



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: brunocesarp@hotmail.com; venerandoamaro@gmail.com; atargino@prof.ung.br

Recebido em: 29/11/2016 Aprovado em: 26/01/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_135_149

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 importante 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 prevalecente 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 an important 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.

Keywords: 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 avaliado apenas os produtos pesqueiro 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 à 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 desenvolvimentos 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 geográficas $5^{\circ}3'6,12''S/36^{\circ}48'41,04''W$, $5^{\circ}3'6,12''S/36^{\circ}9'38,16''W$, $5^{\circ}11'7,08''S/36^{\circ}9'38,16''W$, $5^{\circ}11'7,08''S/36^{\circ}48'41,04''W$, 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).

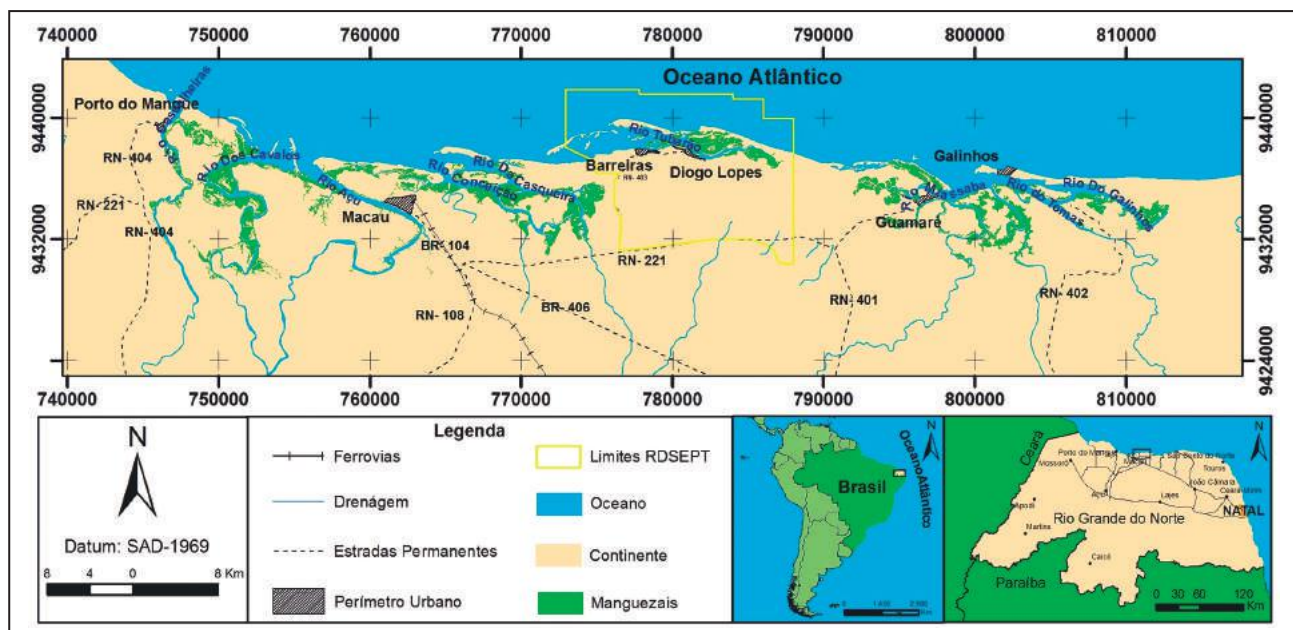


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. Estuários, canais de maré, com respectivos manguezais, e principais vias de acesso.

2 Materiais e Métodos

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.

2.1 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).

2.2 Processamento Digital de Imagens

OPDI 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,

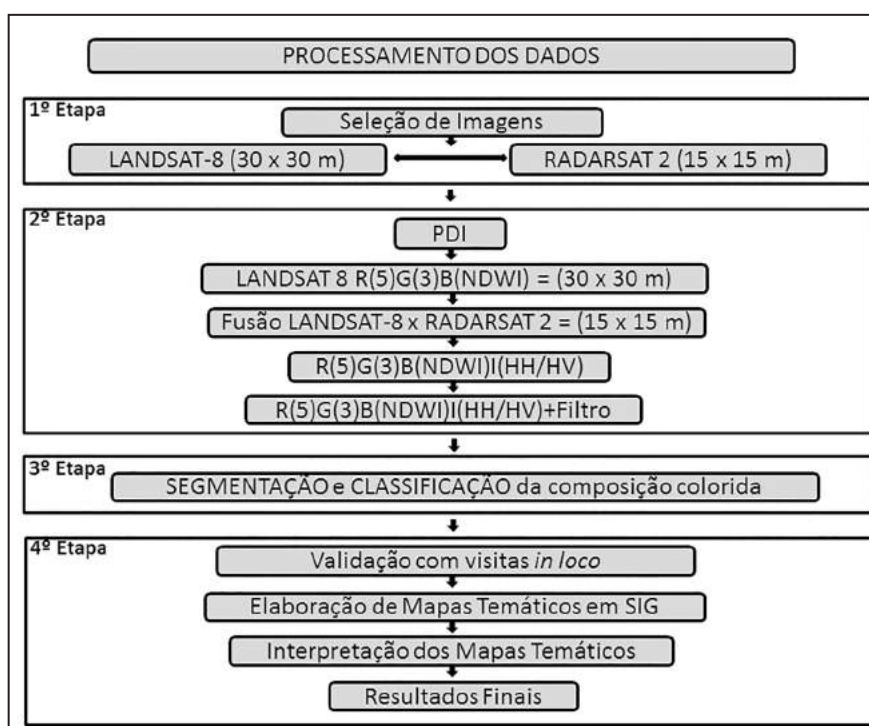


Figura 2
Etapas metodológicas e técnicas empregadas no processamento dos dados digitais.

devido aos dois períodos de preamar e baixamar das condições de mesomares 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 utilizou 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.

2.3 Filtragem Espacial

Nas imagens híbridas resultantes foi aplicado o filtro de convolução de dimensão 5x5 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):

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

2.4 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 *ISOCCLASS*, 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.

2.5 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, utilizou-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, definiu-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 imagem híbrida 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.

A compartimentação florística e geoambiental, baseada na interpretação de imagens híbridas, 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 o a imagem híbrida, 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 há, 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 a 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

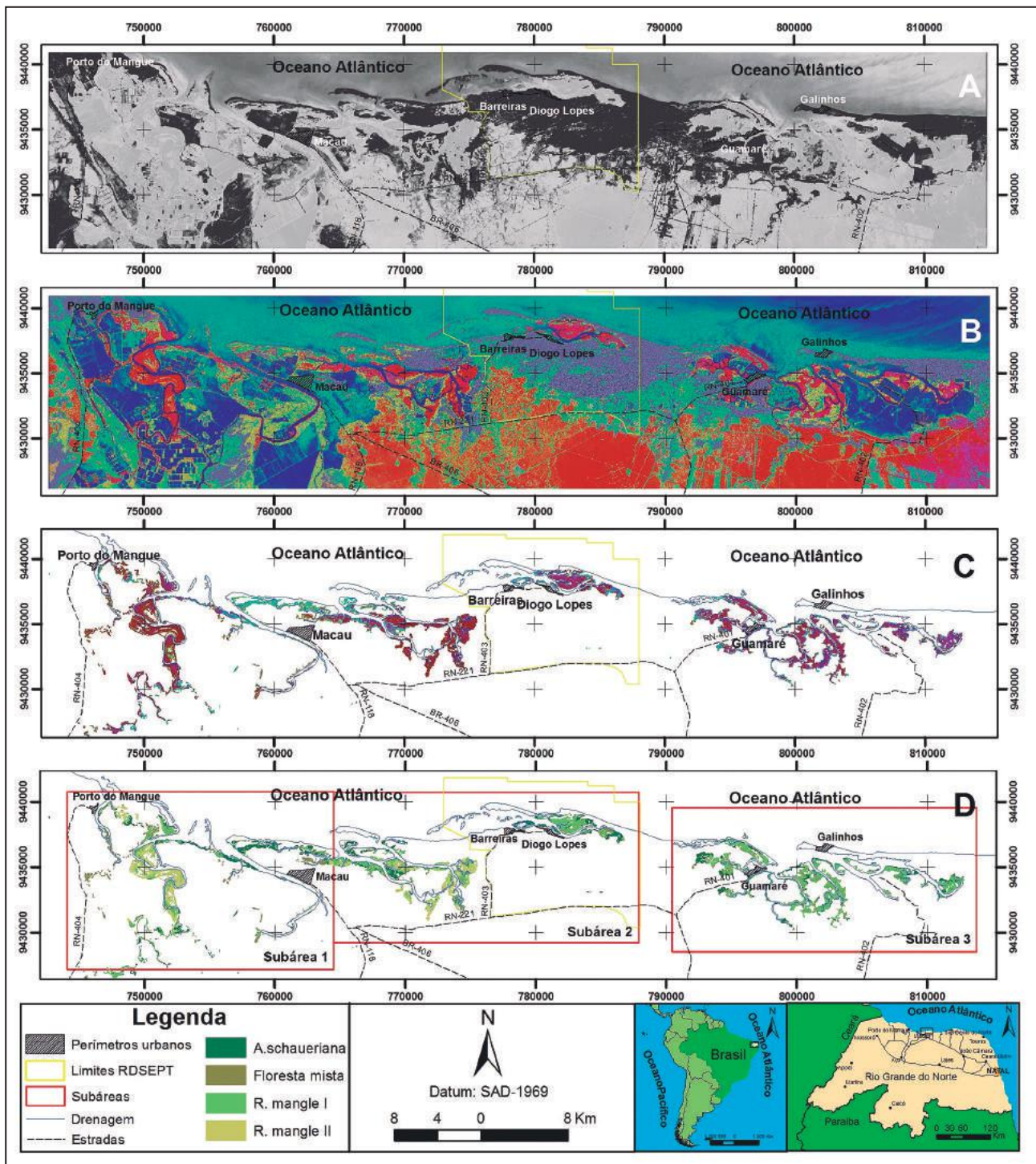


Figura 4 Processo de segmentação e classificação. (A) Imagem híbrida do LANDSAT-8 e RADARSAT-2 em níveis de cinza. (B) Imagem híbrida em composição colorida R(5)G(3)B(NDWI)I(HH/HV)+filtro, com destaque para o realce da vegetação de mangue e das unidades geoambientais. (C) Imagem em composição colorida 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 de espécies de mangue presentes na área de estudo.

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).

A avaliação do resultado da exatidão da classificação, realizados 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 classifica-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.

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.

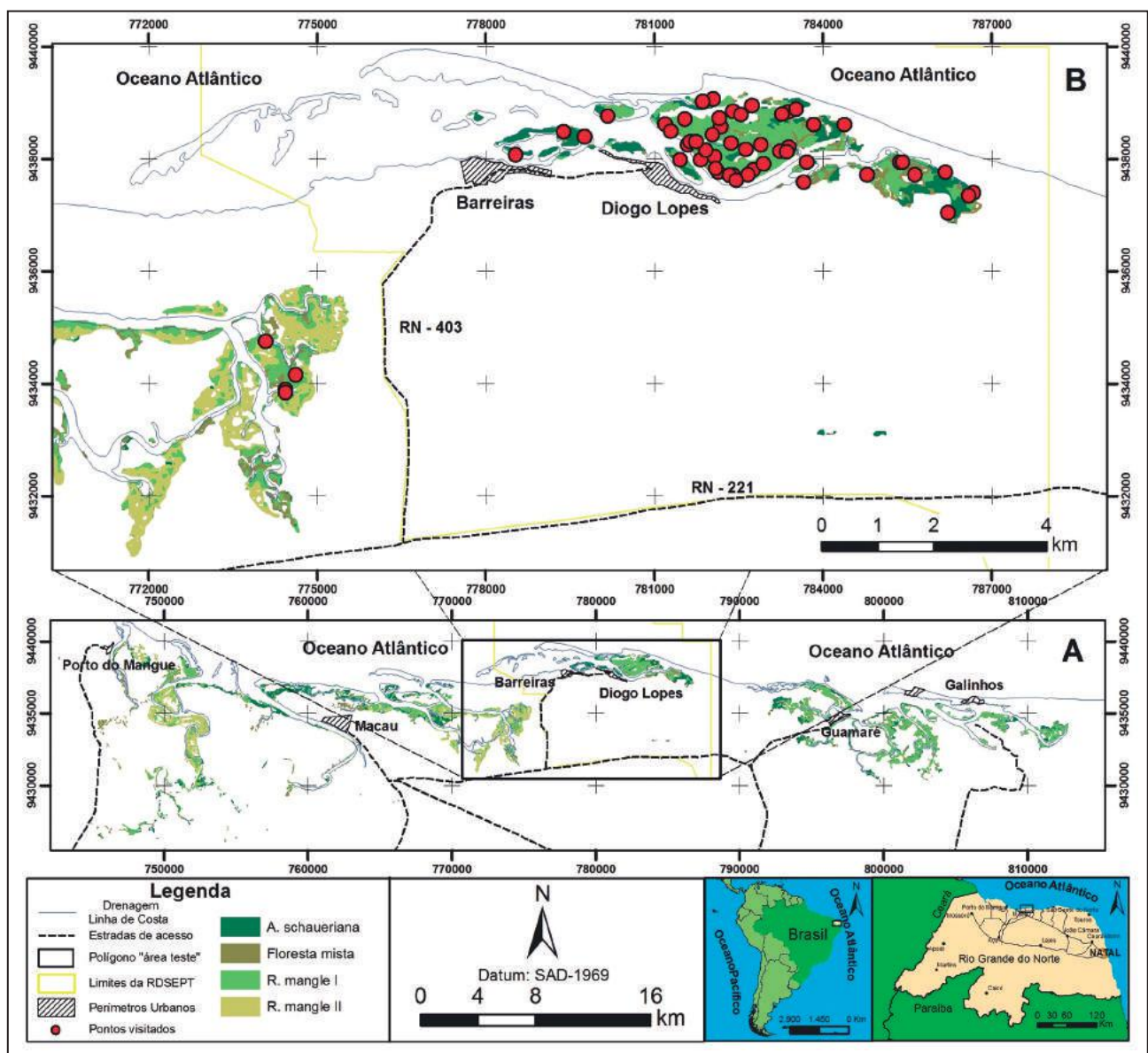


Figura 5 (A) Área de estudo total com a localização da área representativa escolhida para a análise da exatidão da classificação. (B) Detalhe da área representativa com os locais dos pontos de controle.

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 à 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, como 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.

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.

Subárea 3

Os municípios de Guamaré e Galinhos encontram-se inseridos também na Bacia Hidrográfica

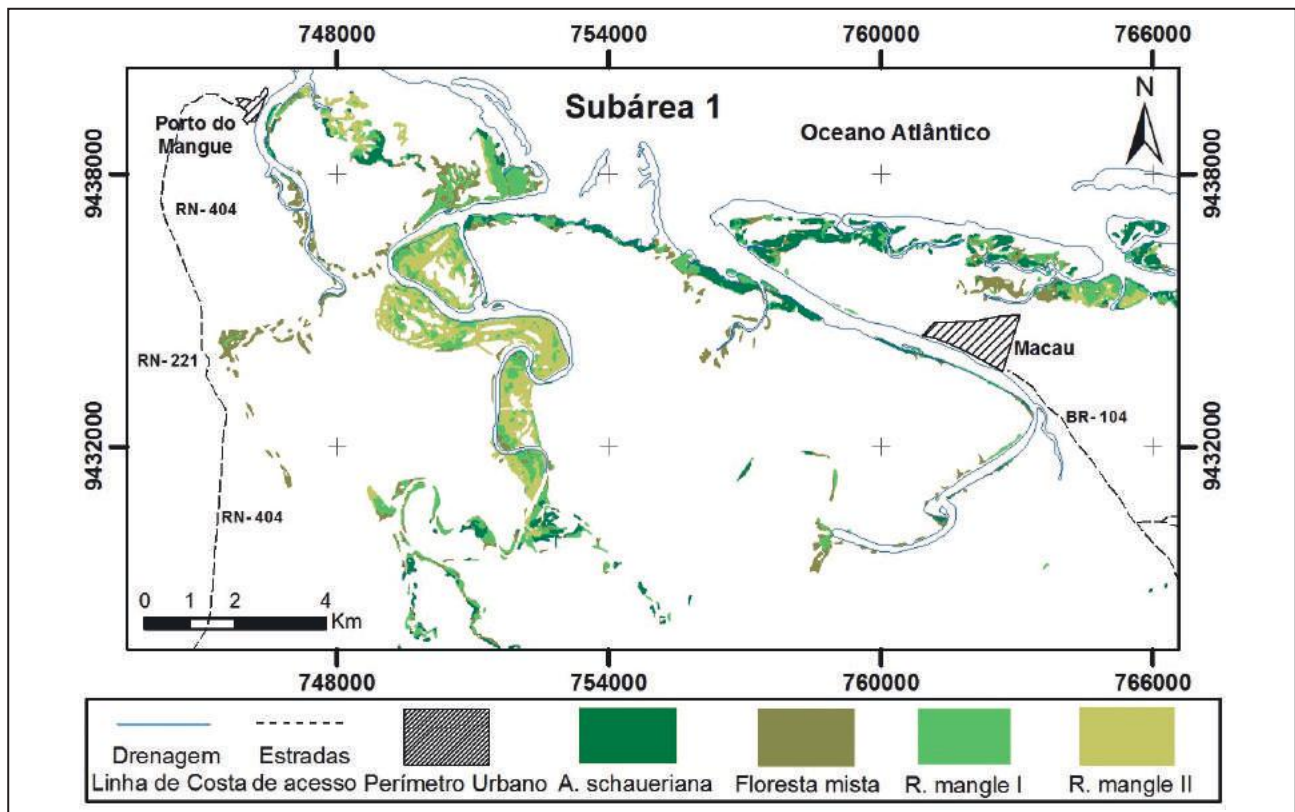


Figura 6 Detalhe da subárea 1. Nestes estuários observa-se a presença de forte aporte fluvial em todos os estuários desta subárea, promovendo a presença de planícies flúvio-estuarinas.

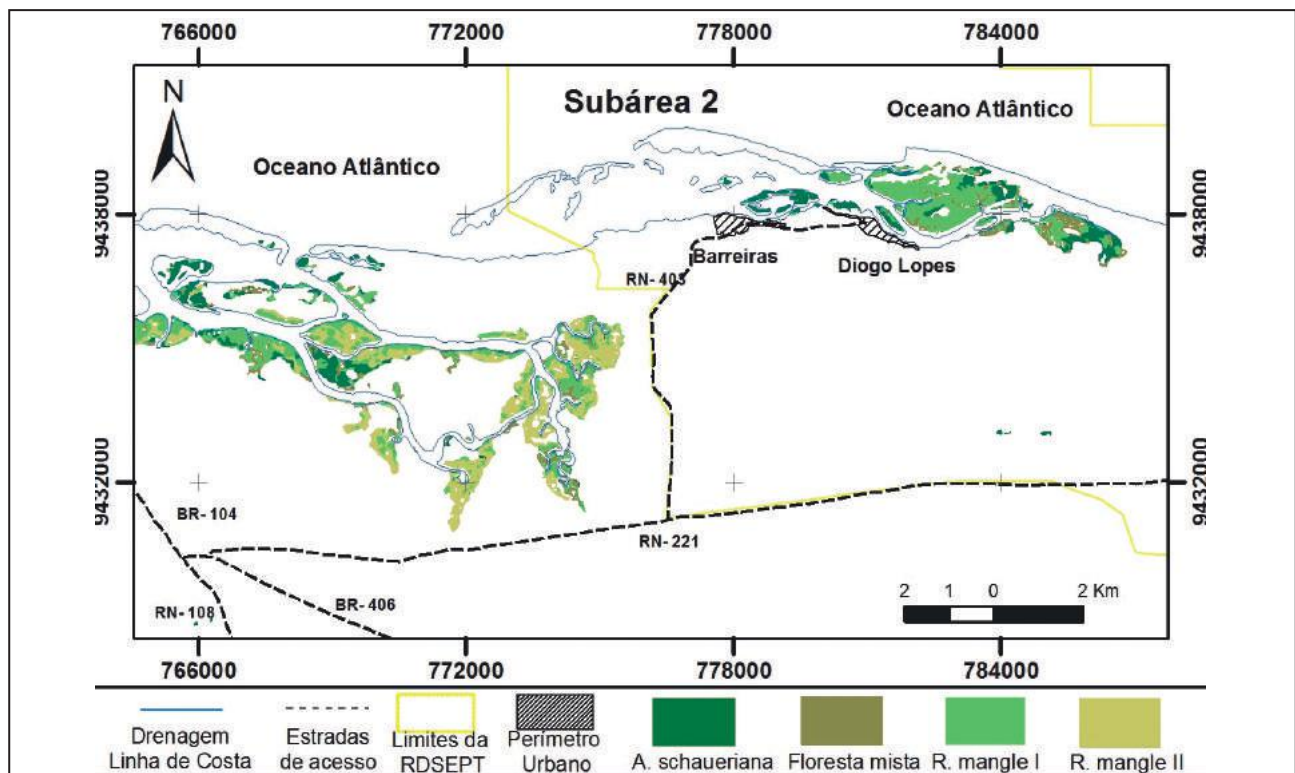


Figura 7 Detalhe da subárea 2. Observa-se a presença de aporte fluvial apenas no estuário localizado ao Oeste desta subárea, promovendo a presença de planícies flúvio-estuarinas, entretanto o estuário na porção Nordeste é caracterizado apenas por canais de maré.

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 e condiciona a espacialização estruturais de espécies, como podem ser facilmente observado na Figura 8.

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)+filtro que serviu de base para a segmentação e classificação não supervisionada. A Figura 9(B) mostra o resultado desta classificação

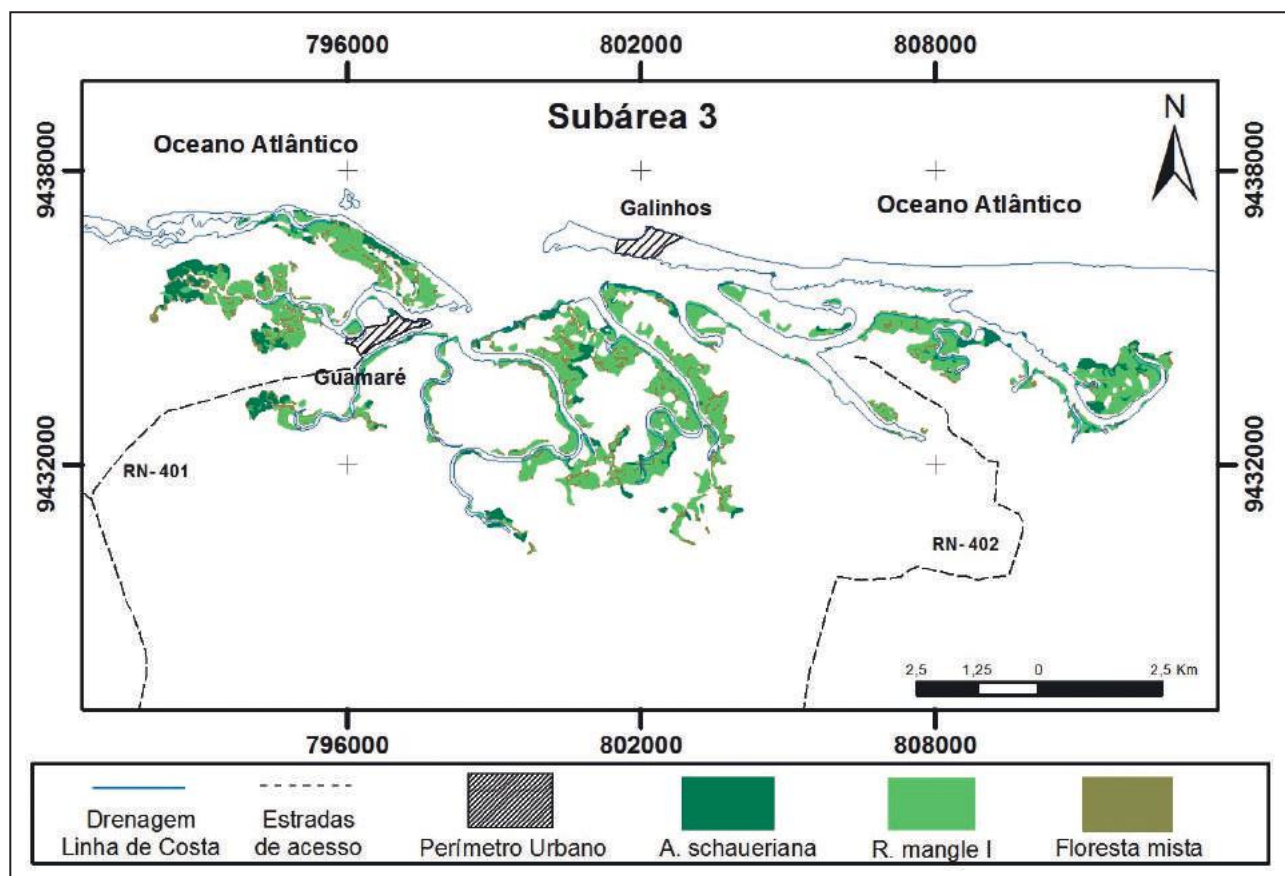


Figura 8 Detalhe da subárea 3. Neste estuário observa-se a presença de pequeno aporte fluvial intermitente no estuário central desta subárea, porém este está caracterizado basicamente por canais de maré.

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.

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

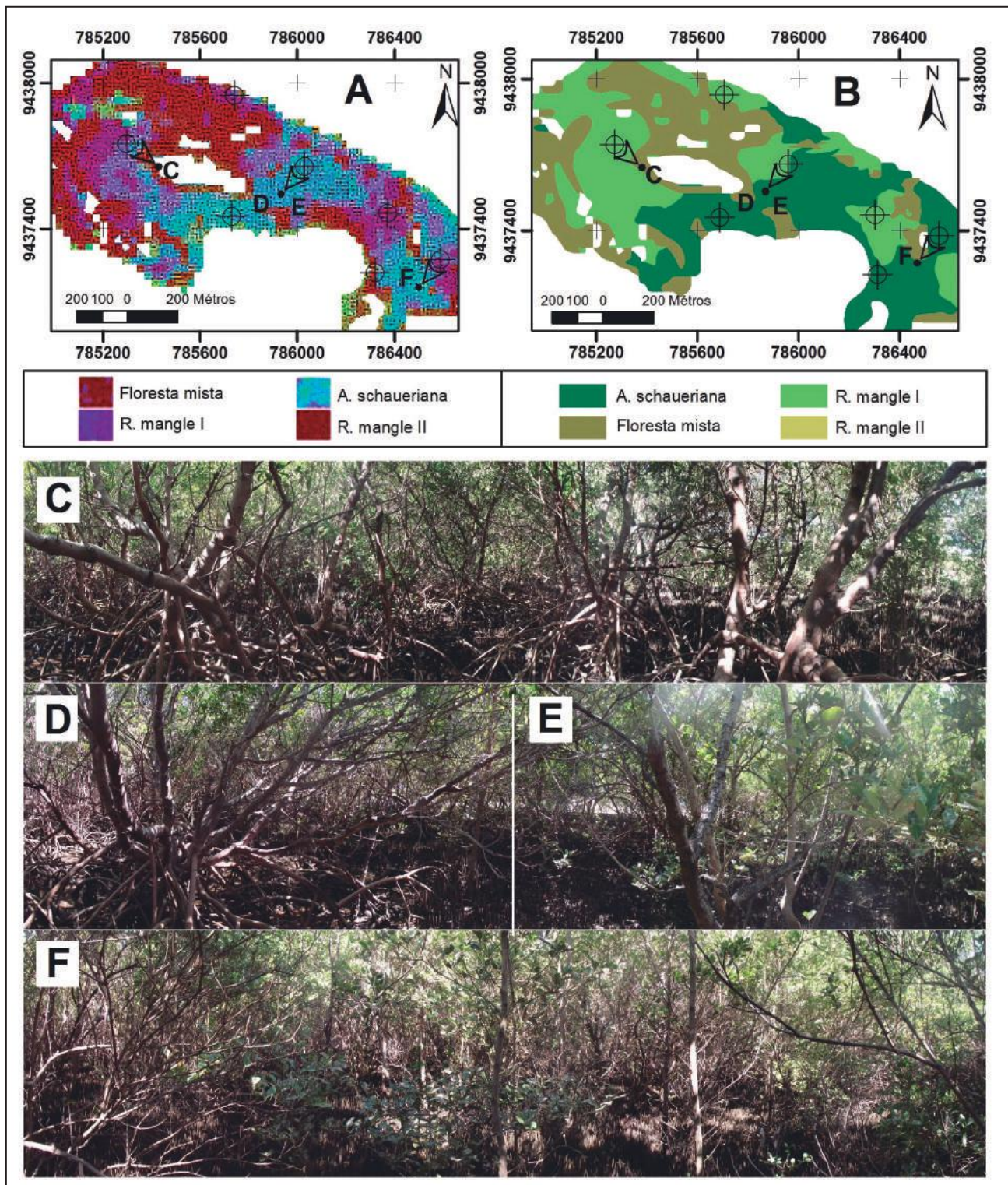


Figura 9 Comparação entre o resultado das respostas a resolução espacial de 15 m da imagem colorida, utilizada na classificação das florestas de mangue, não possibilitou o mapeamento de árvores isoladamente ou que formam pequenos agrupamentos. Por sua vez, o variado adensamento de copas, similaridade 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*.

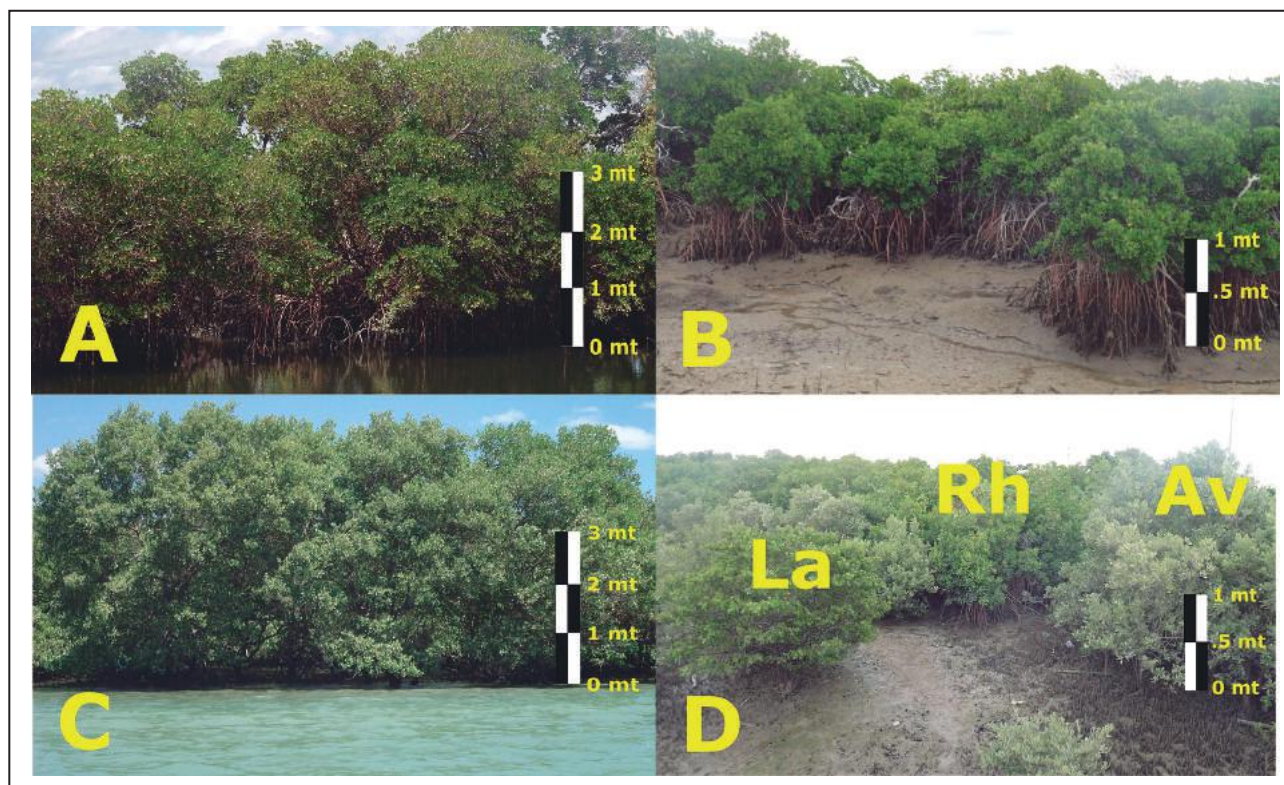


Figura 10 Condições estruturais das espécies de mangue ocorrentes na área de estudo, bem como as alturas estimadas dos portes florestais. (A) trata-se de *R. mangle* I, (B) *R. mangle* II, (C) *A. schaueriana* e (D) região de espécies mistas: (La) indivíduo da espécie *L. racemosa*, (Rm) *R. mangle*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

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.

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.

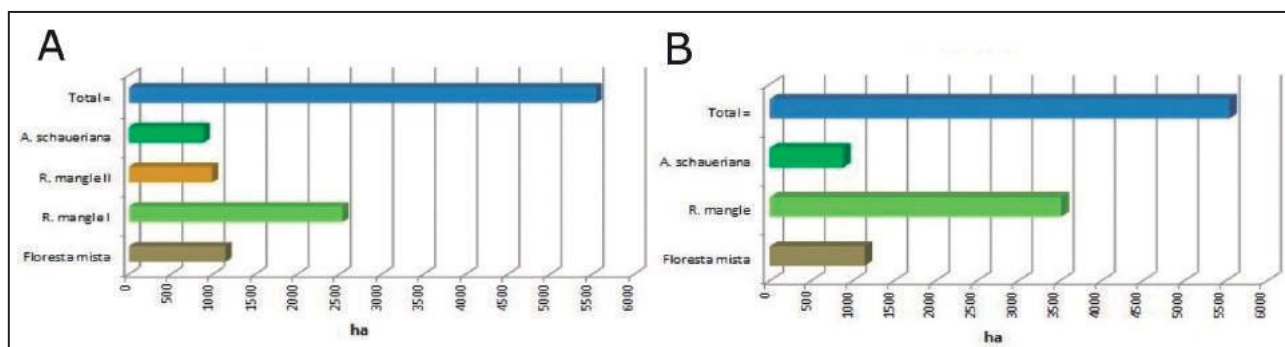


Figura 11 (A) Valores da cobertura vegetal em hectares referentes às quatro condições estruturais de espécies reveladas através da classificação. (B) Valores em hectares referentes à cobertura vegetal das espécies de mangue ocorrentes.

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 importante 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 outros importantes 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 multitemporal 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 Híbridas 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 setentrional 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 multi-temporal satellite data from (1973 to 2000). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73: 91-100.
- Gonçalves, F.D.; Souza Filho, P.W.; Paradelia, 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 da 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. & Paradelia, 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. & Paradelia, 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.