

RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE ISA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO, AMAZÔNIA ORIENTAL

Messiana Beatriz Malato Boulhosa^{1*} e Pedro Walfir Martins e Souza Filho¹

Recebido em 30 janeiro, 2008 / Aceito em 26 maio, 2008
Received on January 30, 2008 / Accepted on May 26, 2008

ABSTRACT. Accidents related to exploration and oil transport are a threat to coast zones around the world. Oil spills are an ecological disaster that may cause irreparable damage to the environment. In the northeast coast of Pará state the intense flow of ships and rafts transporting petroleum and flowed, then the need to establish prevention strategies and administration of the environmental sensitivity about the oil spills in a certain part of Pará state northeast coast. The methodology consisted on processing digital images from remote sensors in the Landsat ETM+7 associated to data from the SRTM (shuttle radar topography mission) digital model of elevation, and to the field data collected in a GIS (geographical information system) environment. The most important results allowed: recognizing and describing five main geomorphological; identifying and classifying nine units of Environmental Sensitivity Rates (ISA) and creation of the Environmental Sensitivity Rates map to oil spill. The remote sensors techniques and SIG proved to be important tools for recognizing coast environments and for generating proposed maps.

Keywords: remote sensing, coastal geology, ESI chart, Amazon.

RESUMO. Acidentes relacionados ao transporte de petróleo constituem uma ameaça às zonas costeiras de todo o mundo, pois se trata de um evento ecologicamente desastroso podendo causar sérios danos ao meio ambiente. Na costa nordeste do Pará ocorre intenso fluxo de navios e balsas transportando petróleo e derivados, daí a necessidade de estabelecer estratégias de prevenção e gestão dos impactos ambientais ao derrame de óleo para elaboração de planos de emergência. O objetivo deste trabalho é gerar o mapa dos ambientes costeiros e o mapa de índice de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo dos ambientes costeiros de uma porção da costa nordeste do Pará. A metodologia consistiu no processamento digital de imagens Landsat ETM+7, associadas aos dados do MDE do SRTM (*shuttle radar topography mission*) e aos dados de campo, em ambiente de SIG (sistema de informação geográfica). Os resultados permitiram o reconhecimento e a descrição de cinco unidades geomorfológicas e de ambientes sedimentares; identificação e hierarquização de nove índices de sensibilidade ambiental (ISA); além da geração do mapa de índice de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo. As técnicas de sensoriamento remoto e SIG mostraram ser importantes ferramentas no reconhecimento dos ambientes costeiros e geração dos mapas propostos.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, geologia costeira, carta SAO, Amazônia.

¹ Universidade Federal do Pará, Instituto 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.: (91) 3201-8009; Fax: (91) 3183-1478 – E-mail: walfir@ufpa.br

*Endereço atual: Museu Paraense Emílio Goeldi, Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia, Campus de Pesquisa Terra Firme, Av. Perimetral, 1.091, Terra Firme, 66077-530 Belém, PA, Brasil. Tel.: (91) 3217-6147; Fax: (91) 3217-6159 – E-mail: biaboulhosa@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A preservação dos ecossistemas costeiros é de extrema importância tendo em vista o seu potencial ecológico e ambiental. Agressões antrópicas como ocupação desordenada, uso indevido do solo e despejo de poluentes podem gerar impactos ambientais irreversíveis aos seres vivos que habitam na zona costeira. Acidentes como derramamentos de óleo durante atividades de transporte ou procedimentos irregulares de limpeza de reservatórios dos navios petroleiros correspondem a uma importante agressão às regiões litorâneas. Vários casos de derramamentos de petróleo ocorreram no litoral brasileiro nos últimos anos apesar dos esforços de aumentar a segurança por parte das indústrias petroleiras de desenvolver métodos tanto preventivos quanto corretivos. Assim um monitoramento ambiental de zonas costeiras é de vital importância para a conservação dos ecossistemas costeiros, para tanto é necessário o conhecimento pleno das diferentes características geomorfológicas deste ambiente assim como uma cartografia confiável.

O mapeamento geomorfológico dos ambientes costeiros, em especial os tropicais úmidos dominados por macromaré, é complexo em virtude de uma série de fatores. Primeiro, a planície de macromaré forma áreas baixas, onde a informação detalhada do relevo é muitas vezes escassa e a representação planimétrica é dominante. Segundo, as variações de maré em torno de 6 m produzem fortes modificações nos limites dos ambientes sedimentares costeiros em resposta aos amplos deslocamentos verticais e laterais das marés. Terceiro, as modificações geomorfológicas costeiras são muito intensas e rápidas. Todos esses fatores são limitantes para o mapeamento do ambiente costeiro ao longo da zona costeira do nordeste do Pará.

A planície costeira estudada encontra-se localizada na maior e mais bem preservado ambiente tropical úmido do planeta, a região amazônica, mais especificamente ao longo da costa de manguezais do nordeste do Estado do Pará, correspondente à Folha SA-23-V-A-V (Escala 1:100.000) e engloba os municípios de Salinópolis, São João de Pirabas, Santarém Novo, Maracanã, Primavera (Fig. 1).

Diversos trabalhos têm sido realizados nos últimos anos ao longo da costa do Pará com o objetivo de mapear os ambientes costeiros e suas feições morfológicas utilizando diferentes produtos e técnicas de sensoriamento remoto e SIG (Pereira, 1995; Souza Filho, 1995; Santos, 1996; Silva, 1996; Silva Jr. & El-Robrini, 2001; Souza Filho & Paradella, 2001, 2003; Souza Filho et al., 2004; Boulhosa et al., 2005; Gonçalves et al., 2006; Silva et al., 2009).

Produtos de Sensoriamento Remoto incorporados em Sistema de informações geográficas (SIG) vêm sendo utilizados para mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental (ISA) de ambientes costeiros (Carvalho, 2003; Carvalho & Gherardi, 2003; Castro et al., 2003; Souza Filho et al., 2004; Gonçalves, 2005; Gonçalves & Souza Filho, 2005), e estes têm demonstrado ser uma ferramenta eficiente na geração de mapas de Sensibilidade ambiental.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial das imagens orbitais (Landsat ETM+7) na delimitação dos ambientes costeiros e de áreas inundáveis, associados a modelos numéricos de terreno (MNT) para identificação e geração de mapas dos Índices de Sensibilidade Ambiental ao derrame de óleo (ISA) nessa importante costa de manguezais. Tal mapa tem como principal aplicação fornecer subsídios para elaboração de planos de emergência para minimizar os impactos ambientais em caso de acidente.

A metodologia para geração do mapa de sensibilidade ambiental proposta pela NOAA (2002) e pela Petrobras (2002) e adotada neste trabalho consiste na análise integrada das características dos ambientes costeiros mapeados através de dados de sensores remotos (imagens Landsat ETM+7), sistema de informação geográfica (SIG), dados sobre geomorfologia, litologia, relevo da região.

ÁREA DE ESTUDO

O quadro geológico do nordeste do estado do Pará é marcado por depósitos do Neógeno representados pela Formação Pirabas do Mioceno Inferior (Góes et al., 1990) e pelo Grupo Barreiras datado Mioceno Inferior (Arai et al., 1988, 1994). Os depósitos quaternários que recobrem a maior parte do NE do estado do Pará e são representados pelo Pós-Barreiras (Sá, 1969) e depósitos holocênicos de planície aluvionar, estuarina e costeira compõem um complexo sistema deposicional (Silva, 1996; Souza Filho & El-Robrini, 1996; Silva Jr. & El-Robrini, 2001).

Souza Filho (2005) define esta costa como Costa de manguezais de macromaré da Amazônia definida por um relevo baixo (0 a 8 m), ampla planície costeira (com até 70 km de largura) e plataforma continental adjacente (~200 km de largura), sendo extremamente irregular, denteada e recortada por vários estuários.

Na região predomina um clima equatorial quente e úmido, definido por uma estação seca bem definida que vai de julho a dezembro, com precipitação em torno de 300 mm um período chuvoso bem acentuado que perdura nos meses de janeiro a junho, com precipitação de 2.350 mm (Moraes et al., 2005).

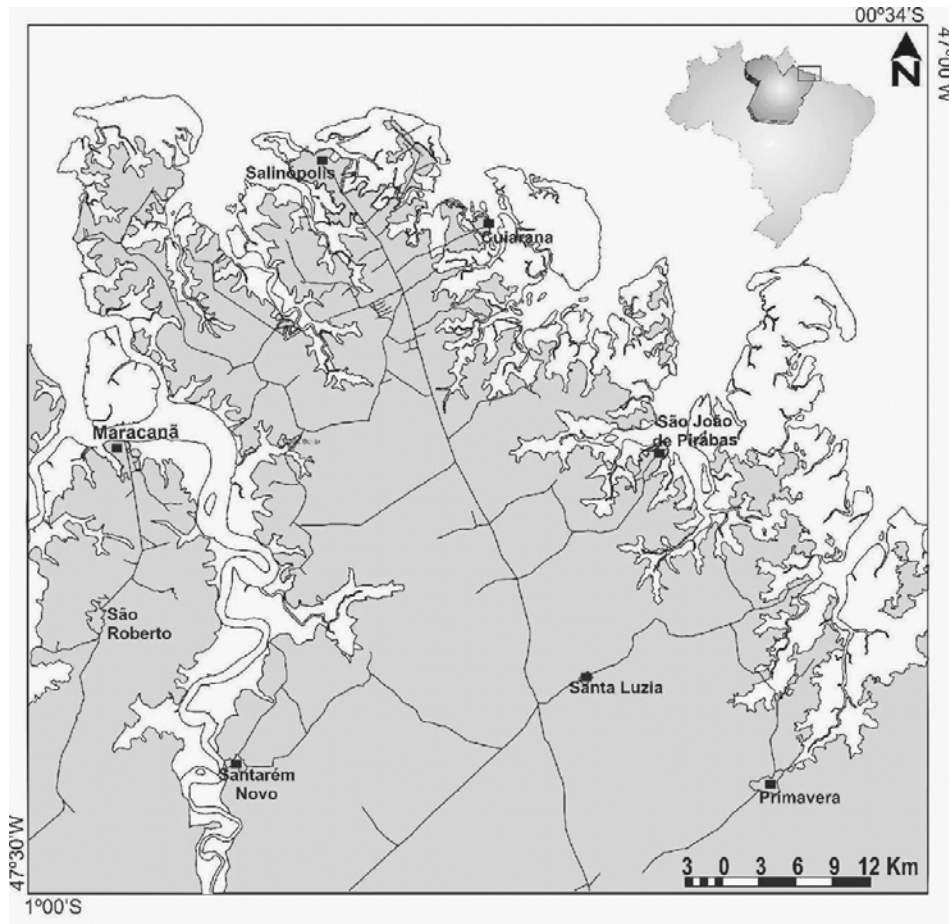


Figura 1 – Localização da área de estudo.

A cobertura vegetal presente na área de estudo está intimamente relacionada às feições morfológicas e ambientes posicionais, sendo estas classificadas por Silva (1996) como: vegetação de praias e dunas, que fixam os sedimentos arenosos das praias e dunas, sendo rasteira nas zonas de berma, arbustiva a arbórea nos campos de dunas (móveis e paleodunas), e de brejo herbáceo que caracteriza as zonas de interdunas; vegetação de mangue, que é coberta por árvores pneumatóforas com raízes aéreas de ambiente salino e salobro; e vegetação de lagos, composta por ciperáceas e vegetação flutuante.

METODOLOGIA

Os materiais utilizados neste trabalho incluem imagens Landsat ETM+7, dados de elevação da missão SRTM, mapas planialtimétricos (Pereira, 1995) e mapas temáticos (Silva, 1996; Silva Jr. & El-Robrini, 2001) além de ortofotos digitais obtidas por um levantamento aerofotogramétrico na região Salinópolis/Atalaia. Detalhes destes dados espaciais são apresentados na Tabela 1.

Processamento digital das imagens Landsat ETM+7

As imagens ETM+7 foram corrigidas radiometricamente a partir da redução dos efeitos da atmosfera utilizando o algoritmo ATCOR do programa PCI Geomatica 9.1. A correção geométrica das imagens ETM foi dispensada, pois foram adquiridas em formato Geocover, cujo processamento de ortoretificação já havia sido realizado. Tal metodologia permitiu a correção dos erros de deslocamento do terreno e da geometria da imagem com elevada precisão, pois tomou como referência dados de Modelo Digital de Elevação do SRTM com resolução de 30m (Tucker et al., 2004).

As técnicas de realce digital da imagem envolveram fusão entre bandas multiespectrais e pancromática, escolha de composição colorida utilizando o fator de índice ótimo (OIF – optimum index factor, Chavez Jr. et al., 1982), e realce linear.

A fusão da banda pancromática (15 m de resolução) com as bandas multiespectrais (30 m de resolução) do Landsat-7, foi realizada via transformação IHS-RGB (Harris et al., 1994). A partir do

Tabela 1 – Características dos dados espaciais.

Imagem Landsat ETM+7	Data de aquisição: 3 agosto 2001 Bandas: 1,2,3,4,5 e 7 (multiespectrais), 8 (pancromática) Ângulo de incidência (km): 185 × 185 Resolução espacial: 30m-multi; 15m-pan
Produto SRTM – DEM	Resolução espacial: 90 × 90m Datum Vertical: WGS 84 Grid (lat × long): 3 × 3 arc segundo Acurácia horizontal: absoluta < 60 m, relativa < 45 m Acurácia vertical: absoluta < 16 m, relativa < 10 m Formato de imagens: 16 bits

cálculo do OIF (Tab. 2) foram selecionadas as bandas 4, 5 e 3, na composição RGB. A princípio foi realizada a transformação para o espaço de cores IHS, cujos canais resultantes são relativos à intensidade, matiz e saturação das três bandas originais; seguidas da reversão da imagem para espaço RGB onde o canal Intensidade (I) foi substituído pela banda Pancromática. Esse procedimento possibilitou obter em uma única imagem, a melhor resolução espacial da banda Pancromática (15 m) com a maior informação espectral das bandas multiespectrais. Posteriormente foi aplicado um realce linear nas bandas fundidas.

Tabela 2 – Cálculo do OIF das combinações possíveis.

Combinação de bandas	OIF*	Combinação de bandas	OIF*
3,4,5=	50,96	1,2,5=	39,41
1,4,5=	48,27	2,3,5=	37,88
2,4,5=	46,36	1,5,7=	36,76
1,3,4=	45,88	4,5,7=	35,50
2,3,4=	43,11	3,5,7=	34,73
1,2,4=	42,44	2,5,7=	34,15
3,4,7=	42,39	2,3,7=	27,67
1,4,7=	42,21	1,3,7=	30,58
1,3,5=	40,96	1,2,7=	30,52
2,4,7=	39,84	1,2,3=	26,34

* Fórmula usada no cálculo do OIF: $\text{Desvio Padrão } (x) + \text{Desvio Padrão } (y) + \text{Desvio Padrão } (z) / \text{Correlação } (x,y) + \text{Correlação } (x,z) + \text{Correlação } (y,z)$.

Para a classificação visual dos ambientes adotou-se os procedimentos propostos por Van Zuidam & Verstappen (1991), que leva em conta o padrão, textura, tons, cores e arranjos espaciais nas imagens digitais. Assim, uma análise detalhada foi feita integrando propriedades físico-químicas dos alvos que puderam ser observadas nas imagens, com as características geomorfológicas, elementos geométricos e características sedimentares dos ambientes costeiros.

Processamento digital das imagens SRTM

Inicialmente, as imagens SRTM 16 bits foram tratadas para retirar dados de elevação ruidosos sobre os corpos d'água através da geração de uma máscara mar (Fig. 2A) no *software* PCI Geomatica 9.0. Em seguida foi gerada uma palheta com a finalidade de obter melhor percepção de profundidade (Toutin, 1995) pela qual foi possível criar uma escala de cores representando as suas respectivas altimetrias. A paleta de cores selecionada foi a *Chroma-Depth* do *software* Surfer 8 (Fig. 2B), a qual permitiu uma boa percepção dos níveis de altitude em toda a área, os quais variam de 0 a 64 m, vale ressaltar que a altitude demonstrada nos perfis topográficos corresponde à altura da copa das árvores nas regiões de manguezal e da superfície do terreno nos ambientes não vegetados. Por fim, foi gerada a imagem de relevo sombreado (Fig. 2C) foi através da manipulação do ângulo azimute da iluminação solar e sua elevação, simulando diferentes ângulos de visada.

Trabalho de campo

Os trabalhos de campo tiveram como objetivo coletar pontos de controle no campo através do GPS (*Global Positioning System*) GARMIN, modelo e-trex e DGPS (*Differential Global Positioning System*), de acurácia subcentimétrica – ASHTECH Precision Products modelo Z-Xtreme para validação dos diversos ambientes costeiros previamente mapeados no mapa base. Os pontos obtidos com GPS foram plotados na Imagem de referência (Landsat ETM, composição 4R5G3B), utilizando o programa *GPS Track-Maker*, no qual foi possível gerar trilhas que demonstram todo caminho percorrido durante a validação de campo.

Geração de cartas de Índice de Sensibilidade Ambiental ao derramamento de óleo

A metodologia proposta pela NOAA (2002) é empregada com sucesso no mapeamento da sensibilidade ambiental a derrama-

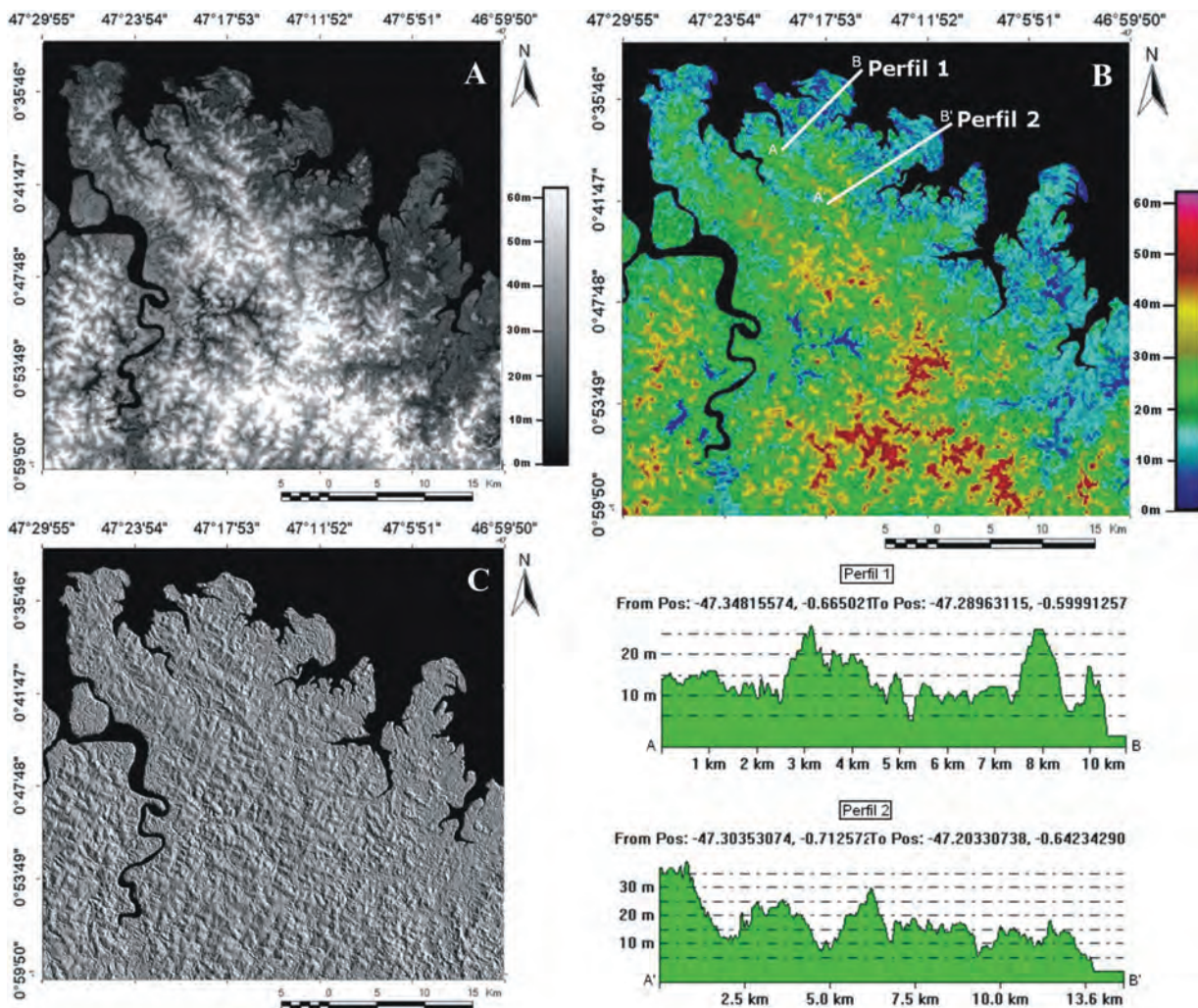


Figura 2 – Processamento digital dos dados SRTM. (A) Imagem SRTM com máscara mar; (B) Palheta de cores e perfis topográficos; (C) Relevo sombreado.

mento de óleo no mundo. Entretanto, as complexidades e peculiaridades da região amazônica, quanto à dinâmica dos processos ambientais envolvidos (sedimentares, geomorfológicos, oceanográficos e biológicos), fez com que fosse utilizada uma abordagem específica para a região, que considerou suas particularidades. Souza Filho et al. (2004) propuseram uma classificação de ISA para a zona costeira amazônica, a qual será utilizada neste trabalho.

RESULTADOS

Reconhecimento e mapeamento dos ambientes deposicionais costeiros

Foram reconhecidas quatro unidades geomorfológicas:

- i) Planalto Costeiro, onde predominam cotas médias abaixo de 50 m;

- ii) Planície aluvial que ocorre no domínio fluvial do estuário, onde os processos fluviais predominam sobre os costeiros;
- iii) Planície de maré, fortemente influenciada pelos processos estuarinos dominados por macromaré semidiurnas;
- iv) Planície litorânea, que ocorre ao longo do litoral, estando influenciada principalmente por processos eólicos e ondas.

Vale ressaltar que a planície estuarina não foi objeto de investigação deste trabalho. A compartimentação das unidades morfológicas pode ser observada na Tabela 3.

O reconhecimento dos ambientes costeiros foi possível através da interpretação visual das imagens Landsat ETM+7, na composição colorida 4R5G3B, bem como a altitude dos respectivos

Tabela 3 – Compartimentação das unidades geomorfológicas e as características gerais dos ambientes deposicionais costeiros.

Unidade geomorfológica	Características geomorfológicas gerais
Planalto Costeiro	Composto pelo Grupo Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras, correspondente ao embasamento da Planície Costeira.
Colinas e tabuleiros	Relevo ondulado e por vezes planos com altitudes de até 64 m.
Planícies aluvial	Depósitos holocênicos influenciados por processos fluviais.
Planície de inundação vegetada – Várzea	Planície lamosa encontrada na margem dos rios, coberta por vegetação.
Planícies estuarinas e de Maré	Depósitos holocênicos influenciados diretamente pelas correntes e marés.
Planície de intermaré lamosa – Manguezal	Planície lamosa, densamente vegetada por mangue, que sofre a influência de marés, e processos estuarinos.
Planície de supramaré	Superfície areno-argilosa resultante da dissipação de dunas e erosão de falésias, com sedimentos retrabalhados e acumulados apenas durante as marés de sizígia.
Pântano salino	Depósitos areno-argilosos hipersalinos, localizados na zona de supramaré.
Barras arenosas	Barras arenosas longitudinais desenvolvidas na foz dos canais de maré e de baías.
Planície litorânea	Depósitos holocênicos que sofrem influência de ondas, ventos e marés.
Antigas cristas de praia	Corpos arenosos alongados isolados pelos processos litorâneos e que repousam sobre depósitos lamosos de manguezais.
Dunas vegetadas	Campos de dunas que foram totalmente descaracterizados e vegetados.
Dunas costeiras atuais	Dunas fixas e móveis paralelas à linha de costa.
Interdunas	Dunas fixas e móveis entre lagos.
Praias de macromaré	Estão localizadas na zona de maior energia do litoral desde o nível de baixa-mar até a linha máxima de alcance das marés (base dos campos de dunas e falésias ativas).
Lagos	Corpos hídricos associados aos campos de dunas atuais e paleodunas, estando limitados pelas mesmas.

ambientes observada nos dados de elevação do SRTM. Estas interpretações encontram-se descritas na Tabela 4. Os ambientes reconhecidos previamente foram validados no campo, e comparados com as respectivas respostas espectrais como mostra a Figura 3. O mapa resultante desta análise é mostrado na Figura 4 que ilustra a distribuição espacial das unidades geomorfológicas da área de estudo.

Geração das cartas de ISA ao derramamento de óleo

De posse dos produtos gerados pelo processamento digital de imagens, informações de campo, e interpretação dos dados, foi possível gerar o mapa de índice de sensibilidade ambiental (ISA) ao derramamento de óleo na área estudada (Fig. 5) de acordo com a proposta de Souza Filho et al. (2004), adaptada da NOAA (2002).

A partir do mapa dos ambientes costeiros, foram identificados nove índices de sensibilidade ambiental (ISA) ao derramamento de óleo na área estudada (Tab. 5 e Fig. 6), descritos a seguir.

ISA 1B: muro de arrimo

- *Características:* estruturas sólidas expostas construídas pelo homem; paredão artificial com superfície lisa, declividade alta a média, construído com concreto ou madeira; exposição freqüente a ondas e/ou a fortes correntes de maré; tendência refletiva; substrato impermeável e sem rugosidades; declividade superior a 30 graus; foram construídos com o objetivo de proteger áreas contra erosão pela ação de ondas e marés, ocorrem principalmente em áreas residenciais, turísticas e industriais.
- *Comportamento do óleo:* não há penetração e nem permanência do óleo.
- *Ações de resposta:* a remoção do óleo tende a ser naturalmente e de maneira rápida.

ISA 3A: praias com granulometria fina a média

- *Características:* praias de areia fina, com face de baixa declividade (zona intermarés larga); reflexão baixa das

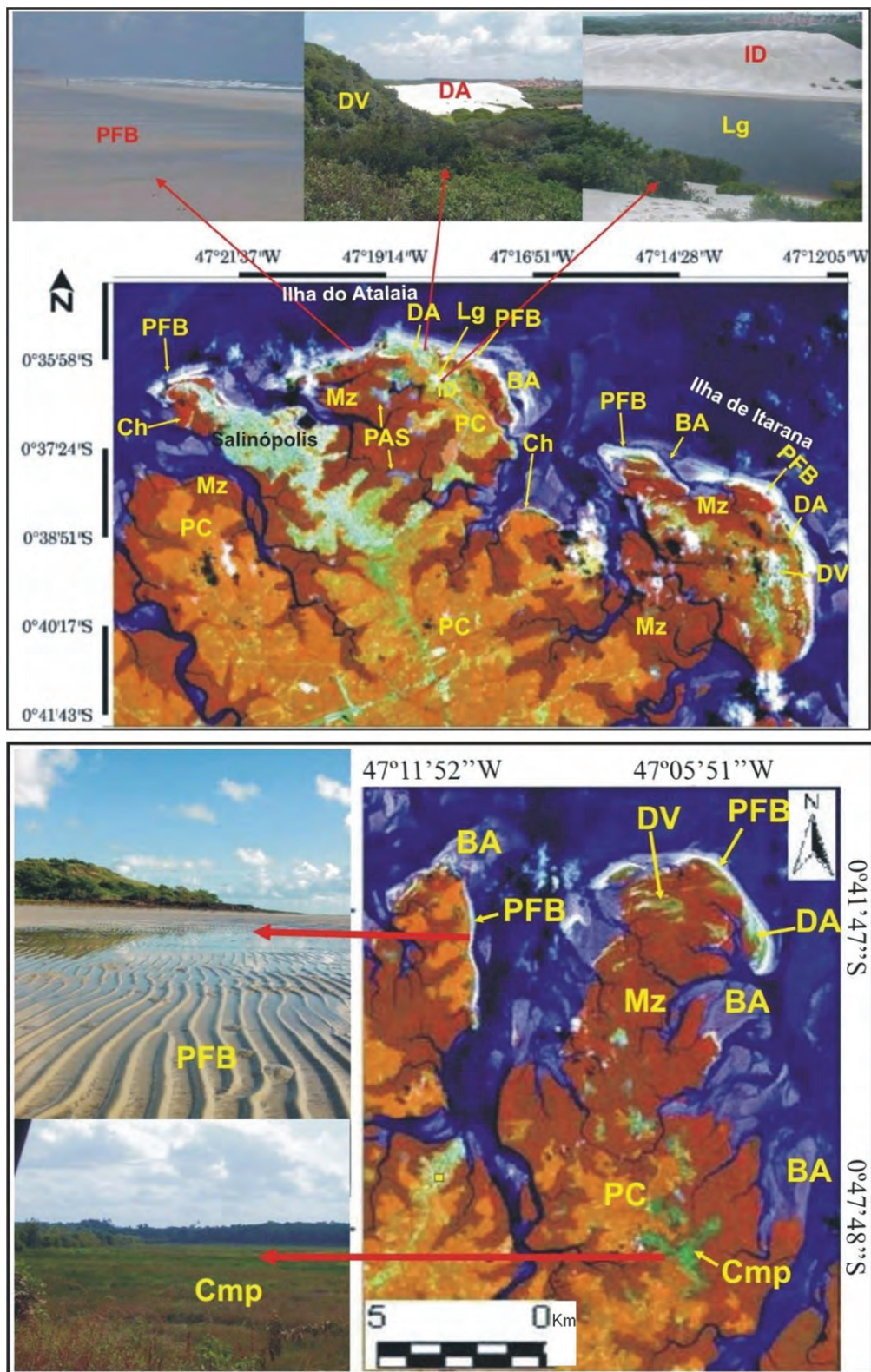


Figura 3 – Produto da fusão das bandas multiespectrais 453 com a banda pancromática. Composição colorida 4R5G3B, mostrando no detalhe fotos dos diversos ambientes mapeados e suas respectivas respostas na imagem. (PFB = Praias de macromaré; DV = Dunas vegetadas; DA = Dunas atuais; Lg = Lagos; ID = Interdunas; Mz = Manguezal; Ch = cristas de praia; PC = Planalto costeiro; PAS = Planície arenosa de supramaré; BA = Barras arenosas).

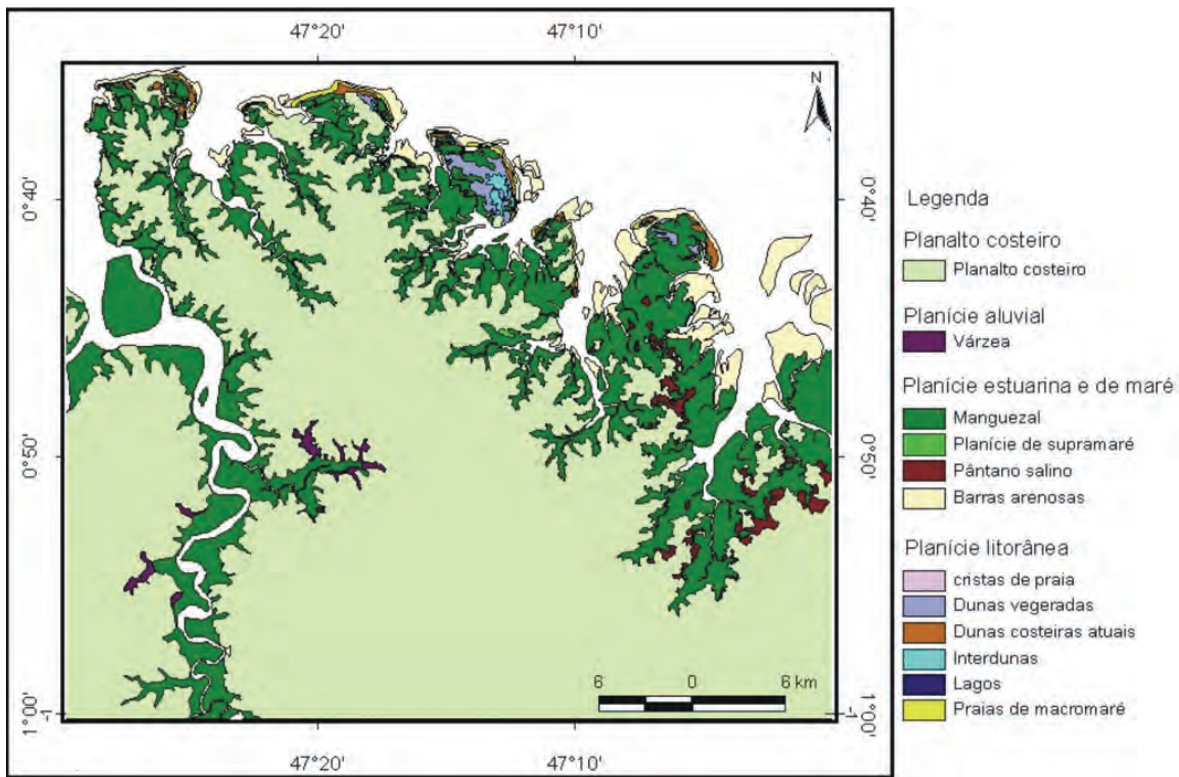


Figura 4 – Mapa dos ambientes deposicionais costeiros da área de estudo.

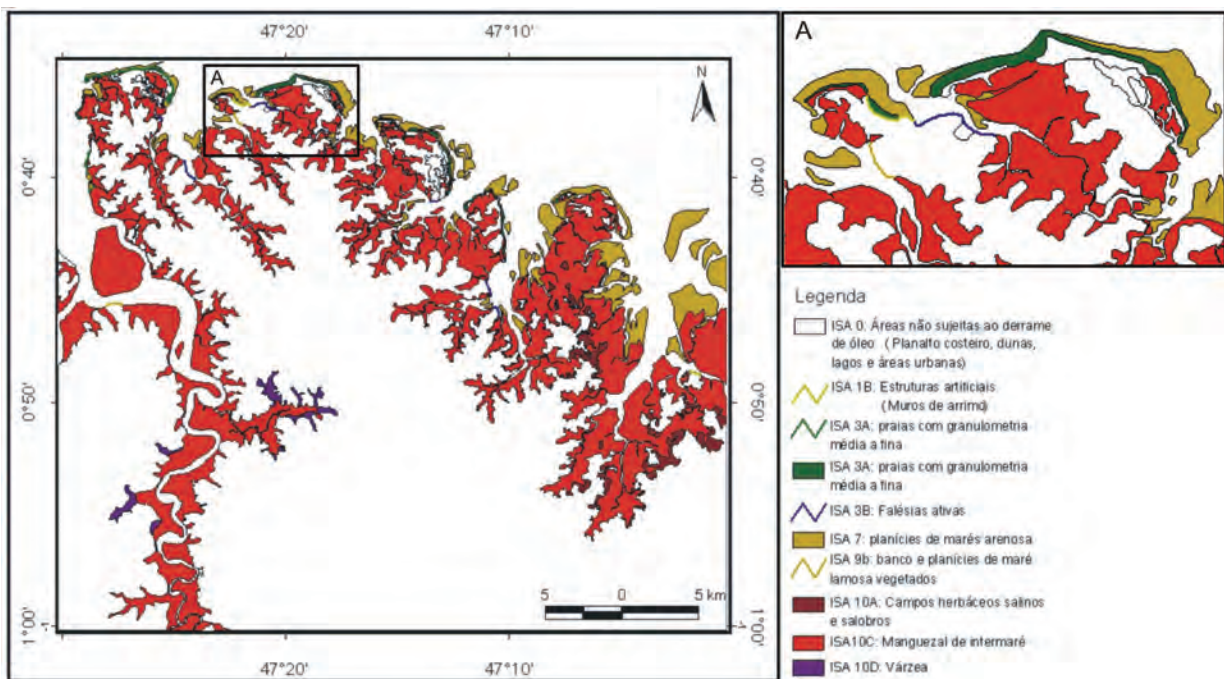


Figura 5 – Mapa dos índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo na área de estudo.

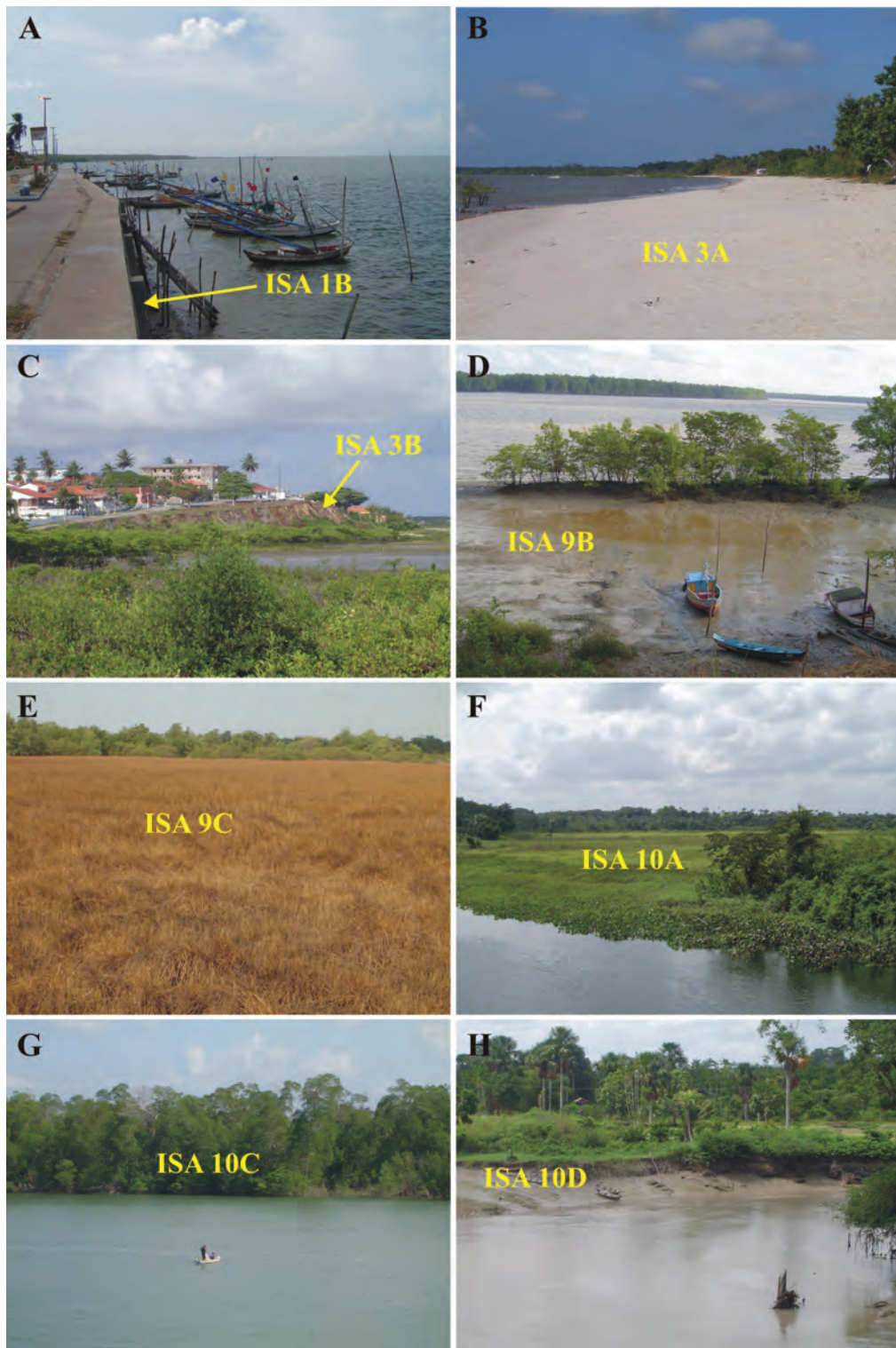


Figura 6 – ISA mapeados e seus respectivos ambientes costeiros: (a) ISA 1B: muro de arrimo, orla da localidade de Boa Vista; (b) ISA 3A: praias com granulometria fina a média, praia Penha da Marieta; (c) ISA 3B: escarpas expostas com declives íngremes em areia, falésia ativa na orla de Salinópolis; (d) ISA 9B: bancos e planícies de marés lamosas vegetadas, banco de lama na orla de Maracanã; (e) ISA 9C: campos herbáceos hipersalinos; (f) ISA 10A: campos herbáceos salinos e salobros; (g) ISA 10C: manguezal; (h) ISA 10D: várzea.

Tabela 4 – Unidades morfológicas com suas respectivas respostas espectrais na imagem ETM+7 e altitude média detectada no modelo digital de elevação do SRTM.

Unidade geomorfológica	Cor na Composição Colorida 3R 4G 5B	Elevação SRTM (m)
Tabuleiro costeiro	Laranja avermelhado, devido à alta reflectância da vegetação juntamente com o solo, nas bandas 4 (canal vermelho) e 5 (canal verde) respectivamente.	30-50 m
Manguezal	Marrom avermelhada, em resposta à alta reflectância na banda 4 resultando em uma cor marrom avermelhada como resposta da interação da radiação com a densa floresta de manguezais.	0-5 m
Planície arenosa de supramaré	Roxo esverdeado, com média ou pouca reflectância nas três bandas, em resposta à presença de sedimentos arenosos úmidos com pouca vegetação, ocorrem bordejando o planalto costeiro em quase toda a sua extensão sempre de maneira descontínua.	5-15 m
Campo	Verde claro, em resposta ao comportamento espectral da vegetação rasteira juntamente com os sedimentos lamosos. Ocorrem somente na porção leste da área estudada.	5-8 m
Antigas cristas de praia	Verde azulado claro, em resposta espectral da areia fina coberta por vegetação espalhada que expõe o solo (areia), resultando em uma alta reflectância nas bandas 3 e 5.	10-20 m
Paleodunas	Verde clara, resultante de uma alta reflectância na banda 5 causada pela presença de depósitos arenosos bem selecionados secos e brancos encontrados nestas dunas com vegetação.	5-20 m
Dunas costeiras atuais	Verde clara, devido à resposta espectral alta na banda 5, causada pela presença de depósitos arenosos bem selecionados secos e brancos encontrados nas dunas.	até 25 m
Praias de macromaré	Branco, devido à resposta espectral alta nas três bandas, em consequência da presença de depósitos arenosos bem selecionados secos e brancos encontrados nas praias.	até 5 m
Lagos	Cinza escuro, possui pouca reflectância na banda 3 e nenhuma nas bandas 4 e 5, em resposta à presença de água que absorve praticamente toda a radiação.	5-10 m
Várzea	Marrom esverdeada, semelhante à resposta espectral apresentada pelos manguezais, estes dois ambientes foram diferenciados pela sua distribuição espacial margeando os grandes rios.	0-5 m
Barras arenosas	Azul claro, devido à resposta espectral alta nas bandas 3 e 4, causada pela presença de depósitos arenosos úmidos bem selecionados e brancos, encontrados na foz dos canais de maré e de baías.	0 m

ondas; sedimentos bem selecionados e geralmente compactos (fundo duro) moderadamente permeáveis; sedimentos superficiais sujeitos à remobilização freqüente por ação das ondas; região de uso recreacional e com intensa atividade socioeconômica, incluindo pesca.

- *Comportamento do óleo:* penetração do óleo inferior a 10 cm; possibilidade de soterramento do óleo em praias expostas, após a fase erosiva das tempestades.

- *Ações de resposta:* geralmente a limpeza do óleo é necessária.

ISA 3B: escarpas expostas com declives íngremes em areia

- *Características:* substratos semipermeáveis com pequena penetração de petróleo; formam escarpas ao longo dos cursos fluviais e falésias ao longo das praias estuarinas

Tabela 5 – Índices de sensibilidade ambiental mapeados na área de estudo e seus respectivos ambientes costeiros.

Índice de sensibilidade ambiental (ISA)	Ambiente costeiro
ISA 1B	Muro de arrimo
ISA 3A	Praias com granulometria fina a média
ISA 3B	Escarpas expostas com declives íngremes em areia
ISA 7	Planícies de maré arenosa
ISA 9B	Bancos e planícies de marés lamosas vegetados
ISA 9C	Campos herbáceos hipersalinos
ISA 10A	Campos herbáceos salinos e salobros
ISA 10C	Manguezal
ISA 10D	Várzea

a partir da ação das ondas (Grupo Barreiras); reflexão média das ondas e marés, com sedimentos bem selecionados e geralmente compactos, sedimentos sujeitos a remobilização freqüente por ação das ondas e marés; no caso de escarpas íngremes expostas do Grupo Barreiras, a ação das correntes de maré e ondas, durante os períodos de maré alta, atinge a base da barreira, erodindo sua porção inferior, enquanto as porções superiores são desgastadas pela água da chuva e outras descargas que se infiltram no terreno. Como resultado desta ação conjugada, a escarpa é erodida e recua.

- *Comportamento do óleo*: penetração do óleo geralmente menor que 10 cm; mínima possibilidade de soterramento do óleo devido à lenta mobilidade da massa sedimentar; a possibilidade existe, porém, em praias expostas, após a fase erosiva das tempestades.
- *Ações de resposta*: geralmente a limpeza é necessária, sendo comumente possível o tráfego de veículos, respeitando o ciclo de marés e as eventuais restrições ambientais locais. No caso dos sedimentos Barreiras, o óleo pode se entranhar no material desmoronado, acumulado na base da escarpa, tornando a limpeza necessária na faixa da preamar.

ISA 7: planícies de maré arenosa

- *Características*: Planícies de marés expostas (barras arenosas longitudinais desenvolvidas, principalmente na foz dos canais de maré e de baías, corpos alongados parale-

los à linha de costa). Superfície de baixa declividade totalmente exposta durante a baixa-mar e submersa na preamar.

- *Comportamento do óleo*: Penetração do óleo muito reduzida, e tende a ser transportado para a zona de alcance máximo da preamar ou levado ao longo da costa pelas correntes de maré.
- *Ações de resposta*: A limpeza é difícil devido à baixa trafegabilidade e à tendência de transferir o óleo para camadas mais profundas de sedimento através do pisoteio ou outras ações de resposta. O impacto na biota pode ser alto devido à exposição tóxica.

ISA 9B: bancos e planícies de marés lamosas vegetados (mud flats)

- *Características*: abrigado da ação das ondas; substrato sub-horizontal lamoso (declividade <3 graus); sedimento saturado com água, com baixa permeabilidade; sedimentos moles de baixíssima trafegabilidade; largura variando de poucos metros a extensão da ordem de quilômetros.
- *Comportamento do óleo*: penetração do óleo limitada pelos sedimentos saturados de água, sendo que o óleo é geralmente transportado até a linha de maré alta, podendo ocorrer penetração junto à linha de preamar.
- *Ações de resposta*: a remoção natural ocorre de forma extremamente lenta; a limpeza se torna quase impossível devido à dificuldade de locomoção no substrato mole

e à dificuldade de acesso, sendo que qualquer esforço nesse sentido tende a introduzir o óleo nas camadas mais profundas.

ISA 9C: campos herbáceos hipersalinos

- *Características:* estão situados na zona de intermaré superior, ambiente de baixa energia; representam a zona de transição entre o planalto costeiro e o sistema de manguezais. Substrato plano, lamoso a arenoso com baixa permeabilidade; sofrem influência somente das marés somente durante os períodos de marés de sizígias; ambiente protegido da ação das ondas.
- *Comportamento do óleo:* penetração do óleo limitada pelos sedimentos saturados em água; possibilidade de cobertura direta da vegetação pelo óleo nas zonas de supramarés.
- *Ações de resposta:* remoção natural de forma extremamente lenta devido aos baixos níveis de energia e biodegradação (condição anaeróbica do substrato); o substrato mole e a dificuldade de acesso tornam a limpeza impraticável.

ISA 10A: campos herbáceos salinos e salobros (*salt and brackish water marshes*)

- *Características:* estão situados na zona de intermaré superior, ambiente de baixa energia; representam a zona de transição entre o planalto costeiro e o sistema de manguezais. Substrato plano, lamoso a arenoso com baixa permeabilidade; sofrem influência somente das marés somente durante os períodos de marés de sizígias; ambiente protegido da ação das ondas.
- *Comportamento do óleo:* penetração do óleo limitada pelos sedimentos saturados em água; possibilidade de cobertura direta da vegetação pelo óleo nas zonas de supramarés.
- *Ações de resposta:* remoção natural de forma extremamente lenta devido aos baixos níveis de energia e biodegradação (condição anaeróbica do substrato); o substrato mole e a dificuldade de acesso tornam a limpeza impraticável.

ISA 10C: manguezal

- *Características:* zona salobra ou de água salgada, com

vegetação adaptada ao meio salobro ou salino; ambiente formado em planícies de maré, sendo caracterizado por uma zona com baixa declividade, sujeita a níveis de energia mais baixos; sedimentos lamosos formando solos muito orgânicos; manguezais frontais e manguezais de estuários; região com grande importância ecológica dada pela presença de recursos biológicos como plantas e animais sensíveis ao óleo, como por exemplo, leitões de mexilhões, caranguejos e comunidades de plantas; região com grande importância econômica em função de atividades de extração de caranguejos pela comunidade local.

- *Comportamento do óleo:* penetração do óleo muito limitada graças à presença dos sedimentos lamosos com baixa permeabilidade e saturados de água, porém a penetração do óleo pode ocorrer por entre as escavações feitas pelos organismos que habitam nos manguezais; constituem um dos habitat mais sensíveis devido à elevada riqueza e valor biológico, e funcionam como verdadeiras armadilhas de retenção de óleo, ou seja, o tempo de permanência do óleo é prolongado em função da menor ação de limpeza natural e manual.
- *Ações de resposta:* em substratos lamosos mesmo que vegetados, como é o caso dos manguezais, o uso de equipamentos de limpeza ou proteção não é recomendado, devido à baixa consistência do substrato, sendo que a limpeza deve ser feita apenas manualmente; o substrato mole e a dificuldade de acesso tornam a limpeza manual impraticável, pois o esforço nesse sentido tende a introduzir o óleo nas camadas mais profundas, agravando o dano.

ISA 10D: várzea

- *Características:* terraços alagadiços formados nas margens dos rios; formado em planícies aluviais ou estuarina, sendo caracterizado por uma zona com baixa declividade, sujeita a níveis de energia mais baixos; possui ampla superfície de inundação, que permite o estabelecimento de rica comunidade biológica; substrato plano, arenoso a lamoso, com sedimentos saturados em água, com baixa permeabilidade, e de baixa mobilidade.
- *Comportamento do óleo:* a penetração de óleo é limitada, com possibilidade de cobertura direta da vegetação pelo óleo na zona intermarés, podendo sufocar os sistemas de raízes, o impacto na biota pode ser alto devido à exposição tóxica ou asfixia.

- *Ações de resposta*: a remoção natural ocorre de forma extremamente lenta, devido aos baixos níveis de energia; as dificuldades de acesso devido à grande densidade e diversidade de vegetação tornam a limpeza mecanizada muito difícil. Assim, de maneira geral, não é possível a utilização de equipamentos de limpeza, admitindo-se apenas limpeza manual.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de dados de sensores remotos orbitais de moderada resolução como as do Landsat ETM+7 permite a produção de Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Carta SAO), e em escala tática, com maior rapidez, acurácia e menor custo. A visão sinóptica obtida com esses sensores propicia o melhor entendimento dos processos atuantes nos ambientes costeiros tropicais amazônicos, bem como suas interrelações. Ademais, para o monitoramento dos processos costeiros e o entendimento de suas rápidas variações, é necessária a obtenção de dados com elevada resolução temporal, ou seja, alta frequência e repetitividade de aquisição. Tais dados de sensores remotos orbitais são uma excelente alternativa para essa finalidade.

O monitoramento ambiental e o gerenciamento de atividades econômicas e sociais de zonas costeiras são iniciativas importantes no sentido de prevenir e minimizar impactos ambientais gerados por modificações antrópicas e acidentes, como derramamento de óleo na costa.

A elaboração de mapas de índices de sensibilidade ambiental é uma ferramenta importante que pode auxiliar em projetos de estratégias de prevenção e controle de acidentes, durante as atividades de produção e transporte de óleo, usadas pelas companhias de petróleo. Esta se tornou a melhor estratégia de prevenção, pois evita o custo elevado das operações de atividades de limpeza, pagamento de indenizações e a restauração dos ambientes impactados por um evento de derramamento de óleo.

O conhecimento dos parâmetros ambientais que controlam a dinâmica dos ambientes costeiros amazônicos são informações de extrema importância para o entendimento das modificações costeiras nesta região. Uma situação ímpar na região amazônica é o domínio das macromarés que influencia diretamente nas grandes extensões das áreas inundáveis, que correspondem às áreas vulneráveis à contaminação no caso de um derramamento de óleo. Assim, este parâmetro é de vital importância para a classificação dos índices de sensibilidade ambiental, que considera os ambientes localizados no intervalo entre as marés.

A utilização dos dados de sensores remotos orbitais propi-

ciou a elaboração de mapas de distribuição espacial dos ambientes costeiros e do mapa de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, que poderão ser usados em situações emergenciais e planos de contingência para a proteção de ambientes sensíveis aos danos gerados por um evento de derramamento de óleo.

Os produtos deste trabalho poderão ser de grande importância para os tomadores de decisão na hora de definir áreas prioritárias para conservação. Para isso se faz necessário que se leve em conta que as áreas de alta sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo, são as áreas mais importantes para as populações que vivem na zona costeira, pois estes ambientes apresentam importância econômica, ecológica e social para as comunidades da região, em função das atividades extrativistas e de subsistência das populações ribeirinhas.

Portanto a utilização das tecnologias de sensoriamento remoto e SIG têm se revelado uma combinação poderosa para a identificação da geomorfologia da área e conseqüentemente, na elaboração de Cartas SAO, confirmando que esta é uma importante aplicação do sensoriamento remoto no estudo de zonas costeiras, principalmente em áreas de difícil acesso ou com base cartográfica desatualizada ou inexistente, comum na Amazônia.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa – FADESP pela concessão de bolsa de mestrado e ao programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA pela oportunidade de desenvolvimento do mestrado. À Petrobras S.A. pelo suporte financeiro ao projeto PIATAM Mar (Potenciais impactos ambientais ao transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica) que possibilitou o desenvolvimento dos trabalhos de campo e aquisição da infra-estrutura necessária.

REFERÊNCIAS

- ARAI M, UESUGUI N, ROSSETTI DF & GÓES AM. 1988. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do estado do Pará. In: Congr. Bras. Geol., 35: 1988, Belém, Anais... Belém, SBG, 2: 738–752.
- ARAI M, TRUCKENBRODT W, NOGUEIRA ACR, GÓES AM & ROSSETTI DF. 1994. Novos dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4: 1994, Belém. Anais... Belém: SBG-Núcleo Norte. p. 185–187.
- BOULHOSA MBM, SOUZA FILHO PWM & GONÇALVES F. 2005. Uso de Imagens SRTM e Landsat ETM+7 para o mapeamento geomorfológico dos ambientes costeiros do nordeste do Pará. In: Simp. Bras. de Sens. Rem. 12.: 2005, Goiânia. Anais... INPE: p. 1745–1747.

- CARVALHO M. 2003. Mapeamento da sensibilidade ambiental ao impacto por óleo de um segmento da costa entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará Utilizando imagens ETM+/LANDSAT-7 e geoprocessamento. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 186 p. (Dissertação de mestrado).
- CARVALHO M & GHERARDI DFM. 2003. Uso de transformação HIS e classificação não supervisionada por regiões para o mapeamento de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo. In: Simp. Bras. de Sens. Rem. 11: 2003, Belo Horizonte. Anais... INPE: p. 1515–1523.
- CASTRO AFC, AMARO VE & VITAL H. 2003. Desenvolvimento de um banco de dados geográficos em um ambiente de SIG e sua aplicação na elaboração de mapas de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo em áreas costeiras do estado do Rio Grande do Norte. In: Simp. Bras. de Sens. Rem. 11: 2003, Belo Horizonte. Anais... INPE: p. 1533–1540.
- CHAVEZ JR. PS, BERLIN GL & SOWERS LB. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8: 23–31.
- GÓES AM, ROSSETTI DF, NOGUEIRA ACR & TOLEDO PM. 1990. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra, Belém*, 2: 3–15.
- GONÇALVES FD. 2005. Utilização de Dados de Sensores Remotos para o Mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamento de Óleo na Baía de Guajará. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 161 p. (Dissertação de Mestrado).
- GONÇALVES FD & SOUZA FILHO PWM. 2005. Integração digital de Imagens Radarsat-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de Sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará (Belém-PA). In: Simp. Bras. Sens. Rem. 12: 2005, Goiânia, Anais... INPE: p. 1789–1796.
- GONÇALVES FD, SOUZA FILHO PWM, MIRANDA FP & PARADELLA WR. 2006. Técnicas automáticas para geração de mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na baía de Guajará, Belém-PA. *Revista Brasileira de Cartografia*, 58(3): 255–262.
- HARRIS JR, BOWIE C, RENCZ AN & GRAHAM D. 1994. Computer-Enhancement Techniques for the Integration of Remotely Sensed, Geophysical, and Thematic Data for the Geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20(3): 210–221.
- MORAES BC, COSTA JMN, COSTA ACL & COSTA MH. 2005. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazônica*, 35: 207–214.
- NOAA, 2002. PETERSEN J, MICHEL J, ZENGEL S, WHITE M, LORD C & PLANK C. 2002. Environmental sensitivity index guidelines, NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. Version 3.0. Seattle. NOAA Technical Memorandum NOS OR&A 11, 89 p.
- PCI GEOMATICS. 2004. *Geomatica: User Manual*. PCI Geomatics, Version 9.1. Canada. 352 pp.
- PEREIRA SWM. 1995. Mapeamento plani-altimétrico e morfo-topográfico da microrregião do Salgado Paraense a partir de procedimentos fotogramétricos. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 126 p. (Dissertação de Mestrado).
- PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.). 2002. *Manual Básico para Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo no Sistema Petrobras: Ambientes Costeiros e estuarinos*. Rio de Janeiro, 134 p.
- SÁ JHS. 1969. Contribuição à Geologia e os sedimentos Terciários e Quaternários da Região Bragantina. *Bol. Inst. Geol.*, 3: 21–36.
- SANTOS VF. 1996. Estratigrafia holocênica e morfodinâmica atual da planície costeira da ilha de Algodual e Marudá. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 139 p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA MS. 1996. Morfoestratigrafia e evolução holocênica da Planície Costeira de Salinópolis, Nordeste do Estado do Pará. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 142 p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA JR. OG. 1998. Morfoestratigrafia da Planície Costeira do Município de São João de Pirabas (Porção NW) – NE do Estado do Pará. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 88 p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA JR. OG & EL-ROBRINI M. 2001. Morfoestratigrafia do noroeste da planície costeira de São João de Pirabas (Nordeste do Pará). *Revista Brasileira de Oceanografia*, 49(1/2): 99–114.
- SILVA CA, SOUZA FILHO PWM & RODRIGUES SWP. 2009. Morphology and modern sedimentary deposits of the macrotidal Marapanim Estuary (Amazon, Brazil). *Continental Shelf Research*, 29(3): 619–631.
- SOUZA FILHO PWM. 1995. Influência das variações do nível do mar na morfoestratigrafia da Planície Costeira Bragantina (NE do Pará) durante o Holoceno. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 123p. (Dissertação de Mestrado).
- 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.
- SOUZA FILHO PWM & EL-ROBRINI M. 1996. Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfo-sedimentares da Planície Costeira Bragantina, Nordeste do Pará, Brasil. *Geonomos*, 4: 1–16.
- SOUZA FILHO PWM & EL-ROBRINI M. 2000. Geomorphology of the Bragança Coastal Zone, Northeastern Pará State. *Rev. Bras. Geoc.*, 30: 522–526.
- SOUZA FILHO PWM & PARADELLA WR. 2001. Estudo da Geomorfologia de Ambientes Costeiros Tropicais Úmidos a partir das imagens de sensores remotos. *Revista Pesquisas*, 28(2): 359–368.

- SOUZA FILHO PWM & PARADELLA WR. 2003. Use of Synthetic Aperture Radar for Recognition of coastal Geomorphological Features, Land-use Assessment and Shoreline Changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 75(3): 341–356.
- SOUZA FILHO PWM, MIRANDA FP, BEISL CH, ALMEIDA EF & GONÇALVES FD. 2004. Environmental sensitivity mapping for oil spill in the Amazon coast using remote sensing and GIS technology. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS 2004*, Anchorage, Alaska. *Proceedings...* Anchorage: IEEE Geoscience and Remote Sensing. CD-ROM.
- TOUTIN T. 1995. Multi-source data fusion with an integrated and unified geometric modelling. *EARSel Journal – Advances in Remote Sensing*, 4(2): 118–129.
- TUCKER CJ, GRANT DM & DYKSTRA JD. 2004. NASA's Global Orthorectified Landsat Data Set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3): 313–322.
- VAN ZUIDAM RA & VERSTAPPEN HT. 1991. The ITC system of Geomorphologic Survey, 89 p.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Messiana Beatriz Malato Boulhosa. Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Pará (2003), Mestre na área de Sensoriamento Remoto na Universidade Federal do Pará (2006). É professora do Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA desde 2008. Atualmente é bolsista do Programa de Capacitação Institucional, DTI, nível 7G, desenvolvendo pesquisa na área de geomorfologia e hidrodinâmica costeira.

Pedro Walfir Martins e Souza Filho. Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Pará (1993), especialista em geologia e geofísica marinha pela Universidade Federal Fluminense (1993), e doutorado na área de Sensoriamento Remoto Geológico na Universidade Federal do Pará (2000). É professor adjunto da Faculdade de Oceanografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará desde 2002. Atualmente coordena o Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido da UFPA, é Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq desde 2003 e foi indicado como Jovem Cientista da Academia Brasileira de Ciências em 2008.