

MAPEAMENTO DE AMBIENTES COSTEIROS TROPICAIS (GOLFÃO MARANHENSE, BRASIL) UTILIZANDO IMAGENS DE SENSORES REMOTOS ORBITAIS

Sheila Gatinho Teixeira¹ e Pedro Walfir Martins e Souza Filho²

Recebido em 17 outubro, 2006 / Aceito em 31 agosto, 2007
Received on October 17, 2006 / Accepted on August 31, 2007

ABSTRACT. This paper presents the results of coastal environmental mapping of Golfão Maranhense, Brazil, using a methodological approach that includes: (a) integrated analysis based on digital image processing of Landsat-4 TM, SPOT-2 HRV, RADARSAT-1 SAR (Synthetic Aperture Radar) and SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data; (b) geographic information system; (c) field surveys related to geomorphology, topography and sedimentology. Mapped environments were grouped into four sectors: Sector 1, with salt marsh, fresh marsh, estuarine channel and intermittent lake; Sector 2, embracing coastal plateau, fluvial floodplain, sandflats, macrotidal beach, urban areas, artificial lakes and mudflats; Sector 3, including, paleodunes covered with grass, mangroves and mixed intertidal banks; Sector 4, constituted by mobile dunes. In addition, perennial lakes, ebb-tidal deltas and supratidal sandflats were recognized. Digital image processing visual analysis of orbital remote sensing data in association with geographic information system, proved to be effective in tropical coastal mapping, allowing the generation of products with good accuracy and cartographic precision.

Keywords: coastal environments, wetlands, orbital remote sensing, images, Amazon Region.

RESUMO. Este trabalho apresenta os resultados do reconhecimento e mapeamento dos ambientes costeiros da região do Golfão Maranhense, Brasil, utilizando uma abordagem metodológica que incluiu: (a) análise integrada com base no processamento digital de imagens, ópticas Landsat-4 TM e SPOT-2 HRV, de imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) do RADARSAT-1, e dados de elevação da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*); (b) sistema de informações geográficas; e (c) levantamentos de campo relativos à geomorfologia, topografia e sedimentologia. Os ambientes costeiros, assim mapeados foram agrupados em quatro setores: Setor 1, com pântanos salinos, pântanos de água doce, lagos intermitentes e canal estuarino; Setor 2, abrangendo tabuleiro costeiro, planície de maré lamosa, planície fluvial, planície de maré arenosa, praias de macromaré, área construída e lagos artificiais; Setor 3, com manguezal, paleodunas e planície de maré mista; e Setor 4, constituído por dunas móveis. Além disso, foram também reconhecidos lagos perenes, deltas de maré vazante e planícies de supramaré arenosas. O processamento digital e a análise visual das imagens de sensores remotos orbitais, associados ao uso de sistemas de informações geográficas, mostraram-se eficazes no mapeamento de zonas costeiras tropicais, possibilitando a geração de produtos com boa acurácia e precisão cartográfica.

Palavras-chave: ambientes costeiros, zonas úmidas, sensoriamento remoto orbital, imagens, Amazônia.

¹ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil, Av. André Araújo, 2160, Aleixo, 69060-001 Manaus, AM, Brasil. Tel.: +55 (92) 2126-0327; Fax: +55 (92) 2126-0319 – E-mail: steixeira@ma.cprm.gov.br

² Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido, Av. Augusto Correa, 1, Campus do Guamá, Caixa Postal 8608, 66075-110 Belém, PA, Brasil. Tel.: +55 (91) 3201-8009; Fax: +55 (91) 3183-1478 – E-mail: walfir@ufpa.br

INTRODUÇÃO

O Golfo Maranhense, termo adotado pelo projeto RADAM com base na descrição de Ab'Saber (1960), está localizado no extremo norte do Estado do Maranhão. O Golfo está inserido no contexto das regiões tropicais úmidas, as quais se estendem entre as latitudes de 15° N e 15° S. Tais ambientes são de grande importância ambiental, pois contêm metade da água doce, partículas e solutos descarregados nos oceanos. Os trópicos úmidos são caracterizados por precipitação alta e constante (>1.500 mm/ano), altas temperaturas (>20°C) e baixa variação térmica (Nittrouer et al., 1995).

Esta área, mesmo inserida em importante contexto nos trópicos úmidos, ainda se encontrava desprovida de estudos mais detalhados (escalas de 1:25.000 e 1:50.000) nos ambientes costeiros, fato que motivou sua escolha para a realização da presente pesquisa.

Assim, são aqui apresentados os resultados do mapeamento dos ambientes costeiros da região do Golfo Maranhense. Para a confecção do trabalho foram utilizadas imagens ópticas Landsat-4 TM (*Thematic Mapper*) e SPOT-2 HRV (*High Resolution Visible*), imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) do RADARSAT-1, além de dados de elevação da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Estas imagens de sensores remotos orbitais foram processadas digitalmente, utilizando técnicas que permitiram o reconhecimento e o mapeamento de dezoito ambientes costeiros tropicais, sendo uma feição morfológica e duas feições antrópicas, agrupados em quatro unidades morfológicas, a saber: Planalto Costeiro, Planície Fluvial, Planície Estuarina e Planície Litorânea.

ÁREA DE ESTUDO

O Golfo Maranhense está localizado no extremo norte do Estado do Maranhão e é constituído pelas baías de São Marcos e São José, que se encontram separadas pela Ilha de São Luís (Fig. 1). Esta região faz parte de uma zona costeira marcada por estuários e reentrâncias no noroeste do Maranhão, que apresenta cerca de 5.414 km² de manguezais, e no nordeste do Pará, com aproximadamente 2.177 km² de manguezais Souza Filho (2005). Esta zona costeira, que constitui o maior sistema contínuo de manguezais do mundo, foi designada por Souza Filho, *op. cit.*, como Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA). Os manguezais do Estado do Maranhão são considerados os mais estruturalmente complexos do Brasil (Rebelo-Mochel, 1997). Este aspecto é atribuído em parte às diversas características da linha de costa, às grandes quantidades de água doce, provenientes de

extensos rios, às altas taxas de precipitação, bem como às altas amplitudes de maré (Kjerfve & Lacerda, 1993). Além disso, a área de estudo encontra-se no centro de um sistema de golfo, caracterizado por macromaré semidiurna, com variações médias de 4 m e máxima superior a 7 m. As correntes de marés máximas são superiores a 4 m/s (Rebelo-Mochel, *op. cit.*). O clima é tropical úmido, com estações seca (julho a dezembro) e chuvosa (janeiro a junho) bem definidas, com temperatura média em torno de 26°C.

MATERIAIS

O estudo foi baseado nas informações extraídas de duas cenas do sensor Thematic Mapper (TM) do Landsat-4 (órbitas/ponto 220/062 e 221/062, que se referem, respectivamente, às datas de passagem 21/08/1992 e 13/09/1992), adquiridas no acervo da Universidade de Maryland, bem como duas cenas HRV do SPOT-2 (órbitas/ponto 710/355 e 711/355, que se referem, respectivamente, às datas de passagem 09/08/1990 e 18/08/1991). Foram também utilizadas duas cenas do RADARSAT-1, no modo de imageamento Wide 1, de órbita descendente, com aquisição em 16/01/2003 e 09/02/2003. As quatro cenas SRTM empregadas, correspondentes aos arquivos *hgt* S03W044, S03W045, S04W044 e S04W045 do período de 11 a 22/02/2000, foram adquiridas pelo ônibus espacial *Endeavour* (Rabus et al., 2003). Algumas características destas imagens são descritas na Tabela 1.

Um problema encontrado neste trabalho foi a falta de imagens ópticas (Landsat e SPOT) sem cobertura de nuvens na área estudada, durante o período de obtenção dos dados RADARSAT-1, impossibilitando a comparação entre informações extraídas nas faixas ópticas e de microondas do espectro eletromagnético para o mesmo período.

Os dados foram processados no Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), da Universidade Federal do Pará (UFPA), utilizando os pacotes PCI Geomatica 9.1, Surfer 8, Global Mapper 5 e ArcView GIS 3.2.

MÉTODOS

A abordagem metodológica para a geração do mapa de ambientes costeiros envolveu o processamento digital, no *software* PCI V. 9.1, das imagens ópticas (Landsat-4 TM e SPOT-2 HRV), SAR (RADARSAT-1 Wide-1) e SRTM, além de levantamentos de campo, relativos à geomorfologia, topografia e sedimentologia.

Para as imagens ópticas, foram efetuados: (1) correção atmosférica através do método de ajuste do histograma (Jensen, 1996); (2) confecção de mosaicos de imagens, considerando duas cenas adjacentes lateralmente; (3) escolha do melhor tri-

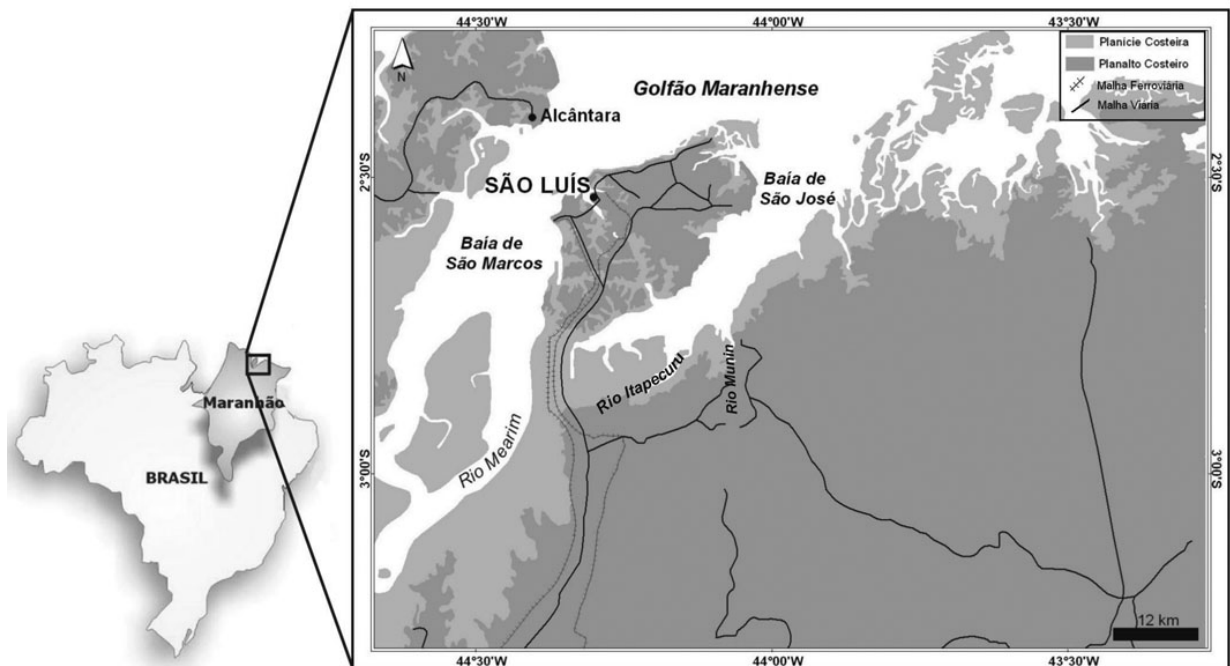


Figura 1 – Mapa de localização do Golfo Maranhense.

Tabela 1 – Características das imagens de sensoriamento remoto utilizadas.

Plataforma	Sensor	Data de aquisição	Ângulo de incidência (°)	Resolução espacial (m)	Tamanho do pixel (m)	Swath (km)	Condição de maré
RADARSAT-1	SAR/Wide 1	16/01/2003	20-31	33x27	12,5	165	Alta
RADARSAT-1	SAR/Wide 1	09/02/2003	20-31	33x27	12,5	165	Baixa
Landsat-4	TM	21/08/1992	Nadir	30	28,5	185	Alta
Landsat-4	TM	13/09/1992	Nadir	30	28,5	185	Alta
SPOT-2	HRV	09/08/1990	98,7°	20	20	60	Alta
SPOT-2	HRV	18/08/1991	98,7°	20	20	60	Alta
(SRTM)	InSAR	Fev. 2000	off-nadir	90	90	111	–

plete de bandas Landsat-4 TM (1, 4 e 5) através do cálculo OIF (*Optimum Index Factor*) (Chavez Jr. et al., 1982); (4) realce linear do contraste aplicado ao mosaico de imagens; e (5) correção geométrica das imagens SPOT através de modelo polinomial, pois estas foram adquiridas no formato *geotiff*, não possuindo os dados de órbita, que são pré-requisitos para a ortorretificação. Nas imagens Landsat, não foi efetuada correção geométrica, pois estas já foram adquiridas ortorretificadas.

As imagens SRTM foram processadas primeiramente no *software* Global Mapper 5, com recorte e confecção de mosaicos. Posteriormente, estes mosaicos do SRTM foram processados no PCI 9.1, no qual foi feita a extração automática do DEM.

Os dados RADARSAT-1 foram primeiramente reescalados

de 16 para 8 bits (PCI Geomatics, 2004) e posteriormente ortorretificados (Cheng et al., 2000) usando o modelo digital de elevação adquirido automaticamente das imagens SRTM. Em seguida, foi utilizado para a redução do ruído *speckle* o filtro de Frost (3×3) e, subseqüentemente, aplicado um aumento linear de contraste linear.

Os trabalhos de campo foram realizados em outubro de 2005, constando das seguintes atividades: (1) validação dos ambientes costeiros reconhecidos nas imagens de sensores remotos, através da coleta de pontos de controle em levantamento terrestre; (2) amostragem de sedimentos para análise granulométrica; (3) sobrevôos para refinar o reconhecimento dos ambientes costeiros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Reconhecimento e caracterização dos ambientes costeiros do Golfo Maranhense

O reconhecimento dos ambientes costeiros foi realizado através da interpretação visual dos melhores produtos obtidos através do processamento digital de imagens. A interpretação visual levou em consideração o arranjo espacial das propriedades físicas e químicas dos alvos naturais nas imagens ópticas (Fig. 2) e a análise da textura, forma, tons e tamanho nas imagens SAR (Fig. 3), além do exame de variáveis ambientais (dados de precipitação e de maré) para os dias de aquisição das imagens. Assim, foram reconhecidos quinze ambientes costeiros, bem como uma feição morfológica, o Tabuleiro Costeiro, duas feições antrópicas (Área Construída e Lagos Artificiais). Neste trabalho, a fim de facilitar a descrição e a espacialização dos ambientes e feições costeiras, a área de estudo foi segmentada em quatro setores geográficos (Fig. 3B).

O Setor 1 compreende parte da Baixada Maranhense até a Baía de São Marcos, englobando a Ilha do Caranguejo. Neste setor, são reconhecidos pântanos salinos, pântanos de água doce, lagos intermitentes e o canal estuarino.

Pântanos salinos

São ambientes localizados sob os manguezais, que, como estes, também se desenvolvem em uma topografia baixa, que varia de 0 a 3 m. Nas composições coloridas Landsat-4 TM (Fig. 4A) e SPOT-2 HRV (Fig. 4D), os pântanos salinos são identificados pelas cores ciano e verde claro, em função da resposta espectral do solo lamoso salino exposto. Sabe-se que a salinidade, a rugosidade do solo e a umidade aumentam a constante dielétrica e, conseqüentemente, incrementam o retroespalhamento, aumentando a resposta dos alvos na faixa de microondas. Os pântanos salinos são observados em tons de cinza escuro, na imagem SAR do dia 16 de janeiro de 2003 (Fig. 4B). Esta tonalidade é decorrente da condição de baixa precipitação registrada tanto para o dia da aquisição da imagem, como para os cinco dias que antecederam tal data, levando à diminuição da constante dielétrica e a reflexão predominante das microondas, pelo solo liso exposto, na direção oposta à antena do radar.

Pântanos de água doce

Corresponde à região rebaixada e alagadiça dos estuários afogados do rio Mearim, denominada Baixada Maranhense. A planície apresenta numerosas lagoas fluviais, extensas várzeas inundáveis

e áreas colmatadas, sendo recobertas por palmeiras de *Mauritia flexuosa* e *Euterpe edulis* (Lebigre, 1994). No geral, apresenta cotas em torno de 0 a 10 m e é bordejada pelo planalto costeiro.

Este ambiente é identificado nos mosaicos Landsat-4 TM e SPOT-2 HRV (Figs. 4A e D), através das cores verde e vermelho claro, respectivamente, em decorrência da mistura espectral das respostas do solo alagadiço, que possui baixa reflectância tanto na faixa espectral do visível como do infravermelho, e das gramíneas, que possuem alta reflectância na faixa do infravermelho. Ao longo dos canais fluviais, ocorre vegetação do tipo palmeira. Na imagem SAR (Fig. 4B), este ambiente é observado em tons de cinza escuro, em virtude do baixo retorno do sinal, ocasionado pela pequena rugosidade da vegetação do tipo gramínea, que cria um mecanismo de retroespalhamento quase-especular.

Lagos intermitentes

Correspondem a corpos hídricos rasos, com aproximadamente 2 m de profundidade, que ocorrem sobre os pântanos de água doce e são abastecidos principalmente por águas pluviais, secando totalmente durante o período mais seco. Os lagos intermitentes foram identificados em função da reflexão especular da água observada na imagem RADARSAT-1 W1, de 09 de fevereiro de 2003 (Fig. 4C), adquirida em um período de alta precipitação. Na imagem RADARSAT-1 W1 de 16 de janeiro de 2003 (Fig. 4B), os lagos não são observados, o que ratifica a condição intermitente deste ambiente controlado principalmente pela chuva.

Canais estuarinos

Os canais estuarinos são representados pelos rios Mearim (Figs. 4A, B, C e D), Munim e Itapecuru. Estes foram identificados pelo contraste da resposta espectral da água e pela reflexão especular nas imagens SAR.

O Setor 2 inclui a Ilha de São Luís, desde a Baía de São Marcos até a Baía de São José. Nele, são reconhecidos o tabuleiro costeiro, planície fluvial, planície de maré lamosa, planície de maré arenosa, praias de macromaré, área construída e lagos artificiais.

Tabuleiro costeiro

Esta feição morfológica é sustentada por sedimentos cretácicos do Grupo Itapecuru, apresentando cotas que variam de 20 a 120 m. No contato com os manguezais, são observadas paleofalésias; nos limites com rios e com o mar, são esculpidos barrancos e falésias ativas, respectivamente.

O tabuleiro costeiro foi reconhecido a partir da resposta espectral da vegetação arbórea, que possui alta reflectância na faixa

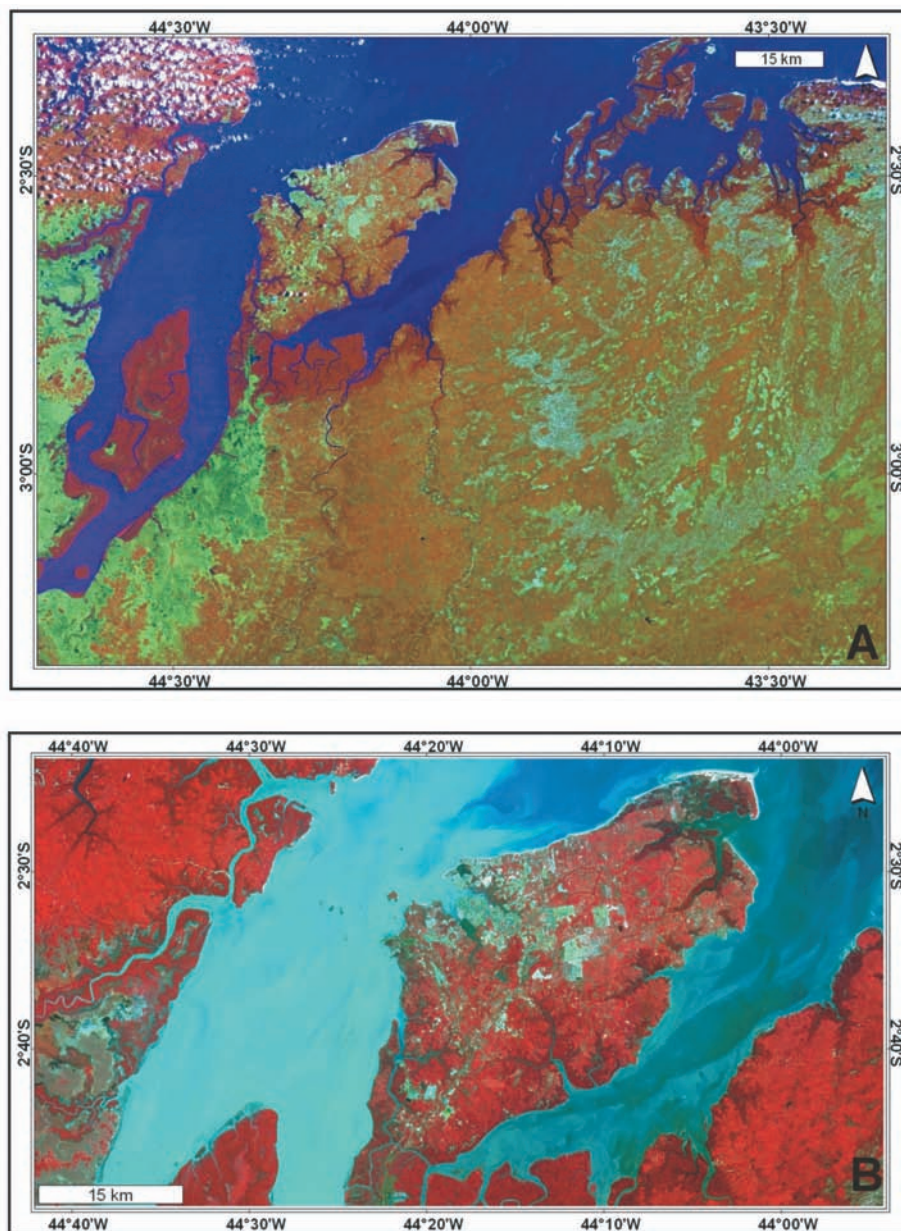


Figura 2 – A) Mosaico de imagens Landsat-4 TM (composição colorida 4R5G1B). B) Mosaico de imagens SPOT-2 HRV (composição colorida 3R2G1B).

do infravermelho próximo e médio. Assim, apresenta-se com cor vermelha em tons mais claros na composição colorida Landsat-4 TM (Fig. 5A), em razão da contribuição da vegetação arbórea nas bandas 4 e 5. Na composição colorida SPOT-2 HRV (Fig. 5B), a cor vermelha do tabuleiro costeiro é explicada pela alta refletância da vegetação na banda 3. A diferença de saturação do vermelho nas imagens Landsat e SPOT, para o tabuleiro costeiro, deve-se à ausência da faixa do infravermelho médio no sensor HRV. Na imagem RADARSAT-1 W1 da Fig. 5C, o tabuleiro costeiro é observado em tons relativamente escuros, em decorrência

do mecanismo de retroespalhamento difuso do sinal, provocado pela estrutura da vegetação arbustiva, sendo influenciado pelo baixo teor de umidade.

Planície fluvial

A planície fluvial é representada pelas áreas sujeitas à inundação dos rios, caracteristicamente áreas baixas (cotas variando de 0 a 10 m) e planas, que ocorrem bordejando os principais cursos d'água na região investigada. Essas áreas são inundadas somente

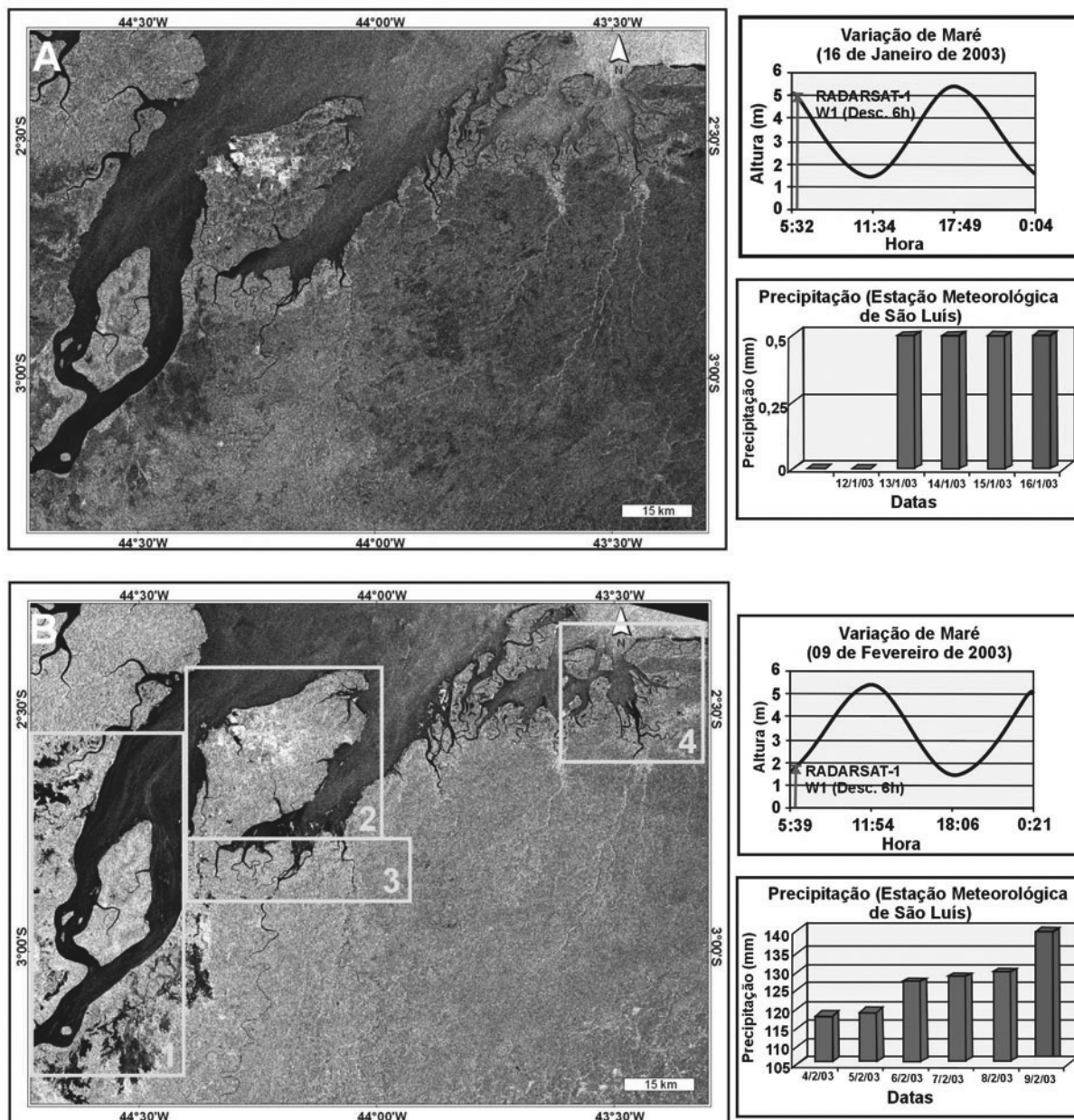


Figura 3 – A) Imagem RADARSAT-1 W1 (16/01/2003), com os gráficos Variação de Maré (DHN, 2005) e Precipitação (CPTEC-INPE, 2005). B) Imagem RADARSAT-1 W1 (09/02/2003), mostrando os setores 1, 2, 3 e 4, ao longo do Golfo Maranhense, com os gráficos Variação de Maré (DHN, 2005) e Precipitação (CPTEC-INPE, 2005).

durante os períodos de grandes cheias e foram identificadas nas composições coloridas Landsat-4 TM (Fig. 5A) e SPOT-2 HRV (Fig. 5B) pela cor vermelha, decorrentes da resposta espectral do tipo de vegetação, no entanto, que é diferente das áreas de tabuleiro. A planície fluvial também foi identificada por sua forma, que acompanha o padrão de drenagem. Na imagem SAR (Fig. 5C), apresenta tons de cinza mais claros, em virtude dos mecanismos de retrospalhamento do tipo volumétrico e do tipo *dou-*

ble bounce (reflexão de canto), sendo diferenciada também por apresentar uma textura mais rugosa que as áreas adjacentes.

Planície de maré lamosa

Este ambiente ocorre bordejando algumas áreas de mangue, sendo constituído essencialmente de sedimentos lamosos e melhor observado nos períodos de maré baixa. Como a região está

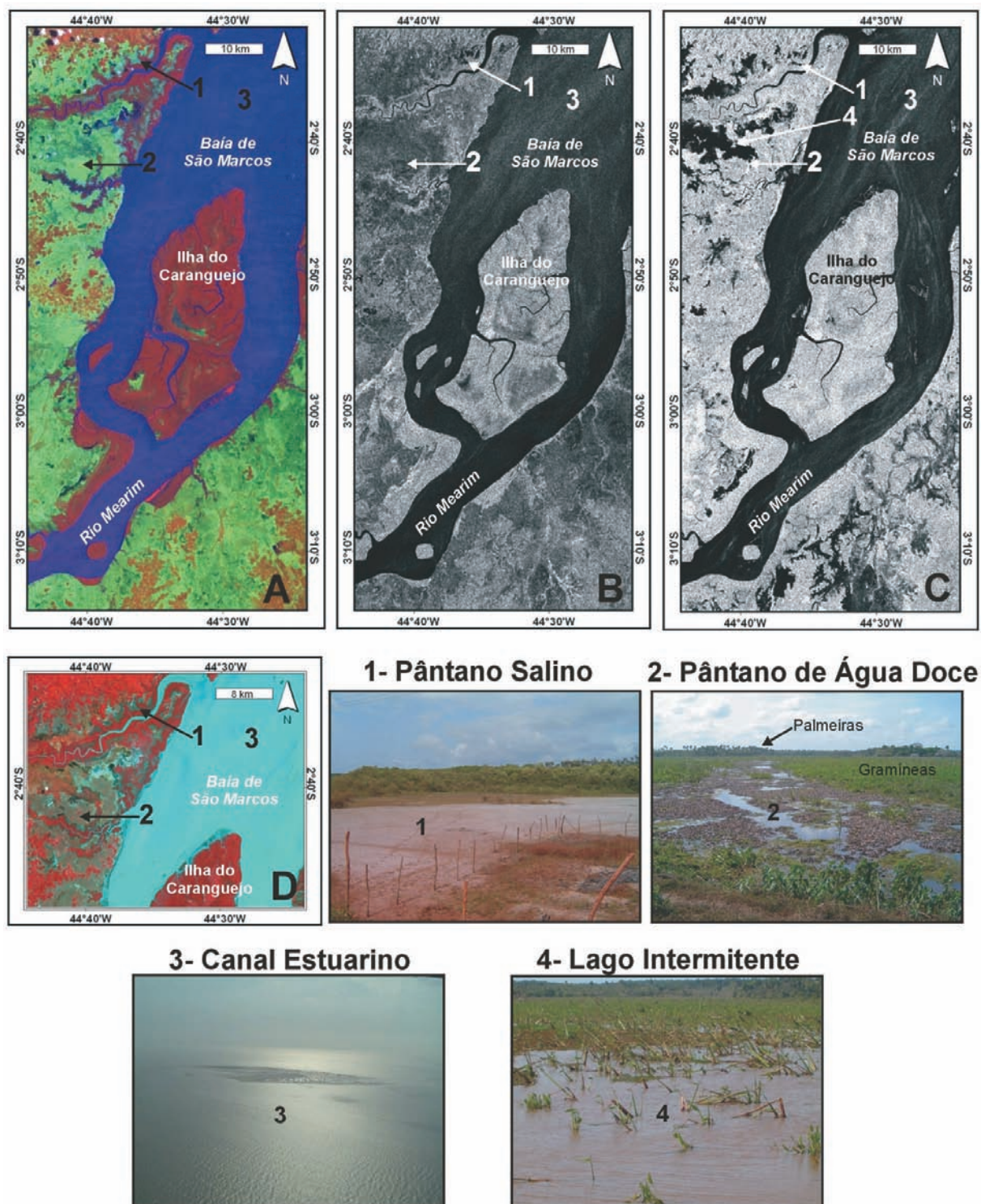


Figura 4 – Setor 1 – A) Composição colorida Landsat-4 TM 4R5G1B; B) imagem RADARSAT-1 W1 (16/01/2003); C) imagem RADARSAT-1 W1 (09/02/2003); D) Composição colorida SPOT-2 HRV 3R2G1B. Ambientes costeiros destacados: 1) pântano salino, 2) pântano de água doce, 3) canal estuarino e 4) lago intermitente.

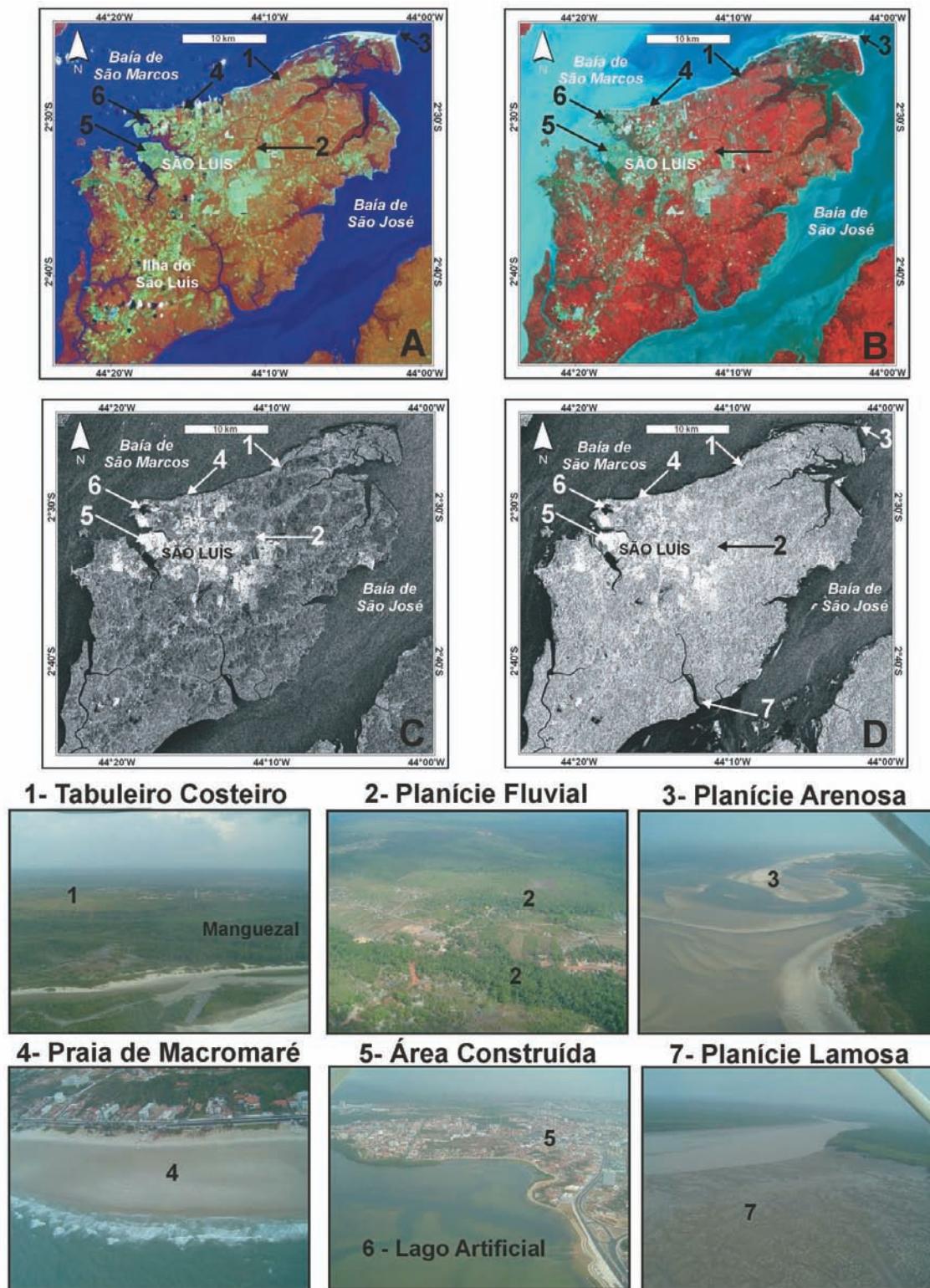


Figura 5 – Setor 2 – A) Composição colorida Landsat-4 TM 4R5G1B; B) composição colorida SPOT-2 HRV 3R2G1B; C) imagem RADARSAT-1 W1 (16/01/2003); D) imagem RADARSAT-1 W1 (09/02/2003). Ambientes costeiros destacados: 1) tabuleiro costeiro, 2) planície de inundação fluvial, 3) planície de maré arenosa, 4) praia de macromaré, 5) área construída, 6) lago artificial e 7) planície de maré lamosa.

inserida em uma zona de macromaré, na qual as variações diárias chegam em média a 5 m, esta planície lamosa pode atingir uma extensão de aproximadamente 1 km, como observado em frente à cidade de São Luís. A planície lamosa pode ser visualizada na imagem SAR (Fig. 5D) como áreas em tons de cinza escuro em virtude da rugosidade da superfície dessas áreas.

Planície de maré arenosa

Ocorre na porção distal da planície estuarina, margeando as dunas costeiras. É constituída por sedimentos arenosos úmidos, pois sofrem a influência da maré. Na área de estudo, a planície arenosa possui a feição do tipo esporão (*spit*), que é observada no extremo norte da Ilha de São Luís (Fig. 5A). Tal feição é representada pela cor ciano, em resposta ao comportamento espectral da areia úmida, nas faixas imageadas pelo sensor Landsat-4 TM. Na imagem SAR (Fig. 5D), este ambiente de textura lisa é observado, em condições de maré baixa, em tons de cinza escuro.

Praias de macromaré

Ocorrem como faixas de sedimentos arenosos, que bordejam a Ilha de São Luís e outras ilhas menores na porção nordeste da área. Na Ilha de São Luís, as praias são constituídas de areias finas a médias, moderadamente selecionadas, enquanto que, na região de Alcântara, porção noroeste da área de estudo, os sedimentos que as constituem são caracterizados como areias finas a muito finas e moderadamente selecionadas. Na Ilha de São Luís, as praias de macromaré, em condições de maré baixa, podem chegar a uma largura de aproximadamente 1 km. Tais ambientes são observados nas imagens ópticas na cor branca (Figs. 5A e B), em função da resposta espectral dos depósitos arenosos, que possuem alta reflectância nas faixas espectrais do visível e infravermelho. Nas imagens RADARSAT-1 W1 (Figs. 5C e D), este ambiente possui tonalidade cinza escura, em função do baixo retorno do sinal, decorrente da pequena rugosidade local, desenvolvendo um mecanismo de retroespalhamento quase-especular.

Áreas construídas e lagos artificiais

As áreas construídas englobam tanto as porções urbanas em expansão como as consolidadas, estas representadas principalmente pela cidade de São Luís. Tais áreas são identificadas pela cor verde clara nas imagens Landsat-4 TM e SPOT-2 HRV (Figs. 5A e B), em decorrência de sua reflectância nas regiões do infravermelho e visível. Nas imagens RADARSAT-1 W1 (Figs. 5C e D), estes alvos podem ser observados como áreas de forte retorno do radar em decorrência do efeito de reflexão de canto (*double bounce*).

Os lagos artificiais ocorrem na região da cidade de São Luís, sendo identificados na imagem Landsat-4 TM pela cor azul escura (Fig. 5A) e no SPOT-2 HRV (Fig. 5B) pela cor verde escura, em resposta ao comportamento espectral da água no visível. Nas imagens de RADARSAT-1 W1 (Figs. 5C e D), foram caracterizados pelo baixo retorno do radar, decorrente da reflexão especular na água.

O Setor 3 abrange a porção a sul da Ilha de São Luís, incluindo a foz do rio Itapecuru. Neste setor, são reconhecidas as paleodunas, planície de maré mista e manguezal.

Paleodunas

Sobre o tabuleiro costeiro, observam-se áreas com sedimentos arenosos expostos, que foram mapeados como paleodunas, as quais ocorrem, entre as cotas de 20 e 70 m. Nas imagens de sensores ópticos (Figs. 6A e B), são diferenciadas do tabuleiro costeiro pela cor, decorrente de sua alta resposta espectral nas faixas do visível e do infravermelho, como também pela textura rugosa, proveniente de sua morfologia. Na imagem SAR (Fig. 6C), as paleodunas são observadas em tons escuros. O reconhecimento deste ambiente só ocorreu com o levantamento de campo, pois apenas com a análise das imagens de sensores remotos não foi possível estabelecer sua classificação.

A compartimentação das paleodunas observada em campo é melhor visualizada nas imagens SPOT-2 HRV, pois sua resolução espacial de 20 m permite o detalhamento mais preciso da textura rugosa característica da morfologia deste ambiente.

As características espectrais das paleodunas permitiram a definição de três compartimentos, em função das diferentes reflectâncias nas bandas SPOT-2 HRV: paleodunas vegetadas, não-vegetadas e interdunas.

Planície de maré mista

A planície de maré mista é representada principalmente por bancos areno-lamosos em condições de intermaré, que podem ser encontrados no meio dos canais estuarinos, durante o período de baixamar. Pode ser observada na imagem SAR (Fig. 6D) ora em tons de cinza claro, ora em tons de cinza escuro, tonalidades estas provenientes do mecanismo de retroespalhamento influenciado tanto pela superfície da água (tons escuros) como pela superfície rugosa dos bancos arenosos então emersos (tons claros).

Manguezal

Este ambiente é caracterizado por sedimentos lamosos e apresenta uma cobertura vegetal em que predominam de espécies de

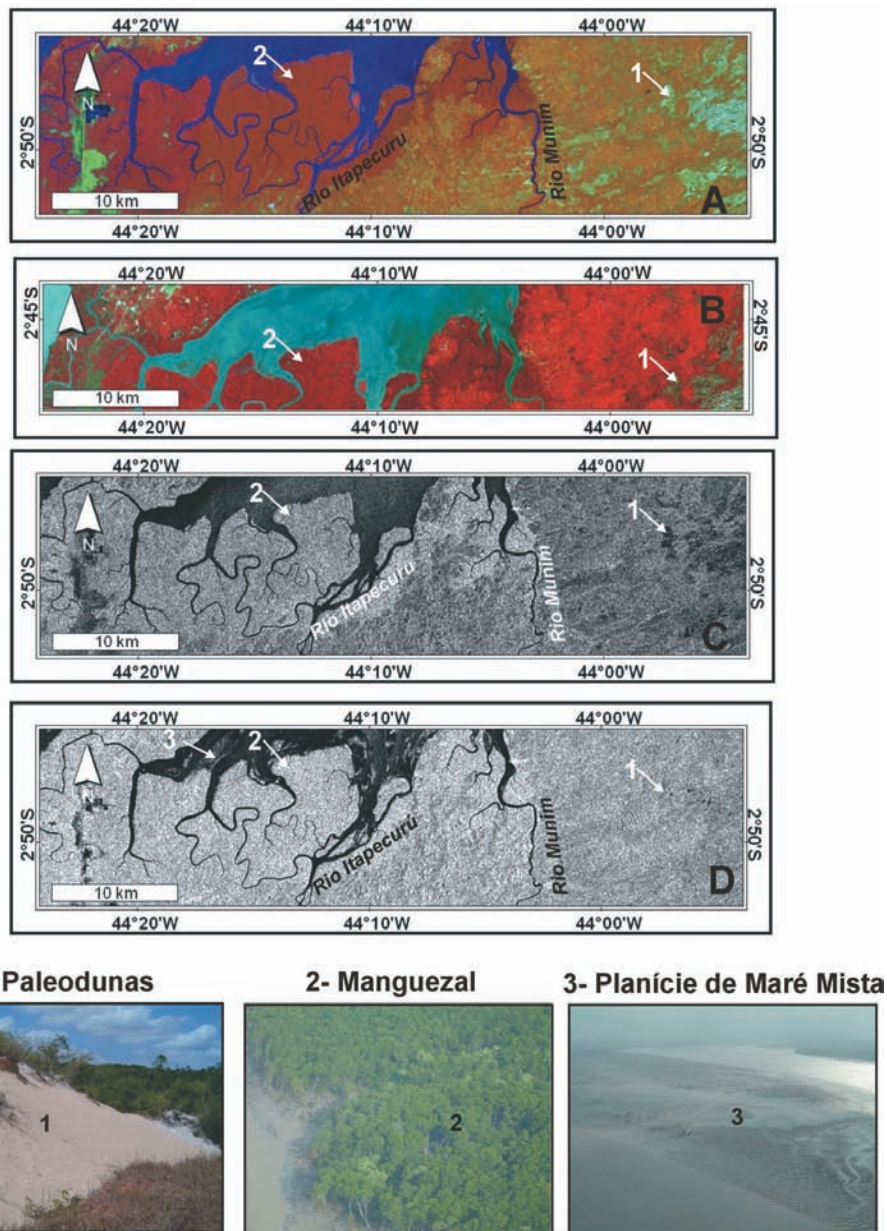


Figura 6 – Setor 3 – A) Composição colorida Landsat-4 TM 4R5G1B; B) composição colorida SPOT-2 HRV 3R2G1B; C) imagem RADARSAT-1 W1 (16/01/2003); D) imagem RADARSAT-1 W1 (09/02/2003). Ambientes costeiros destacados: 1) paleodunas vegetadas, 2) manguezal e 3) planície de maré mista.

Rhizophora e *Avicennia* (Lebigre, 1994). Ocorrem em áreas baixas com cotas variando de 0 a 3 m, incluindo árvores de 30 m de altura em média. Considerando os sensores ópticos utilizados, este ambiente pode ser melhor discriminado das áreas de Tabuleiro na imagem Landsat-4 TM (Fig. 6A), em função da alta resposta espectral da densa floresta de mangue na faixa do infravermelho próximo. A mesma delimitação não é observada nas imagens SPOT, pois tanto a vegetação arbustiva que reco-

bre o tabuleiro costeiro como a vegetação de mangue possui altas reflectâncias na faixa do infravermelho próximo, representada pela banda 3 HRV ($\lambda = 0,79-0,89 \mu\text{m}$), dificultando assim a delimitação deste ambiente. Na imagem SAR (Fig. 6C), o manguezal é observado em tons de cinza claro, decorrentes do maior retroespalhamento, mecanismo de *double bounce*, em virtude da inundação da floresta de mangue, condicionada pela maré alta registrada para o dia 16 de janeiro de 2003.

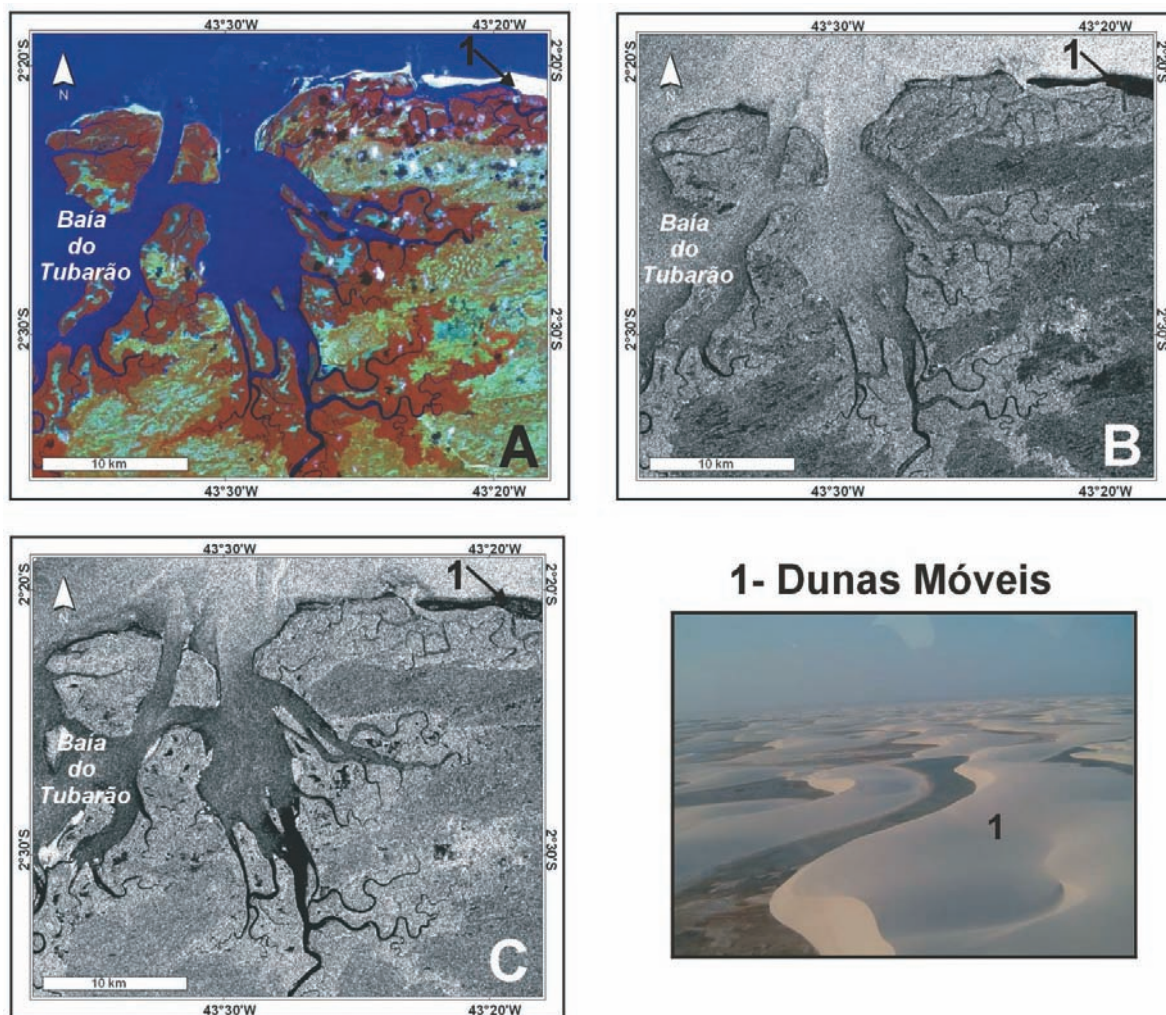


Figura 7 – Setor 4 – A) Composição colorida Landsat-4 TM 4R5G1B; B) imagem RADARSAT-1 W1 (16/01/2003) e C) imagem RADARSAT-1 W1 (09/02/2003). Ambiente costeiro destacado: 1) Dunas móveis.

O Setor 4 abrange a área costeira, desde a Baía do Tubarão até o limite oeste dos Lençóis Maranhenses. Neste setor, é destacada a presença das dunas móveis.

Dunas móveis

Ocorrem na porção norte da Ilha de São Luís e nordeste da área estudada, dispostas como transversais ou barcanas. São limitadas a sul pelos manguezais e a norte pela planície de maré arenosa e pelo Oceano Atlântico. As dunas móveis são constituídas essencialmente por depósitos de areia fina a média, bem selecionados, de coloração esbranquiçada. Este ambiente pode ser identificado na imagem Landsat-4 TM (Fig. 7A) pela cor branca, em função da alta reflectância dos depósitos arenosos em todas as faixas espectrais. Nas imagens RADARSAT-1 W1, apresentam-se com tonalidades escuras, em decorrência da reflexão especular

do pulso do radar nas superfícies lisas das dunas (Figs. 7B e C).

Além dos ambientes, anteriormente citados foram ainda reconhecidos: lagos perenes, que ocorrem sobre o tabuleiro costeiro, na porção oeste da área; delta de maré vazante, que é um ambiente que se desenvolve na desembocadura de alguns canais estuarinos, na porção noroeste da área, ficando totalmente exposto durante a baixamar; planície de supamaré arenosa, que ocorre de maneira descontínua, na porção noroeste da área, e encontra-se topograficamente acima dos manguezais e abaixo do tabuleiro costeiro, bordejando este.

Mapeamento dos ambientes costeiros

A partir do reconhecimento dos ambientes costeiros, as imagens de sensores remotos foram agrupadas em uma base de dados georreferenciados no ArcView 3.2. Integrados aos dados de

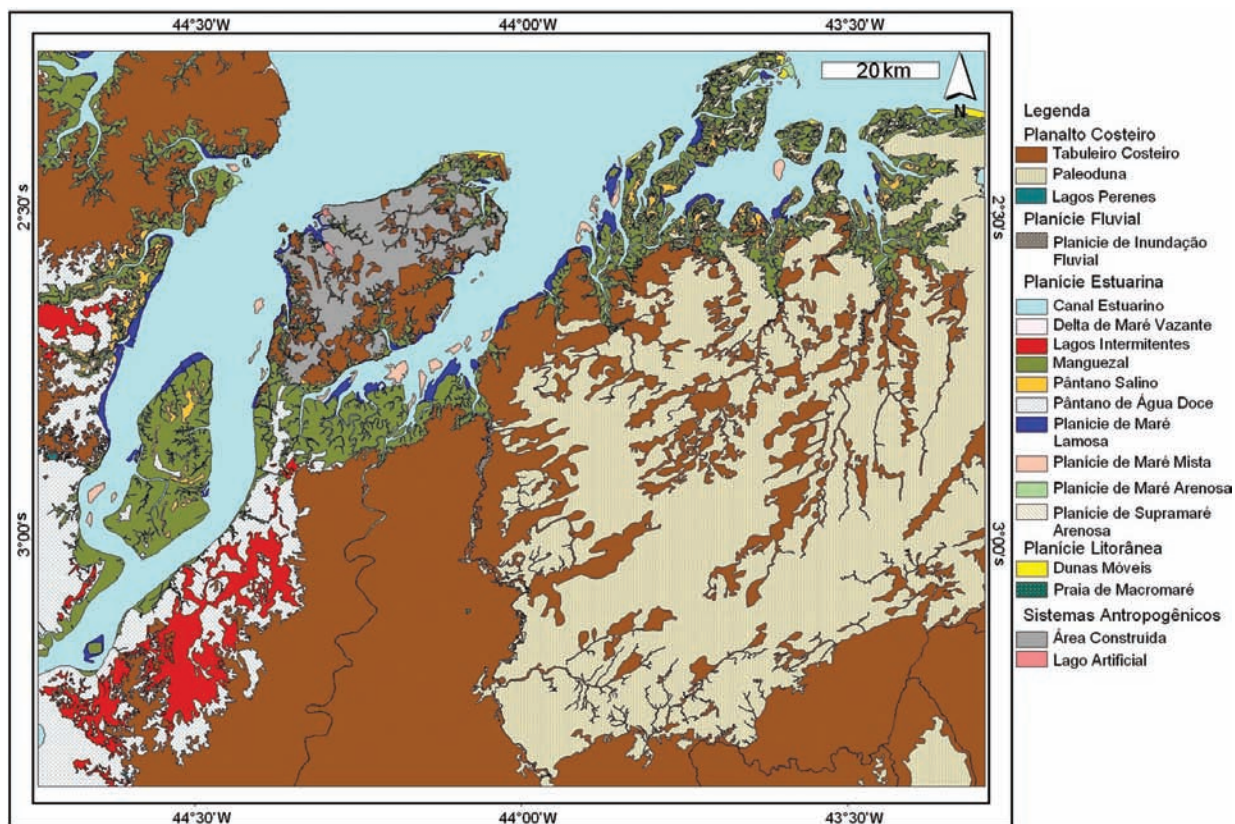


Figura 8 – Mapa dos ambientes costeiros do Golfo Maranhense.

campo, os polígonos referentes a cada ambiente foram vetorizados, permitindo a visualização de sua distribuição espacial no mapa de ambientes costeiros, com uma precisão de aproximadamente 38 m (Fig. 8).

Detalhes das cores e texturas dos ambientes costeiros reconhecidos nas imagens, bem como a área ocupada por cada um deles, estão descritos na Tabela 2.

CONCLUSÕES

Este trabalho constou do uso de sensores remotos, que operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético, no reconhecimento e mapeamento da área costeira tropical do Golfo Maranhense.

Os sensores ópticos (Landsat-4 TM e SPOT-2 HRV) contribuíram com informações espectrais, que realçaram as características físico-químicas dos materiais. As imagens SPOT-2 HRV apresentam menor resolução espectral, porém maior resolução espacial, quando comparadas às imagens Landsat-4 TM, constituindo importante fonte de informações no mapeamento e permi-

tindo a visualização de detalhes. No entanto, a maior resolução espectral das imagens Landsat-4 TM possibilitou a discriminação entre os diferentes ambientes, como por exemplo, o limite entre o tabuleiro costeiro e as áreas de manguezal.

As imagens RADARSAT-1 W1 contribuíram com informações relacionadas a diferenças na altura da vegetação litorânea, geometria dos ambientes, rugosidade superficial, além de apresentar o comportamento dos ambientes costeiros mapeados em diferentes condições de maré. Permitiram também o monitoramento de áreas alagáveis, pois foram adquiridas em condições de precipitação bastante distintas, onde, na imagem do dia 16 de janeiro de 2003, não houve chuva, enquanto que, na imagem do dia 09 de fevereiro de 2003, houve precipitação não só no dia da aquisição da imagem, mas nos dias que a antecederam. Tal fato resultou na formação dos lagos intermitentes, que são bem marcados nesta imagem SAR com tonalidades escuras.

O uso conjunto das técnicas de sensoriamento remoto e de sistema de informações geográficas mostrou-se eficaz no mapeamento da zona costeira, possibilitando a geração de produtos na escala de 1:50.000 com boa acurácia e precisão cartográfica.

Tabela 2 – Características dos ambientes costeiros tropicais do Golfão Maranhense.

Ambientes Costeiros	Morfologia/Localização	Características da imagem Landsat-4 TM	Características da imagem SPOT-2 HRV	Características da imagem RADARSAT-1 (16/01/2003)	Características da imagem RADARSAT-1 (09/02/2003)	Área (km ²)
Tabuleiro costeiro	Superfície suavemente ondulada e fortemente dissecada com bordas abruptas.	Tons de vermelho	Tons de vermelho claro	Superfície rugosa com tons escuros	Superfície rugosa com tons claros	7.324,3
Paleoduna	Formas alongadas paralelas, com limites irregulares e de direção predominante NE-SW.	Tons de verde claro	Tons de verde escuro	Superfície rugosa com tons escuros	—	4.934,8
Lagos perenes	Corpos hídricos isolados localizados sobre o tabuleiro costeiro.	Tons de azul escuro	—	Superfície lisa com tons escuros	Superfície lisa com tons escuros	5,2
Planície de inundação fluvial	Áreas baixas e planas que ocorrem bordejando os principais cursos d'água, que cortam a região.	Tons de marrom claro	Tons de vermelho	—	—	29,8
Canal estuarino	Canais com processos de acreção e erosão das margens.	Tons de azul escuro	Tons de azul claro	Superfície lisa com tons escuros	Superfície lisa com tons escuros	5.377,7
Delta de maré vazante	Área plana observada na maré baixa na desembocadura de alguns canais estuarinos da área.	—	—	—	Superfície intermediária com tons claros	3,8
Lagos intermitentes	Corpos hídricos rasos que ocorrem associados aos pântanos de água doce.	—	—	—	Superfície lisa com tons escuros	512,1
Manguezal	Área baixa e plana que ocorre bordejando o litoral.	Tons de marrom escuro	Tons de vermelho escuro	Superfície muito rugosa com tons claros	Superfície muito rugosa com tons claros	1.930,1
Pântano salino	Área baixa e plana que ocorre sob o manguezal, sendo inundada periodicamente por águas salobras.	Tons de ciano	Tons de verde claro	Superfície lisa com tons escuros	—	182,7
Pântano de água doce	Região baixa e alagadiça dos estuários afogados do rio Mearim.	Tons de verde	Tons de marrom claro	Superfície rugosa com tons escuros	Superfície rugosa com tons claros	1.104,1
Planície de maré lamosa	Área plana e baixa que é coberta pela água durante a maré alta e descoberta na baixamar, a qual bordeja algumas áreas de mangue.	—	Tons de marrom claro	—	Superfície lisa com tons claros	170,6
Planície de maré mista	Ocorre na forma de bancos alongados, observados na baixamar no meio dos canais estuarinos.	—	—	—	Superfície lisa com tons claros	62,5
Planície de maré arenosa	Feição do tipo esporão (<i>spit</i>), que ocorre bordejando as dunas móveis costeiras.	Tons de azul claro	Tons de ciano	—	Superfície rugosa com tons claros	15,4
Planície de supramaré arenosa	Faixas estreitas, descontínuas, que bordejam o tabuleiro costeiro, em áreas restritas da costa.	Tons de ciano	Tons de branco	—	—	12,8
Dunas móveis	Corpos de areia do tipo transversais e barcanas, que ocorrem na porção litorânea da área.	Tons de branco	Tons de branco	Superfície lisa com tons escuros	Superfície lisa com tons escuros	31,7
Praia de macromaré	Faixas contínuas, que bordejam a Ilha de São Luís e outras ilhas menores.	Tons de branco	Tons de branco	Superfície lisa com tons escuros	Superfície lisa com tons escuros	6,29
Área construída	Áreas com ocupação e construção de infra-estrutura urbana.	Tons de verde claro	Tons de verde claro	Superfície muito rugosa com tons muito claros	Superfície muito rugosa com tons muito claros	460,28
Lagos artificiais	Corpos hídricos represados que ocorrem associados às áreas construídas.	Tons de azul escuro	Tons de azul claro	Superfície lisa com tons escuros	Superfície lisa com tons escuros	4,6

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no contexto do projeto PIATAM Mar, com apoio da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Proc. #502450/03-7) e do projeto Rede 05 / Petromar / Petro-risco (CtPetro / FINEP / Petrobras / CNPq). Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio à pesquisa durante esta investigação (Proc. #303238/2002-0 e Proc. #130599/2004-2).

REFERÊNCIAS

- AB'SABER AN. 1960. Contribuição à Geomorfologia do Estado do Maranhão. *Notícia Geomorfológica*, 3(5): 35–45.
- CAMARGO MG. 1999. SYSGRAN para Windows: Sistema de análises granulométricas [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: mcamargo@cem.ufpr.br em 10 ago. 2005.
- CHAVEZ JR PS, BERLIN GL & SOWERS LB. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8: 23–31.
- CHENG P, TOUTIN T & TOM V. 2000. Orthorectification and data fusion of Landsat-7 data. Disponível em: <http://www.pcgeomatrics.com/support_center/tech_papers/ASPRS_2000_land7.pdf>. Acesso em: 12 maio 2005.
- CPTEC-INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. 2005. Observações e Instrumentação – Dados Automáticos – Plataformas de

- Coleta de Dados. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br:9080/PCD/>>. Acesso em: 15 maio 2005.
- DHN. Departamento de Hidrografia e Navegação. 2005. Tábuas de marés para 2003 e 2004 – Porto de Itaqui (MA). Disponível em: <<http://dhn.mar.mil.br/>>. Acesso em: 09 maio 2005.
- JENSEN JR. 1996. Introductory digital image processing – A remote sensing perspective. 2nd ed. New Jersey, Prentice Hall, Prentice Hall Series in Geographic Information Science. 318 p.
- KJERFVE B & LACERDA LD. 1993. Mangroves of Brazil. In: LACERDA LD (Ed.). Conservation and sustainable utilization of mangrove forest in Latin America and Africa regions. Part I – Latin America Mangrove Ecosystem Technical Report No. 2. ITTO/ISME, Okinawa, 272 pp.
- LEBIGRE JM. 1994. Les marais maritimes de la baie de São Marcos (Maranhão-Brasil). Trav. Lab. Geo. Phys. Appl., Bordeaux, 12: 21–35.
- NITTROUER CA, BRUNSKILL GL & FIGUEIREDO AG. 1995. Importance of Tropical Coastal Environments. *Geo-Marine Letters*, 15: 121–126.
- PCI GEOMATICS. 2004. *Geomatica: User Manual*. PCI Geomatics, Version 9.1. Canada, 352 pp.
- RABUS B, EINEDER M, ROTH A & BAMLER R. 2003. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4): 241–262.
- REBELO-MOCHEL F. 1997. Mangroves on São Luís Island, Maranhão Brazil. In: KJERFVE B, LACERDA LD & DIOP EHS (Ed.). *Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa*; UNESCO, Paris, 145–154.
- SOUZA FILHO PWM. 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.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Sheila Gatinho Teixeira. Geóloga da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil, da Superintendência de Manaus-AM. Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Pará (2004). Desenvolveu mestrado na área de sensoriamento remoto aplicado à geologia costeira no Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA. Atualmente é estudante de doutorado na área de sensoriamento remoto, do Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA.

Pedro Walfir Martins e Souza Filho. Professor Doutor do Departamento de Geologia do Centro de Geociências da UFPA desde 2002. Desenvolveu mestrado na área de geologia costeira e doutorado na área de sensoriamento remoto aplicado à geologia costeira no Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA. É bolsista de produtividade em pesquisa nível II do CNPq desde 2003 e atualmente coordena o Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido do Centro de Geociências da UFPA.