koehler, H. S., Sanquetta, C. R. & Arce, J. E. 2007. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. *Revista Floresta*, 38(1),
- Small, C. 2011. *Spatiotemporal dimensionality and time-space characterization of vegetation phenology from multitemporal MODIS EVI*. Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University, NYC USA.
- Soares, M.L.G. & Schaeffer-Novelli Y. 2005. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65: 1–18.
- Souto, M.V.S. 2009. *Análise da Evolução Costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Região Sob Influência da Indústria Petrolífera*. Tese (Doutorado em Geofísica e Geodinâmica). Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.
- Souto, M.V.S.; Grigio, A.M.; Castro, A.F. & Amaro, V.E. 2006. *Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, City of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Itajaí, SC - Brazil), Estados Unidos, v. 39, p. 1618-1621.
- Souza Filho, P. W. M. 2005. Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427-435.
- Statterger, T.K.; Caldas.L.H.O. & Vital.H. 2006. *Holocene Coastal Evolution of the Northern Rio Grande of Northeast Coast, NE, Brazil*. *Journal of Coastal Research*, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium). Itajaí, SC, p. 150-155.
- Suguió, K. 2003. Tópicos de geociências para o desenvolvimento sustentável: as regiões litorâneas. *Revista do Instituto de Geociências da USP*, 1: 1-40.

REFERÊNCIAS

- Tamooh, F.; Kairo, J. G.; Huxham, M.; Kirui, B.; Mencuccini, M. & Karachi, M. 2009. Biomass accumulation in a rehabilitated mangrove forest at Gazi Bay. *African Studies Collection*, 20: 131-146.
- Twilley, R.R., Chen, R.H. & Hargis, T. 1992. Carbon sinks in mangrove forests and their implications to the carbon budget of tropical coastal ecosystems. *Water Air Soil Pollut* 64: 265–288.
- Vaiphasa, C. 2006. *Remote Sensing Techniques for Mangrove Mapping*. International Institute for Geo-information Science & Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
- Velozzo, T.G. & Alves, A.R. 2006. *Características gerais do fenômeno da maré no Brasil*. Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, Tomo LXI.
- Wang, L.; Sousa, W.P. & Gong, P. 2004. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *Int. J. Remote Sensing*. 25: 5655-5668.
- West, T.O. & Marland, G.A. 2002. Synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 91: 217-232.

