



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.

Venerando Eustáquio Amaro^{1,2} & Bruno César Pereira da Costa¹

Recebido em 11 de dezembro de 2011 / Aceito em 24 de janeiro de 2012

Resumo

Este trabalho combinou dados multiespectrais do LANDSAT 5-TM com dados de micro-ondas do RADARSAT-1 para caracterizar fitofisionomia de manguezais localizadas no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. As imagens híbridas entre sistemas ópticos e micro-ondas mostraram excelente desempenho na identificação das diversas unidades geoambientais costeiras e permitiram maior realce das propriedades florísticas das espécies de manguezais. Os resultados da caracterização fitofisionômica revelaram a ocorrência de três espécies típicas de manguezal: *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* L. (Avicenniaceae) e *Laguncularia racemosa* L. Gaertn. f. (Combretaceae). *A. germinans* é a espécie de manguezal mais abundante para toda a área estudada, ocupando uma área aproximadamente de 324,70 hectares, representando 61,2% de todo o manguezal. *R. mangle* ocupa uma área de 205,48 hectares, representando, 38,8%. *Laguncularia racemosa* ocorre como indivíduos restritos associados às demais espécies. O presente estudo busca atender às expectativas de maior eficiência (espacial e temporal) e acurácia no monitoramento da qualidade dos ecossistemas manguezais, altamente sensíveis às alterações ambientais, e como subsídio à sua preservação.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; imagens híbridas; ecossistema manguezal; Nordeste do Brasil.

Abstract

This work combined multispectral data of LANDSAT 5-TM with microwave data from RADARSAT-1 to characterize the phytophysionomy of mangroves located on the northern coast of Rio Grande do Norte State, northeast Brazil. Hybrid images between optical and microwave systems have shown excellent performance in identifying several geoenvironmental units and allowed better coastal properties enhancement of floristic species of mangroves. The results of the phytophysionomic characterization revealed the occurrence of three typical species of mangrove: *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* L. (Avicenniaceae) and *Laguncularia racemosa* L. Gaertn. f. (Combretaceae). *A. germinans* is the most abundant species of mangrove for the entire study area, occupying approximately 324.70 hectares, representing 61.2% of all mangrove swamp. *R. mangle* occupies an area of 205.48 hectares, representing, 38.8%. *A. germinans* is the most abundant species of mangrove for the entire area studied, occupying an area approximately 324.7 hectares, representing 61.2% of all mangrove swamp. *R. mangle* occupies an area of 205.48 hectares, representing, 38.8%. *L. racemosa* occurs as restricted individuals associated with other

species. The present study seeks the expectations of higher efficiency (spatial and temporal) and accuracy in monitoring the quality of mangroves ecosystems highly sensitive to environmental changes and as a subsidy to its preservation.

Keywords: Remote Sensing; hybrid images; mangrove ecosystem; Northeast Brazil.

1 – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN), Brasil. E-mail: brunocesarpc@hotmail.com; 2 - Laboratório de Geoprocessamento, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN), Brasil. E-mail: amaro@geologia.ufrn.br

1. Introdução

Os manguezais constituem um dos ecossistemas mais produtivos do planeta, por se apresentarem como importante fonte de nutrientes e abrigo para espécies da base da cadeia alimentar desses ambientes e de águas adjacentes, mas também por possuir uma importância socioeconômica para comunidades localizadas nos seus arredores. O manguezal é um sistema costeiro tropical e subtropical dominado por espécies vegetais típicas, às quais se associam outros componentes da flora e da fauna adaptados a um substrato periodicamente inundado pelas marés, com grandes variações de salinidade, condições de temperatura e ventos, o que define a geomorfologia de sua área de abrangência, mesmo em condições de solo lamacento e anaeróbico (Coelho Jr., 1998).

O litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte apresenta alguns fragmentos de florestas de manguezais ao longo dos seus principais estuários. Por estarem localizadas próximas às áreas urbanas, estas áreas tem sido alvo de pressões antrópicas, sobretudo de atividades econômicas de carcinicultura, parques eólicos, bases de exploração petrolífera, empreendimentos imobiliários, turísticos e ocupações desordenadas. Além disso, tais áreas de topografia baixa e propícias às inundações, naturalmente pelo fluxo de marés, como outras regiões em todo o mundo, estão sujeitas às mudanças climáticas e a elevação do nível do mar (Michener *et al.*, 1997; Maia & Lacerda, 2005; Krauss *et al.*, 2011).

As primeiras estimativas de área total ocupada por manguezais no litoral nordeste brasileiro foram realizadas por Herz (1991) com base em imagens de Sensoriamento Remoto disponíveis para o ano de 1978. Desde então, o geoprocessamento tem sido utilizado intensamente no estudo e identificação de ecossistemas em diferentes regiões do Brasil, incluindo o mapeamento e o monitoramento de áreas costeiras, em diferentes escalas (Kjerfve & Lacerda, 1993; Camargo *et al.*, 2000; Prost, 2001; Souza Filho, 2005; Kampel *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2006, Mochel & Ponzoni, 2007; Gonçalves *et al.*, 2009; Barros Pereira *et al.*, 2011; entre outros). O emprego das geotecnologias é cada vez mais importante para estudos geoambientais e na obtenção de informações que subsidiem a gestão ambiental costeira (Gowda *et al.*, 1995; Ramsey III *et al.*, 1998).

Os sensores ópticos estão na origem dos principais esforços de mapeamento quanto ao tipo de cobertura vegetal, mas esse imageamento em áreas costeiras é corriqueiramente afetado negativamente pelo ângulo solar e pelo espalhamento atmosférico e cobertura excessiva de nuvens. Os sistemas ativos não são afetados por estes fatores, mas são sensíveis à umidade e às propriedades estruturais da vegetação. Portanto, os dados de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*; sigla SAR), como o RADARSAT-1, tem potencial para a separação entre diferentes espécies vegetais e do seu arranjo espacial em classes geoambientais, especialmente quando integrado com

os dados do sensor óptico (Ranson & Williams, 1992; Huang *et al.*, 2007; Blanco *et al.*, 2009).

O presente trabalho tem por objetivo utilizar imagens híbridas dos satélites LANDSAT 5-TM (resolução espacial de 30m, 6 bandas multiespectrais ópticas entre 0,45–2,35 μm , 8 *bits* de resolução radiométrica) e do RADARSAT-1 (modo *Standard-1*, resolução espacial de 25m, banda-C, 16 *bits* de resolução radiométrica) para o levantamento florístico e caracterização fitofisionômica de espécies de manguezal localizadas na região da Reserva de Desenvolvimento Sustentável da Ponta do Tubarão (RDSPT, criada pela Lei Estadual nº 8.342 de 18/07/2003), avaliando assim a potencialidade do método para ações de monitoramento ambiental. Tem ainda como intuito definir o grau de conservação da cobertura vegetal da floresta de manguezal da RDSPT e áreas adjacentes, a fim de reconhecer os tipos vegetacionais que possam contribuir para as estratégias de conservação e preservação da

biodiversidade local e como fonte geradora de recursos econômicos. Trata-se da elaboração de subsídios baseados em tecnologias que permitam o desenvolvimento sustentável da região, aprimorado na exploração eficiente e não destrutiva do ecossistema de manguezal, diante dos processos contínuos de alterações climáticas e pressões antrópicas de ocupação da zona costeira.

2. Caracterização da Área de Estudo

A área em estudo situa-se na porção setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (Fig. 1), integrante da Microrregião de Macau, que está inserida na Mesorregião Central Potiguar, no trecho pertencente à bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, sendo limitada pelas coordenadas UTM (zona 24) 760.652 e 779.000mE, e UTM 9.441.000 e 9.432.851mN, entre os municípios de Macau e Guamaré. Os municípios distam aproximadamente a 185 km de Natal-RN, por via rodoviária.

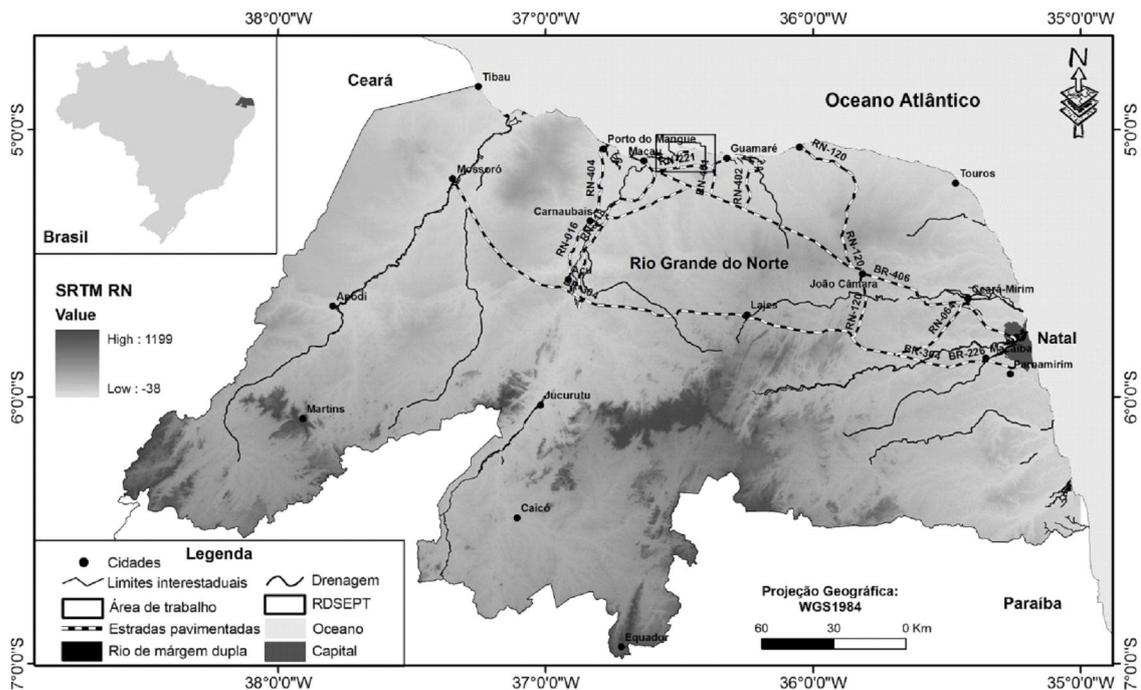


Fig. 1 - Mapa de localização e vias de acessos à área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte.

O clima da região é Semiárido do tipo *BSW'h*, segundo a classificação climática de (Köppen, 1948), com temperaturas altas e poucas chuvas, definido por duas estações: uma estação seca com período mais longo (de 7 a 8 meses) e uma estação de chuvosa curta entre os meses de fevereiro a maio, umidade relativa média anual é de 68% (IDEMA, 1999). Devido à proximidade com o Equador a temperatura média anual é de 27,2°C, ultrapassando os 40°C no mês de novembro (período da estação seca), onde a insolação é das mais elevadas do Brasil, com médias anuais em tomo de 2.600 horas/ano e 7,22 horas/diárias. A precipitação pluviométrica média de 537,5 mm, com máxima precipitação de 1.780,6 mm e mínima de 53,0 mm (IDEMA, 1999).

Nesse ambiente, os processos hidrodinâmicos e sedimentares são resultantes da atuação de forçantes como os ventos alísios, predominantes na área, que entre maio e agosto são frequentes provenientes de SE e quando de E-NE mostram máximos em dezembro. Entre março e maio a velocidade média mensal varia de 4,1 a 5,5 m/s e entre agosto e outubro as velocidades médias mensais são mais intensas entre 7,0 a 9,2 m/s, conforme os dados medidos na Estação Meteorológica de Macau (altura de 20 m) entre os anos 1961 e 1990 e analisados pela NATRONTEC/ECOPLAN (1995) a partir do Banco Nacional de Dados Oceanográficos. O regime é de mesomaré semidiurnas, com amplitude de maré de quadratura da ordem de 127,79 cm e nível médio de maré alta de sizígia de 284,55 cm (Silva 1991).

O fluxo das ondas apresenta a mesma direção dos ventos dominantes (NE e/ou SE) e a altura das ondas varia entre 0,13 a 0,72 m, com máximas e mínimas nos meses de novembro e maio, respectivamente (Chaves & Vital, 2001; Chaves, 2005). A direção preferencial dos ventos e o fluxo de ondas provenientes promovem uma importante corrente de deriva litorânea de Leste para Oeste, que controla a migração para Oeste dos esporões arenosos costeiros (*spits*). As correntes apresentam velocidades máximas de 1,10 m/s e mínimas de 0,17 m/s para Oeste, nos meses de novembro e maio, respectivamente (Vital, 2009).

A rede hidrográfica da área está inserida na porção nordeste da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. Porém, que é constituída por rios de pequeno porte na porção sul da Ilha da Ponta do Tubarão, trecho da RDSPT, e pelos rios Casqueira e Conceição (de médio porte) na porção sudoeste da área em estudo, cuja contribuição provém do continente nos períodos chuvosos, com vazões reduzidas, mas basicamente estão sujeitos à ação das marés. Por esse motivo, a vegetação litorânea ocupa a porção da área que sofre influência marinha com as espécies de manguezal, de dunas fixas e de restinga. Os manguezais são encontrados nas planícies flúvio-marinhas e flúvio-estuarinas, em áreas abrigadas da ação direta do mar aberto, no interior de lagunas e ao longo dos cursos dos canais de maré. A vegetação das dunas fixas é halófila, geralmente espécies herbáceas e rasteiras. A vegetação de caatinga é do tipo arbustiva-arbórea fechada (ou densa) e arbórea fechada (ou densa), assinalando a porção definida pela geomorfologia dos Tabuleiros Costeiros.

3. Materiais e Métodos

Este trabalho foi baseado em estratégias abrangendo as etapas de processamento digital das seis imagens ópticas (LANDSAT-5 TM de 10/09/2009) e de micro-ondas (RADARSAT-1 modo *Standard-1*, banda-C de 26/09/2006), com emprego de técnicas de composições coloridas no sistema de cores *Red-Green-Blue*(RGB), a fusão digital de imagens ópticas e de micro-ondas no sistema híbrido *Red-Green-Blue-Intensity*(RGBI), a análise estatística espacial e a interpretação visual para a quantificação fitofisionômica das imagens resultantes. A fusão de imagens é baseada numa abordagem multifontes e multiresoluções espaciais para obtenção de uma imagem composta (híbrida) com a resolução espacial da imagem de melhor resolução, mantendo as características espectrais e temporais das imagens de melhor atributo nesses domínios. As imagens digitais tiveram a geometria corrigida a partir de pontos de controle no terreno

com o uso de GPS de navegação, georreferenciadas no *Datum* SAD-69, com o acompanhamento de cartas planialtimétricas previamente produzidas por Valentim da Silva & Amaro (2008), baseadas em imagens RADAR do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM, Rabus *et al.*, 2003).

As bandas multiespectrais do LANDSAT 5-TM foram submetidas à correção atmosférica por meio da técnica de subtração do *pixel* escuro (Chavez Jr., 1988) e em seguida às técnicas de Análise por Principais Componentes (PC), para redução da redundância entre as bandas (Picchiotti *et al.*, 1997), Razões de Bandas (incluindo o *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI), Classificação Supervisionada (Método Máxima Verossimilhança) e Não-Supervisionada (Método ISOCLASS). No processamento digital das imagens foi adotado o *software* ER-Mapper® v. 7.1, e a integração e análise dos dados espaciais foi realizada no *software* ArcGIS® v.9.3.

O RADARSAT-1 fornece informações sobre as propriedades de macro- e microtopografia do terreno, representadas na geometria e teor de umidade dos alvos, destacados na textura das unidades geoambientais na imagem (Singhroy, 1996), e das propriedades estruturais das diversas espécies de vegetação (Souza Filho & Paradella, 2002; 2005). As propriedades físico-químicas dos alvos estão representadas nas respostas espectrais das bandas ópticas do LANDSAT 5-TM. Portanto, a fusão entre as imagens ópticas e de micro-ondas foi realizada com o intuito de maximizar a extração de informações, como indicaram os trabalhos anteriores para os ambientes costeiros e estuarinos (Souza Filho & Paradella, 2002 & 2005; Gonçalves *et al.*, 2009). A redução do efeito de espalhamento (*Speckle Effect Reduction*) foi aplicada na imagem do RADARSAT-1.

Das diversas composições coloridas elaboradas pela combinação das bandas espectrais

e fusões para geração de imagens híbridas entre sistemas ópticos e ativos, as que melhor realçaram as feições de interesse, principalmente que favoreceram a delimitação das áreas dos manguezais, foram aquelas envolvendo as PC das 6 bandas do LANDSAT 5-TM do espectro refletido (bandas 1-5 e 7) e as Razões de Bandas. Dessas, as melhores composições coloridas foram integradas às imagens de micro-ondas para a geração das imagens híbridas.

A compartimentação florística e geoambiental em meio digital foi seguida do controle em campo através de incursões pela floresta de manguezal para identificação de grupos fitofisionômicos (Método de coleta definido por Schaeffer-Novelli, 1991) e relacionados com o comportamento das imagens híbridas que seriam submetidas aos métodos de classificação supervisionada e não-supervisionada, além de servir como referência da fitofisionomia do ambiente no processo interpretativo. O mapeamento florístico do manguezal foi realizado de modo a fornecer subsídios para a caracterização estrutural da área de manguezal por meio de área demarcatória para levantamento de todos os indivíduos e aferição da circunferência na altura do peito (CAP) e classificação da espécie vegetal (Schaeffer-Novelli, 1991). Os pontos correspondentes aos trechos de observação foram coletados com GPS e transpostos às imagens processadas para analisar as correspondências com a estrutura da floresta de manguezal e identificação de espécies vegetais em setores distintos do estuário.

4. Resultados e Discussão

Análise e Interpretação das Imagens Digitais

Na Figura 2 (A-D) foram apresentadas as imagens em composições coloridas RGB do LANDSAT 5-TM, que apresentaram os melhores resultados na caracterização das unidades geoambientais, incluindo a definição das áreas de manguezais e planícies lamosas: R(5) G(4) B(2)

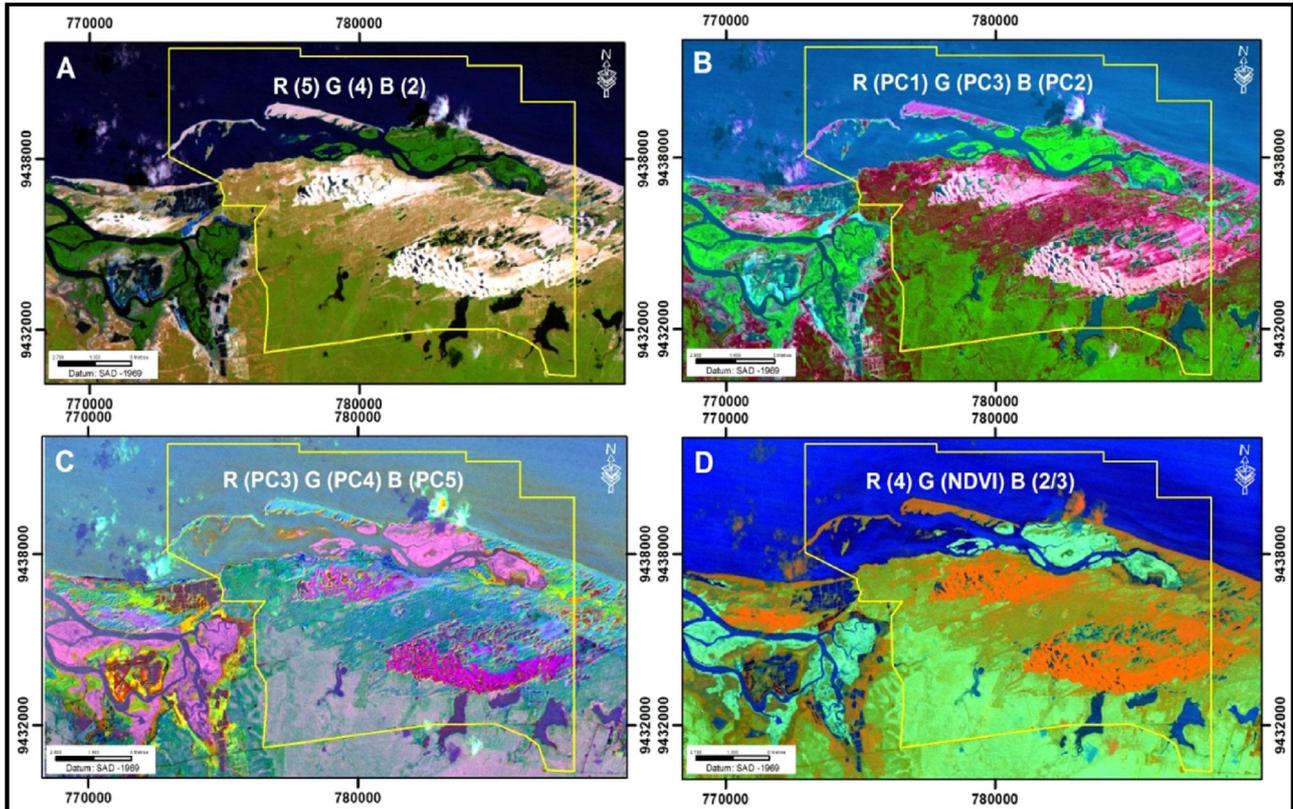


Fig. 2 - Imagens em composições coloridas do LANDSAT 5-TM no sistema RGB: (A) Imagem R(5) G(4) B(2); (B) imagem R(PC1) G(PC3) B(PC2); (C) imagem R(PC3) G(PC4) B(PC5); (D) imagem R(4) G(NDVI) B(2/3).

(Figura 2A); R(PC1) G(PC3) B(PC2) (Fig. 2B); R(PC3) G(PC4) B(PC5) (Fig. 2C); e, R(4) G(NDVI) B(2/3) (Fig. 2D).

Nessas composições coloridas foram realçados os contatos entre as unidades de solo, os corpos d'água (estuário, lagoas e oceano), os campos de dunas, as diversas unidades de vegetação (manguezal, caatinga rala e densa) e a delimitação da linha de costa. A imagem da Figura 2B diferenciou as areias nas praias, sobretudo nas ilhas barreiras, daquelas que compõem os campos de dunas móveis e fixas (essas com alguma vegetação rasteira) e destacou a vegetação de manguezal das demais áreas com vegetação. Na Figura 2D este realce para a vegetação de manguezal foi incrementado pela introdução do NDVI, que também destaca as diferentes densidades de vegetação nas áreas de caatinga, além do uso da razão 2/3 (ou a 3/2), que favoreceu a ênfase para as áreas submersas,

indicando a disposição dos canais de maré e feições submersas na plataforma continental rasa, além de favorecer a distinção entre variedades de solos e de vegetação na área de estudo.

Para expandir a discriminação de espécies florísticas nas áreas de manguezal optou-se pela técnica de integração no sistema RGBI de imagens ópticas e de micro-ondas (esta apenas no canal do *Intensity*), gerando as imagens híbridas, além do uso das PC, como forma de redução da dimensionalidade das imagens ópticas. As imagens híbridas atribuíram ganhos significativos na qualidade textural e de macro e microrelevo das diferentes unidades (Fig. 3). Nas imagens híbridas a identificação fitofisionômica no manguezal foi possível pelas alterações na rugosidade da superfície provocada pelo arranjo estrutural dos elementos do dossel nos diferentes espécies vegetacionais, fatores que afetam o retroespalhamento da imagem RADAR na banda-C.

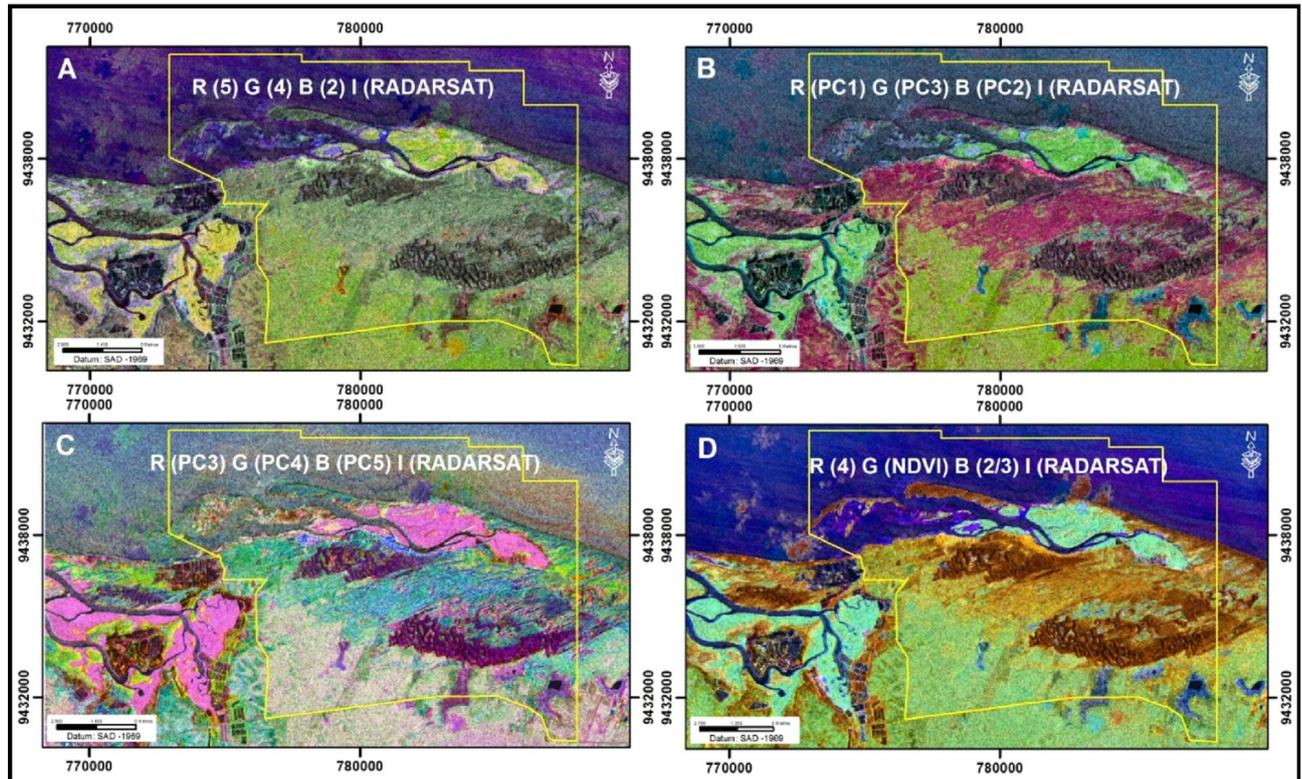


Fig. 3 - Imagens híbridas em composições coloridas no sistema RGBI: (A) Imagem do LANDSAT 5-TM R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1); (B) imagem do LANDSAT 5-TM R(PC1) G(PC3) B(PC2) I(RADARSAT-1); (C) imagem do LANDSAT 5-TM R(PC3) G(PC4) B(PC5) I(RADARSAT-1); (D) imagem do LANDSAT 5-TM R(4) G(NDVI) B(2/3) I(RADARSAT-1).

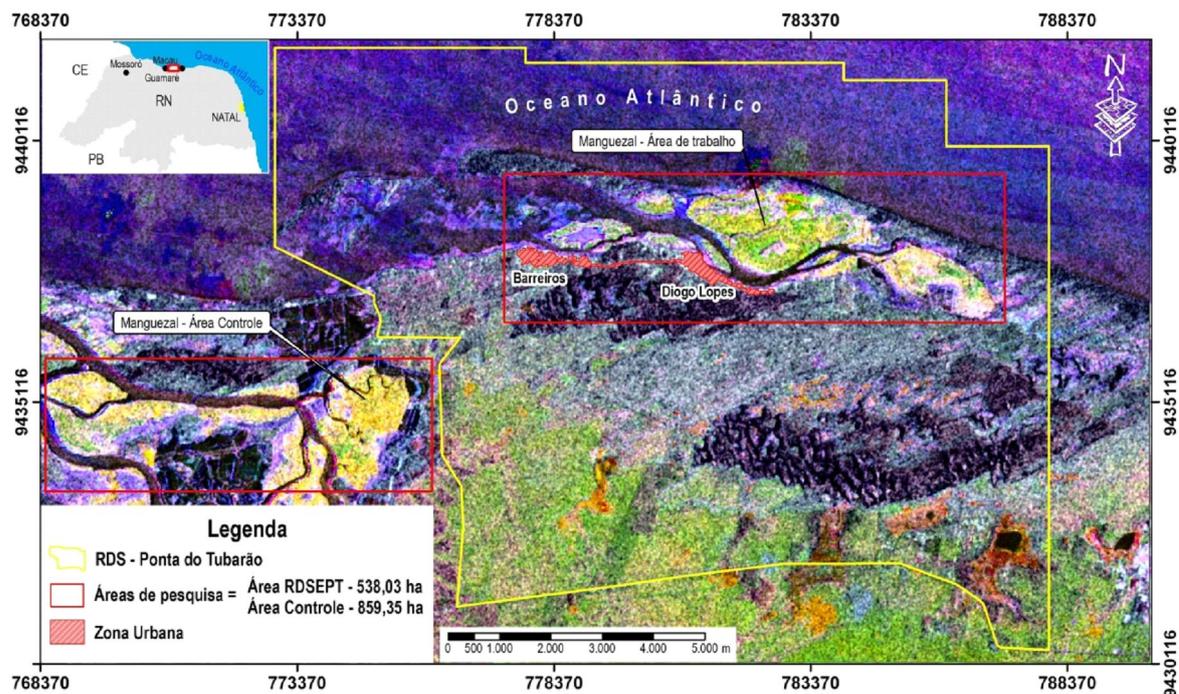


Fig. 4 - Análise fitofisionômica do manguezal da RDSPT e da área de controle baseada no detalhamento da Figura 3A, da composição colorida LANDSAT 5-TM R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1). Notar as variações na coloração amarelo-esverdeado nos manguezais.

O sinergismo entre as imagens no espectro eletromagnético da faixa das micro-ondas e do visível-infravermelho produziram um acréscimo na discriminação e no mapeamento das feições morfológicas, como campos de dunas fixas e móveis, ilhas barreiras/canais de marés, planícies de marés, e nos padrões de vegetação (Blanco *et al.*, 2009; Barros Pereira *et al.*, 2011).

Na Figura 4 (um detalhamento da Figura 3A) a imagem híbrida do LANDSAT 5-TM R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1) evidenciou o ganho significativo na distinção fitofisionômica do manguezal na área da RDSPT e na área controle, como mostra a variação entre cores amarelo-esverdeadas.

Na comprovação da qualidade de distinção fitofisionômica de espécies de manguezal, a imagem da Figura 4 foi submetida à classificação supervisionada (Método Máxima Verossimilhança) baseada em regiões de instrução (áreas testes) definidas em campo, visando transformar os dados numéricos e estatísticos das imagens multiespectrais em classes de informações temáticas reconhecidamente relacionadas a diferentes espécies vegetacionais (Fig. 5). Nesta classificação supervisionada, a identificação de outras classes ou tipos de cobertura (p.ex. áreas urbanas; corpos d'água como águas de rios, canais de marés e oceanos; tipos vegetacionais solos, etc.) foram previamente estabelecidas em amostragem de campo. Os parâmetros estatísticos multivariados, tais como média, desvio padrão e matrizes de correlação foram calculados para cada região de instrução e cada conjunto de *pixels* foi avaliado e atribuído à classe mais provável de uma unidade geoambiental. Com este procedimento foi possível correlacionar perfeitamente a presença de dois principais grupos de cores, verde correspondente à espécie *Rhizophora mangle* L., e o amarelo à *Avicennia germinans* L., além de áreas intermediárias onde ocorre a mistura entre as duas espécies, e/ou às vezes com a *Laguncularia racemosa*. Esta classificação

Revista de Geologia, Vol. 25 HIDROSEMA-UFRN, 2012

tornou possível também o cálculo para a área ocupada por cada espécie.

Na classificação não-supervisionada (Método ISOCLASS) da imagem LANDSAT 5-TM R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1) as propriedades espectrais dos *pixels* mostraram resultados similares à classificação supervisionada (Fig. 6), onde aqueles na cor verde referem-se à espécie *R. manglee* aqueles na cor amarelo indicam a espécie *A. germinans*. Assim, os métodos de classificação supervisionada e não-supervisionada das imagens híbridas mostraram-se altamente válidos na avaliação florística de espécies de manguezal.

Setores Ocupados pelas Espécies Vegetacionais dos Manguezais

Os manguezais ocupam uma área geral de aproximadamente 530,18 hectares no setor estudado. As espécies vegetais típicas encontradas foram *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. germinans* formando, geralmente, bosques monoespecíficos. A *A. germinans* é a espécie dominante ocupando uma área de aproximadamente 324,70 hectares, representando 61,2% dos manguezais da área de estudo. A *R. mangle* é a segunda mais abundante, ocupando uma área de 205,48 hectares, representou os demais 38,8% dos manguezais da área de estudo. A *L. racemosa* ocorreu apenas na forma de indivíduos esporádicos nas bordas do manguezal, sem formar agrupamentos significativos que pudessem ser identificados nas imagens, por vezes em meio às demais espécies.

A maioria da vegetação de manguezal mapeada foi classificada como manguezal de porte médio-alto, alcançando aproximadamente 10 m de altura. As classes formam estrutura vegetal densa com elevado grau de desenvolvimento.

Quanto ao aspecto fitofisionômico, e geoambiental, as espécies vegetacionais dos manguezais ocupam diferentes locais na zona intermaré, com características distintas em relação à frequência de inundação das águas estuarinas, à

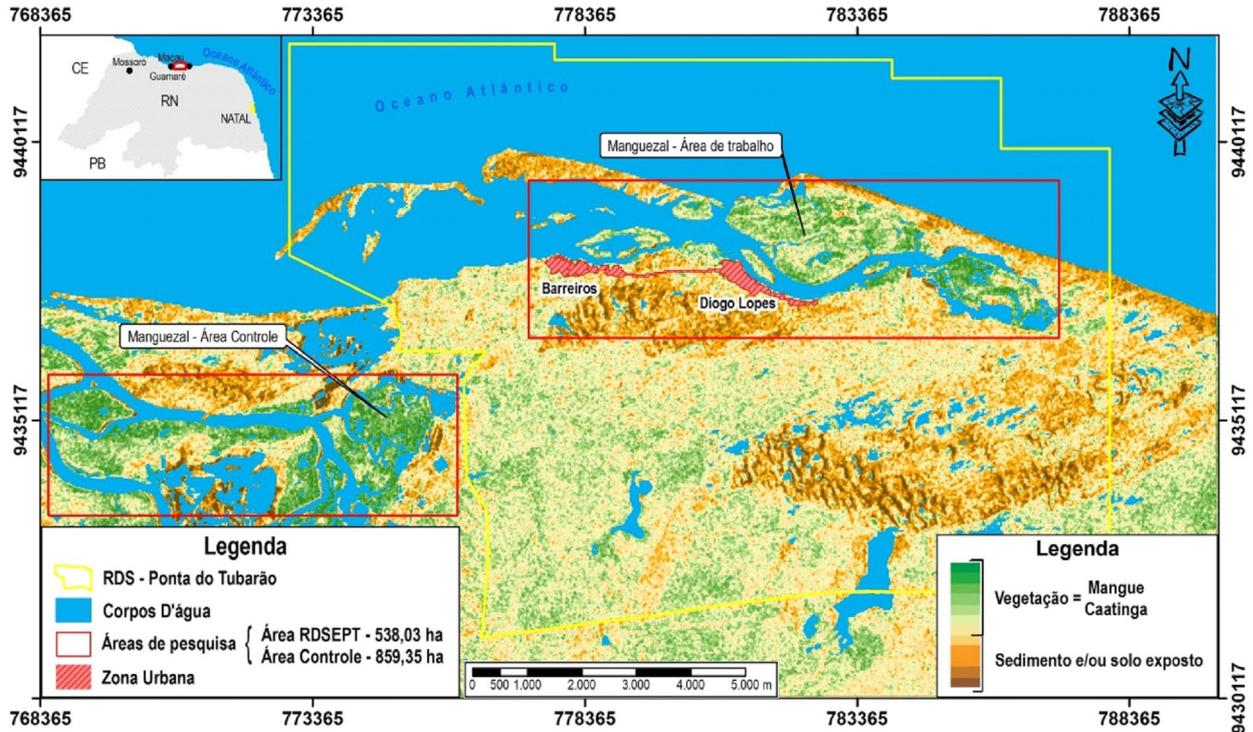


Fig. 5 - Imagem obtida pela classificação supervisionada da imagem LANDSAT 5-TM R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1) para análise florística do manguezal da RDSPT e da área de controle. Notar as variações na coloração amarelo-esverdeado nos manguezais.

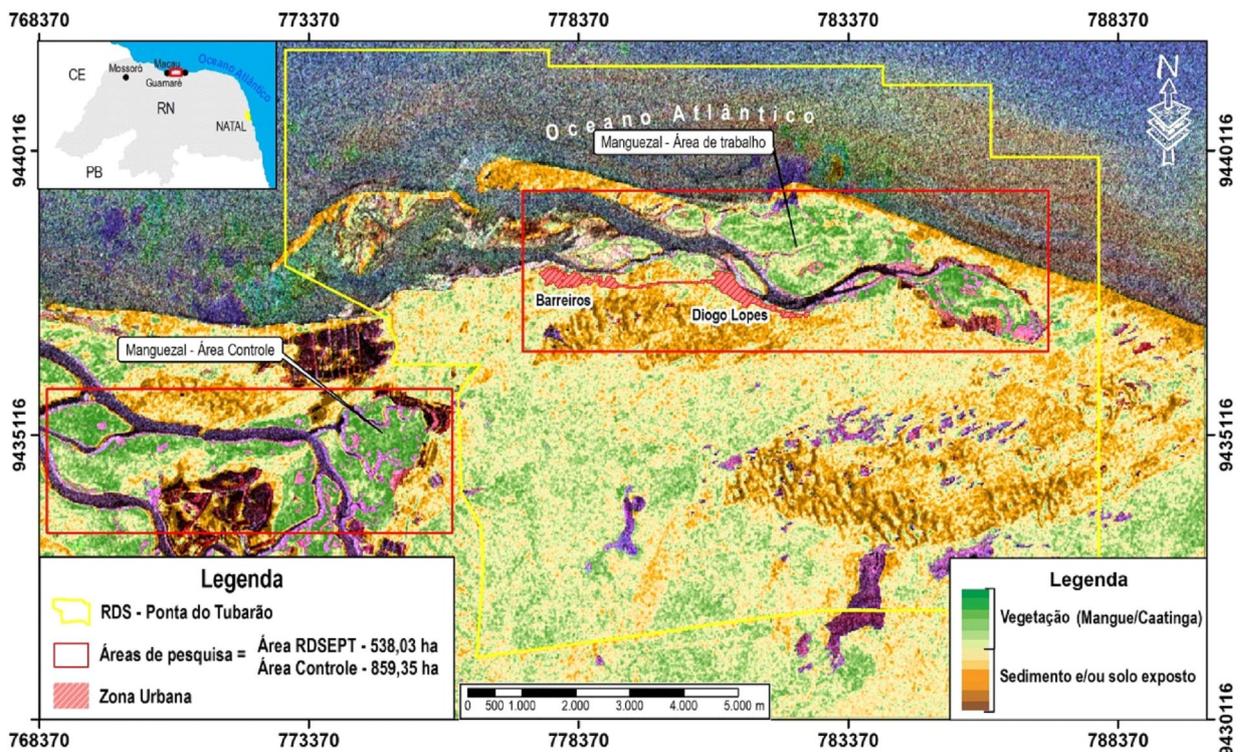


Fig. 6 - Imagem obtida pela classificação não-supervisionada da imagem LANDSAT 5-TM R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1) para análise florística do manguezal da RDSPT e da área de controle. Notar as variações na coloração amarelo-esverdeado nos manguezais.

textura e composição dos sedimentos no substrato, à salinidade intersticial, aos processos costeiros. Nas porções de área mais a Leste (área de controle) predomina a espécie *R. mangle* (cor verde) enquanto que a oeste a predominância é da espécie *A. germinans* (cor amarelo) (Fig. 7). A espécie *L. racemosa* ocorre de forma esporádica nas porções centrais da área de estudo. A situação mais comum é a associação entre indivíduos de *A. germinans* e *R. mangle*. Outras associações entre *L. racemosa* e as demais espécies ocorrem com menos frequência, como também o é a presença de todas

as espécies no mesmo local. Essas características refletem condições abióticas favoráveis ao desenvolvimento de cada espécie.

As comparações entre as imagens híbridas e os dados de campo apresentadas na evidenciaram claramente a diferença entre as características espectrais e texturais nas espécies de manguezal. Portanto, sugere-se que as diferenciações entre as espécies de manguezal nas imagens híbridas estejam relacionadas com os aspectos estruturais dos dosséis, com a densidade das folhas, dos ramos e dos galhos, ocorrendo que a *A. germinans* possui uma maior densidade em relação à *R. mangle*.

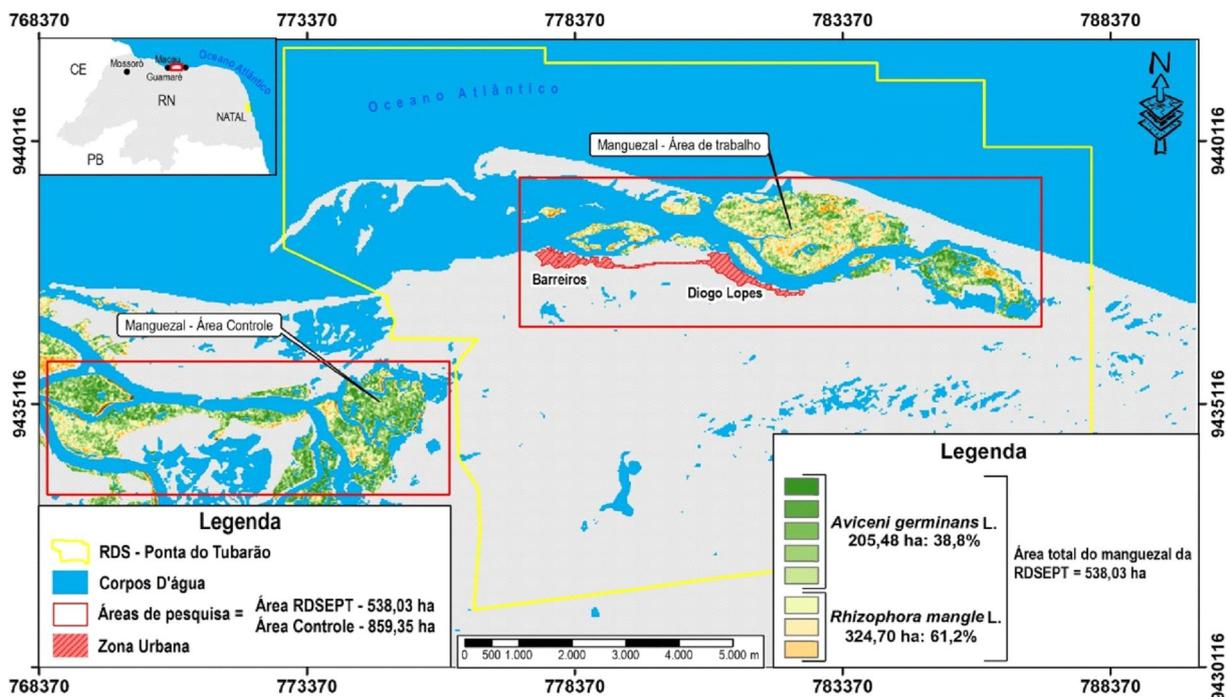


Fig. 7- Mapa de distribuição arbórea taxonômica do manguezal da área de estudo e área de controle.

5. Conclusões

Os resultados obtidos apontaram a relevância do emprego de imagens híbridas entre LANDSAT 5- TM e o RADARSAT-1 combinadas aos processamentos digitais e estatísticos de imagens multiespectrais como as PC, as Razões de Bandas e NDVI, e confirmados pelos métodos de classificação supervisionada e não-supervisionada, além de comparações com dados georreferenciados *Revista de Geologia, Vol. 25 HIDROSEMA-UFRN, 2012*

coletados em campo (método de Schaeffer-Novelli, 1991), como uma valiosa maneira de caracterizar a fitofisionomia de manguezais. As imagens híbridas mostraram ainda o desempenho significativo na detecção e discriminação das características das unidades geoambientais presentes em zonas costeiras, demarcando as feições com cores contrastantes e padrões espectrais bem definidos. As principais combinações coloridas no sistema RGB foram: imagem R(5) G(4) B(2); imagem

R(PC1) G(PC3) B(PC2); imagem R(PC3) G(PC4) B(PC5); (D) R(4) G(NDVI) B(2/3). No sistema híbrido RGBI foram: imagem LANDSAT 5-TM R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1); imagem do LANDSAT 5-TM R(PC1) G(PC3) B(PC2) I(RADARSAT-1); imagem do LANDSAT 5-TM R(PC3) G(PC4) B(PC5) I(RADARSAT-1); imagem do LANDSAT 5-TM R(4) G(NDVI) B(2/3) I(RADARSAT-1). Imagens como a R(5) G(4) B(2) I(RADARSAT-1) revelaram diferenças entre os grupos vegetacionais das florestas de manguezal, o que facilita o mapeamento temático nessas áreas de difícil acesso. Tais possibilidades de diferenciação correspondem ao poder de penetração da banda-C no topo do dossel marcado por características diversas nas densidades de folhas/copa e galhos, alturas das árvores, além das propriedades estruturais das espécies vegetacionais. A excelente delimitação florística das imagens permitiu delimitar a área geral de ocupação dos manguezais em aproximadamente 530,18 hectares, formando bosques monoespecíficos. As espécies *A. germinans* é a dominante tomando uma área de aproximadamente 324,70 hectares, representando 61,2% dos manguezais da área de estudo. A *R. mangle* ocupa uma área de 205,48 hectares, os 38,8% restantes dos manguezais da área de estudo. A *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. f. (Combretaceae) ocorre como indivíduos restritos associados às demais espécies.

Na região de estudo ocorre ampla dinâmica costeira, que atua sobre a área de manguezais de rica biodiversidade e elevada sensibilidade ambiental. Tais áreas de manguezais são ecossistemas essenciais ao desenvolvimento sustentável do trecho estudado e, portanto, considera-se que o presente estudo vem atender às expectativas de maior eficiência (espacial e temporal) e acurácia no monitoramento da qualidade das unidades geoambientais para o reconhecimento das frequentes alterações observadas nesses ambientes, como os processos

de mudanças climáticas globais e de ampliação das pressões antrópicas sobre esses importantes ecossistemas costeiros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro da REDE05 – PETROMAR (CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/CNPq), por meio do suporte aos Projetos Cooperativos HIDROSSEMA e MOLECO. Ao apoio operacional das equipes do Laboratório de Geoprocessamento do Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica e do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GEOPRO/PPGG/DG/UFRN) e ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia do Petróleo da UFRN (PPGCEP/UFRN).

Referências Bibliográficas

- 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 Ratonés, através de técnicas de sensoriamento remoto e do sistema geográfico de informações (SIG), Ilha de Santa Catarina, Brasil. In: International Conference Mangrove, Recife/PE. Anais, CD-rom.
- Chaves, M. S., 2005. Dinâmica Costeira dos Campos Petrolíferos Macau/Serra, Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. Tese de Doutorado, nº 10. PPGG/UFRN. Natal/RN, 117p.
- Chaves, M. S.; Vital, H., 2001. Caracterização Geoambiental dos Parâmetros de Onda entre o trecho Praial da Ponta do Tubarão e Gamboa do Corta-Cachorro, Macau/RN. In: ABEQUA, 8, Imbé/RS. Anais, p. 55.
- Chaves Jr., P.S., 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24: 459-479.

- Chaves Jr., P.S., 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24:459-479.
- Coelho Jr., C., 1998. Manguezal, desenvolvimento estrutural da cobertura vegetal ao longo do gradiente de inundação – Cananéia, Estado de São Paulo, Brasil. Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 108 p.
- Costa, M. R. P.; Alcântara, E. H.; Amorim, A. J. E.; Mochel, F. R., 2006. Avaliação das potencialidades e fragilidades das áreas de manguezal para a implementação do ecoturismo usando ferramentas de sensoriamento remoto em Cururupu – MA, Brasil. *Caminhos de Geografia*, 22(17):237-243.
- 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(S.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.
- HERZ, R. (1991). Manguezais do Brasil. São Paulo/SP: Instituto Oceanográfico de São Paulo, 227p.
- Huang, H.; Legarsky, J.; Othman, M., 2007. Land-cover classification using RADARSAT and LANDSAT imagery for St. Louis, Missouri. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73:37-43.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do RN, 1999. In: Informativo Municipal - Macau. Natal/RN, Vol. 05, p. 1-14.
- Kampel, M.; Amaral, S.; Soares, M. L. G., 2005. Imagens CCD/CBERS e TM/LANDSAT para análise multitemporal de manguezais no nordeste brasileiro. Um estudo no litoral do Estado do Ceará. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, Goiânia. Anais, São José dos Campos/SP: INPE, Artigos, p. 979-986.
- Kjerfve, B.; Lacerda, L. D., 1993. Mangroves of Brazil. In: Conservation and sustainable utilization of mangrove forest in Latin America and Africa regions. Part I - Latin America, LACERDA LD (Ed.). Mangrove Ecosystem Technical Report nº 2. ITTO/ISME, Okinawa/Japan, 272 p.
- Köppen, W., 1948. *Climatologia: con um estúdio de los climas de la Tierra*. México: Fondo de Cultura Economica, 478 p.
- Krauss, K. W.; From, A. S.; Doyle, T. W.; Doyle, T. J.; Barry, M. J., 2011. Sea-level rise and landscape change influence mangrove encroachment onto marsh in the Ten Thousand Islands region of Florida, USA. *Journal of Coastal Conservation*, 15:629-638.
- Maia, L. P.; Lacerda, L. D., 2005. Estudo das áreas de manguezais do Nordeste do Brasil. Avaliação das áreas de manguezais dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Universidade Federal do Ceará. Instituto de Ciências do Mar. Fortaleza/CE, 60 p.
- Michener, W. K.; Blood, E. R.; Bildstein, K. L.; Brinson, M. M.; Gardner, L. R., 1997. Climate change, hurricanes and tropical storms, and rising sea level in coastal wetlands. *Ecological Applications*, 7:770-801.
- 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.
- NATRONTEC/ECOPLAM, 1995. Fabricação de barrilha e implantação de emissário submarino. Estudo de Impacto Ambiental: Diagnóstico, Análise de Impactos e Programa de Gestão Ambiental, 186p.
- Picchiotti, A.; Casacchia, R.; Salvatori, R., 1997. Multitemporal principal component analysis of spectral and spatial features of the Venice Lagoon. *International Journal of Remote Sensing*, 18(1):183-196.
- Prost, M. T., 2001. Manguezais paraenses: recursos naturais, usos sociais e indicadores para a sustentabilidade. Relatório Final, FUNTEC Convênio 063/98 Belém/PA: CTE/MPEG, 62 p. (+ mapas).
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, R.; Bamblér, R. 2003. The Shuttle Radar Topography Mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57:241-262.
- 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(2):109-119.
- Ranson, K. J.; Williams, D. L., 1992. Remotely sensed technology for forest ecosystem analysis. In: Shugart, H. H.; Leemans, R.; Bonan, G. B., (Eds.). A systems analysis of the global boreal forest. Cambridge University Press, p.267-290.

- Schaffer-Novelli, Y., 1991. Manguezais brasileiros. Tese de Livre Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 42p.
- Silva, C.G., 1991. Holocene stratigraphy and evolution of the Açu river delta, Rio Grande do Norte State, Brazil. PhD Thesis, Duke University, United States, 250p.
- Singhroy, V., 1996. Interpretation of SAR images for coastal zone mapping in Guyana. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22(3):317-328.
- 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*, 23(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 Region) from LANDSAT TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, 10(2):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.
- Valentim da Silva, D. R.; Amaro, V. E., 2008. Integração entre dados ópticos e radar (SRTM) para a caracterização geoambiental da costa setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista Geográfica Acadêmica*, 2:111-123.
- Vital, H., 2009. The mesotidal barrier of Rio Grande do Norte. In: Dillemburg, S.; Hesp, P. (eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*, Springer-Verlag, Berlin/Germany, p. 289-324.