



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DE IMAGENS LANDSAT ETM⁺, RADARSAT-1 E MODELOS
NUMÉRICOS DE TERRENO PARA O MAPEAMENTO DOS ÍNDICES DE
SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA
COSTA DE MANGUEZAIS DO NORDESTE DO PARÁ**

Dissertação apresentada por:

MESSIANA BEATRIZ MALATO BOULHOSA

**BELÉM
2006**



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**ANÁLISE DE IMAGENS LANDSAT ETM⁺, RADARSAT-1 E MODELOS
NUMÉRICOS DE TERRENO PARA O MAPEAMENTO DOS ÍNDICES DE
SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA
COSTA DE MANGUEZAIS DO NORDESTE DO PARÁ**

TESE APRESENTADA POR

MESSIANA BEATRIZ MALATO BOULHOSA

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de GEOLOGIA.

Data de Aprovação: / /

Comitê de Tese:

Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador)

Marcelo Cancela Lisboa Cohen

Venerando Eustáquio Amaro

Belém
2006

Ofereço aos meus pais Pedro Paulo e Cleide,
pelo apoio, entusiasmo e incentivo aos estudos.
Ao meu marido Osvaldo Boulhosa pela força e
compreensão durante minha ausência.
Ao meu irmão Rafael, pela confiança.
Dedico ao meu querido filho Matheus que sempre
foi minha maior fonte de inspiração e alegria
e a quem eu dedico toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

A colaboração de várias pessoas e instituições que foram de fundamental importância para a realização desta dissertação, aos quais expresso aqui com muita satisfação meus sinceros agradecimentos.

Agradeço primeiramente a Deus, que por sua misericórdia me concedeu essa oportunidade de progredir e iluminou meu caminho ao longo dessa jornada.

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA, pela oportunidade da realização do curso de mestrado.

Ao Projeto PIATAM-mar - Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica, pela concessão de bolsa de mestrado durante o período de 24 meses, pela concessão das imagens RADARSAT-1 e pelo financiamento do trabalho de campo.

À Petrobras S.A. pelo suporte financeiro ao projeto PIATAM mar e a todas as demais iniciativas decorrentes do mesmo.

Sou grata ao meu orientador Ao Profº Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho não apenas pela orientação, mas também pela compreensão, paciência, dedicação, apoio e amizade. MUITO OBRIGADA!

Aos Membros da Banca examinadora Dr. Marcelo Cancela Lisboa Cohen e Dr. Venerando Eustáquio Amaro, pelas valiosas sugestões.

À Geóloga e melhor amiga Paula Lima, pelo apoio e amizade em todos os momentos difíceis e pela ajuda nas análises granulométricas realizadas no Laboratório de Sedimentologia do PPGG.

Ao Laboratório de análises de imagens do trópico úmido – LAIT, coordenado pelo Profº Dr. Pedro Walfir, por disponibilizar toda infra-estrutura para a realização das atividades computacionais. A todos os amigos do LAIT com os quais convivi com harmonia e solidariedade, em especial a Fabrício, Francisco, Sheila, Helenice, Edimilson, Ana Valéria, Rosana, Suzan, Gabriela, Edson, Luiz Fernando, Paulo, Lourival, Elainy, Glenda e Karla. Gente VALEU!

A toda a minha família que sempre depositaram toda confiança em mim, em especial ao meu marido e à minha mãe, que sempre cuidaram muito bem do meu filho para então realizar minhas atividades com tranquilidade.

*“Feliz aquele que transfere o que sabe
e aprende o que ensina”*

Cora Carolina

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
EPIGRAFE.....	iii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	viii
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUÇÃO.....	5
1.1. A ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA E O SENSORIAMENTO REMOTO	5
1.2. OBJETIVO.....	8
1.2.1. Objetivos específicos.....	9
1.3. UM HISTÓRICO DOS DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NO MUNDO	9
1.4. IMPORTÂNCIA DA GERAÇÃO DE CARTAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL	11
1.5. TRAJETÓRIA DOS NAVIOS PETROLEIROS NA REGIÃO AMAZÔNICA	12
2. ÁREA DE ESTUDO	15
2.1. GEOLOGIA	15
2.2. GEOMORFOLOGIA COSTEIRA.....	16
2.3. VEGETAÇÃO	17
2.4. SOLOS	18
2.5. PARÂMETROS METEOROLÓGICOS E OCEANOGRÁFICOS	18
3. SENSORIAMENTO REMOTO E SIG APLICADOS A GERAÇÃO DE CARTAS DE ISA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO.....	22
3.1. IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE UM SAR.....	22
3.1.1. Características dos sistemas de Radar imageadores.....	24
3.1.2. Geometria de imageamento do SAR.....	25
3.1.3. Distorções geométricas.....	26
3.1.3.1. Sombreamento.....	26
3.1.3.2. Encurtamento de Rampa.....	27
3.1.3.3. Inversão de Relevo.....	27

3.1.4. Ruídos.....	29
3.1.5. Interação das microondas com a superfície.....	29
3.2. FUSÃO DE DADOS MULTISENORES	31
3.3. A GERAÇÃO DE MAPAS DE ÍNDICES DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAME DE ÓLEO	34
3.4. UTILIZAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) PARA O MAPEAMENTO DO ISA.....	39
4. MATERIAIS UTILIZADOS	41
4.1. SATÉLITE LANDSAT ETM+7	41
4.2. SATÉLITE RADARSAT-1.....	43
4.3. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM.....	44
5. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS ORBITAIS PARA O RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS DA COSTA NORDESTE DO PARÁ	45
5.1. PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS.....	45
5.1.1. Imagens Landsat ETM⁺ 7.....	45
5.1.1.1. Pré-processamento.....	46
5.1.1.1.1. <i>Correção atmosférica.....</i>	<i>46</i>
5.1.1.1.2. <i>Correção geométrica.....</i>	<i>47</i>
5.1.1.2. Processamento.....	47
5.1.1.2.1. <i>Composição colorida.....</i>	<i>47</i>
5.1.1.2.2. <i>Realce.....</i>	<i>49</i>
5.1.1.2.3. <i>Decorrelação.....</i>	<i>50</i>
5.1.1.2.4. <i>Transformação por principais componentes</i>	<i>51</i>
5.1.1.2.5. <i>Classificação automática.....</i>	<i>53</i>
5.1.1.2.6. <i>Classificação visual dos produtos gerados</i>	<i>60</i>
5.1.2. Imagens Radarsat-1	61
5.1.2.1. Ortorretificação.....	61
5.1.2.2. Reescalamento.....	62
5.1.2.3. Realce e recorte.....	62
5.1.2.4. Interpretação das imagens RADARSAT-W1.....	62
5.1.3. Imagens SRTM.....	68

5.1.3.1. Geração de máscara.....	68
5.1.3.2. Geração de paleta de cores e perfis topográficos.....	69
5.1.3.3. Geração de relevo sombreado.....	71
5.1.4. Fusão de dados.....	72
5.1.4.1. Transformação IHS-RGB.....	72
5.1.4.2. Transformação por Principais Componentes.....	73
5.1.4.3. Fusão PAN / ETM.....	75
5.1.4.4. Fusão RADARSAT-1/ ETM.....	77
5.1.4.5. Fusão SRTM / ETM.....	79
5.2. GERAÇÃO DE BANCO DE DADOS	81
6. RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS USANDO IMAGENS LANDSAT ETM +7, RADARSAT W-1, SRTM E FUSÃO DE DADOS.	82
6.1. INTERPRETAÇÃO PRELIMINAR DAS IMAGENS DE SATÉLITE	83
6.2. TRABALHO DE CAMPO	83
6.3. ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA	85
6.4. RECONHECIMENTO DOS AMBIENTES DEPOSICIONAIS COSTEIROS.....	87
6.4.1. Planalto Costeiro.....	88
6.4.2. Planície de maré.....	93
6.4.2.1. Manguezal.....	93
6.4.2.2. Cobertura arenosa de supramaré.....	97
6.4.2.3. Campos / Pântanos salinos.....	98
6.4.2.4. Cristas de praia.....	100
6.4.2.5. Planície de maré lamosa.....	101
6.4.3. Planície Litorânea ou Litoral.....	103
6.4.3.1. dunas vegetadas.....	105
6.4.3.2 Interdunas.....	105
6.4.3.3. Dunas costeiras atuais.....	106
6.4.3.4. Praias-flecha barreira.....	107
6.4.3.5. Sistema de lagos.....	108
6.4.4. Planície Estuarina.....	108
6.4.4.1. Várzeas.....	108
6.4.4.2. Barras arenosas de maré / Delta de maré vazante.....	110

6.4.5. Sistema Antropogênico.....	113
6.4.5.1. Áreas construídas.....	113
6.4.5.2. Lago artificial.....	114
6.4.6. Discussão.....	115
6.5. MAPEAMENTO DOS AMBIENTES DEPOSICIONAIS COSTEIROS.....	118
7. GERAÇÃO DAS CARTAS DE ISA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO	122
7.1. ISA-1B: MURO DE ARRIMO.....	124
7.2. ISA 3A: PRAIAS COM GRANULOMETRIA FINA A MÉDIA.....	126
7.3. ISA 3B: ESCARPAS EXPOSTAS COM DECLIVES ÍNGRIMES EM AREIA.....	128
7.4. ISA 9B: BANCOS E PLANÍCIES DE MARÉS LAMOSAS VEGETADOS (MUD FLATS).....	130
7.5. ISA 9C: CAMPOS HERBACEOUS HIPERSALINAS	132
7.6. ISA 10 A: CAMPOS HERBACEOUS SALINOS E SALOBROS (SALT AND BRACKISH WATER MARSHES)	134
7.7. ISA 10C: MANGUEZAL.....	136
7.8. ISA 10D: VÁRZEA.....	138
8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1: Localização da área de estudo.....6

Figura 1.2: Principais rotas de navios petroleiros e balsas ao longo da costa norte do Brasil – Região Amazônica.13

Capítulo 2

Figura 2.1: Temperatura média anual na cidade de Salinópolis no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995).....19

Figura 2.2: Precipitação média anual na cidade de Salinópolis registrada no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995).....19

Figura 2.3: Direção preferencial dos ventos em Salinópolis registrada no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995).....21

Figura 2.4: Velocidade dos ventos na cidade de Salinópolis registrada no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995).....21

Capítulo 3

Figura 3.1: características geométricas do Radar de Abertura Sintética (SAR). Ângulo de incidência: ângulo entre a linha de visada do radar e a vertical local com relação ao geóide. Direção de azimute: direção de vôo ou a direção ao longo da trajetória. Direção de alcance é a direção transversal à trajetória. Alcance inclinado é a distância medida ao longo da linha entre a antena e o alvo. Alcance no terreno é a distância entre o rastreamento no terreno e um objeto. Alcance próximo near range é a parte da imagem de radar mais próxima da trajetória de vôo ou do nadir, ao passo que o alcance distante far range é a parte da imagem de radar mais afastada da trajetória de vôo. (Fonte: Raney, 1998).....25

Figura 3.2: Tipo de distorções inerentes ao imageamento com radar: (A) sombreamento topográfico (B) encurtamento de rampa, (C) inversão de relevo. (Adaptado de Raney, 1998).....28

Figura 3.3: Contribuições do retroespalhamento de um dossel: (1) direto do dossel, (2) direto dos troncos, (3) direto da superfície, (4a) interação tronco-solo, (4b) interação solo-tronco, (5a) interação dossel-solo, (5b) interação solo-dossel. (Veiga & Andrade, 2005).....30

Capítulo 5

Figura 5.1: Composição colorida 4R 5G 3B sem realce (a), com realce linear (b) e com decorrelação aplicada na composição 453 (c).....50

Figura 5.2: Classificação não-supervisionada da imagem Landsat 7 com 15 classes mapeadas pelo classificador automático ISODATA.....	57
Figura 5.3: Classificação resultante da agregação das 15 classes mapeadas pela classificação não-supervisionada da imagem Landsat 7.....	58
Figura 5.4: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de 19 de Janeiro de 2003 e gráfico mostrando a amplitude de maré (3,3m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).....	64
Figura 5.5: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de 12 de fevereiro de 2003 e gráfico mostrando a amplitude de maré (2,2m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).....	65
Figura 5.6: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de 10 de setembro de 2004 e gráfico mostrando a amplitude de maré (2,4m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).....	66
Figura 5.7: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de 04 de outubro de 2004 e gráfico mostrando a amplitude de maré (1,5m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).....	67
Figura 5.8: Imagem SRTM com máscara mar.....	68
Figura 5.9: Paleta de cores gerada a partir do Modelo Digital de Elevação do SRTM, mostrando no detalhe os perfis topográficos os quais representam a resposta da interação das microondas com a copa das árvores.....	70
Figura 5.10: Relevo Sombreado gerado a partir do DEM do SRTM.....	71
Figura 5.11: Fluxograma de processamento das imagens para integração por Transformação IHS-RGB.....	73
Figura 5.12: Fluxograma de processamento das imagens para integração por principal componente seletiva (a), e por principal componente não seletiva (b).....	74
Figura 5.13: Imagem híbrida resultante da fusão da composição multiespectral 4R5G3B com a banda Pancronática, destacando o realce das feições de textura dos ambientes costeiros.....	76
Figura 5.14: Imagem híbrida da fusão da decorrelação da composição 4R5G3B com a banda PAN, destacando a cidade de salinópolis e os arruamentos na ilha do Alatalia.....	76
Figura 5.15: Produto da fusão SPC / SAR por Transformação IHS.....	78
Figura 5.16: Produto da fusão PC / SAR por Transformação IHS.....	78
Figura 5.17: Produto da fusão REL/Decorrelação 453.....	80
Figura 5.18: Fusão REL-PCA seletiva com realce linear.....	80
Figura 5.19: Esquema mostrando o conceito de índice de sensibilidade ambiental usando integração de dados de sensores remotos, SIG e informações de campo.....	81

Capítulo 6

- Figura 6.1:** Principais caminhos percorridos e os pontos de GPS plotados na imagem Landsat composição 4R5G3B.....84
- Figura 6.2:** Método de amostragem dos sedimentos.....85
- Figura 6.3:** Imagem ETM, Composição 453 (A) mostrando detalhe da cidade e orla de Salinópolis, (B) Paleta de cores mostrando o contato direto do planalto costeiro com a linha de costa na orla do Maçarico (seta branca) e (C) uma foto com o detalhe do desnível abrupto do terreno formando uma falésia ativa.....89
- Figura 6.4:** Planalto costeiro, A- Composição ETM 4R5G3B, B- Foto de campo mostrando relevo característico do ambiente.....90
- Figura 6.5:** (1) imagem SAR (04 outubro 2004), (2) imagem híbrida mostrando clara distinção da interface Planalto costeiro/manguezal. A - Planalto costeiro, B- Manguezal.....92
- Figura 6.6:** Vegetação de manguezal, (a) *Rhizophora*, Ilha do atalaia-Salinópolis (b) *Avicenia*, estrada Quatipuru-boá vista. **Figura 6.7:** Vegetação *Avicennia* do manguezal na estrada Quatipuru-boá vista.....94
- Figura 6.7:** Resposta espectral dos principais ambientes da planície de maré e sua interação com o planalto costeiro. (A) Imagem ETM composição 4R5G3B; (B) Radarsat-W1 de 04 outubro 2004; (C) Ortofoto da cidade de Salinópolis (outubro-2001) mostrando a floresta densa de médio porte nos manguezais. Mz = Manguezal, CAS = Cobertura arenosa de supramaré, PC = planalto costeiro.....95
- Figura 6.8:** Imagem ETM mostrando a resposta espectral que identificaram os campos e imagens RADARSAT-W1 demonstram a variação do comportamento do retroespalhamento da superfície dos campos em função de mudanças nos parâmetros ambientais, as fotos mostram os campos em período seco. C = Campos.....99
- Figura 6.9:** Figura mostrando a forma alongada do corpo arenoso em meio ao manguezal no município de Salinópolis. (CP = Crista de praia).....101
- Figura 6.10:** Planície de maré Lamosa (A) orla da cidade de Maracanã, (B) orla da cidade de Salinópolis.....102
- Figura 6.11:** A - Imagem ETM, composição 453 mostrando os ambientes da Planície litorânea com detalhes de fotos de campo, B- Imagem SAR e C- Imagem produto da fusão SPC-SAR. PFB: Praia flecha barreira, DA: Dunas atuais, LG: Lagos, Ch: Chenier, DV: Dunas Vegetadas.....104
- Figura 6.12:** Ortofoto mostrando detalhe das dunas costeiras atuais, dunas transversais e parabólicas localizadas na Ilha do Atalaia.....107
- Figura 6.13:** Planície de Várzea, Santarém Novo, mostrando vegetação densa e sedimentos lamosos ao longo da planície de inundação. A- Imagem ETM, composição 453, B- Foto das várzeas que bordejam o rio Maracanã.....109
- Figura 6.14:** A- Imagem ETM, Composição 453 com realce linear mostrando resposta espectral das Barras arenosas (BA), B- Imagem ETM após processamento de realce por decorrelação mostrando maior contraste das barras arenosas.....110

Figura 6.15: Imagens RADARSAT-1 Wide-1 órbita descendente. (A) Imagem adquirida em 04 de outubro de 2004, condições de maré enchente mostrando em (1) as Barras arenosas emersas. (B) imagem adquirida em 12 de fevereiro de 2003, condição de maré vazante, mostrando as principais direções de fluxo dos estuários, e em (2) a morfologia das barras arenosas submersas dada pela rugosidade superficial da água.....	112
Figura 6.16: Resposta espectral da áreas construída correspondente à cidade de Maracanã (A) Imagem ETM 453, e (B) Imagem Radarsat-W1.....	113
Figura 6.17: (A) Resposta espectral do Lago artificial localizado na cidade de Salinópolis, com detalhe na foto. (B) Espalhamento especular da água na imagem RADARSAT-W1.....	114
Figura 6.18: Mapa dos ambientes deposicionais costeiro da costa nordeste do Pará.....	119
Figura 6.19: Perfis topográficos gerados pelo DEM mostrando a distribuição espacial dos ambientes costeiros mapeados.....	120
Capítulo 7	
Figura 7.1: Mapa dos índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo do NE do Pará.....	123
Figura 7.2: ISA 1B - Muros de arrimo em concreto construídos na área de estudo. (A) orla da localidade de Boa Vista (B) orla da cidade de Salinópolis.....	125
Figura 7.3: ISA 3A - Praia da área em estudo (A)Farol Velho, Ilha do Atalaia; (B) Praia do Atalaia; (C) Praia Penha da Marieta na Ilha do Marco.....	127
Figura 7.4: ISA 3A - Falésias ativas da área de estudo (A) Falésia na localidade de Boa Vista (B) Falésia na orla da cidade de Salinópolis.....	129
Figura 7.5: ISA 9C - Planície de maré lamosa da área de estudo (A) banco de lama na orla da cidade de Salinópolis, próximo ao mercado municipal; (B) Banco de lama na orla da cidade de Maracanã.....	131
Figura 7.6: ISA 9C - Campos hipersalinos da área de estudo (A) campos com vegetação adaptada ao meio salgado; (B) Detalhe do sal cristalizado caracterizando o ambiente hipersalino.....	133
Figura 7.7: ISA 10A - Campos/pântanos salinos (A) localizado próximo à cidade de Quatipuru (B) localizado próximo à localidade de Boas Vosta (Quatipuru).....	135
Figura 7.8: ISA 10C - Manguezais (A) Manguezal da Ilha do Atalaia com vegetação Rysophora típica de mangue; (B) Manguezal da Praia da Curvina, detalhe mostrando substrato lamoso e as árvores pneumatóforas com raízes aéreas típicas de ambiente salobro.	137
Figura 7.9: ISA 10D- Planície de inundação, Várzeas (A) várzea próximo à localidade de Boa Vista; (B) Várzea, próximo à localidade de Boa Vista.....	139

TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1: Principais pontos da navegação em águas jurisdicionais da bacia Amazônica (Fonte: CT-Petro 2004).....14

Tabela 1.2: Principais rotas marítimas ao longo da costa do Pará (Fonte: CT-Petro 2004).....14

Capítulo 3

Tabela 3.1: Proposta de adaptação dos métodos NOAA (2002) e PETROBRAS (2002) para a zona costeira amazônica (Souza Filho et al., 2004).....38

Capítulo 4

Tabela 4.1: Faixa espectral das bandas do sensor ETM+.....42

Tabela 4.2: Características das imagens Landsat 7 ETM+.....42

Tabela 4.3: Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas.....43

Tabela 4.4: Propriedades dos dados SRTM utilizadas neste trabalho.....44

Capítulo 5

Tabela 5.1: Estatística das seis bandas espectrais da Imagem Landsat 7.....48

Tabela 5.2: Matriz de covariância entre as bandas multiespectrais.....48

Tabela 5.3: Matriz de correlação entre as bandas dada por: Coeficiente de correlação $(x,y) = \text{desvio padrão } (x) \times \text{desvio padrão } (y)$ 48

Tabela 5.4: Calculo do OIF das 20 combinações possíveis.....49

Tabela 5.5: Valores de variância dos componentes principais resultantes da TCP 1, 2 e 3 correspondentes à faixa do visível.....52

Tabela 5.6: Valores de variância dos componentes principais resultantes da TCP 5 e 7 (Faixa do infravermelho).....52

Tabela 5.7: Valores de variância dos componentes principais resultantes das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (visível e infravermelho).....43

Tabela 5.8: Coeficiente Kappa e os respectivos conceitos da classificação.....55

Tabela 5.9: Matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada (ISODATA) da imagem LANDSAT ETM+7 (bandas 1,2,3,4,5,7), destacando em azul as amostras que foram classificadas corretamente (diagonal principal).....59

Capítulo 6

Tabela 6.1: Unidades morfológicas e ambientes costeiros mapeados.....87

Tabela 6.2: Diferentes sensores usados e sua contribuição para o reconhecimento dos ambientes costeiros.....96

Tabela 6.3: Diferentes sensores usados e sua contribuição para o reconhecimento dos ambientes costeiros.....114

Tabela 6.4: Classificação geomorfológica dos sistemas costeiros mapeados na área de estudo.....121

Capítulo 7

Tabela 7.1: Índices de sensibilidade ambiental mapeados na área de estudo e seus respectivos ambientes costeiros.....122

RESUMO

Acidentes relacionados à exploração e transporte de petróleo constituem uma ameaça às zonas costeiras de todo o mundo, pois um derrame de óleo trata-se de um evento ecologicamente desastroso e pode causar danos irreparáveis ao meio ambiente afetando principalmente os seres vivos que habitam na zona costeira e a economia local. Na costa nordeste do Pará, assim como ao longo de toda a costa norte do Brasil ocorre intenso fluxo de navios e balsas transportando petróleo e derivados, ameaçando os recursos naturais dessa região. Daí a necessidade de serem estabelecidas estratégias de prevenção e gestão dos impactos ambientais ao derrame de óleo para elaboração de planos de emergência.

A caracterização dos ambientes costeiros, em especial os tropicais úmidos dominados por macromaré, é complexa em virtude de uma série de fatores limitantes para o mapeamento ao longo da zona costeira do nordeste do Pará. 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.

Dentro desse contexto o objetivo dessa dissertação de Mestrado 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 estado do Pará. A metodologia consistiu no processamento digital de imagens de sensores remotos na faixa do óptico (Landsat ETM +7) e das microondas (RADARSAT-1 Wide-1), associados aos dados do Modelo digital de elevação do SRTM (*shuttle radar topographic mission*) e aos dados de campo, em ambiente de SIG (sistema de informação geográfica) proporcionando assim uma análise integrada das características espectrais, geomorfológicas, altimétricas e sedimentológicas dos ambientes costeiros em base cartográfica georreferenciada.

Os principais resultados gerados nesta dissertação permitiram: 1) Avaliação do potencial das imagens Landsat ETM+7, RADARSAT-1 e dos produtos de fusão multi-

sensores, para a identificação dos ambientes costeiros e dos Índices de Sensibilidade Ambiental ao derrame de óleo (ISA) nessa importante costa de manguezais; 2) Reconhecimento e descrição de cinco unidades morfológicas principais e quatorze subunidades: Planalto costeiro, Planície de Maré, Planície Litorânea e Planície aluvial; 3) Identificação e hierarquização de oito unidades de índices de sensibilidade ambiental (ISA), para a zona costeira amazônica, são eles: ISA 1B- Muro de arrimo; ISA 3A- Praias com granulometria fina a média; ISA 3B- Escarpas expostas com declives ingressos em areia; ISA 9B- Bancos e planícies de marés lamosas vegetados; ISA 9C- Campos herbáceos hipersalinas; ISA 10A- Campos herbáceos salinos e salobros; ISA 10C- Manguezal; ISA 10D- Várzea; 5) Geração do mapa de índice de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo da área estudada.

O uso das técnicas de sensoriamento remoto e SIG mostraram ser uma importante ferramenta para o reconhecimento e análise dos ambientes costeiros e geração dos mapas dos ambientes costeiros e dos índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo da costa nordeste do Pará.

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 affecting living beings that live in these coast zones and also the local economy.

Characterizing coast environments is very complex because of the many limiting factors during the mapping process. When it comes to humid tropical environment, like in Pará northeast coast, it gets worse because this area is typically dominated by macro tide. First of all, the macro tide plain creates low areas where informations about the relief are, most of times, scarce and the plain metric representation is dominant. Secondly, the tide variations with its vertical and horizontal moving produces strong changes on the sediment coast environment limits. Thirdly, the geomorphological modifications in the coast areas are intense and fast.

Towards this context, the objective of this master's degree dissertation is to create a map of the coast environment and a rating map 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 range of optical (Landsat ETM +7) and microwave (RADARSAT-1 Wide-1) associated to data from the SRTM (*shuttle radar topographic mission*) digital model of elevation, and to the field data collected in SIG (geographical information system) environment, providing an integrated analysis of the spectral, geomorphological, altimetric and sedimentological characteristics of the coastal environments in cartographic georeferenced bases.

The most important results of this dissertation allowed: 1) The evaluation of the potential of the images Landsat ETM +7, RADARSAT-1 and of the multi sensors fusion products used for identifying the coastal environment and the Environment Sensitivity Rates (ISA) of oil spills in this areas 2) Recognizing and describing five main morphological unities and fourteen sub unities: Coastal Plateau, Tide Plain, Coastal Plain and Alluvial Plain 3) Identifying and classifying eight unities of Environmental Sensitivity Rates (ISA) for the Amazon coast zone which are: ISA 1B – support wall; ISA 3B – exposed scarps with declivity to the sand; ISA 9B – sand bank and plains of tidal vegetable mudflats; ISA 9C – hypersalt herbaceous fields, ISA 10A – salt and salobre

herbaceous fields; ISA10C – Mangrove; ISA 10D – Lea; 5) creation of the Environmental Sensitivity Rates map to oil spill of the studied area.

The using of remote sensors techniques and SIG proved to be an important tool for recognizing and analyzing coast environments and for generating maps to coast environments and to environmental sensitivity rates to oil spills in the northeast coast of Pará.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. A ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA E O SENSORIAMENTO REMOTO

A zona costeira ocupa cerca de 18% da superfície do globo, onde vive aproximadamente 60% da população mundial, sendo responsável por cerca de 1% da produção primária oceânica mundial (Cracknell, 1999). No estado do Pará, cerca de 43% da população reside na zona costeira, ao longo do qual alternam-se manguezais, restingas, campos de dunas, estuários, planícies de marés e outros ecossistemas importantes do ponto de vista ecológico (Silva, 1996; Mendes et.al,2001; Gregório, 2004). Vale ressaltar que o Brasil é o 2º país em extensão de áreas de manguezal no mundo, com 13.400 km² (Spalding et al., 1997).

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 ocorridos 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.

A planície costeira estudada encontra-se localizada no 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 a Folha SA-23-V-A-V (Escala 1:100.000) e engloba os municípios de Salinópolis, São João de Pirabas, Santarém novo, Maracanã, Primavera (**Figura 1.1**).

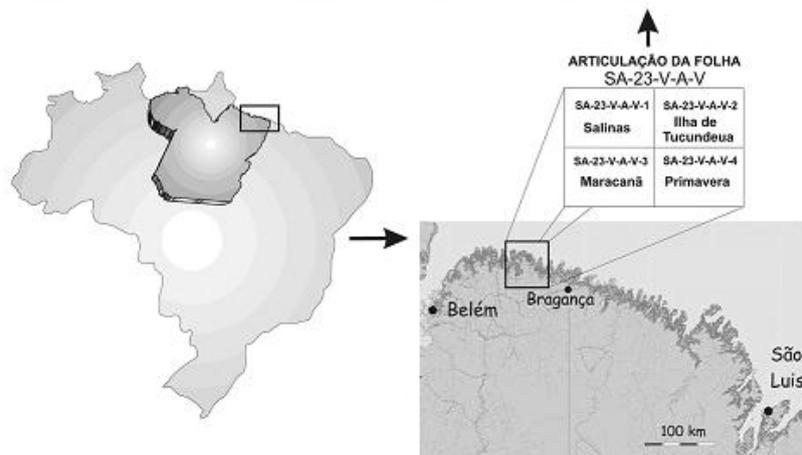
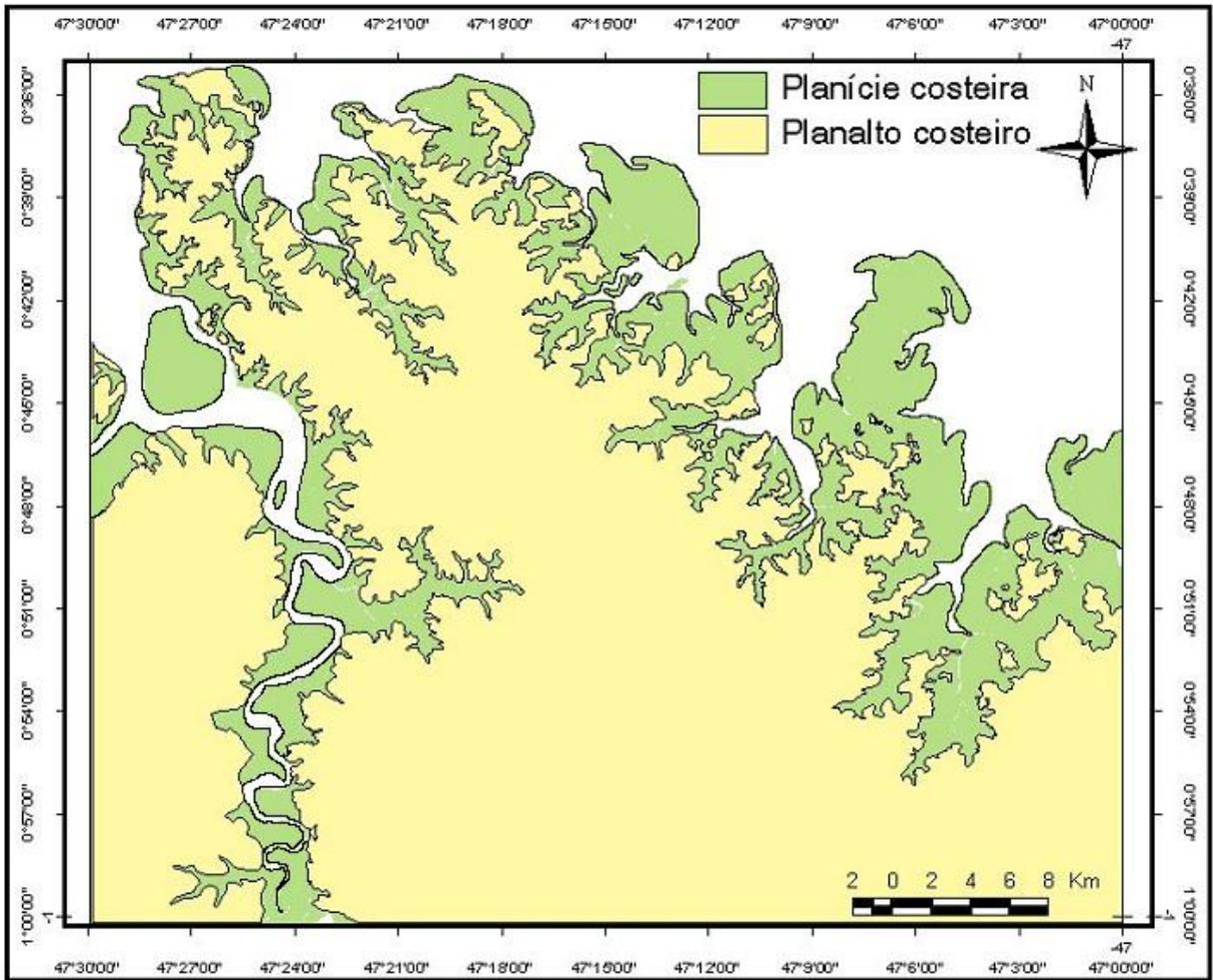


Figura 1.1: Localização da área de estudo

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 escaça 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.

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, 1998; Silva Jr & El-Robrini, 2001; Souza Filho & Paradella, 2001, 2003; Souza Filho, 2004; Boulhosa et.al., 2005).

Avanços na utilização de dados de radar de abertura sintética orbitais (ERS, JERS e RADARSAT) na faixa das microondas tem mostrado grande utilidade no mapeamento principalmente em ambientes tropicais úmidos pela sua versatilidade no imageamento, pois possibilita a penetração em nuvens e chuvas, que são bastante comuns na Amazônia. Além disso, os radares registram as propriedades da forma e constantes elétricas dos alvos, estendendo assim a capacidade dos sensores ópticos (Souza Filho & Paradella, 2001).

Em 2003, a NASA disponibilizou os modelos numéricos de terreno (MNT) da superfície terrestre gerados pela “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM) iniciando uma nova era de reconhecimento do relevo do planeta (Rabus et al., 2003), tornando-se, portanto uma ferramenta indispensável na análise do espaço costeiro, mapeamento geológico, geomorfológico e geração da cartografia temática.

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; Goncalves & Souza Filho,

2005), e têm demonstrado ser uma ferramenta eficiente na geração de mapas de Sensibilidade ambiental, os quais são de extrema importância na definição de planos de contingência e estratégias de limpeza em um evento de derramamento de óleo.

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 do mapa de sensibilidade ambiental, confirmando que este é um importante segmento do sensoriamento remoto aplicado ao estudo de zonas costeiras principalmente em áreas de difícil acesso ou com base cartográfica desatualizada ou inexistente, comum na Amazônia.

Dentro desse contexto foram determinados alguns objetivos gerais e específicos que tendem a contemplar as necessidades de reconhecimento e mapeamento da planície costeira em estudo através do uso de dados de sensoriamento remoto, os quais serão descritos a seguir.

1.2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial das imagens Landsat ETM+7 e RADARSAT-1 na delimitação dos ambientes costeiros e de áreas inundáveis, e o potencial dos produtos de integração de multi-sensores ótico e microondas associados ao 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 através da análise de dados de sensores remotos (imagens RADARSAT-1 Wide-1 e Landsat ETM+7), sistema de informação geográfica (SIG), dados sobre geomorfologia, litologia, relevo da região.

1.2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar o cenário geomorfológico regional de uma porção da costa nordeste do Pará (região do salgado) através de dados de sensores remotos.
- Integrar produtos de sensores óticos e microondas e modelo numérico de terreno através de diferentes técnicas de processamento digital de imagens
- Avaliar o potencial das técnicas de realce e integração digital de imagens de sensores remotos (microondas e óptico) para a caracterização dos ambientes costeiros e dos índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo da área de estudo.
- Gerar o mapa dos ambientes deposicionais costeiros da região.
- Gerar mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo nesta porção da zona costeira amazônica.

1.3. UM HISTÓRICO DOS DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NO MUNDO

Durante a exploração, armazenagem ou transporte, o óleo e seus derivados ocasionalmente são derramados, por motivos acidentais ou intencionais. As principais fontes de derramamentos de óleo no mar segundo PACPLAN, 2000 (Pacific Islands Regional Marine Spill), disponível em: http://202.4.49.28/Events/2000/11SM/WP7_3_2_6_Att_1.pdf.

Acidentes durante a carga e descarga de tanques e navios; Acidentes como afundamento, colisões e encalhes de navios carregados com óleo e derivados; Acidentes com tanques de armazenagem e oleodutos, onde o óleo e outros materiais escapam para os rios e mar; Descargas intencionais ou acidentais de resíduos de óleo durante operações de limpeza dos tanques de petroleiros; Descargas acidentais e operacionais de óleo durante a exploração e produção de petróleo em alto mar.

As companhias de petróleo vêm investindo nos últimos anos para garantir o aumento da segurança operacional durante as atividades de exploração, produção e transporte de petróleo e têm diminuído os riscos de acidentes, ainda assim, derramamentos acidentais e intencionais. Os danos decorrentes são, ainda, uma grave

ameaça à conservação ambiental das áreas costeiras em todo mundo. (Gonçalves, 2005).

A estimativa da quantidade de óleo derramado em todo mundo anualmente é de mais de 4,5 milhões de toneladas, sendo que as operações de limpeza dos reservatórios de navios petroleiros são responsáveis por cerca de 45% da poluição. Descargas de lixo urbano e industrial nos cursos dos rios e que alcançam os oceanos também são responsáveis pelo aumento da poluição no mar (European Space Agency - ESA, 1998).

O número de grandes vazamentos (> 700 t) tem diminuído nos últimos anos, sendo que os pequenos e médios vazamentos são responsáveis pela maioria dos acidentes, segundo dados da ITOPF (International Tanker Owners Pollution Federation) em: <http://www.itopf.com/itopfhandbook2006.pdf>. Estes dados deixam claro que:

- A maioria dos vazamentos de navios-tanque resulta de operações de rotina como carga, descarga e abastecimento, que normalmente ocorre em portos ou terminais;

- A maioria dos vazamentos operacionais é pequeno, com 91% deles envolvendo quantidades menores que 7 t.

- Acidentes envolvendo colisões e encalhes geralmente representam risco de derramamento de grande porte, com quase a metade deles envolvendo quantidades maiores que 700 t.

O derramamento de óleo mais conhecido no mundo aconteceu em março de 1989, no Canal Prince Willian, no Alaska, onde uma ruptura no casco do navio Exxon Vandez, acarretou no derramamento de aproximadamente 37 mil toneladas de óleo, causando impactos ambientais em todos os níveis nos ecossistemas envolvidos. Outro acidente importante ocorreu em 2002, quando o navio Prestige, das Bahamas, afundou no dia 19 de novembro, a 250 Km da região da Galícia, na costa da Espanha, derramando 63 mil toneladas de óleo combustível (Carvalho, 2003).

No Brasil, dentre os maiores acidentes registrados estão os com os navios, Takimyia Maru, em 1974, com 6.000 toneladas vazadas; Brazilian Marina, em 1978, com também 6.000 toneladas; Marina, em 1985 com 2.500 toneladas de óleo

derramados no canal de São Sebastião (SP), e com o navio Tarik Ibn Ziyad, na Baía de Guanabara (RJ), com 6.000 toneladas.

Segundo EPA (2000) somente no ano de 2000 ocorreram vários acidentes com oleodutos: Em janeiro o rompimento de um oleoduto da Petrobrás no Rio de Janeiro derramou mais de 1 milhão de litros de óleo na Bahia de Guanabara causando impactos às comunidades biológicas e aos recursos sócio-econômicos da região; Em julho, ainda na Bahia de Guanabara, 370 litros de óleo cru foram derramados durante a lavagem de tanques; Ainda em julho ocorreu o rompimento de dois oleodutos da Petrobras, um na refinaria Presidente Getúlio Vargas, derramou 3,785 milhões de litros de óleo cru no Rio Barigüe, e outro próximo ao município de Paracambi liberou cerca de 1000 litros de óleo combustível no solo, causando danos à saúde da população da cidade; Além destes ocorreram outros pequenos derramamentos.

Em 2001, a balsa “Miss Rondônia” afundou no Rio Pará, às proximidades do Porto de Vila do Conde (PA), carregada com aproximadamente 1.900 toneladas de óleo do tipo A1 (Berredo et al. 2001).

1.4. IMPORTÂNCIA DA GERAÇÃO DE CARTAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL

Os impactos que um derramamento de óleo no mar ou no rio podem causar ao meio ambiente não depende apenas do tamanho do derramamento, mas sim de diversos fatores que tornam um ambiente ecologicamente mais sensível, como por exemplo pouca influência de correntes marítimas, ondas e marés, composição do material despejado, localização geográfica do derramamento, variáveis biológicas, oceanográficas e meteorológicas tornam possível que pequenos derramamento causem grandes danos ecológicos.

Assim, derramamentos em regiões de grande influência das correntes marítimas podem ser deslocados para mar aberto facilitando os processos de dispersão natural do óleo por intemperismo, enquanto que, em regiões onde esta influência é menor, como baías, canais, enseadas, estuários, estes processos são mais lentos, causando impactos e desastres ecológicos que podem perdurar por vários anos.

Existe uma grande necessidade de conservação do meio ambiente em áreas onde há exploração, produção e transporte de petróleo e derivados de petróleo, em virtude dos vários casos de derramamentos de petróleo ocorridos no litoral brasileiro nos últimos anos. Isso tem incentivado os órgãos e as empresas envolvidas nestes episódios a investir cada vez mais na investigação de métodos, tanto preventivos como corretivos para que os danos decorrentes destes episódios sejam amenizados. O monitoramento dessas áreas envolve a legislação ambiental vigente, Lei nº. 9.966 de 28 de abril de 2000 (MMA, 2002), que exige que seja realizado um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e um plano de emergência individual (PEI) para que seja concedida a certificação ambiental e liberação para que as empresas realizem atividades relacionadas à indústria do petróleo.

Assim, os mapas de índices de sensibilidade são componentes importantes do plano de emergência individual, para as áreas de influência de um empreendimento petrolífero (MMA, 2002).

1.5. TRAJETÓRIA DOS NAVIOS PETROLEIROS NA REGIÃO AMAZÔNICA

O transporte de petróleo na Amazônia se dá principalmente através de navios petroleiros que trafegam ao longo de toda a costa norte do Brasil para atender a demanda de diversos portos localizados no estado do Amazonas, Pará e Maranhão. A **Figura 1.2** mostra a principal rota desses navios petroleiros ao longo da região Amazônica.

É importante destacar que a área de estudo, a costa nordeste do Pará, encontra-se geograficamente vulnerável a qualquer acidente com derrame de óleo envolvendo navios petroleiros incluídos nas rotas São Luís – Belém, pois o óleo derramado, dependendo das condições hidrodinâmicas, poderá atingir a planície de inundação da área de estudo, provocando danos ambientais.

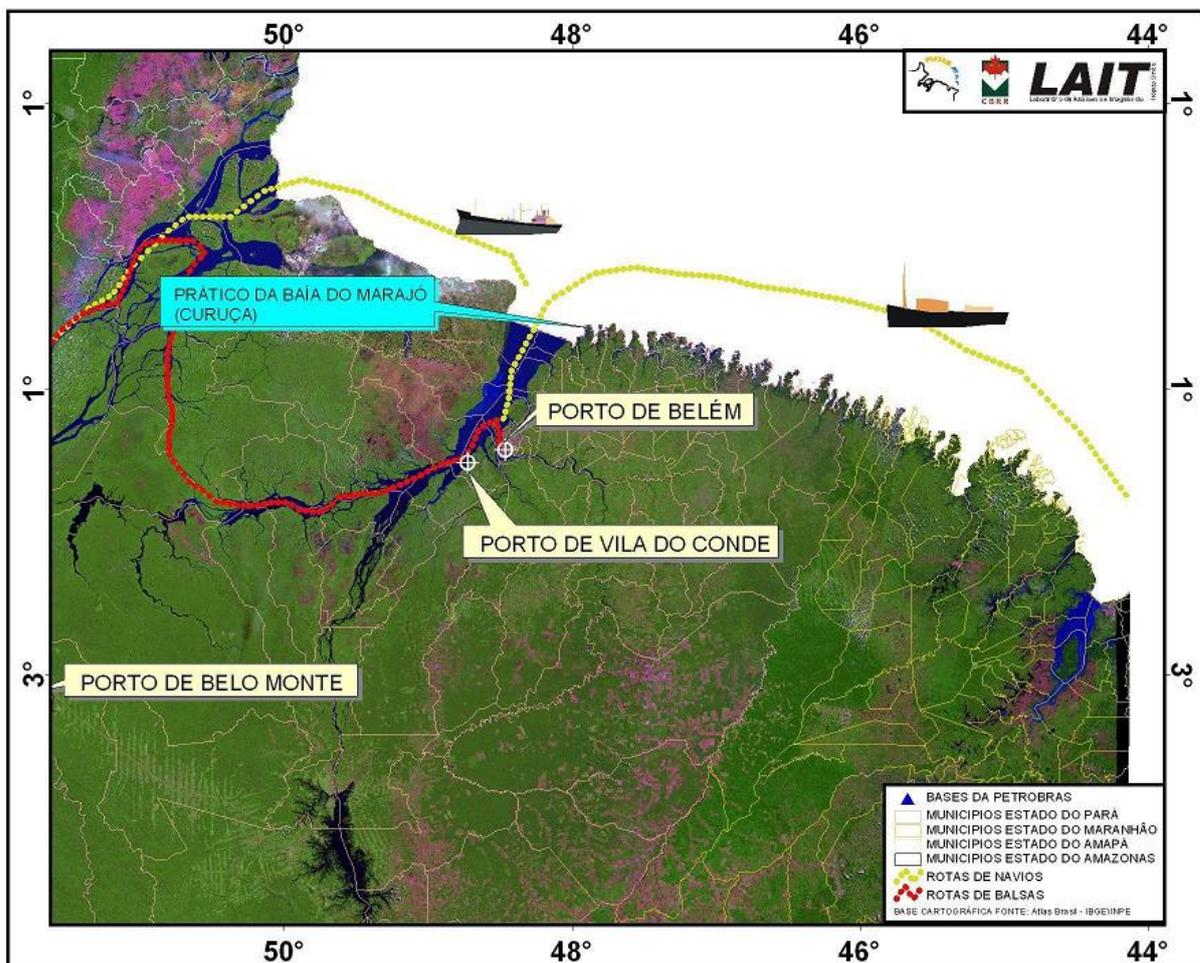


Figura 1.2: Principais rotas de navios petroleiros e balsas ao longo da costa norte do Brasil – Região Amazônica.

A Tabela 1. demonstra as rotas dos principais pontos da navegação em águas jurisdicionais da bacia Amazônica e suas respectivas movimentações média anuais. Na **Tabela 1.2**, as principais rotas dos navios, ambas fazendo uma relação entre os navios mercantes (NM) e petroleiros nas rotas retro citadas durante o ano de 2001, segundo dados fornecidos pela marinha mercante do Brasil e publicados no projeto CT-PETRO/MCT/CNPq nº 040/2004 – anexo III no endereço <http://www.cnpq.br/servicos/editais/ct/anexos/402004/anexo3.pdf>.

Tabela 1.1: Principais pontos da navegação em águas jurisdicionais da bacia Amazônica

Porto	Localização	Movimentações anuais		
		Petroleiros	NM *	Percentual (%)
Porto de Manaus (MXO)	0308S 06001W	360	694	51,9
Porto de Belém (PAA)	0127S 04830W	324	827	39,2
Porto de Coari (CIJ)	0405S 06208W	176	177	99,4
Porto de Macapá (MCP)	0001N 05102W	90	184	48,9
Porto de Vila do Conde (VIF)	0135S 04845W	59	453	13,0
Porto de Munguba (MVF)	0030S 05024W	21	157	13,4
Porto de Fazendinha (FAZ)	0200S 05200W	11	86	12,8
Porto de Salinópolis (LND)	0030S 04723W	05	10	50,0
Porto de Santana (PJZ)	0003S 05111W	07	44	15,9
Bacia Amazônica	-	1053	2632	40,0

* NM- Todos os navios mercantes, incluindo os peroleiros.

(Fonte: CT-Petro 2004)

Tabela 1.2: Principais rotas marítimas ao longo da costa do Pará

Rota Marítima	Movimentações anuais		
	Petroleiros	NM*	Percentual (%)
São Luís (MHO)/Belém (PAA)	130	136	95,6
São Luís (MHO)/Manaus (MXO)	32	32	100,0
Manaus (MXO)/Salvador (CVD)	31	71	43,7

* NM- Todos os navios mercantes, incluindo os peroleiros.

(Fonte: CT-Petro 2004)

CAPÍTULO 2

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. GEOLOGIA

A evolução sedimentar holocênica da planície costeira iniciou a 5.100 anos B.P, quando o nível relativo do mar alcançou seu máximo. A evolução sedimentar foi resultado da progradação da linha de costa com desenvolvimento de sistema de manguezais, intercalados com um curto prazo de eventos retrogradacionais responsáveis pela erosão da costa e deposição de dunas praias velhas e recentes (Silva, 1996; Souza Filho & El-Robrini, 1998; Behling et.al, 2001).

O quadro geológico dos depósitos ocorrentes no nordeste do estado do Pará é representado por depósitos do Neógeno (Formação Pirabas e Grupo Barreiras) e quaternários (Pós-Barreiras e depósitos holocênicos) que recobrem a maior parte do NE do estado do Pará. Estes documentam a história de flutuações relativas do nível do mar consistente com muitas outras áreas da América do Sul e do mundo, refletindo mudanças eustáticas, provavelmente combinadas com fatores tectônicos (Rosseti et. al., 1989; Rosseti & Góes, 2001; Rosseti et. al., 2001; Cohen et.al., 2005).

O Neógeno é marcado inicialmente pelos depósitos da Formação Pirabas do Mioceno Inferior (Góes et.al, 1990) composto por camadas de calcáreos depositados em ambiente marinho raso (Góes et. al, 1990). Os depósitos transgressivos desta Formação iniciaram o preenchimento desta bacia, subsequentemente houve uma fase de deposição regressiva responsável pela sedimentação do Grupo Barreiras (Góes et. al, 1990; Costa et al, 1993).

O Grupo Barreiras datado do Mioceno Inferior (Arai et. Al. 1988; 1994), é composto por conglomerados polimíticos com intercalações de areia e argila formando várias fácies sedimentares, que caracterizaram um modelo deposicional de leque aluvial (planície arenosa e lamosa) com influência marinha na porção mais distal (Rosseti et.al, 1989). Corresponde ao embasamento dos depósitos holocênicos e ao limite continental da planície costeira. Aflora na faixa litorânea na forma de falésias

ativas e inativas em locais onde o planalto costeiro entra em contato abrupto com a planície costeira, planície estuarina e o mar (Souza Filho e El-Robrini, 1996).

O Quaternário é representado pelos sedimentos areno-argilosos do Pós-Barreira (Sá, 1969) com estruturas de dissipação de dunas eólicas (Rosseti et. al, 1989) que formam uma delgada cobertura intemperizada sobrejacente às sucessões terciárias Pirabas/Barreiras com contato definido por uma discordância marcada por forte relevo erosivo (Rosseti et. al., 2001), enquanto os 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). Tais ambientes são objeto da investigação desta dissertação e serão detalhados nos capítulos seguintes.

2.2. GEOMORFOLOGIA COSTEIRA

Franzinelli (1982) classificou a planície costeira do NE estado do Pará como uma costa embaiada, transgressiva influenciada por macromaré compartimentada em dois setores: (1) a leste da ilha de Marajó até a baía de Pirabas, onde desenvolve uma costa recortada, com falésias esculpidas nos depósitos do Planalto Costeiro (Grupo Barreiras) que ocorrem na margem do oceano e manguezais desenvolvidos ao longo dos vales afogados e; (2) a leste da Baía de Pirabas, que consiste em uma costa baixa e recortada, com extensas planícies de maré e manguezais muito desenvolvidos, penetrando nos vales afogados, neste trecho o Planalto Costeiro recua em direção sul, sendo que e as falésias baixas inativas existem próximo ao continente, e as baías recortam a planície costeira.

Souza Filho (2005) define esta costa como *Costa de manguezais de macromaré da Amazônia* definida por um relevo baixo (0 a 8m), 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.

Os principais compartimentos geomorfológicos descritos na região são: (1) *Planalto costeiro* constituído por sedimentos do Grupo Barreiras e sustenta os depósitos holocênicos da Planície costeira, desenvolve uma superfície plana, suavemente ondulada e fortemente dissecada, com cotas que variam entre 50 e 60m, que diminuem

em direção à planície costeira desenvolvendo contato brusco litológico, vegetacional e morfológico, onde desenvolve falésias (Costa et. al.¹ *apud* Souza Filho, 1995); (2) *Planície de maré* que se desenvolve ao longo de extensas áreas protegidas da ação das ondas, onde as marés e suas correntes de enchente e vazante atuam mais diretamente, compreende ao ambientes de manguezal (planície lamosa), e pântanos salinos ou Campos; (3) *Planície Estuarina* com as feições de canal estuarino como funil estuarino, segmento meandrante sinuoso, segmento meandrante em cúspide e canal de curso superior; e (4) *Planície litorânea ou costeira* correspondente à zona que está diretamente submetida à ação das ondas, ventos e marés, e sofrem intensas modificações geomorfológicas, que abriga os ambientes de Praia flecha Barreira, dunas (parabólicas piramidais e longitudinais), e lagos (Silva, 1996).

Trabalhos na região caracterizaram diversas unidades morfoestratigráficas definidas a partir de suas propriedades sedimentológicas, propriedades geomorfológicas, e geométricas de superfície e subsuperfície (Pereira, 1995; Silva, 1996; Souza Filho & El-Robrini, 1996; Mendes et. al. , 1997; Silva Jr. & El-Robrini, 2001; Boulhosa et.al., 2005).

2.3. VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal presente na área de estudo está intimamente relacionada às feições morfológicas e ambientes deposicionais, 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.

¹ COSTA, J.L.; ARAÚJO, A.A.F; VILLAS BOAS, J.M; FARIAS, C.A.S; SILVA NETO, C.S; WANDERLEY FILHO, V.J.R. 1997. **Projeto Gurupi**, Belém, DNPM/CPRM. 1 (4) SOLOS. 258p.

2.4. SOLOS

Segundo Silva (1996), os solos que ocorrem na região em estudo são: Latossolo Amarelo que são solos profundos e se desenvolvem sob relevo suavemente ondulado, com vegetação capoeira; Podzólico Amarelo, que são solos profundos, bem a excessivamente drenados; Areias quartzosas que são sedimentos arenosos holocênicos, extremamente a fortemente drenados, profundos e altamente intemperizados, e ocorrem nas baixadas e nas dunas sobre os terraços ao longo da faixa costeira.

2.5. PARÂMETROS METEOROLÓGICOS E OCEANOGRÁFICOS

Na Região do Salgado há predominância do clima tropical úmido caracterizado como um clima quente e úmido, definindo uma estação seca bem definida que vai de junho a novembro (de junho a agosto com pouca precipitação e de setembro a outubro praticamente seco) e um período chuvoso bem acentuado que perdura nos meses de dezembro a maio.

Segundo Mengawaco (1995), no município de Salinópolis o clima é do tipo *Am* segundo a classificação de Köpper. A temperatura média varia de 26,2°C a 30°C (**Figura 2.1**), com temperaturas mais elevadas em outubro e mais baixas em fevereiro.

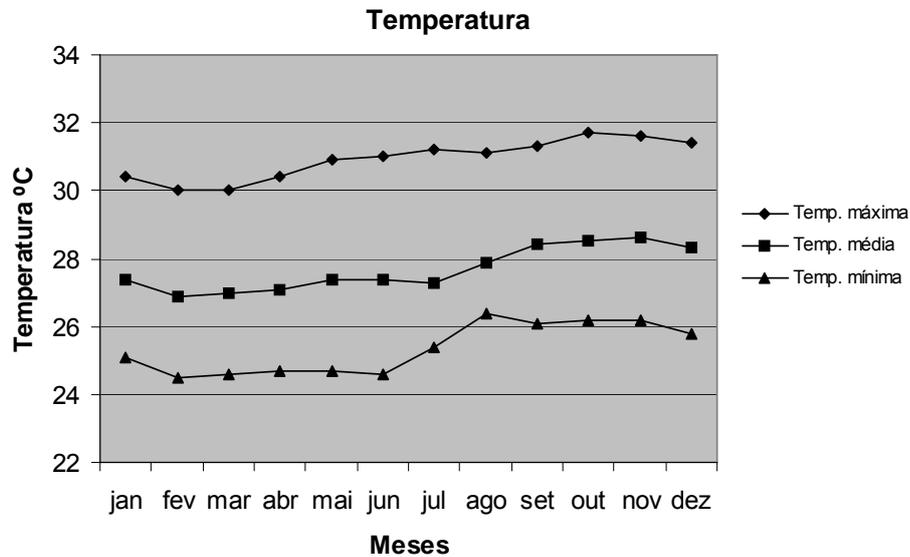


Figura 2.1: Temperatura média anual na cidade de Salinópolis no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995).

A precipitação média na cidade de Salinópolis é de 220 mm/ano segundo dados coletados no período de 1978 a 1993. No período chuvoso a precipitação chega a tinge o máximo de 532,5 mm no mês de abril (**Figura 2.2**), enquanto no período seco a precipitação mínima chega a 5,2 mm no mês de setembro (Mengawaco, 1995).

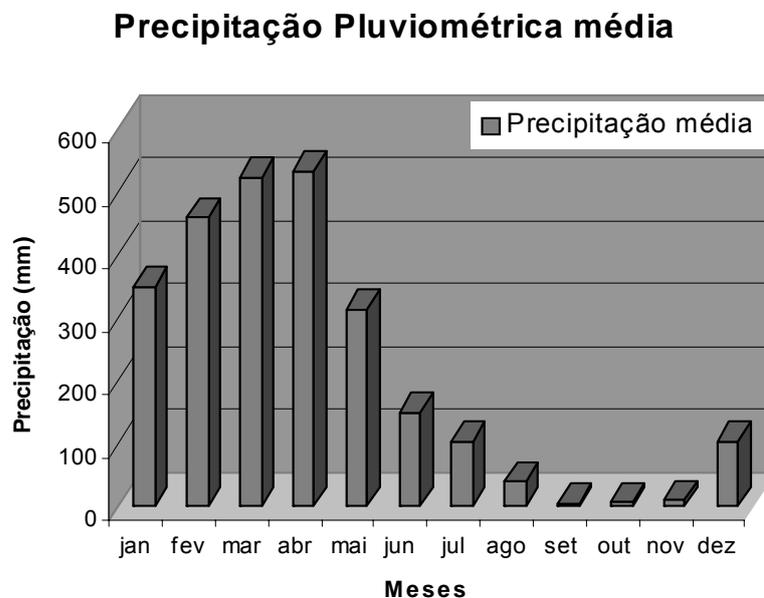


Figura 2.2: Precipitação média anual na cidade de Salinópolis registrada no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995).

A amplitude média da maré na praia do Atalaia é de 4,3m, sendo esta pertencente ao regime de macromaré (>4m) semidiúrna (duas preamares e duas baixamares durante o dia lunar- 24h e 50 min) (Gregório, 2004).

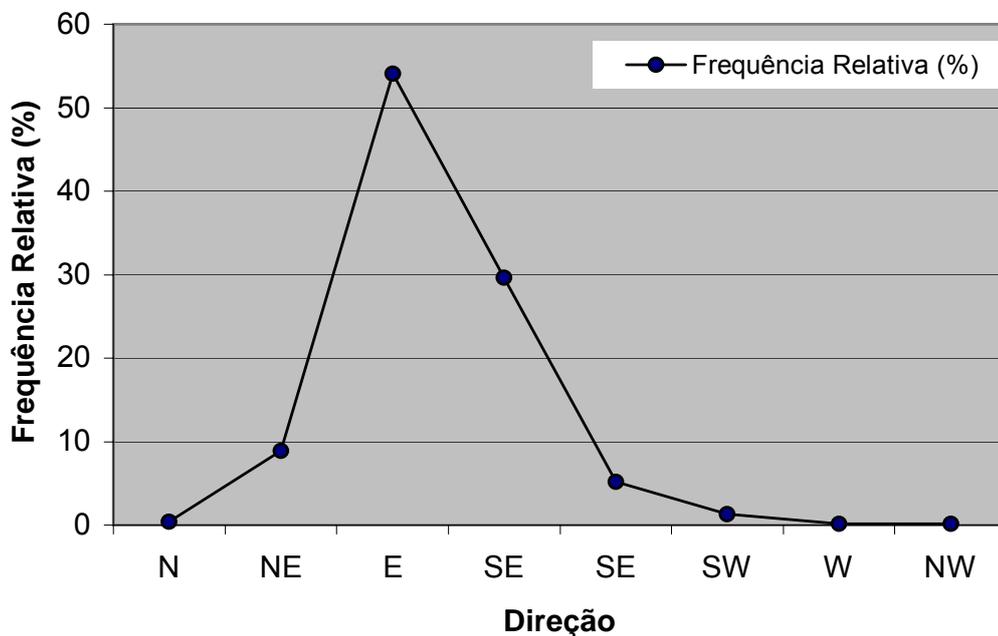
Na planície costeira de Salinópolis o nível médio da maré é de 2,68 m, sendo que o nível médio de maré alta de sizígia de 5,05 m, e nível médio da maré alta de quadratura de 4,04 m de acordo com dados do D.H.N-Departamento de Hidrografia e Sinalização Náutica (*apud* Silva, 1996). Deste modo, áreas extensas são inundadas durante a maré alta.

A energia das ondas é um dos principais fatores controladores das modificações morfológicas das praias (Reineck & Singh, 1980). As praias que apresentam ondas com altura >2m são classificadas como de alta energia, representadas na área pela praia do Atalaia, Farol Velho e Marieta; e aquelas que apresentam ondas com altura <1m são praias de baixa energia, representadas pelas praias do Maçarico e do Cocal (Gregório, 2004).

Segundo dados da DHN (*apud* Silva, 1996), a velocidade das correntes de enchente alcança 0,93 m/s no sentido NE-SW e E-W, e das correntes de preamar chega a 0,97 m/s no sentido SE-NW, as de maré vazante variam de 1,07 a 1,11 m/s no sentido W-E a SW-NE. As correntes de maré enchente alcançam velocidades de 1,13 m/s em junho e julho e 1,43 m/s no sentido E-W no período de março a abril. Nos meses de junho e julho são observadas as maiores correntes de enchente e as menores correntes de vazante, e nos meses de março e abril as maiores correntes de vazante e as menores correntes de enchente.

A direção dos ventos que atingem a Região do Salgado é predominantemente E, seguida das direções SE e NE (Mengawaco, 1995) (**Figura 2.3**), com intensidade fraca a moderada de 7,9 m/s (Silva, 1996) como mostra a **Figura 2.4** Os ventos, as marés e as ondas são os agentes físicos que atuam no modelamento da paisagem da praia. A direção de deslocamento dos campos de dunas eólicas, juntamente com a orientação das ondas que atingem a linha de costa atesta o sentido preferencial dos ventos de nordeste para sudoeste.

Direção Preferencial dos Ventos



Figura

2.3: Direção preferencial dos ventos em Salinópolis registrada no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995)

Velocidade dos Ventos

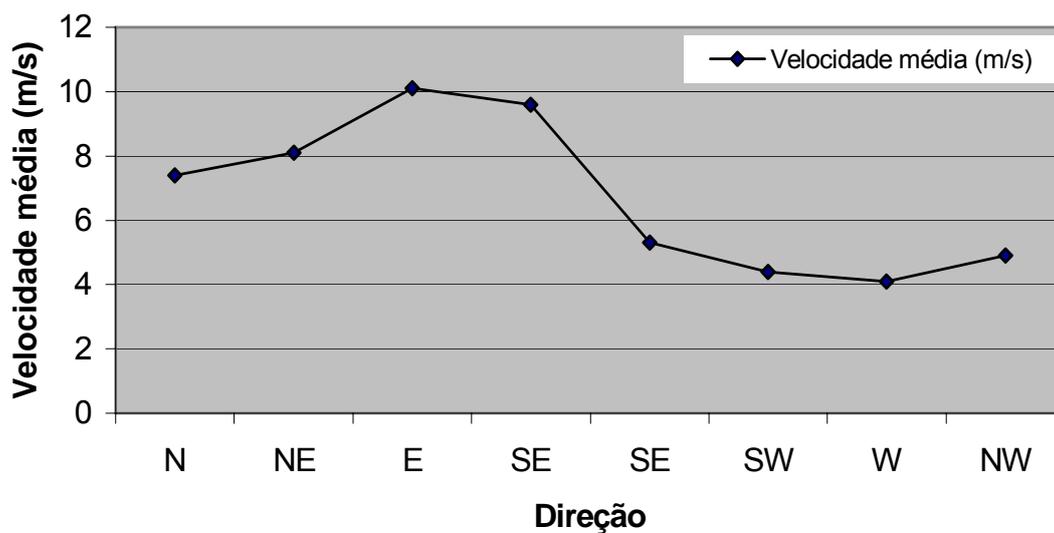


Figura 2.4: Velocidade dos ventos na cidade de Salinópolis registrada no período de 1978 a 1993 (Modificado de Mengawaco, 1995)

CAPÍTULO 3

3. SENSORIAMENTO REMOTO E SIG APLICADOS A GERAÇÃO DE CARTAS DE ISA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO

Neste capítulo será feita uma breve revisão da fundamentação teórica a cerca da utilização de imagens SAR, fusão de dados multisensores, utilização de SIG e geração de mapas de ISA, com a finalidade de fornecer informações sobre esse conjunto de dados e metodologias usadas nesta dissertação, os quais foram de fundamental importância para a interpretação dos dados e confecção dos mapas.

Quanto aos sistemas óticos não se faz necessária tal revisão em virtude da ampla sua utilização em diversas áreas do conhecimento, considerando-se assim que tais fundamentos e metodologias encontram-se devidamente entendidos e aplicados, contudo outras informações podem ser encontradas em: Chavez Jr. et al. (1982); Chavez JR. & Kwarteng (1989); Jensen et al. (1993); Jensen (1996); Irish (1998); Cracknell (1999); Kampel & Amaral (2001).

3.1. IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE UM SAR

A utilização de imagens do sistema ótico em diversas áreas do conhecimento é muito efetiva, porém é limitada nas regiões costeiras tropicais, devido a permanente cobertura de nuvens nesta região que interagem com a Radiação eletromagnética causando perda de informação a respeito dos alvos da terra. Esse fato se torna um obstáculo para a obtenção de imagens com boa qualidade e pouca cobertura de nuvens em regiões costeiras tropicais, como é o caso da região amazônica.

Entre os principais aspectos que justificam o uso de imagens de radar destacam-se o fato de fornecerem informações que complementam as obtidas pelos sensores óticos e a possibilidade de imageamento em condições atmosféricas adversas, uma vez que as microondas podem penetrar em nuvens e chuvas, fator este limitante para o imageamento dos sensores óticos, principalmente nas regiões costeiras tropicais amazônicas (Souza Filho & Paradella, 2002; Dutra *et al.*, 2003).

Outro fator importante é a possibilidade de aquisição de imagens com geometria de imageamento controlada, ou seja, direção de visada, ângulo de incidência, polarização e interferometria. É o único sensor remoto que possibilita a penetrabilidade no dossel vegetal e a geração de Modelos Digitais de Elevação de alta precisão de uma grande área e com uma grande redução no tempo e custos para obtenção dos dados. (Paradella *et al.*, 2000).

Estas são as principais vantagens dos sensores SAR em relação aos sensores óticos, embora também tenham suas limitações quanto a outros fatores tais como distorções geométricas (encurtamento, inversão de relevo e sombreamento), e ruído (*speckle*).

O radar imageador é um sensor de rádio-frequência que permite derivar informações relacionadas a características físicas (geometria e forma) e elétricas dos alvos, o que atribui ao radar elevada sensibilidade, para medir variações na macro-topografia (relevo), micro-topografia (rugosidade superficial), e conteúdo de umidade (Lewis *et al.*, 1998). Enquanto que os sistemas óticos usam a energia solar refletida e fornecem informações sobre as características físico-químicas dos alvos, onde a interação energia-matéria ocorre em escala microscópica (Paradella *et al.*, 2000).

Sendo assim, o ideal seria extrair informações complementares de diferentes regiões do espectro eletromagnético, analisando-as de maneira integrada, os aspectos complementares das diferentes faixas do espectro (microondas, infravermelho e visível). Isso é possível através da fusão de dados, o que possibilita extração de informações pela obtenção do sinergismo do produto híbrido resultante (Souza Filho, 2000; Souza Filho & Paradella 2002).

Todas essas vantagens confirmam que o uso do sensoriamento remoto nas microondas se torna muito eficiente para mapeamento geológico, geologia estrutural aplicada para pesquisa de depósitos minerais e trapas de petróleo, e também para estudos de risco geológico. É importante também em atividades que requerem aquisição de dados de alta repetitividade, como por exemplo, monitoramento ambiental e risco de erosão em zonas costeiras, principalmente naquelas onde há intensa cobertura de nuvens, como na zona costeira tropical amazônica.

No entanto para que todos os dados de sensoriamento remoto adquiridos na faixa das microondas sejam interpretados coerentemente para que se tenha um bom resultado é necessário que o usuário tenha conhecimento dos principais fundamentos relacionados aos sistemas de imageamento do radar, bem como do processamento digital destas imagens e suas aplicações, além de informações confiáveis de campo (Souza Filho *et al.*, 2005).

Sendo assim, no decorrer deste capítulo será feita uma breve demonstração a cerca dos fundamentos mais relevantes dos sistemas de Radar, com o objetivo de esclarecer as principais informações a respeito das características do sistema SAR, dos parâmetros que controlam a geometria de imageamento, as principais características das imagens, bem como a interação das microondas com a superfície terrestre.

3.1.1. Características dos sistemas de Radar imageadores

O termo RADAR deriva do inglês – “Radio Detection And Ranging”, detecção e posicionamento usando faixas de rádio. Existem diferentes tipos de radares, desde os de aproximação em aeroportos, vigilância do espaço aéreo, radares meteorológicos e também os radares utilizados em Sensoriamento Remoto.

Os sistemas de microondas com sensores imageadores, compreendem os sistemas de antena rotatória e os de visada lateral (SLAR- *Side Looking airborne Radar*). O sistema de visada lateral é diferenciado em sistema radar de abertura real (RAR- *Real Aperture Radar*) ou um sistema de abertura sintética (SAR- *Synthetic Aperture Radar*) (Lewis *et al.*, 1998).

No sistema Radar de Abertura Real (RAR) sua resolução em azimute é uma função da distância entre o radar e o alvo (linha de visada) e do diagrama de irradiação horizontal da antena, sendo que a largura do feixe de microondas em azimute é inversamente proporcional ao comprimento da antena e diretamente proporcional ao comprimento de onda do pulso usado. Assim a resolução azimutal é maior para menores comprimentos de ondas, tornando resolução limitada pela dependência entre a distância do alvo e a abertura da antena, o que pode ser um empecilho para algumas aplicações.

No Radar de Abertura Sintética (SAR) opera um sistema que cria uma antena virtual centenas de vezes maior que seu tamanho físico, através do processamento dos sinais recebidos pelo radar e armazenados na memória, o que permite obter resoluções em azimute muito melhores e independentes da distância do alvo. Portanto, a vantagem do sistema SAR é a possibilidade de melhoria na resolução em azimute, sem a necessidade de aumento físico do tamanho da antena, uma vez que com a diminuição do comprimento de onda do feixe utilizado, diminui também a capacidade de penetração do pulso de microondas (Raney, 1998).

3.1.2. Geometria de imageamento do SAR

Os modernos sistemas de Radar usam o efeito Doppler, baseado no deslocamento da plataforma ao longo de sua trajetória (direção em azimute), para simular a antena virtual do Radar de Abertura Sintética - SAR (Raney, 1998). As características geométricas do SAR e seus componentes são demonstrados na **Figura 3.1**.

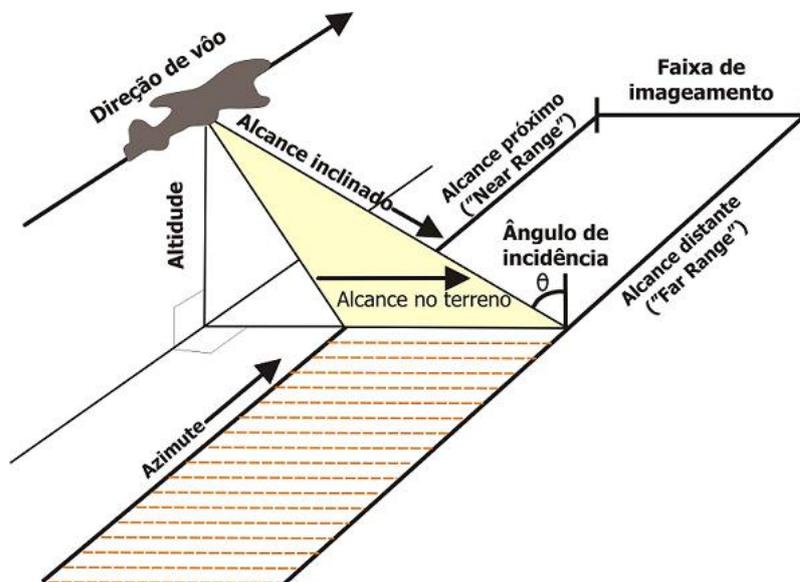


Figura 3.1: características geométricas do Radar de Abertura Sintética (SAR). Ângulo de incidência: ângulo entre a linha de visada do radar e a vertical local com relação ao geóide. Direção de azimute: direção de voo ou a direção ao longo da trajetória. Direção de alcance é a direção transversal à trajetória. Alcance inclinado é a distância medida ao longo da linha entre a antena e o alvo. Alcance no terreno é a distância entre o rastreo no terreno e um objeto. Alcance próximo *near range* é a parte da imagem de radar mais próxima da trajetória de voo ou do nadir, ao passo que o alcance distante *far range* é a parte da imagem de radar mais afastada da trajetória de voo. (Fonte: Raney, 1998)

Nesse sistema de imageamento o conceito de resolução espacial para o radar deve ser considerado segundo as direções em range e azimute. Na resolução em Range, o fator que a controla é a duração e largura do pulso emitido, já a resolução em azimute é controlada pela largura do feixe imageado, segundo o tamanho ou a abertura da antena, isso determina qual a distância mínima entre dois objetos, ao longo da linha de movimentação da plataforma, que pode ser identificada pelo Radar. Assim, para que dois alvos sejam distintos na direção azimutal é necessário que a distância mínima entre eles seja maior que a largura do feixe de iluminação do radar (Lewis *et al.*, 1998).

A escolha da configuração de imageamento para uma determinada aplicação é função de uma série de fatores operacionais como comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência e direção de visada, que devem ser analisados com o objetivo de proporcionar uma imagem de melhor aproveitamento. Portanto, estes parâmetros devem ser considerados na interpretação dessa imagem, e serão discutidos no decorrer deste tópico com o objetivo de relacioná-los com o mecanismo e a intensidade do retroespalhamento do pulso de microondas que é observado na imagem, nos diferentes tipos de superfícies.

3.1.3. Distorções geométricas

As distorções geométricas são causadas pela geometria de imageamento dos radares de visada lateral, isso porque os radares medem distâncias, sendo estas as principais fontes das distorções geométricas, (Lewis *et al.*, 1998). Os tipos de distorções mais comuns nas imagens de radar são: sombras, encurtamento de rampas e inversão de relevo.

3.1.3.1. Sombreamento

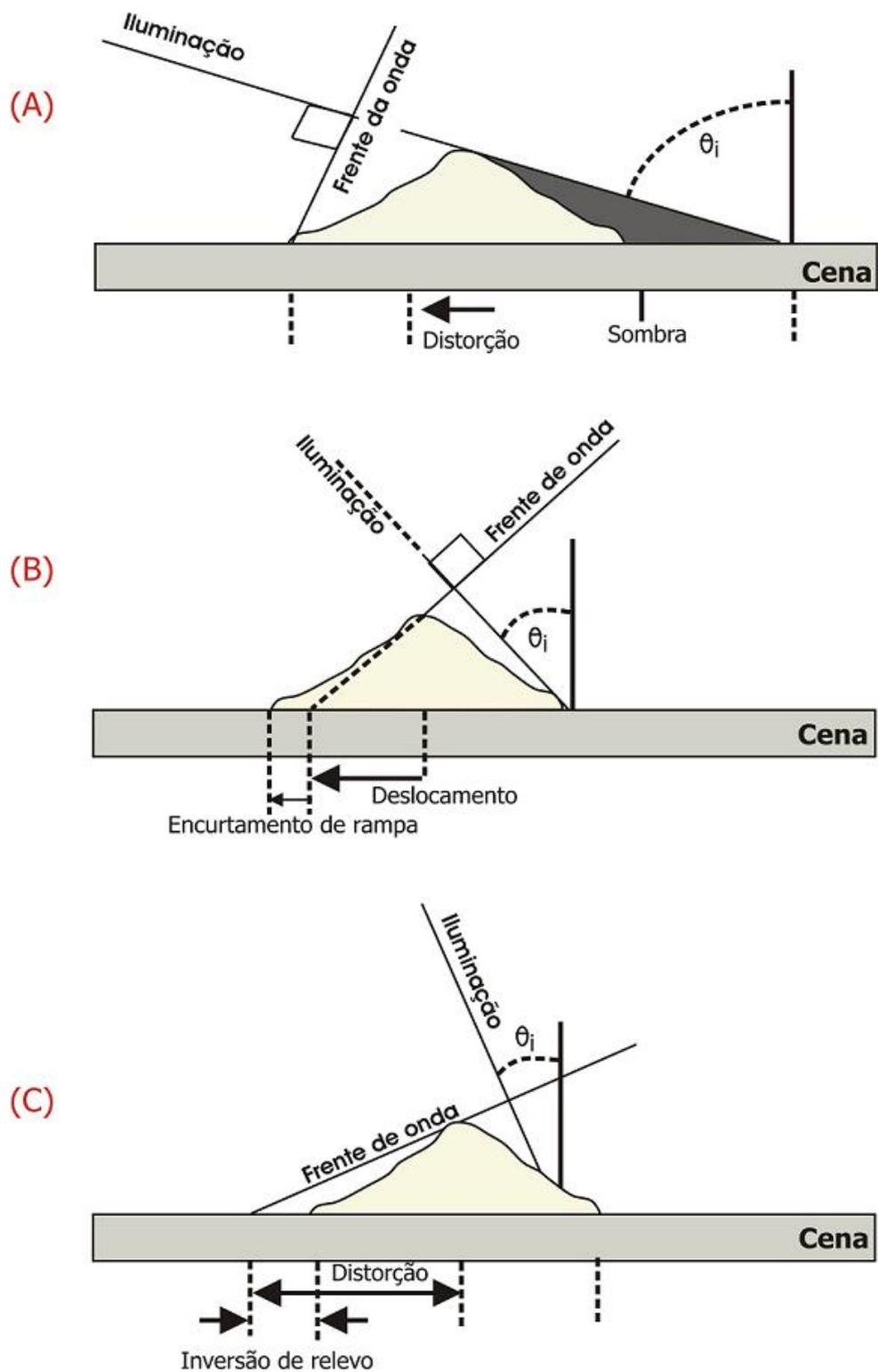
Segundo Lewis *et al.* (1998), a iluminação oblíqua do radar de visada lateral produz sinais de retorno de alta intensidade ou de alto brilho em encostas voltadas para o sensor, de maneira inversa, encostas opostas à iluminação da antena formam sombras escuras, pois a energia dos pulsos transmitidos não alcança essas áreas, e conseqüentemente não retorna ao sensor, formando sombra **Figura 3.2 A**.

3.1.3.2. Encurtamento de Rampa

Este tipo de distorção chamado encurtamento de rampa (*foreshortening*) é decorrente do deslocamento horizontal resultante do uso de ângulos de incidência pequenos, resulta numa aparência de compressão das feições topográficas inclinadas em direção ao radar **Figura 3.2 B**, e uma aparência relativamente brilhante na imagem do relevo afetado, (Paradella, 1996).

3.1.3.3. Inversão de Relevo

Ocorre quando o topo de uma montanha íngreme é imageada antes da base causando um deslocamento do topo em direção ao sensor. Isso ocorre quando a declividade do terreno é mais acentuada que uma linha perpendicular ao pulso incidente como demonstrado na **Figura 3.2 C**, sendo que a resposta na imagem é um efeito serrilhado, (Lewis *et al.*, 1998).



Fonte: Raney, 1998

Figura 3.2: Tipo de distorções inerentes ao imageamento com radar: (A) sombreamento topográfico (B) encurtamento de rampa, (C) inversão de relevo. (Adaptado de Raney, 1998).

3.1.4. Ruídos

As imagens SAR são formadas por uma interferência coerente entre os difusores que formam cada pixel da imagem. O ruído "speckle" é decorrente de flutuações aleatórias do sinal de retorno devido grande número de difusores elementares, dando um aspecto granuloso característico das imagens SAR. Este ruído é inerente ao sistema de imageamento SAR sendo dependente do sinal, ou seja, o ruído é mais intenso onde o sinal eco é maior, (Veiga & Andrade, 2005).

A textura granular é decorrente da configuração dada pelas ondas incidentes em fase e fora de fase, as ondas em fase acarretam em interferência construtiva e aumentam artificialmente o valor digital do pixel, ocasionando maior brilho, já as ondas incidentes fora de fase ocasionam uma interferência destrutiva, aparecendo como pixels escuros, resultando assim em *pixels* claros e escuros dispostos aleatoriamente (Paradella & Bignelli, 1996; Raney, 1998).

3.1.5. Interação das microondas com a superfície.

Os processos que regem a interação das microondas com florestas, ou outros alvos são: transmissão, reflexão e absorção. A transmissão e a reflexão podem ocorrer na superfície de separação (interface) de dois meios adjacentes, enquanto a absorção ocorre em um meio específico (Veiga & Andrade, 2005).

Os diferentes tipos de reflexão podem ser entendidos ao analisar um dossel (conjunto de elementos difusores) ocupando certo volume no espaço sobre uma superfície difusora. O coeficiente de retroespalhamento deste dossel, σ^0 , é representado pela soma das contribuições do próprio dossel, do retroespalhamento direto do solo e de múltiplos espalhamentos entre os elementos difusores do dossel e os da superfície do solo (Veiga & Andrade, 2005). A **Figura 3.3** mostra esquematicamente as contribuições do retroespalhamento de um dossel.

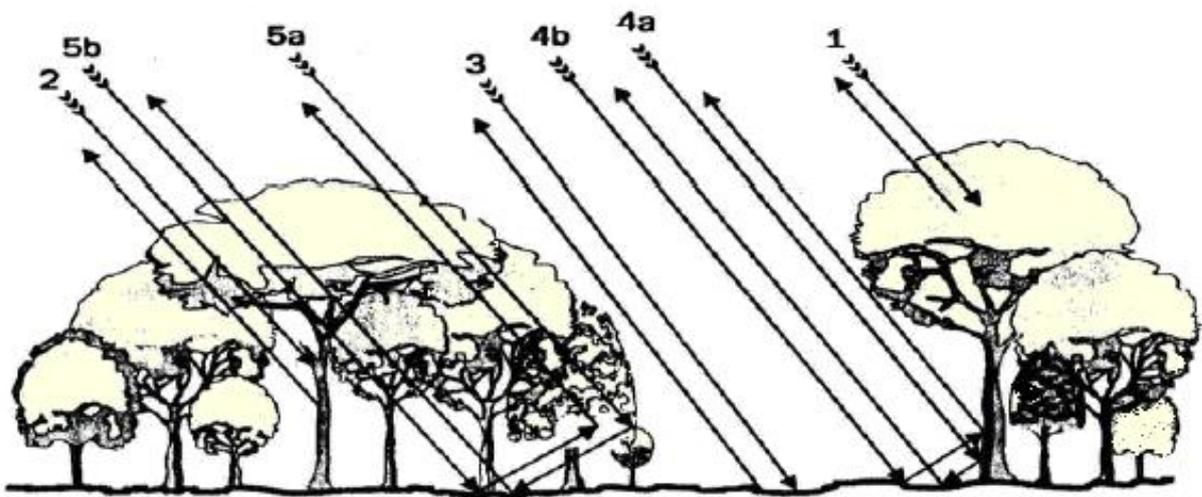


Figura 3.3: Contribuições do retroespalhamento de um dossel: (1) direto do dossel, (2) direto dos troncos, (3) direto da superfície, (4a) interação tronco-solo, (4b) interação solo-tronco, (5a) interação dossel-solo, (5b) interação solo-dossel. (Veiga & Andrade, 2005).

Propriedades do sistema do sensor, propriedades dos alvos, e inter-relações influenciam no retroespalhamento do pulso (*backscattering*) (Lewis *et al.*, 1998; Paradella *et al.*, 2000).

A quantidade de energia espalhada que retorna ao sensor (retroespalhada) está relacionada a um parâmetro conhecido como seção transversal de retroespalhamento do radar, que é a razão entre a energia recebida pelo sensor e a energia que o sensor receberia se a superfície espalhadora tivesse comportamento isotrópico. O coeficiente de retroespalhamento (σ°) é definido como o comportamento do retroespalhamento em função de uma unidade de área, sendo este um parâmetro relacionado diretamente com as propriedades do alvo, sua intensidade é função de dois tipos de parâmetros: 1) parâmetros relacionados com o sistema imageador radar (comprimento de onda, ângulo de incidência, polarização e direção de visada do sensor); 2) parâmetros relacionados com os alvos (constante dielétrica, topografia e rugosidade superficial) (Rosenqvist, 1997; Raney, 1998).

3.2. FUSÃO DE DADOS MULTISENORES

As imagens produzidas por sensores remotos demonstram as características provenientes dos diferentes alvos da superfície da terra, os quais podem ser interpretados de acordo com os seus elementos básicos como cor/tonalidade, textura, tamanho, forma sombra, altura, padrão e localização. As imagens de sensores óticos em particular registram as propriedades físico-químicas dos objetos demonstrando as características espectrais dos alvos, enquanto que as imagens de radar registram características da rugosidade, macrotopografia, microtopografia e umidade da superfície (Harris et al. 1994,1999; Paradella et al. 1997)

A combinação de dados no sensoriamento remoto é conhecida como fusão e é conduzida segundo a regra de que o procedimento deve combinar dados complementares entre si, de modo que o produto resultante forneça mais informação que a dos componentes isoladamente (Paradella et. al, 2001).

O objetivo da fusão digital é produzir um produto de valor agregado, no qual cores e texturas podem ser interpretadas geologicamente em uma única imagem, de modo que o SAR contribui com a informação espacial (estruturas, texturas), as imagens óticas contribuem a informação espectral (cromaticidade) ligada à interação da vegetação com o relevo (Paradella et. al, 2001).

O produto final da fusão através de realce é, tipicamente, uma imagem colorida, na qual o SAR e outros dados foram combinados numa cena atrativa e facilmente interpretável. A fusão de SAR para classificação dos alvos deve resultar em classificações melhoradas para as unidades de interesse (Rosot, 2003).

Inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos com base em fusão de dados radar/óptico (Harris et al. 1994,1999; Mason et al. 1994; Paradella et al. 1997, 2005), e mais especificamente em zona costeira (Souza Filho & Paradella, 2002; Carvalho, 2003; Gonçalves & Souza Filho, 2005; Boulhosa et.al., 2005; Teixeira & Souza Filho, 2005), comprovando que o método tem grande confiabilidade e aplicação.

Para realizar a integração de dados de sensores óticos e microondas são utilizadas técnicas de integração que preservam as características espectrais e espaciais dos dados de entrada garantido a eficácia do método.

As principais técnicas utilizadas na integração SAR/Óptico (Lewis et al. 1998, Harris et al. 1999) são: combinação de bandas (composições RGB), combinações aritméticas, transformações estatísticas (componentes principais, regressões), transformações espaciais (decomposição wavelet multiresolução) e (5) transformações por modelos de cores (IHS). O desempenho em geologia indicou que o modelo IHS forneceu melhores resultados (Paradella et al., 2001).

Na **combinação entre bandas** (composição colorida) três canais de dados são combinados usando um sistema de cores primárias (Red, Green, Blue), formando uma imagem produto colorida que abrange uma ampla faixa de cores. A **combinação aritmética** consiste na combinação entre duas imagens através da multiplicação, adição, subtração e soma.

A **Transformação por Principais Componentes** (Shettigara¹ 1992 *apud* Harris et. al. 1994) correlaciona bandas individuais que são similares visual e numericamente devido ao efeito de sombra da topografia, da sobreposição de janelas espectrais e do próprio comportamento espectral dos objetos, resultando em informações redundantes. Esta técnica de transformação espectral reduz e remove a redundância espectral e produz um novo conjunto de imagens cujas bandas individuais apresentam informações não-disponíveis em outras bandas.

¹ SHETTIGARA, V. K. 1992. A Generalized Component Substitution Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set, *Photogrametric Engineering And Remote Sensing*, 58 (5): 561-567.

A **Tranformação IHS** (Harris et. al. 1994; Paradella et.al, 2001) tem como produto uma imagem colorida de resolução espectral das três bandas ETM e resolução espacial do segundo sensor. Portanto a transformação IHS pode ser utilizada na combinação de imagens de diferentes sensores e com diferentes resoluções espaciais, com o objetivo de melhorar a resolução espacial e abranger o intervalo maior de comprimentos de onda do espectro eletromagnético em uma única imagem. Esta técnica de integração consiste na transformação do espaço de representação de cores RGB, onde as cores são definidas por três quantidades de cores primárias, para o espaço de cores IHS, cujos atributos Intensidade (Intensity), Matiz (Hue) e Saturação (saturation) podem ser analisados e manipulados individualmente. Estes parâmetros descrevem a formação de cores de uma maneira semelhante à que o sistema visual humano percebe as cores e podem ser manipulados analisados e modificados separadamente para um melhor ajuste das cores às características do Sistema visual humano.

Existe uma tendência atual de extrair a informação utilizando dados de sensores remotos envolvendo diferentes regiões do espectroeletrromagnético, valendo-se do sinergismo conseguido com a fusão destes dados ao invés de analisar os dados separadamente. Com isso, aspectos complementares de diferentes faixas (microondas, infravermelho e visível), são integrados em uma imagem, gerando um produto híbrido com qualidade superior para extração de atributos para o mapeamento da zona costeira (Paradella et al, 2001; Souza Filho & Paradella, 2002; Souza Filho & Paradella, 2003).

3.3. A GERAÇÃO DE MAPAS DE ÍNDICES DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAME DE ÓLEO

O óleo ao ser derramado em ambiente natural provoca muitos impactos ao meio ambiente, pois trata-se de uma substância nociva aos organismos, recursos naturais e socioeconômicos da região. A gravidade do impacto de um derramamento de óleo depende de muitos fatores (MMA,2002).

- Volume de óleo derramado.
- Tipo de substrato contaminado.
- Grau de exposição à energia hidrodinâmica
- Características geomorfológicas dos ambientes
- Declividade do litoral
- Propriedades físicas e químicas do óleo (tensão superficial, gravidade específica e viscosidade) que influenciam no modo que a mancha de óleo irá se espalhar na água e penetrar nos substratos.
- Propriedades físico-químicas da água
- Amplitude de maré
- Características oceanográfica e climatológica, tais como, a distribuição das massas d'água, regimes de ventos, correntes, ondas e marés, características dos sistemas hídricos, e suas variações sazonais.

Os mapas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleos constituem uma ferramenta essencial para o planejamento de medidas de prevenção e de combate aos acidentes, visando à mitigação dos danos gerados pelo óleo (Abdel-Kader et al., 1998). Apresentam levantamentos detalhados do ambiente litorâneo para atender a todos os níveis de derramamento, desde grandes vazamentos em áreas remotas (offshore), passando por derrames de porte médio a alguma distância das instalações da indústria do petróleo (ao largo do litoral), até incidentes localizados (em pontos específicos da costa).

Desta forma, os mapas de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo são utilizados como ferramenta nas seguintes situações principais:

- Planos de contingência, no planejamento de prioridades de proteção, estratégias de contenção e limpeza / remoção de resíduos, e quantificação dos recursos necessários ao combate a derramamentos;
- Operações de combate a derramamentos de óleo, possibilitando a avaliação geral de danos e facilitando a identificação dos locais sensíveis, rotas de acesso, áreas de sacrifício e quantificação / localização de equipamentos de resposta;
- Planejamento ambiental, na avaliação de recursos que possam estar em perigo, podendo ser uma ferramenta de um estudo de impacto ambiental, auxiliando na definição de locais de instalação de empreendimentos para a indústria de petróleo. De modo mais específico, reforça os instrumentos políticos e administrativos de ordenamento territorial.

Os mapas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleos trabalham com três tipos de informações: índice de sensibilidade da costa, recursos biológicos e atividades socioeconômicas (NOAA, 2002), sendo que os dois últimos não fazem parte do escopo deste trabalho e sim de um projeto integrado multidisciplinar, o Projeto PIATAM-mar.

O índice de sensibilidade da costa (objetivo deste trabalho) é determinado de acordo com a escala dos índices de sensibilidade ambiental, a capacidade de penetração do óleo, e a facilidade de limpeza.

O **índice de sensibilidade ambiental (ISA)** ao óleo hierarquiza os diversos tipos de contorno da costa em uma escala de 1 a 10, sendo o índice tanto maior, quanto mais sensível for o ambiente, baseado nas características geomorfológicas e sedimentares dos referidos ambientes (Jensen et al., 1993). O tipo de substrato, declividade do litoral e grau de exposição à energia de ondas e marés também são parâmetros importantes a serem considerados para identificação e classificação do ISA.

O *tipo de substrato* é um fator que está diretamente relacionado com a permeabilidade e conseqüentemente com a capacidade de infiltração do óleo, e tempo de permanência do óleo, assim em ambientes com sedimentos grossos bem selecionados possuem alta capacidade de infiltração do óleo. Já em ambientes com substratos não consolidados o óleo tem tendência a se movimentar juntamente com os sedimentos, diminuindo o tempo de permanência do óleo. O tipo de substrato também

afeta a trafegabilidade e possibilidade de locomoção na região e também pode revelar tipos de comunidades bióticas com habitat específico importantes.

A *declividade do litoral* é um fator que determina a extensão da zona intermarés, e conseqüentemente o seu efeito na reflexão e quebra das ondas. Em litorais muito inclinados ocorre rompimento abrupto e reflexão das ondas, com elevadas velocidades de espraiamento e refluxo na encosta ou face da praia e, conseqüentemente o tempo de permanência do óleo será menor, com rápida limpeza natural da área atingida. O inverso acontece em ambientes com baixa declividade, tais como planícies de maré e faixas de mangue. Já as Costas de baixa declividade, como planícies de maré e faixas de mangue, estão sujeitas a níveis de energia mais baixos o que dificulta a ação de limpeza natural, acarretando em maior tempo de permanência do óleo no substrato.

O *grau de exposição à energia de ondas e marés* determina uma associação direta com as comunidades biológicas existente na área e com o tempo de permanência do óleo que tende a ser maior em ambiente abrigado, e menor em ambientes de alta energia de ondas e marés, pois estes proporcionam a limpeza natural e a reconstituição da linha de costa, a partir da refração e reflexão das ondas, ou afastam o óleo e minimizando os seus efeitos. As variações de maré (juntamente com a declividade do perfil topográfico) determinam a largura da zona intermarés, ou seja, a superfície mais sujeita a ser coberta por óleo no caso de derramamento. As correntes de maré tendem a ser maiores com o aumento da amplitude de maré.

Esta abordagem proporciona uma classificação baseada no entendimento do ambiente, como os processos físicos e o substrato, que produzem tipos específicos de ambientes e permitem prever padrões de comportamento e transporte do óleo derramado. Para definição dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de petróleo e derivados serão utilizados os métodos da NOAA ,2002 e PETROBRAS, 2002.

O levantamento de todos os **recursos biológicos** incluindo animais e plantas indicam os locais de concentrações de espécies, áreas de alimentação, reprodução, berçários, nidificação, e rotas de migração de espécies, além de listar as espécies em perigo de extinção. A geomorfologia é também importante, pois é uma característica que condiciona o tipo e a densidade das comunidades biológicas presentes na área.

A metodologia proposta pela NOAA (2002) é empregada com sucesso no mapeamento da sensibilidade ambiental a derramamento de óleo no mundo, porém as complexidade e peculiaridades da Região Amazônica, quanto à dinâmica dos processos ambientais envolvidos (sedimentares, geomorfológicos, oceanográficos e biológicos), além da fragilidade e importância desse rico ecossistema, requer a utilização de uma abordagem específica para região, que considere suas particularidades. Souza Filho *et al.* (2004) propuseram uma classificação de ISA para a zona costeira amazônica, que foi modificada da proposta criada pela NOAA (2002) e PETROBRAS (2002), conforme descrito na **Tabela 3.1**, A qual será utilizada neste trabalho.

Tabela 3.1: Proposta de adaptação dos métodos NOAA (2002) e PETROBRAS (2002) para a zona costeira amazônica.

<i>ISA - Índice de sensibilidade ambiental</i>	<i>Ambientes costeiros amazônicos</i>
1A	Costas rochosas expostas
1B	Estruturas sólidas expostas construídas pelo homem
1C	Falésias rochosas expostas com talus na base
2	Escarpas expostas e declives íngrimes em argila
3A	Praias com granulometria fina a média
3B	Escarpas expostas com declives íngrimes em areia
4	Praias e planícies de marés arenosas com granulometria grossa
5	Praias e bancos de cascalhos com areia
6	Enrocamentos.
7	Planícies de marés expostas
8A	Escarpas protegidas em leitos rochosos e sedimentos – Paleofalésias
8B	Estruturas sólidas protegidas construídas pelo homem
8C	Enrocamentos protegidos
8D	Costas com turfa
9A	Planícies de maré lamosas protegidas
9B	Bancos e planícies de marés lamosas vegetados.
9C	Campos herbaceous hipersalinas (hypersalt marsh)
10A	Campos herbaceous salinos e salobros (Salt and brackish water marshes)
10B	Campos herbaceous doces e vegetação aquática (Freshwater marshes, aquatic vegetation)
10C	Manguezais de intermaré
10D	Manguezais de Supramaré

Fonte: Souza Filho et al., 2004.

3.4. UTILIZAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) PARA O MAPEAMENTO DO ISA

A utilização de dados de sensores remotos orbitais, em função da rapidez, precisão e periodicidade de obtenção desses dados, permite a produção de mapas atualizados, e em escala adequada, com maior rapidez, acurácia e menor custo (Souza Filho & Paradella, 2002).

Existe uma tendência atual de extrair a informação utilizando dados de sensores remotos envolvendo diferentes regiões do espectro eletromagnético, valendo-se do sinergismo conseguido com a fusão destes dados ao invés de analisar os dados separadamente. Com isso, aspectos complementares de diferentes faixas (microondas, infravermelho e visível), são integrados em uma imagem, gerando um produto híbrido com qualidade superior para extração de atributos para o mapeamento da zona costeira (Souza Filho & Paradella, 2002; Souza Filho & Paradella, 2003, Paradella et al, 2001).

Segundo Castro *et.al.*, 2003, o Geoprocessamento possibilita o tratamento eficaz e rápido dos dados ambientais agilizando a execução de processamento desses dados e garantindo confiabilidade nos resultados finais, tornando-se assim uma ferramenta imprescindível nos estudos de impactos ambientais.

Dentre as vantagens de fazer uso de SIG no mapeamento de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo destacam-se: capacidade de armazenar dados espaciais e não espaciais em um único sistema, podendo estes ser de diferentes fontes, escalas espaciais e temporais; possibilidade de executar consultas para a tomada de decisão das equipes de contingência; permite a freqüente e rápida atualização dos dados sempre que necessário; permite ambigüidade de usuários, o que determina o nível de sucesso de sua introdução em um ambiente de trabalho (Krishman, 1995).

Segundo Câmara (1995) o SIG pode ser utilizado de três maneiras: como ferramenta para produção de mapas temáticos, como suporte a análise espacial de fenômenos, e como um banco de dados geográficos com funções de armazenamento e recuperação imediata da informação espacial.

A utilização da tecnologia de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG) podem auxiliar fortemente na elaboração de mapas de índices de

sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, principalmente em áreas de difícil acesso ou com base cartográfica desatualizada (Jensen et al., 1993). Dentro desse contexto diversos trabalhos tem sido realizados com o objetivo de mapeamento de ISA (Gonçalves & Souza Filho, 2004, 2005) e demonstraram que constituem uma importante ferramenta técnico-gerencial para priorização dos ambientes a serem protegidos em caso de derramamento de óleo na região.

Para isso as informações sobre os recursos sensíveis ao óleo, necessários para o planejamento e execução dos trabalhos de limpeza do óleo derramado, podem ser inseridas em um SIG, o que possibilita espacializar essas informações em um mapa. Durante a consulta ao banco de dados, as equipes de limpeza devem ser capazes de resgatar a disponibilidade de equipamentos a serem utilizados nos planos de contingência e possibilidade de acesso, tudo isso em tempo real (Jensen et.al., 1990).

Dentro desse contexto diversos trabalhos tem sido realizados com o objetivo de mapeamento de ISA na região amazônica (Souza Filho *et. al.*, 2004; Gonçalves & Souza Filho, 2004, 2005; Gonçalves, 2005; Teixeira, 2006) e demonstraram que constituem uma importante ferramenta técnico-gerencial para priorização dos ambientes a serem protegidos em caso de derramamento de óleo na região.

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS UTILIZADOS

Neste capítulo será feita uma breve descrição das principais características dos sensores remotos óticos (Landsat 7 ETM+) e microondas (RADARSAT-1 Wide-1) e do Modelo Digital de Elevação (SRTM) usados nesta dissertação. Dados cartográficos existentes como carta topográfica produzida por Pereira (1995) e Mapas Geológico-Geomorfológicos (Silva, 1996; Silva Jr, 1998) serviram de base para interpretação preliminar das unidades Geomorfológicas. Também foi de fundamental importância o uso de ortofotos digitais obtidas por um levantamento aerofotogramétrico na região Salinópolis/Atalaia em janeiro de 2002 (COHAB, escala 1:2000) bem como o conhecimento pretérito da área em estudo.

4.1. SATÉLITE LANDSAT ETM+7

Lançado em 15 de abril de 1999, pelo lançador Delta-II Expendable Launch Vehicle. Apresenta resolução temporal de 16 dias e a área imageada é 185x185Km (Irish, 1998).

O sensor ETM (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) a bordo do Landsat 7 opera em 8 bandas espectrais: 6 bandas multiespectrais (1,2,3,4,5 e 7) com 30m de resolução, 1 banda pancromática (8) com 15m de resolução, e 1 banda termal (6) com 60m de resolução. Na **Tabela 4.1** segue uma descrição das faixas espectrais das bandas do sensor ETM+.

Tabela 4.1: Faixa espectral das bandas do sensor ETM+

Sensor	Banda	Faixa espectral (μm)
ETM+	1	0,45-0,52 (azul)
	2	0,52-0,60 (verde)
	3	0,63-0,69 (vermelho)
	4	0,76-0,90 (infravermelho próximo)
	5	1,55-1,75 (infravermelho médio)
	6	10,40-12,50 (infravermelho termal)
	7	2,08-2,35 (infravermelho médio)
	8	0,50 - 0,90 μm

As características específicas destas imagens Landsat ETM+ utilizadas neste trabalho são descritas na **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2: Características das imagens Landsat 7 ETM+

Plataforma	Data de aquisição	Ângulo de incidência	Área imageada (km)	Resolução espacial (m)	Bandas
Landsat 7 (223-60 e 223-61) Sensor ETM+	3 agosto 2001	Nadir	185x185	30- multi 15- pan	1,2,3,4,5, 7 8

4.2. SATÉLITE RADARSAT-1

Desenvolvido pelo Canadá para monitorar mudanças ambientais e características dos recursos naturais foi lançado em 04 de novembro de 1995. Opera com radar SAR (Radar de Abertura Sintética) na faixa das microondas, banda C.

Possui os seguintes modos de operação com características distintas: Standard, Wide, Fine, ScanSAR, Extended, com combinações que resultam em 35 modos de imageamento, nas quais a resolução espacial das imagens varia de 10 a 100 metros, a faixa imageada varia de 50 km x 50 km até 500 km x 500 km, e os ângulos de incidência variam de 10° a 59° de acordo com o modo de imageamento (Parashar et al., 1993)

O RADARSAT-1 pode adquirir imagens tanto em órbita ascendente, com visada para leste, como em órbita descendente, com visada para oeste.

As imagens RADARSAT-1 utilizadas neste trabalho são do tipo Path image, as quais possuem formato CEOS, com 16 bits. As características específicas destas imagens são descritas na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.3: Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas

Plataforma	RADARSAT-1
Modo	Wide-1
Data de aquisição	19 de Janeiro de 2003, 12 de Fevereiro de 2003, 04 de Outubro de 2004, 10 de Setembro de 2004
Órbita	descendente
Ângulo de incidência	20-31°
Número de looks	1x4
Tamanho da imagem - pixel x linha	15,000x15,000
Tamanho do pixel (m) - range x azimuth	12,5x12,5
Área imageada (km)	150 x 150
Resolução espacial (m)	90

4.3. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM

Os dados de elevação utilizados nesta dissertação foram adquiridos pela missão espacial SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) realizada em fevereiro de 2000 que teve como objetivo coletar dados topográficos usando técnicas de Interferometria nas bandas X e C. (Rabus et.al, 2003).

A imagem interferométrica consiste no produto gerado por um par de imagens complexas que contêm as informações de amplitude e fase, onde a diferença de fase para cada par de pixels das imagens originais vai corresponder à fase de cada pixel da imagem interferométrica, que por sua vez permite obter informação sobre a altitude da superfície terrestre, possibilitando a geração de um Modelo Digital de Elevação - DEM. (Rabus *et al.*, 2003; Dutra *et al.*, 2003, Veiga & Andrade, 2005).

O conjunto de dados obteve DEMs georreferenciados em três resoluções, 30m, 90m e 1 Km em formato GeoTiff. Foram utilizadas nesta dissertação as imagens na banda C com 90m de resolução, que estão disponíveis na Internet gratuitamente no site: <http://srtm.usgs.gov/> (**Tabela 4.5**)

Tabela 4.4: **Propriedades dos dados SRTM utilizadas neste trabalho.**

Parâmetro	Produto SRTM - DEM
Resolução espacial	90x90m
Datum Vertical	WGS 84
Unidade	m
Grid (lat x long)	3x3 arc segundo
Acurácia horizontal	Absoluta < 60m Relativa < 45m
Acurácia vertical	Absoluta < 16m Relativa < 10m
Formato da imagem	16 bits

CAPÍTULO 5

5. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS ORBITAIS PARA O RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS DA COSTA NORDESTE DO PARÁ

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos neste trabalho relacionado a utilização das tecnologias de sensoriamento remoto para o mapeamento dos ambientes costeiros, abrangendo uma avaliação dos sensores na identificação das unidades de paisagem da área. Desta forma será descrita detalhadamente a metodologia do processamento digital das imagens, do reconhecimento dos ambientes através da resposta espectral e do mapeamento dos ambientes costeiros.

A metodologia de trabalho adotada foi iniciada com o levantamento e aquisição dos dados de sensores remotos e levantamento bibliográfico. A etapa seguinte consistiu no Processamento digital das imagens Landsat ETM+7, SRTM e RADARSAT-1. De posse desses dados processados foi realizado o mapeamento das unidades de paisagem que foram demonstradas em mapas temáticos com informações geológicas e geomorfológicas.

5.1. PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS

5.1.1. Imagens Landsat ETM⁺ 7

Inicialmente foi feita a **leitura e mosaico das imagens**, Landsat ETM⁺ 7 órbita/ponto 223/60 e 223/61 através do programa MOSAIC do PCI Geomática 9.1 e o seguimento do **recorte** da área de interesse.

Posteriormente foi realizada uma análise estatística das imagens com o objetivo de calcular e apresentar parâmetros estatísticos das bandas espectrais como média, mediana, Matriz de covariância, matriz de correlação. Através da análise desses parâmetros foi possível estabelecer a composição colorida na qual se observa maior

quantidade de informações através do **Calculo do OIF** (Optimum Index factor) de acordo com Chavez Jr. et al., (1982).

5.1.1.1. Pré-processamento

O pré-processamento das imagens ETM+7, tem como finalidade corrigir distorções radiométricas e geométricas das imagens e melhorar sua qualidade. As técnicas utilizadas nesta fase foram: correção atmosférica e correção geométrica.

5.1.1.1.1. Correção atmosférica

A correção atmosférica foi realizada no software PCI Geométrica 9.1 utilizando modo ATCOR, onde se encontram disponíveis os arquivos de calibração para a maioria dos sensores. Os parâmetros considerados na geração da correção atmosférica das bandas multiespectrais da imagem Landsat ETM⁺ 7 foram os seguintes:

- Informação de elevação: 0.2 Km
- Informação do sensor: Tipo: Landsat 7 ETM+; Tamanho do pixel: 30m; Data de aquisição da imagem: 03 de agosto de 2001; Arquivo de calibração: etm_standard1.cal
- Informações da atmosfera: Atmosfera da área: Oceânica; Condições: tropical; Temperatura da atmosfera: tropical
- Parâmetros de correção: Zenith Solar: 87.274490; Azimuth solar: 72.507202; Visibilidade: 30 Km; Adjacência: 1 Km; Radiância do fator de conservação da temperatura (Kelvin): 210.6
- Fator a ser corrigido: Absorção da radiação solar

A *correção atmosférica* aplicada possibilitou um aumento de contraste das cenas, pois removeu valores adicionais de nível de cinza resultantes da interação da radiação com a atmosfera, com isso houve uma melhora na qualidade visual das imagens otimizando a classificação das imagens.

5.1.1.1.2. Correção geométrica

As imagens geradas por sensores remotos possuem vários tipos de distorções geométricas que podem ser causadas por fatores relacionados com a curvatura da Terra, geometria de imageamento, relevo ou variações de posicionamento durante o processo de aquisição dos dados (Toutin, 1995). A correção geométrica corresponde a uma transformação geométrica simples baseada em modelos matemáticos polinomiais e paramétricos para estabelecer um mapeamento entre coordenadas de imagem (linha, coluna) e coordenadas geográficas conhecidas de um sistema de referência através da seleção de GCPs (*Ground Control points*) correlacionáveis na imagem e na base georreferenciada.

A correção geométrica das imagens ETM foi dispensada, pois foram adquiridas em formato Geocover com processamento de ortorretificação já realizado, cuja 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) .

5.1.1.2. Processamento

As técnicas de processamento aplicadas neste trabalho foram: composição colorida, realce, decorrelação, transformação por principais componentes e classificação automática.

5.1.1.2.1. Composição colorida

A análise do OIF realizada nas bandas 1,2,3,4,5 e 7 possibilitou selecionar as bandas espectrais mais indicadas para gerar a composição colorida. Os maiores desvios padrões e variâncias foram encontrados nas bandas 4, 5 e 1 respectivamente, indicando que estas bandas apresentam maiores variações de níveis de cinza e portanto, maior resposta dos alvos presentes na cena.

Os parâmetros estatísticos usados para calcular a matriz de covariância, matriz de correlação e OIF são mostrados nas **Tabelas 5.1 e 5.2**.

Tabela 5.1: Estatística das seis bandas espectrais da Imagem Landsat 7

Bandas	Média	Desvio padrão
1	53,5705	29,5854
2	42,7292	24,3652
3	33,5385	21,9045
4	58,8937	39,8748
5	50,1152	35,7628
7	24,1512	18,1036

Tabela 5.2: Matriz de covariância entre as bandas multiespectrais

Bandas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
1	875,30					
2	713,52	593,67				
3	601,85	513,01	479,81			
4	735,19	580,85	383,79	1590,00		
5	679,22	561,72	438,51	1304,53	1278,98	
7	362,48	306,36	265,87	559,13	616,07	327,74

Na matriz de correlação foi possível observar que existe uma maior correlação entre as bandas pertencentes à mesma faixa do espectro eletromagnético, ou seja, entre as bandas 1, 2 e 3, do visível, e entre as bandas 5 e 7, do infravermelho médio, como pode ser observado na **(Tabela 5.3)**.

**Tabela 5.3: Matriz de correlação entre as bandas dada por:
Coeficiente de correlação $(x,y) = \text{desvio padrão } (x) \times \text{desvio padrão } (y)$**

Bandas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
1	1,0000					
2	0,9898	1,0000				
3	0,9287	0,9612	1,0000			
4	0,6232	0,5979	0,4394	1,0000		
5	0,6419	0,6446	0,5598	0,9148	1,0000	
7	0,6768	0,6945	0,6705	0,7746	0,9516	1,0000

Através do cálculo OIF foram selecionadas as bandas 3,4,5 como a melhor combinação para uma composição colorida que apresenta a maior quantidade de informação e menor redundância entre as bandas, como pode ser observado na **Tabela 5.4**.

Tabela 5.4: Calculo 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: $\frac{\text{Desvio Padrão}(x)+\text{Desvio Padrão}(y)+\text{Desvio Padrão}(z)}{\text{Correlação}(x,y)+\text{Correlação}(x,z)+\text{Correlação}(y,z)}$

5.1.1.2.2. *Realce*

A aplicação de realce tem como objetivo melhorar a qualidade visual das imagens para facilitar a discriminação dos objetos presentes, possibilitando melhores resultados na interpretação (Jensen, 1996). Este procedimento foi realizado através da manipulação dos histogramas de cada banda espectral, os quais representam a distribuição estatística dos níveis de cinza na imagem. A técnica de realce linear foi aplicada em todas as bandas espectrais individualmente através da manipulação do histograma, possibilitando uma distribuição uniforme dos Níveis de Cinza no intervalo de valores de 0 a 255.

O *realce* pelo método de contraste linear utilizado resultou em uma imagem de melhor contraste e de boa qualidade para interpretação visual e atingiu resultados satisfatórios como pode ser observado na **Figura 5.1 (a)** mostrando um detalhe da imagem antes e depois da aplicação de realce linear. O contato entre o Planalto costeiro e o manguezal foi observado com bastante detalhe após a aplicação do realce,

assim como os bancos de areia denominados aqui de delta de maré vazante, e todos os outros ambientes costeiros foram delimitados mais facilmente.

5.1.1.2.3. Decorrelação

A decorrelação é um procedimento que tem como objetivo eliminar informações redundantes para que o espaço de cores seja mais bem utilizado. Foi aplicada para as bandas 3, 4 e 5 selecionadas pelo cálculo do OIF, este procedimento foi realizado no modo DECORR do PCI Geomática.

Na *decorrelação* a imagem resultante apresentou uma composição com cores mais intensas e saturadas, onde a variância dos respectivos canais foi 79,63%, 16,72% e 3,65%, alcançando resultados satisfatórios e realçaram ainda mais a resposta espectral do solo exposto, dunas e praias na imagem. Na **Figura 5.1 (b)** observa-se um detalhe da imagem antes e depois da aplicação da remoção de correlação.

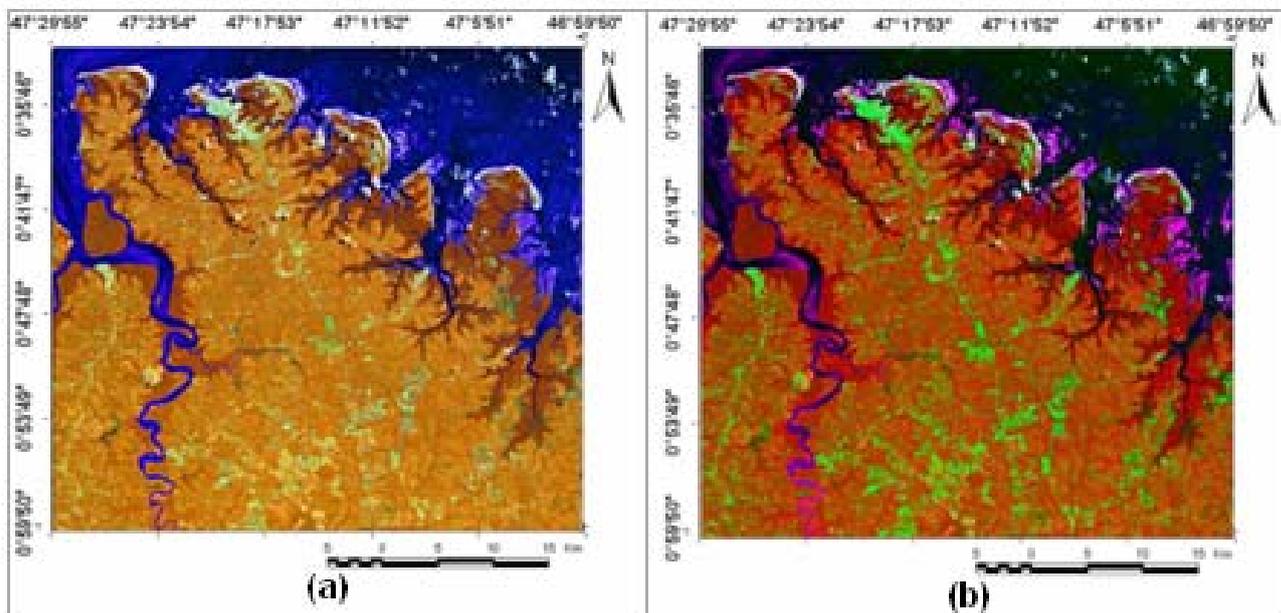


Figura 5.1: Composição colorida 4R 5G 3B sem realce (a), com realce linear (b) e com decorrelação aplicada na composição 453 (c).

5.1.1.2.4. Transformação por principais componentes

Essa técnica considera que algumas bandas apresentam grande quantidade de informação com alta correlação, em resposta a existência de materiais com respostas espectrais semelhantes na superfície terrestre (Jensen, 1996; Chaves, 2002).

A transformação por principais componentes (Shettigara¹ *apud* Harris, et. al. 1994) foi aplicada com o objetivo de reduzir e remover a redundância espectral entre as bandas e produzir uma nova imagem cujas bandas individuais apresentam informações não-disponíveis em outras bandas.

O número de componentes principais é igual ao número de bandas espectrais utilizadas e são ordenadas de acordo com o decréscimo da variância de nível de cinza. Portanto a primeira componente concentra a grande maioria da informação antes distribuída em várias bandas. Nesta componente contém a informação de brilho associada às sombras de topografia e às grandes variações da reflectância espectral geral das bandas. A segunda componente principal e as subseqüentes apresentam gradativamente menos contraste entre os alvos e são desprovidas de informação topográfica, devido à ausência de sombreamento, sendo que as ultimas componentes apresentam mais ruídos, indicando a compressão dos dados nos primeiros canais de componentes principais. Existem dois métodos de geração de principais componentes: Principal Componente seletiva e Principal Componente não seletiva.

¹ SHETTIGARA, V. K. 1992. A Generalized Component Substitution Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set. *Photogrametric Engineering And Remote Sensing*, 58 (5): 561-567.

Na **principal componente seletiva** foi possível gerar dois conjuntos de principais componentes: das bandas 1,2 e 3 cuja primeira componente concentrou 96,96% da variância; e das bandas 5 e 7 onde a primeira componente concentrou 91,51% da variância. A composição colorida foi formada entre a primeira componente das bandas 1, 2 e 3, a primeira componente das bandas 5 e 7, e a banda 4, abrangendo assim toda a faixa espectral das bandas multiespectrais em apenas um conjunto de três canais. Na **Tabela 5.5** e **Tabela 5.6** são mostrados os parâmetros estatísticos de autovalores, desvio padrão e variância das principais componentes do visível (1, 2 e 3) e Infravermelhos (5 e 7).

Tabela 5.5: Valores de variância dos componentes principais resultantes da TCP 1, 2 e 3 correspondentes à faixa do visível.

PC 1 2 3 (visível)	Autovalor	Desvio Padrão	Variância (%)
PC 1	549,4826	23,4410	96.96%
PC 2	13,3102	3,6483	2.35%
PC 3	3,9018	1,9753	0.69%

Tabela 5.6: Valores de variância dos componentes principais resultantes da TCP 5 e 7 (Faixa do infravermelho).

PC 5 7 (IV)	Autovalor	Desvio Padrão	Variância (%)
PC 1	545,3362	23,3524	91.51%
PC 2	50,5802	23,3524	8.49%

Na **principal componente não seletiva** a primeira componente reuniu 68,56% da variância e a três primeiras PC reuniram 97,22% da variância das seis bandas originais (**Tabela 5.7**). A composição colorida foi formada entre a primeira, segunda e terceira componente.

Tabela 5.7: Valores de variância dos componentes principais resultantes das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (visível e infravermelho).

PC (1 2 3 4 5 e 7)	Autovalor	Desvio Padrão	Variância (%)
PC 1	1361,0077	36,8918	68.56%
PC 2	496,7228	22,2873	25.02%
PC 3	72,2737	8,5014	3.64%
PC 4	40,8305	6,3899	2.06%
PC 5	10,7021	3,2714	0.54%
PC 6	3,4827	1,8662	0.18%

Vale ressaltar que a interpretação da cor resultante desse processamento não está fundamentada nos princípios físicos do sensoriamento remoto, pois as informações contidas em cada banda foram condensadas e transformadas em novas cores, as quais não tem nenhuma relação com a refletância dos diferentes alvos e, portanto não podem ser associadas com as curvas espectrais.

5.1.1.2.5. Classificação automática

A técnica de classificação automática tem como objetivo extrair as informações de forma mais rápida e precisa, porém sem considerar aspectos subjetivos da interpretação visual, como textura e geometria. Isso é feito pela aplicação de regras de decisão, que são baseadas nos parâmetros estatísticos das imagens usadas, agrupando todos os pixels de uma imagem digital em várias classes ou temas.

Existem duas técnicas de classificação automática de imagens de sensores remotos a supervisionada e a não-supervisionada. Na técnica de classificação não supervisionada o computador classifica a imagem utilizando um algoritmo, que é baseado no agrupamento de pixels que apresentam respostas espectrais semelhantes no espaço de atributos das bandas utilizadas (Jensen, 1996). Na classificação supervisionada, o usuário define áreas de treinamento em função de seu conhecimento prévio sobre a área, que representam as principais unidades de paisagem e que servirão para modelar a assinatura espectral dos diferentes usos e coberturas do solo, gerando assim, parâmetros estatísticos que servirão como critério de decisão para determinar a que tema determinado pixel pertence (Fonseca *et al.*, 2000).

Nesse trabalho foi aplicada unicamente a técnica de classificação não-supervisionada na imagem Landsat, com o objetivo de excluir qualquer influência do usuário durante o processo, tendo em vista que este é um método que classifica a imagem pixel a pixel de acordo com sua resposta espectral. Assim, foi possível avaliar a viabilidade da classificação automática para o mapeamento das unidades de paisagem da área em estudo e seus respectivos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.

O procedimento para classificação não supervisionada consistiu em três etapas: 1) Geração da classificação não supervisionada para o número máximo de classes; 2) Análise das classes geradas e agrupamento das mesmas conforme sua repetição, ou seja, quando duas ou mais classes correspondem à mesma unidade, e assim por diante; 3) Aplicação dos métodos de avaliação de acurácia da classificação automática não supervisionada.

Os métodos de classificação automática estão sujeitos a erros gerados pela superposição no espaço de atributos, de duas ou mais classes espectrais, ou ainda, pelo mal rotulamento quando o analista tem um conhecimento incompleto sobre os tipos de cobertura presentes na área estudada. Dessa forma, pixels pertencentes a uma classe são classificados erroneamente ou permanecem desconhecidos (Melo, 2002).

Todo o procedimento de classificação foi realizado no módulo *ImageWorks* e *Focus* do programa PCI Geomatica (PCI Geomatics, 2004). Na classificação automática não-supervisionada foi usado o classificador Isoseg (ISODATA) nas bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do LANDSAT-7 ETM+. Após a classificação foi feita uma etapa de pós-classificação, onde foram usadas ferramentas de agregação de classes para resolver possíveis confusões e erros de classificação.

O procedimento de avaliação da acurácia do mapeamento foi realizado para avaliar e quantificar os possíveis erros que o método de classificação automática está sujeito, permitindo quantificá-los e justificar a confiabilidade e praticidade do método (Jensen, 1996). Para esse procedimento usou-se como base pixels de referência distribuídos aleatoriamente sobre a área em estudo, segundo Arzandeh & Wang (2002).

Neste método, disponível no programa PCI (PCI Geomatics, 2004), foram usados 500 pontos de referência distribuídos aleatoriamente pela área estudada e comparados

com a verdade terrestre expressa na composição 4R5G3B da imagem Landsat ETM+ e no mapa Geomorfológico preliminar gerado por Boulhosa (2003) e Boulhosa et.al. (2005).

Foram calculadas as matrizes de confusão, que mostram o percentual de pixels que foram mapeados de forma correta, e ainda, foi calculado o índice *Kappa* que é usado na avaliação da concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático gerado pela classificação (Congalton, 1991). O valor apresentado pela estatística *Kappa* indica o desempenho da classificação gerada, segundo Cohen¹ *apud* Fonseca et al., 2000 (Tabela 5.8).

Tabela 5.8: Coeficiente Kappa e os respectivos conceitos da classificação

Coeficiente Kappa	Desempenho da classificação
< 0	Péssimo
$0 < K \leq 0.2$	Mau
$0.2 < K \leq 0.4$	Razoável
$0.4 < K \leq 0.6$	Bom
$0.6 < K \leq 0.8$	Muito Bom
$0.8 < K \leq 1.0$	Excelente

Segundo Jensen (1996), o índice de exatidão geral é um parâmetro estatístico derivado da matriz de confusão que é dado pela divisão da quantidade total de amostras usadas para se calcular a matriz de confusão, pela soma dos valores da diagonal principal dessa matriz. Os erros de comissão (quando um pixel é classificado como sendo de uma classe A, mas pertence a uma classe B) e omissão (quando um pixel pertencente à classe A é classificado como pertencente a uma outra classe qualquer), também foram calculados.

¹ COHEN, J. A 1960. Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*. v.20, n. 1, p. 37-46.

Desta forma foram aplicados todos os procedimentos necessários para realizar o processo de classificação automática com sucesso, sendo que os produtos gerados foram analisados e comparados entre si.

O resultado da *classificação não-supervisionada* da imagem Landsat-7 demonstrou 15 classes (**Figura 5.2**) com respostas espectrais distintas. Porém, isso não reflete a realidade, pois ao analisar as classes em detalhe observou-se que o método gerou erro e confusão, onde duas ou mais classes com respostas espectrais semelhantes foram interpretadas pelo classificador automático como uma mesma classe, assim como, uma única classe referente a um conjunto de pixels diferentes foi classificada como duas ou mais classes distintas.

Para eliminar o erro gerado pelo classificador, a classificação não supervisionada foi editada, onde se fez uma agregação de classes de acordo com o que se conhece pela interpretação visual esse procedimento gerou um produto mais coerente, considerando assim, apenas 6 classes foram consideradas. (**Figura 5.3**).

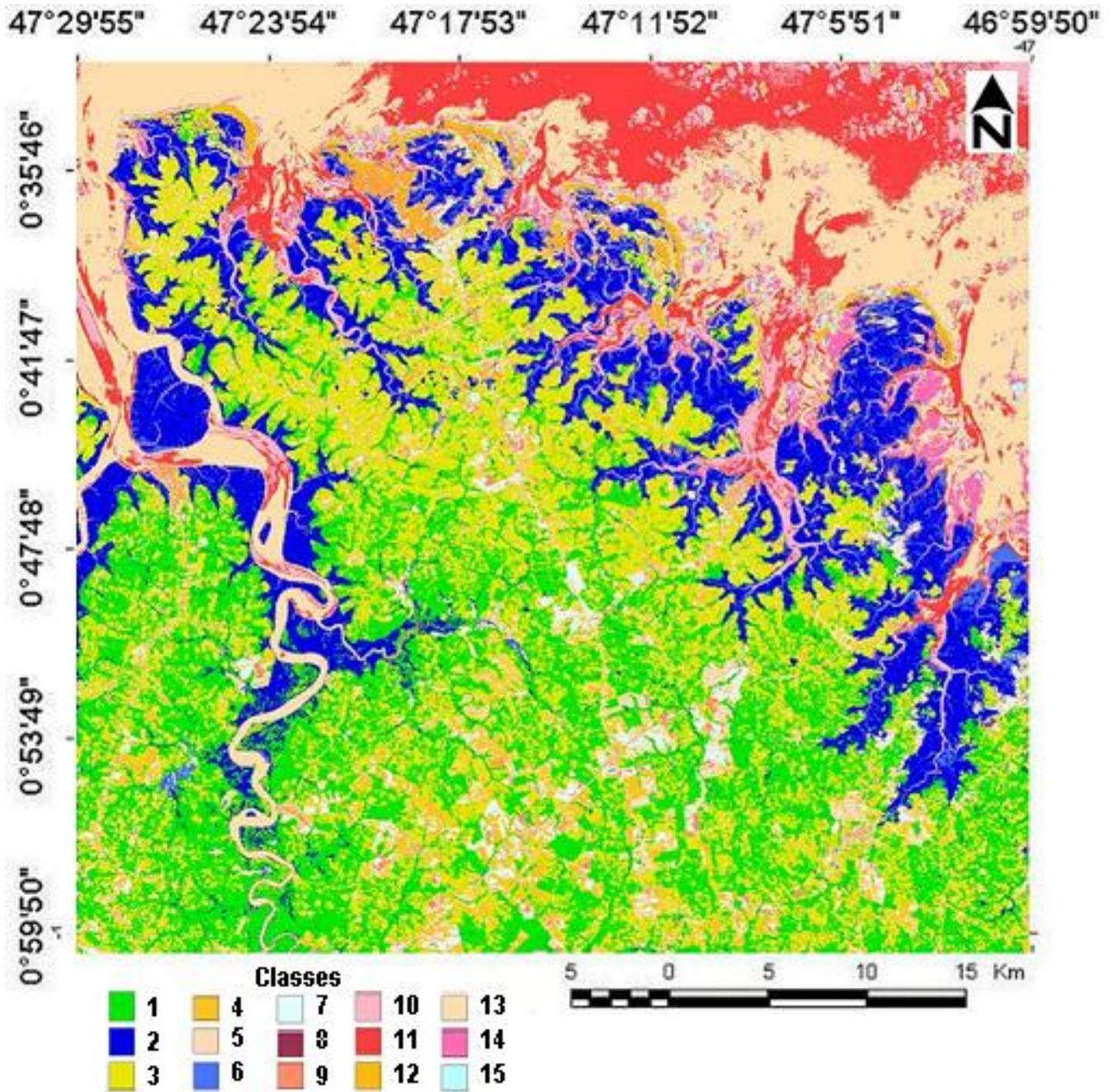


Figura 5.2: Classificação não-supervisionada da imagem Landsat 7 com 15 classes mapeadas pelo classificador automático ISODATA

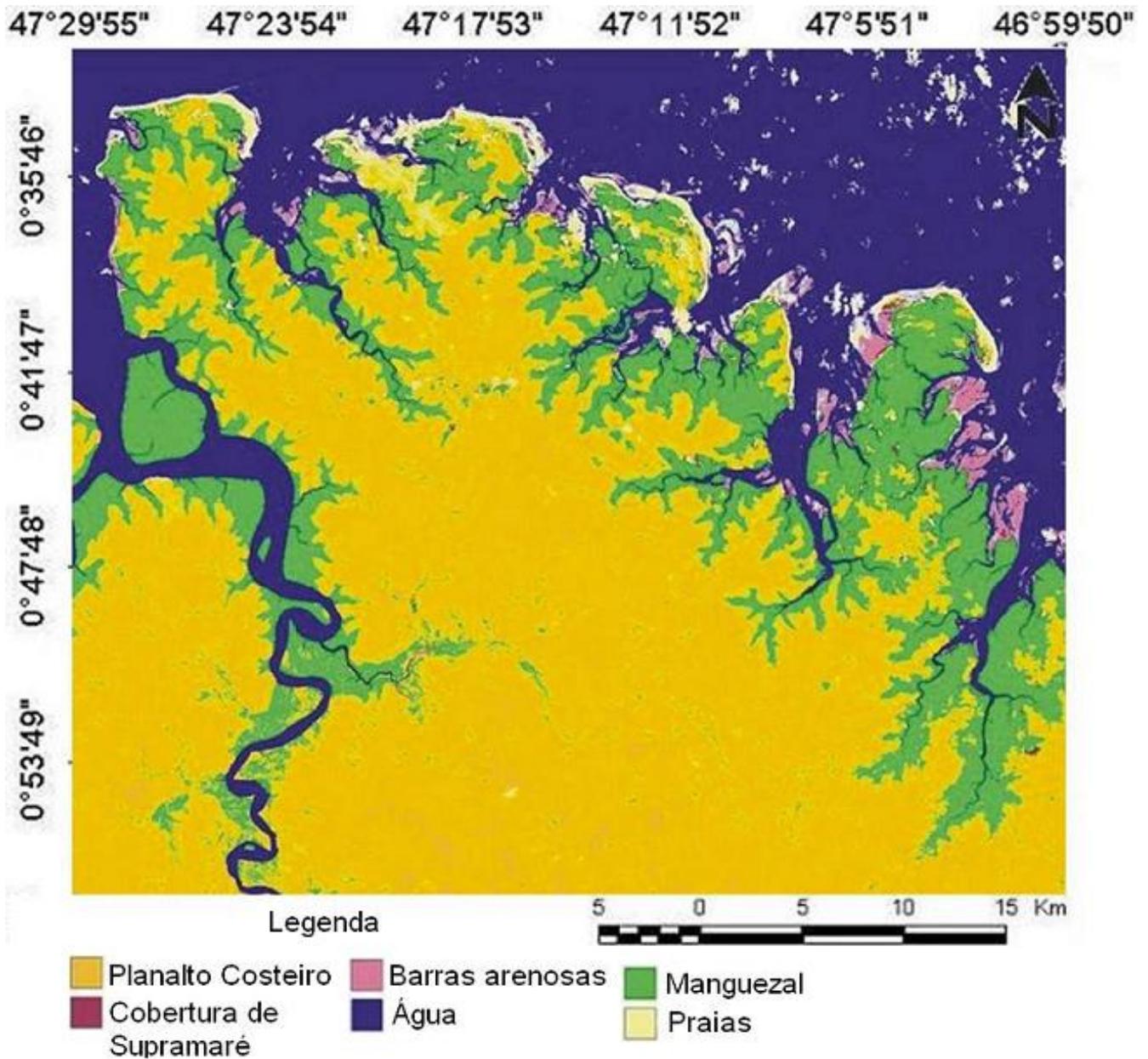


Figura 5.3: Classificação resultante da agregação das 15 classes mapeadas pela classificação não-supervisionada da imagem Landsat 7.

Dentre os resultados das técnicas de classificação automática, selecionou-se a que forneceu melhores informações, tanto do ponto de vista da acurácia quanto da avaliação do intérprete, a classificação não-supervisionada aplicada na imagem Landsat ETM+ (ISODATA) (Figura). Este produto foi avaliado quanto à exatidão de acordo com o índice *Kappa*, donde foi possível obter uma análise quantitativa da confiabilidade do produto. O teste *Kappa* = **0,826%** demonstrou que a classificação pode ser avaliada segundo conceito de classificação da **Tabela 5.8** como excelente.

A análise estatística dos dados de classificação foi feita através dos cálculos da matriz de confusão, estatística *Kappa* e índice de exatidão geral, apontaram bons desempenhos para a técnica de classificação escolhida (**Tabela 5.9**). Estes permitiram medir a boa acurácia do mapeamento automático realizado, confirmando a eficácia desses procedimentos para a confecção de mapas de índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo (ISA) em um pequeno intervalo de tempo, graças à automação eficaz dos procedimentos.

Tabela 5.9: Matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada (ISODATA) da imagem LANDSAT ETM+7 (bandas 1,2,3,4,5,7), destacando em azul as amostras que foram classificadas corretamente (diagonal principal).

Dados de referência								
Classes	Planalto	Cobertura de supramaré	Água	Manguezal	Praia	Barras arenosas	Σ linha	Comissão (%)
Planalto	294	1	1	7	2	1	306	3,92
Cobertura de supramaré	1	0	0	2	0	0	3	100
Água	1	0	97	4	1	4	107	9,35
Manguezal	14	1	0	55	0	0	70	21,43
Praia	3	0	0	1	2	0	6	66,67
Barras arenosas	1	0	3	0	0	4	8	50
Σ coluna	314	2	101	69	5	9	500	
Omissão (%)	6,37	0	3,96	20,29	60	55,56		
Índice Kappa = 0,826				Exatidão geral= 452/500= 90,4%				

Os componentes da diagonal principal da **Tabela 5.9** representam os pixels que foram classificados de forma correta. Por exemplo, para a classe praia do mapa temático classificado, 2 pixels foram classificados corretamente quando observados os dados de referência. As amostras localizadas fora da coluna da diagonal principal em destaque são aqueles pixel que foram classificados que pertencem a uma classe, ao observar os dados de referência, mas que foram classificados em outra classe erroneamente. Por exemplo, 14 pixels, classificados no mapa como manguezal, pertencem na realidade ao planalto costeiro, e 1 pixel pertence à cobertura de supramaré. Portanto dos 70 pixels classificados como manguezal 55 (78,57 %) foram bem classificados, enquanto que 15 pixels (21,43 %) foram mal classificados. Este erro de classificação é chamado de erro de inclusão ou comissão, dado que se incluem pixels em uma classe sendo que estes pertencem a outra classe.

Outro tipo de erro de classificação chamado de erro de omissão foi observado na análise estatística da matriz de confusão, quando pixels pertencentes a uma classe são atribuídos a outras classes, por exemplo, dos 314 pixel classificados como planalto 294 (93,64%) foram bem classificados e 20 pixels (6,37%) foram atribuídos a outras classes.

Portanto, pode-se considerar que as técnicas de classificação automática usadas para a imagen LANDSAT-7, são de grande importância, pois permite classificar automaticamente as principais unidades, como manguezal, planalto costeiro e praia, considerando a acurácia e rapidez do mapeamento.

5.1.1.2.6. Classificação visual dos produtos gerados

Os procedimentos utilizados para o levantamento geomorfológico seguem as normas do sistema ITC (Van Zuidam & Verstappen, 1991), no qual o primeiro passo é efetuar uma visão geral da geomorfologia da área de estudo e sua relação com as áreas adjacentes, através das imagens de satélite, sendo que simultaneamente se consulta outras fontes de informações disponíveis na literatura existente. Posteriormente as unidades geomorfológicas e outros dados geomorfológicos relevantes são mapeados visualmente, delineando as unidades maiores, as subunidades, e o traçado das formas de relevo, sendo que sua gênese não pode ser

interpretada visualmente. A finalização deste levantamento se dá com a seleção de cores e símbolos, registrados na legenda, para representar as unidades geomorfológicas.

A análise detalhada foi baseada integrando dados das assinaturas espectrais e propriedades físico-químicas dos alvos que puderam ser observadas nas imagens, com a análise visual de forma, textura, cor e contexto dos alvos, bem como características geomorfológicas, elementos geométricos e características morfoestratigráficas dos ambientes costeiros, contidos no mapa base de Silva (1996) e de Silva Jr. & El-Robrini (2001).

5.1.2. Imagens Radarsat-1

5.1.2.1. Ortorretificação

Inicialmente as imagens RADARSAT-1 (banda C-HH), modo Wide 1 foram corrigidas geometricamente através do método de modelagem ortorretificação (Toutin, 1995), que consiste na correção das distorções geométrica geradas durante a aquisição da imagem, semelhante à correção geométrica simples por polinômios. Porém a ortorretificação utiliza além de GCPs um modelo digital de elevação corrigindo as distorções introduzidas pela movimentação da plataforma (posição e velocidade), distorções relativas ao sensor (ângulo de orientação, campo de visada instantâneo e tempo de detecção do sinal), distorções relativas à Terra (geóide-elipsóide), distorções relativas à projeção cartográfica (plano elipsóide-cartográfico) (Toutin, 1995).

A imagem RADARSAT-1, modo Wide 1 foi ortorretificada com base em dados de modelo digital de elevação do SRTM e nas imagens Landsat ETM+7 ortorretificadas. Este processo consistiu na seleção de 60 pontos de controle perfeitamente correlacionáveis entre as imagens como, por exemplo, confluência de rios, cruzamento de estradas, cabeceira de pontes, etc, sendo que o erro RMS (*Room Mean Square*) foi de 1,63 para a imagem de 04 de outubro de 2004; 1,47 para a imagem de 10 de setembro de 2004; 1,59 para a imagem de 19 de janeiro de 2003 e 1,62 para a imagem de 12 de fevereiro de 2003.

O filtro redutor de *speckle* que alcançou o melhor resultado nas imagens RADARSAT-W1 foi o filtro adaptativo do tipo *Enhanced Frost*, com janela 3x3 (*Kernel Size*), pois possibilitou reduzir o *speckle* com menor perda de informação.

5.1.2.2. Reescalonamento

O passo seguinte consistiu no reescalonamento das imagens RADARSAT-1 de 16 bits (nível digital de 0 a 65535) para 8 bits (nível digital de 0 a 255) através da análise do seu histograma, para garantir a eficácia do processo de integração com as imagens Landsat ETM+7.

5.1.2.3. Realce e recorte

Paralelamente ao reescalonamento foi aplicado **realce linear** na imagem 8 bits. E posteriormente a imagem realçada foi recortada restringindo a análise a área de interesse.

O *realce linear* aplicado nas imagens RADARSAT-W1 permitiu aumentar o contraste entre as principais feições dos ambientes costeiros estudados.

5.1.2.4. Interpretação das imagens RADARSAT-W1

Os métodos de classificação automática não foram aplicados às imagens RADARSAT-W1 em virtude de estas apresentarem ruído *speckle*, cuja textura granular torna tanto a interpretação visual quanto a segmentação/classificação automática das imagens procedimentos difíceis de serem realizados. Assim, para a extração de informações destas imagens foi feita uma análise do comportamento do retroespalhamento com base nos parâmetros relacionados com o radar e sua interação com a superfície, como foi descrito no *Capítulo 3*.

Para análise do comportamento do retroespalhamento nas imagens de radar é de grande importância o conhecimento das condições ambientais no momento da aquisição da imagem, tais como condições de maré e precipitação acumulada, pois

parâmetros proporcionam variações da umidade do solo, e conseqüentemente na resposta do radar. Entretanto para esta área de estudo encontra-se disponível apenas os dados de maré (<http://www.dhn.mar.mil.br/chm/tabuas>), sendo que os dados de precipitação não foram coletados por motivo de paralisação da estação meteorológica do fundeadouro de Salinópolis desde 2001, segundo informações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Assim, a interpretação da resposta do Radar foi feita apenas com base nos dados de condições de maré, sendo que a ocorrência ou não de chuvas foi apenas suposta com base no período do ano, se seco ou chuvoso. As imagens RADARSAT-W1 processadas e seus respectivos dados de condições de maré são mostrados nas **Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7.**

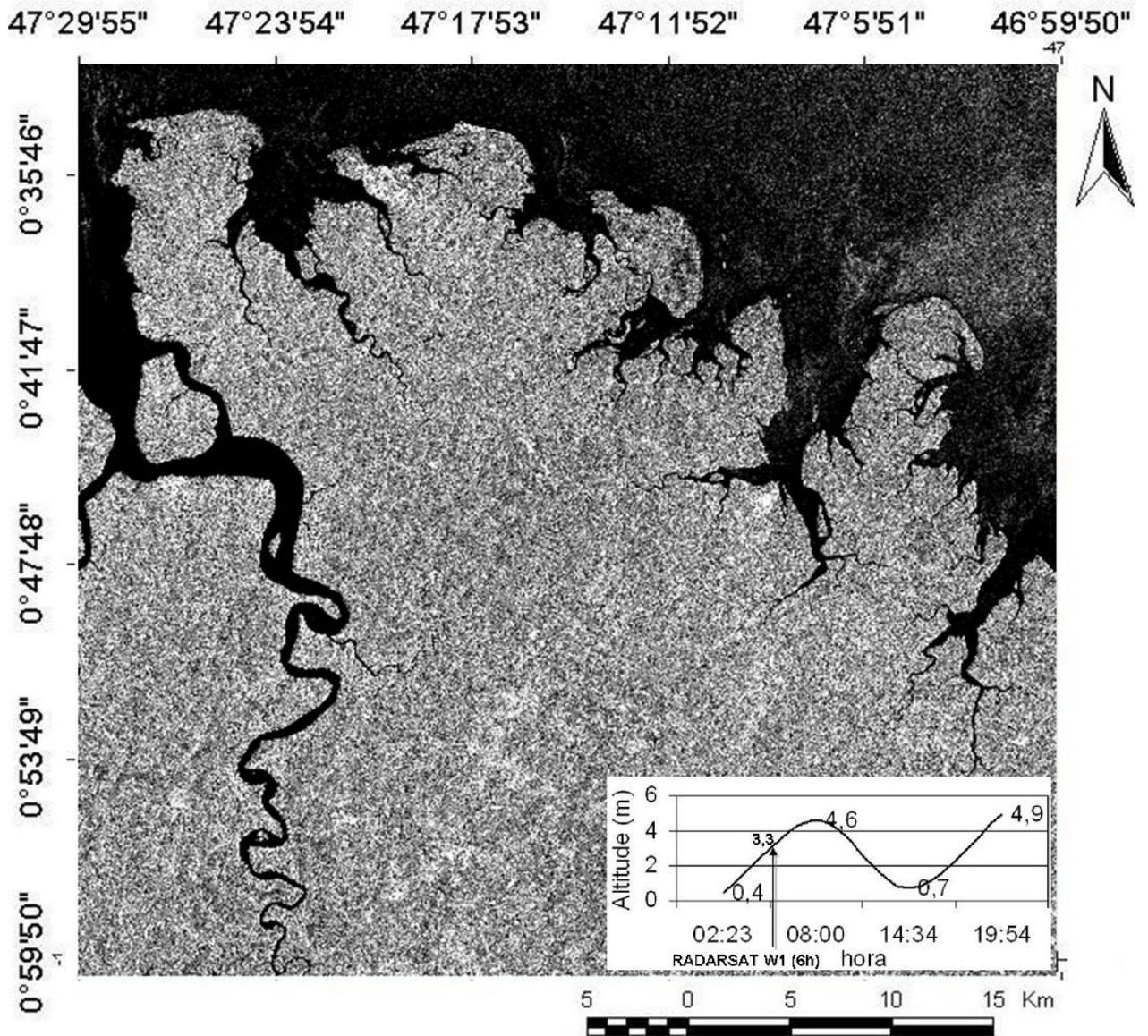


Figura 5.4: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de 19 de Janeiro de 2003 e gráfico mostrando a amplitude de maré (3,3m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).

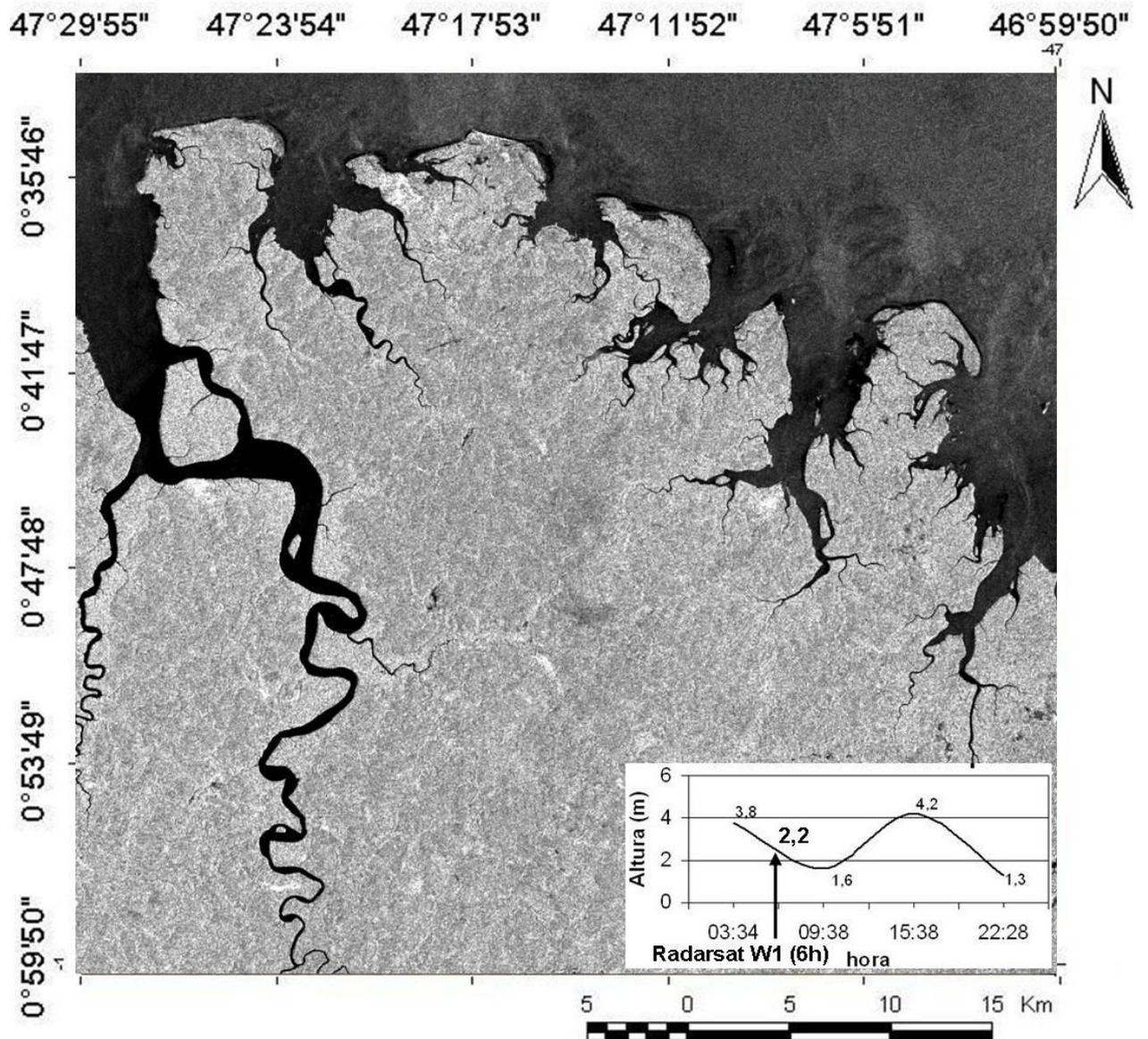


Figura 5.5: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de 12 de fevereiro de 2003 e gráfico mostrando a amplitude de maré (2,2m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).

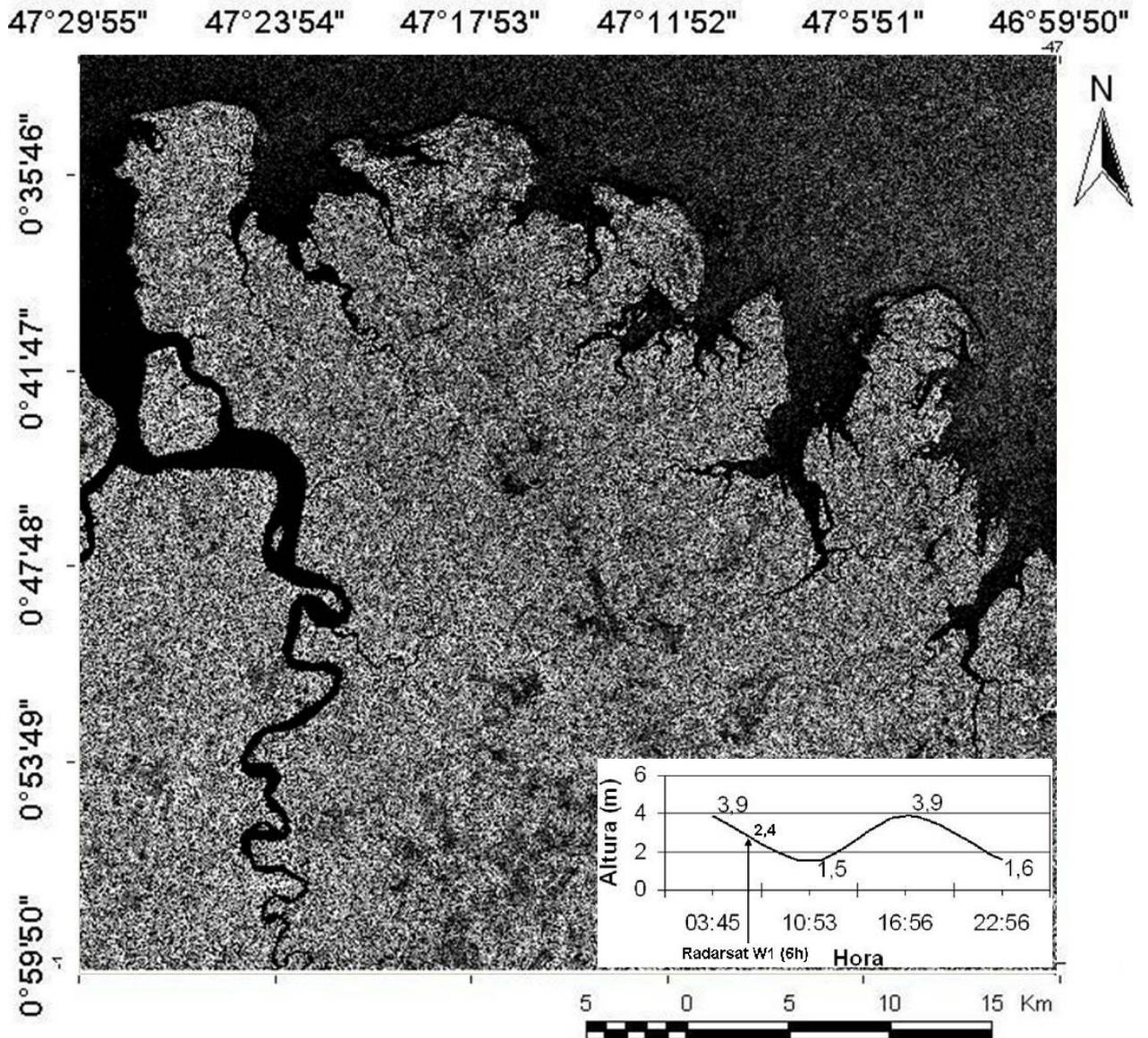


Figura 5.6: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de 10 de setembro de 2004 e gráfico mostrando a amplitude de maré (2,4m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).

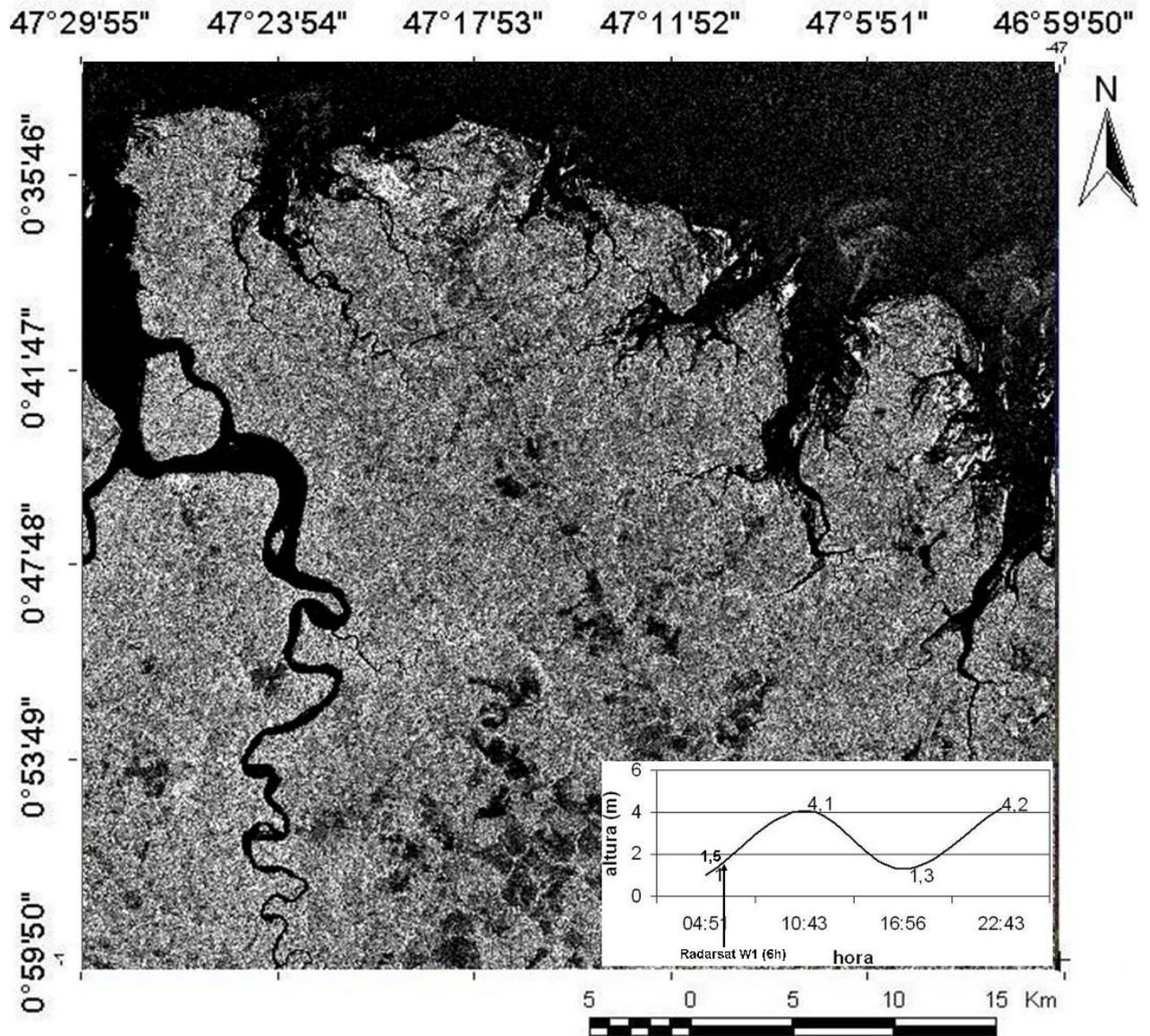


Figura 5.7: Imagem RADARSAT-1 W1 descendente de o4 de outubro de 2004 e gráfico mostrando a amplitude de maré (1,5m) no fundeadouro de Salinópolis no momento do imageamento (6h).

5.1.3. Imagens SRTM

5.1.3.1. Geração de máscara

Inicialmente a imagem SRTM 16 bits foi tratada para retirar dados de elevação dos corpos d'água e ruídos provenientes da resposta das ondas do oceano ou da falta de informação. Este tratamento consistiu na **geração de máscara mar** no Software PCI Geomática 9.0.

A aplicação da máscara mar (**Figura 5.8**) eliminou os ruídos observados na região do mar que registraram a altitude das ondas, e atribuiu valor de cota = 0 para toda a área a partir da linha de costa em direção ao mar, facilitando assim as interpretações principalmente dos perfis topográficos.

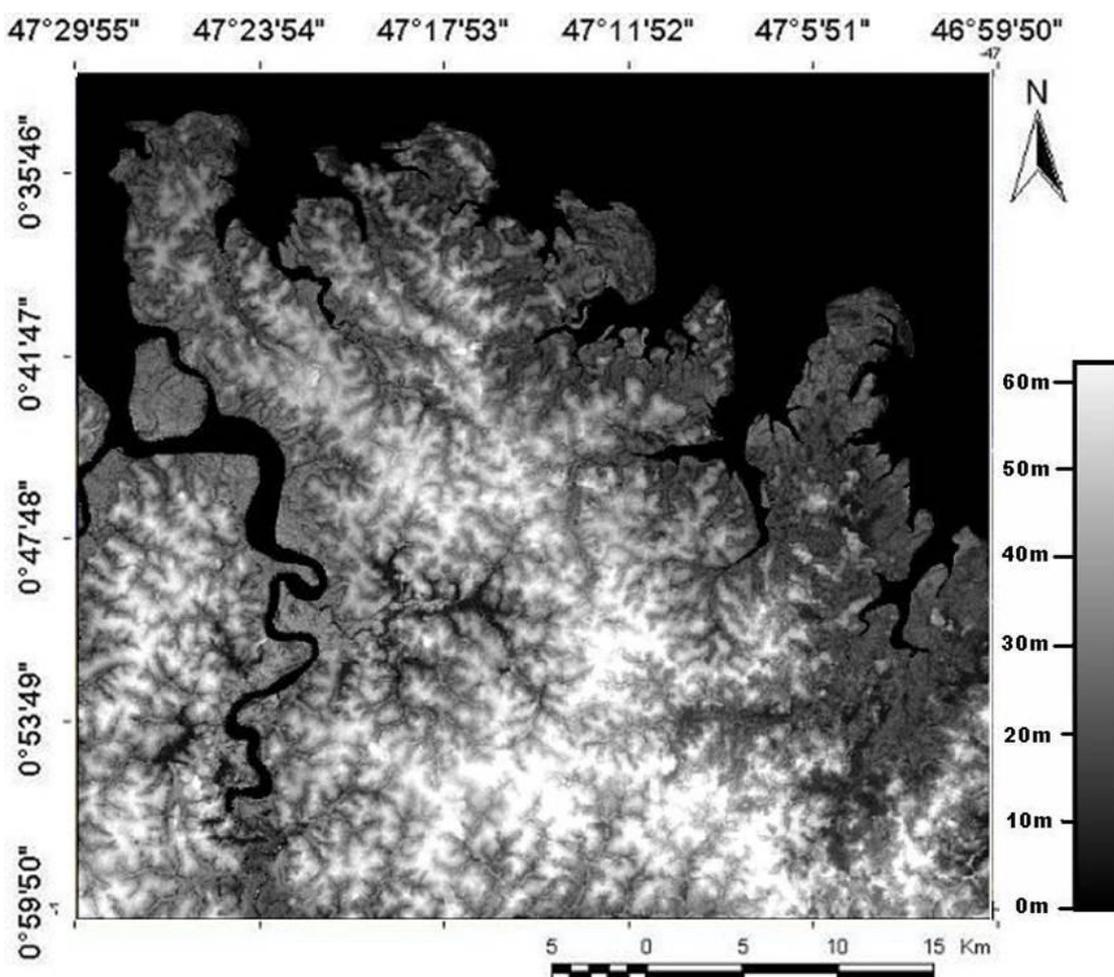


Figura 5.8: Imagem SRTM com máscara mar

5.1.3.2. Geração de paleta de cores e perfis topográficos

A paleta de cores foi gerada para obter melhor percepção de profundidade (Toutin, 1997) 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.

A Paleta de cores permitiu uma boa percepção dos níveis de altitude em toda a área os quais variam de 0 a 64m, e possibilitou uma perfeita percepção das profundidades. A escala de cores associada a sua cota assim como a paleta de cores aplicada na imagem SRTM encontram-se demonstradas na **(Figura 5.9)**.

A Paleta de cores se mostrou muito útil também na geração de perfis topográficos gerados apenas com informações do DEM **(Figura 5.9)**, os quais permitiram o entendimento do arranjo espacial. Considerando sempre que a altitude demonstrada nos perfis corresponde à resposta da interação das microondas com a vegetação, copa das árvores nas regiões de mangue e nos ambientes não vegetados a altitude corresponde à elevação da superfície do terreno.

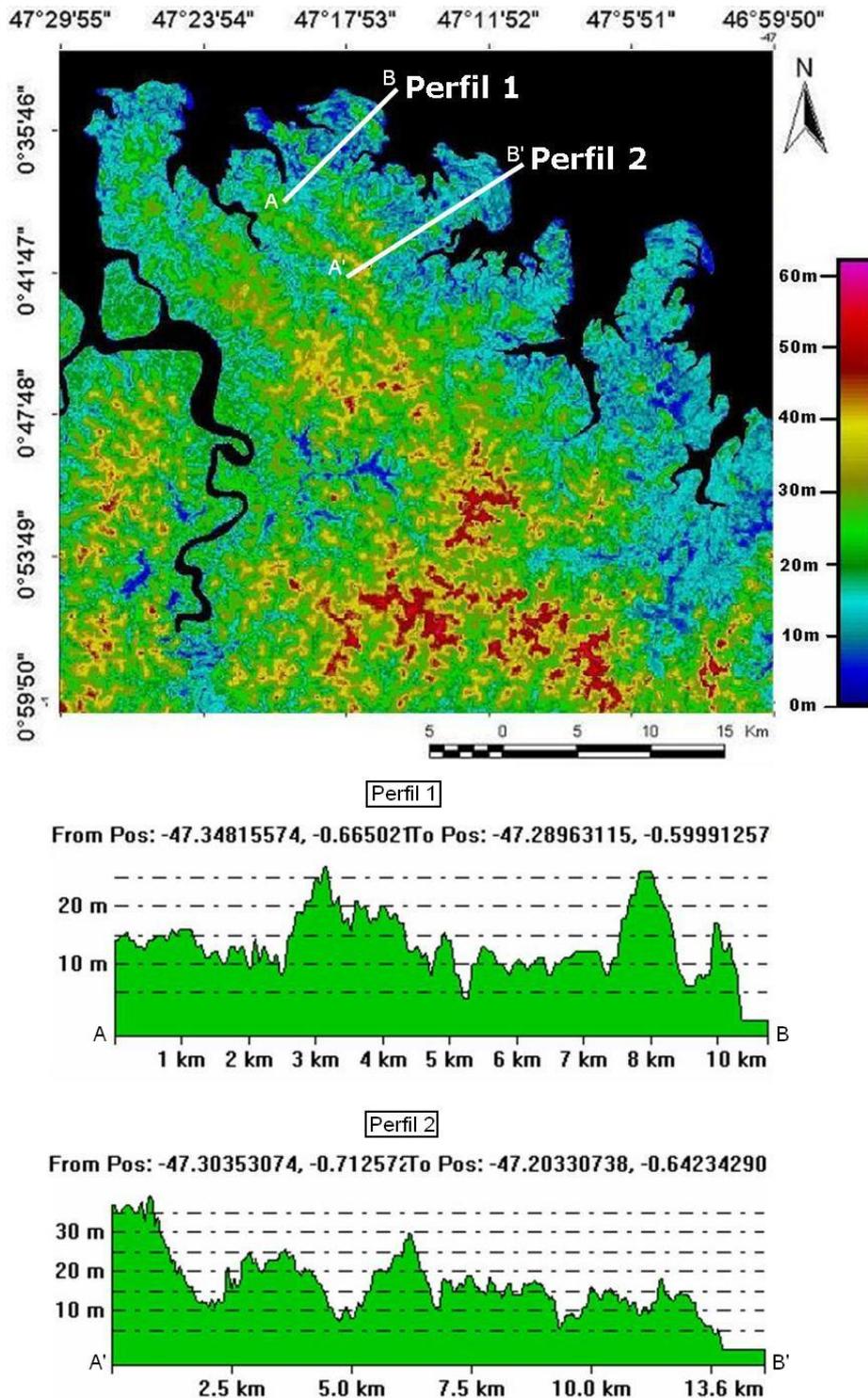


Figura 5.9: Paleta de cores gerada a partir do Modelo Digital de Elevação do SRTM, mostrando no detalhe os perfis topográficos os quais representam a resposta da interação das microondas com a copa das árvores.

5.1.3.3. Geração de relevo sombreado

A imagem de relevo sombreado foi gerada através da simulação de uma visada lateral da área através da mudança do ângulo azimute da iluminação solar e sua elevação, gerando sombras. Em seguida a aplicação de realce linear que ressaltou o relevo permitindo melhores interpretações.

A Geração de relevo sombreado consistiu na aplicação de várias combinações de ângulos de visada sendo que com a iluminação azimute = 70 e iluminação = 30 apresentou os melhores resultados e constituiu uma importante ferramenta para o entendimento das vertentes do relevo.

Os dados SRTM forneceram importantes informações para o entendimento do relevo da área através do seu modelo digital de elevação (DEM) e relevo sombreado (Figura 5.10),

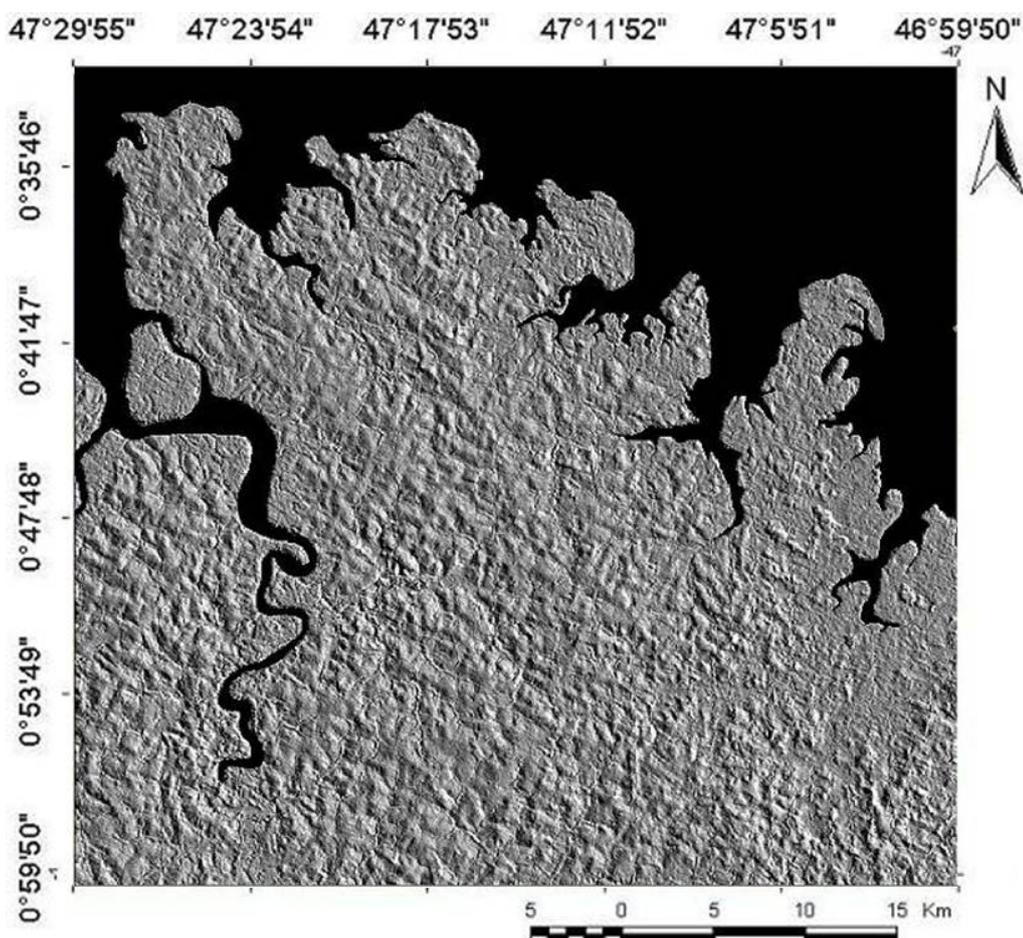


Figura 5.10: Relevo Sombreado gerado a partir do DEM do SRTM

5.1.4. Fusão de dados

Para realizar a integração de dados de sensores óticos e microondas são utilizadas técnicas de integração que preservam as características espectrais e espaciais dos dados de entrada garantido a eficácia do método. Foram aplicadas as técnicas de transformação IHS-RGB e Principal componente para integrar três combinações de sensores diferentes: ETM/PAN, ETM/SRTM (relevo sombreado - REL) e ETM/SAR, pelos métodos de integração IHS-RGB e Transformação por Principais Componentes (seletiva e não seletiva).

Inicialmente as imagens foram **reamostradas** para um tamanho de pixel comum às duas imagens a serem integradas, o que permite uma integração perfeita pixel a pixel. A imagem ETM foi reamostrada para pixel de 15m para ser compatível com a banda Pancromática, e para 45 m compatível com o pixel do SRTM que foi reamostrado de 90m para 45m.

5.1.4.1. Transformação IHS-RGB

O processo de fusão por transformação IHS-RGB (Haydn et.al ¹; Pratt et.al ²; Gillespie et.al ³; Harris et.al ⁴ *apud* Harris, 1994) foi aplicada para combinar imagens de diferentes sensores (ETM, SRTM e RADARSAT-1) e com diferentes resoluções espaciais (30m-ETM, 15m-PAN, 30m-SAR, 90m-SRTM), gerando uma imagem colorida de resolução espectral das três bandas ETM e resolução espacial do segundo sensor (PAN, SRTM, SAR).

¹ HAYDN, R.; DALKA, G.W.; HENKEL J.; BARE, J. E.. 1982. Aplicação de the HIS Colour Transform Tto the Processing of Multi-sensor Data and Image Enhacements. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi Arid Lands*. p. 599-616.

² PRATT, W.K. 1978. Digital Image Processing. New York: John Wiley and Sons (a Wiley Interscience Publication), 749p.

³ GILLESPIE, A.R.; KAHLE A.B.; WALKER, R.E. 1986. Colour Enhancement of Highly Correlated Images, 1. Decorrelation and HIS Contrast Stretches. *Remote Sensing of Environment*, 20: 209-235.

⁴ HARRIS, J.R.; MURRAY, R.; HIROSE, T. 1990. HIS Transform for the Integration of Radar Imagery and Orther Remotely Sensed Data. *Photogrametric and Remote Sensing*. 56 (12): 1631-1641.

Neste trabalho as bandas 3, 4 e 5, que foram selecionadas previamente pelo cálculo do OIF, foram colocadas nos canais BRG, respectivamente e foi feita a transformação para o espaço de cores IHS, cujos canais resultantes são relativos à intensidade, cor e saturação das três bandas originais. Em seguida foi feita a reversão da imagem para espaço RGB onde o canal Intensidade foi substituído pela imagem Pancromática e também pela imagem SAR. Desse modo, foi possível obter uma imagem de composição colorida com a resolução espectral correspondente às três bandas multiespectrais e a resolução espacial da imagem Pancromática (15m), através do processo demonstrado no fluxograma da **Figura 5.11**.

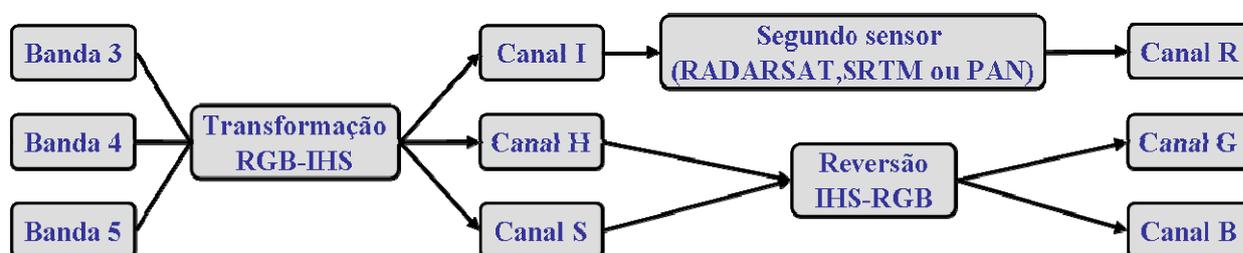


Figura 5.11: Fluxograma de processamento das imagens para integração por transformação IHS-RGB

5.1.4.2. Transformação por Principais Componentes

O processo de integração foi aplicado nos dois conjuntos de principais componentes (seletiva e não seletiva) geradas durante o processamento digital das imagens Landsat ETM+7, nos quais foi aplicada transformação IHS/RGB substituindo o canal intensidade pelo sensor SAR. Este princípio serviu tanto para a fusão ETM / RADARSAT-1 quanto para ETM / SRTM (relevo sombreado) (**Figura 5.12**).

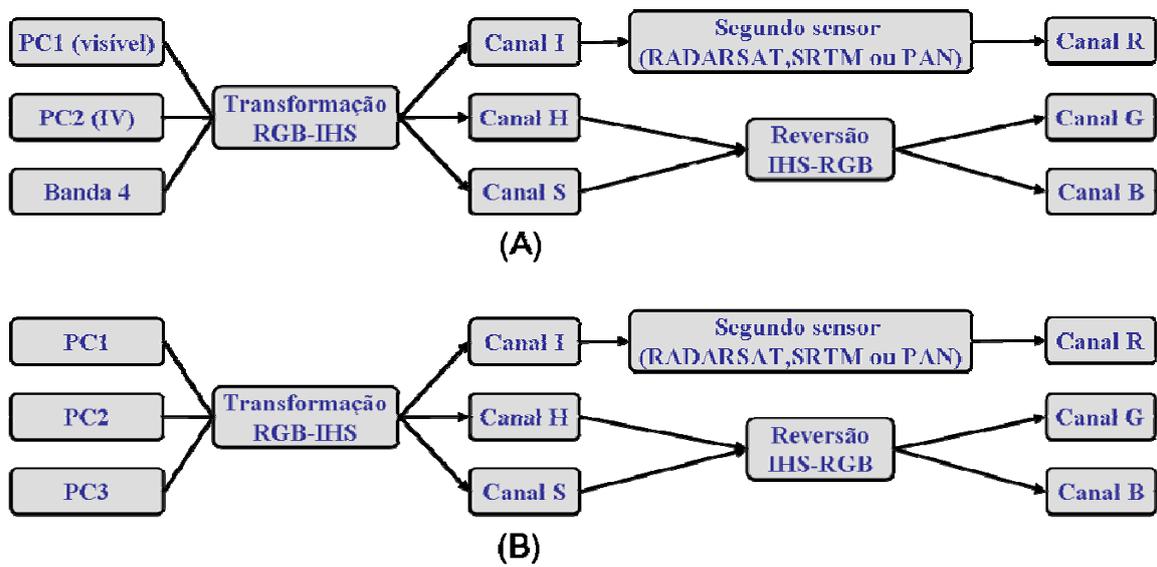


Figura 5.12: Fluxograma de processamento das imagens para integração por principal componente seletiva (a), e por principal componente não seletiva (b).

5.1.4.3. Fusão PAN / ETM

A fusão da banda pancromática (15m de resolução) com as bandas multiespectrais (30 m de resolução) do LANDSAT-7, foi realizada via transformação IHS. Esse procedimento possibilitou obter numa única imagem, a melhor resolução espacial da banda Pancromática (15m) com a maior informação espectral das bandas multiespectrais. Para esta fusão duas abordagens de transformação de dados foram avaliadas.

(1) Fusão da composição colorida indicada pelo OIF (4R, 5G, 3B) com a banda PAN pela Transformação IHS-RGB (**Figura 5.13**).

(2) Fusão da imagem da composição indicada pelo OIF (4R, 5G, 3B) realçada por decorrelação com a banda PAN através da Transformação IHS-RGB (**Figura 5.14**).

O Produto permitiu o realce das feições espectrais de interesse com uma melhor discriminação dos padrões de texturas e do contorno dos ambientes, além de uma perfeita visualização da estrutura urbana.

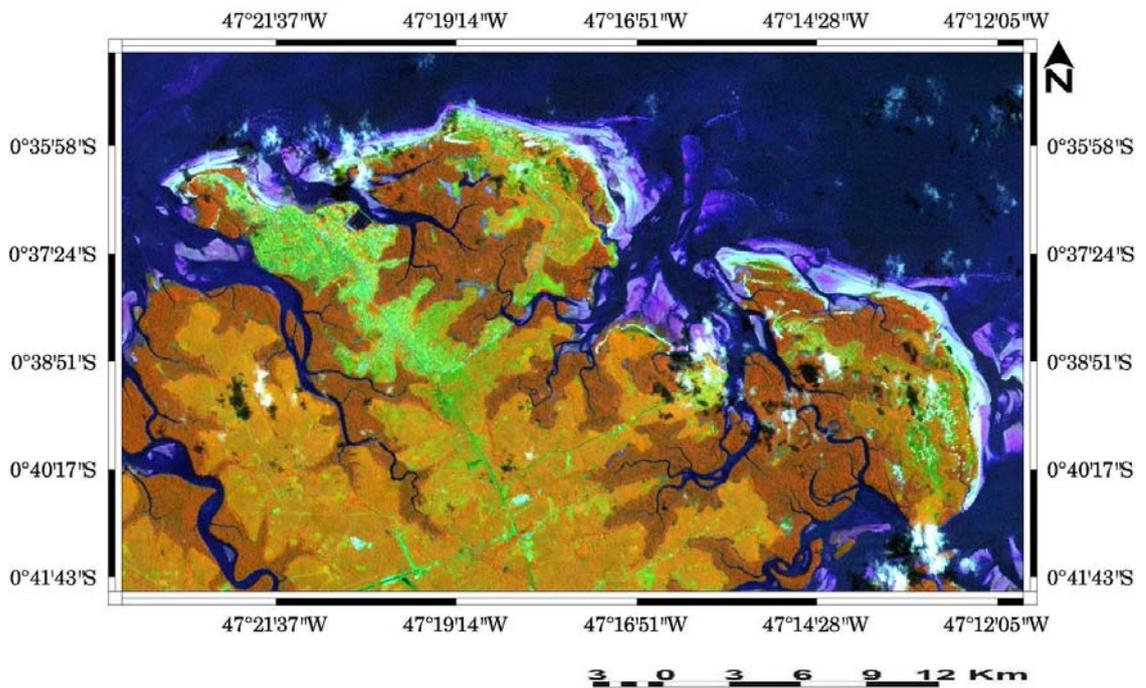


Figura 5.13: Imagem híbrida resultante da fusão da composição multispectral 4R5G3B com a banda Pancronática, destacando o realce das feições de textura dos ambientes costeiros.

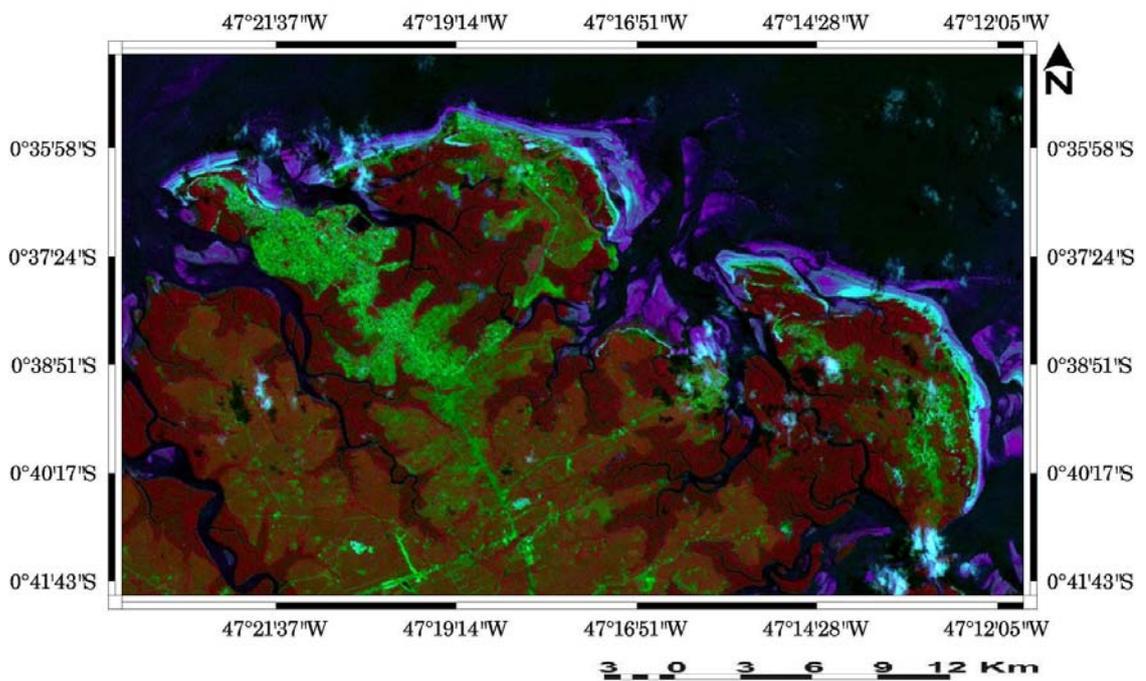


Figura 5.14: Imagem híbrida da fusão da decorrelação da composição 4R5G3B com a banda PAN, destacando a cidade de salinópolis e os arruamentos na ilha do Alatalia.

5.1.4.4. Fusão RADARSAT-1/ ETM

No produto híbrido SAR/óptico gerado, o sensor SAR forneceu informações sobre a geometria do terreno (macro e micro-topografia) e propriedades elétricas (conteúdo de umidade) realçando, portanto as características geométricas e texturais do terreno, enquanto que o sensor óptico forneceu informações espectrais das propriedades físico-químicas dos alvos (Harris et al., 1994; Souza Filho e Paradella, 2005). Portanto a integração desses dados consistiu em uma técnica que veio a realçar a identificação e o mapeamento da geomorfologia da área.

Para esta fusão foram realizadas as seguintes abordagens de transformação de dados para serem avaliadas.

(1) Fusão SPC / SAR: primeira PC das bandas 1, 2 e 3, primeira PC das bandas 5 e 7 e Banda 4, com o sensor SAR através da Transformação PC seguida da transformação IHS-RGB.

(2) Fusão PC / SAR: três primeiras PCs das seis bandas espectrais com o sensor SAR através da Transformação PC seguida da transformação IHS-RGB.

As **Figuras 5.15 e 5.16** mostram os produtos híbridos gerados, pela fusão de dados SAR/ETM, que foram avaliados visualmente considerando padrões de cores e de texturas, sendo que o melhor resultado foi o produto da integração por principais componentes seletiva, pela qual foi possível interpretar melhor os ambientes costeiros.

A imagem integrada SPC-SAR mostrou bons resultados para o mapeamento das feições geomorfológicas devido ter permitido uma boa visualização dos padrões de cores e texturas que demonstram diferenças na topografia (elevação), conteúdo de umidade dos solos e vegetação, densidade da vegetação, além do arranjo geométrico dos elementos de paisagem.

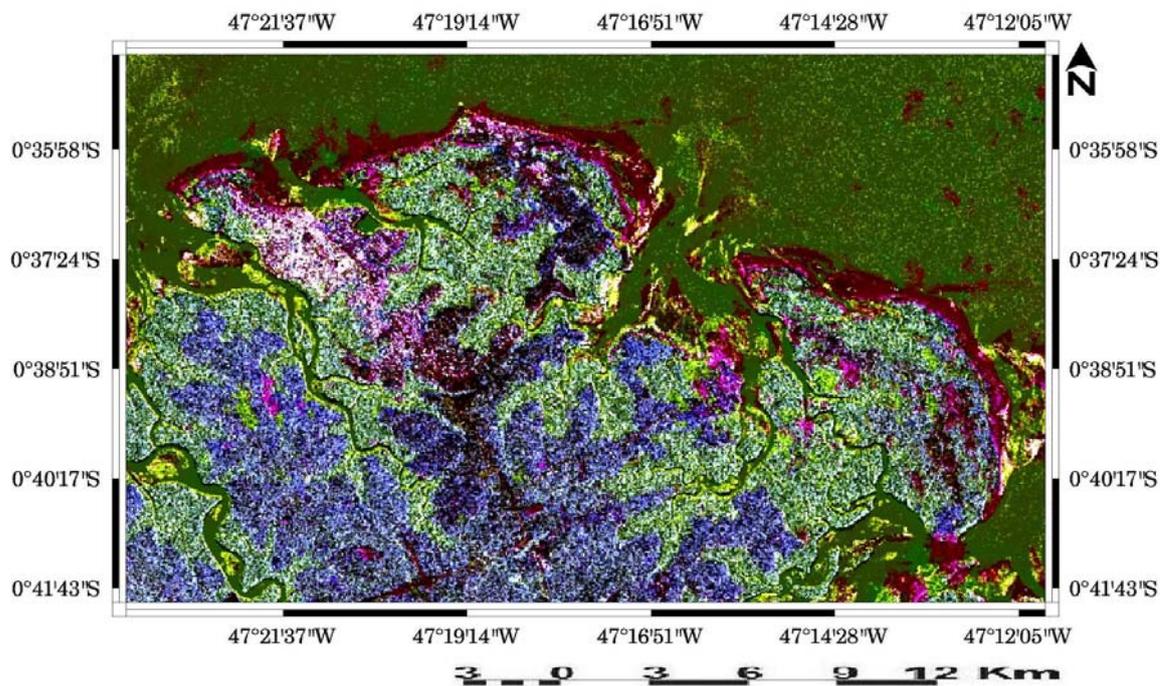


Figura 5.15: Produto da fusão SPC / SAR por Transformação IHS

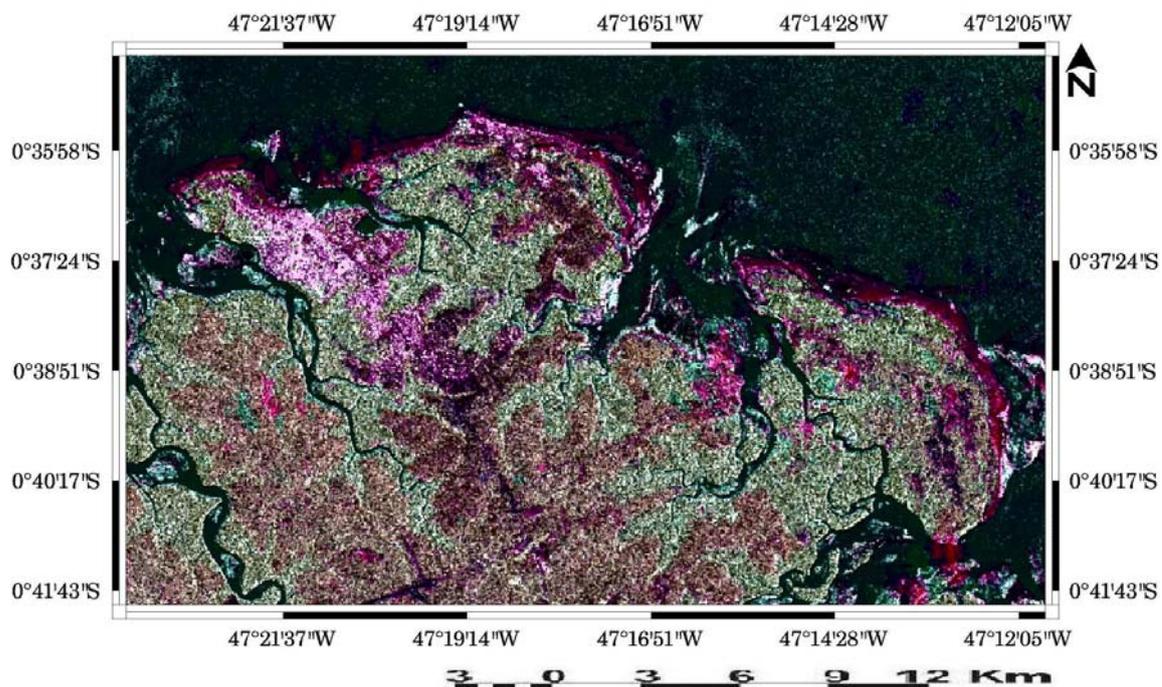


Figura 5.16: Produto da fusão PC / SAR por Transformação IHS

5.1.4.5. Fusão SRTM / ETM

No produto híbrido SRTM / ótico gerado, o DEM forneceu boas informações sobre a topografia do terreno que demonstram diferenças na topografia (elevação) realçando as características geométricas das feições geomorfológicas, enquanto que o sensor ótico forneceu informações espectrais das propriedades físico-químicas dos alvos.

Para esta fusão foram realizadas as seguintes abordagens de transformação de dados para serem avaliadas.

(1) Fusão Relevo Sombreado (REL) / Decorrelação das bandas 453: através de simples transformação IHS-RGB **(Figura 5.17)**.

(2) Fusão Relevo Sombreado/SPC: primeira PC das bandas 1, 2 e 3, primeira PC das bandas 5 e 7 e Banda 4 com a imagem REL através da Transformação PC seguida da transformação IHS-RGB **(Figura 5.18)**.

A imagem integrada REL/Decorrelação mostrou bons resultados para o mapeamento das feições de solo exposto e do relevo do terreno, com pouco realce das unidades geomorfológicas. Porém no produto REL/SPC além do realce das áreas de solo exposto foi possível delimitar perfeitamente o contorno do Planalto costeiro em contato com os manguezais proporcionando assim uma boa percepção das áreas inundáveis. Este produto poderá fornecer maiores informações para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo.

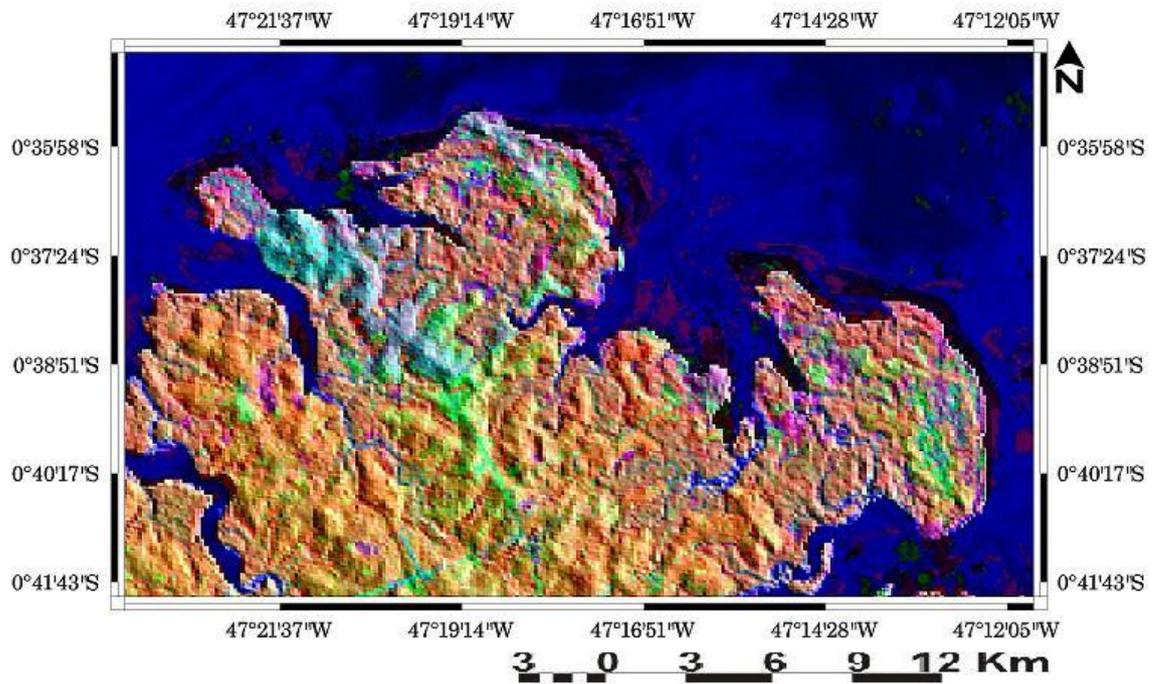


Figura 5.17: Produto da fusão REL/Decorrelação 453

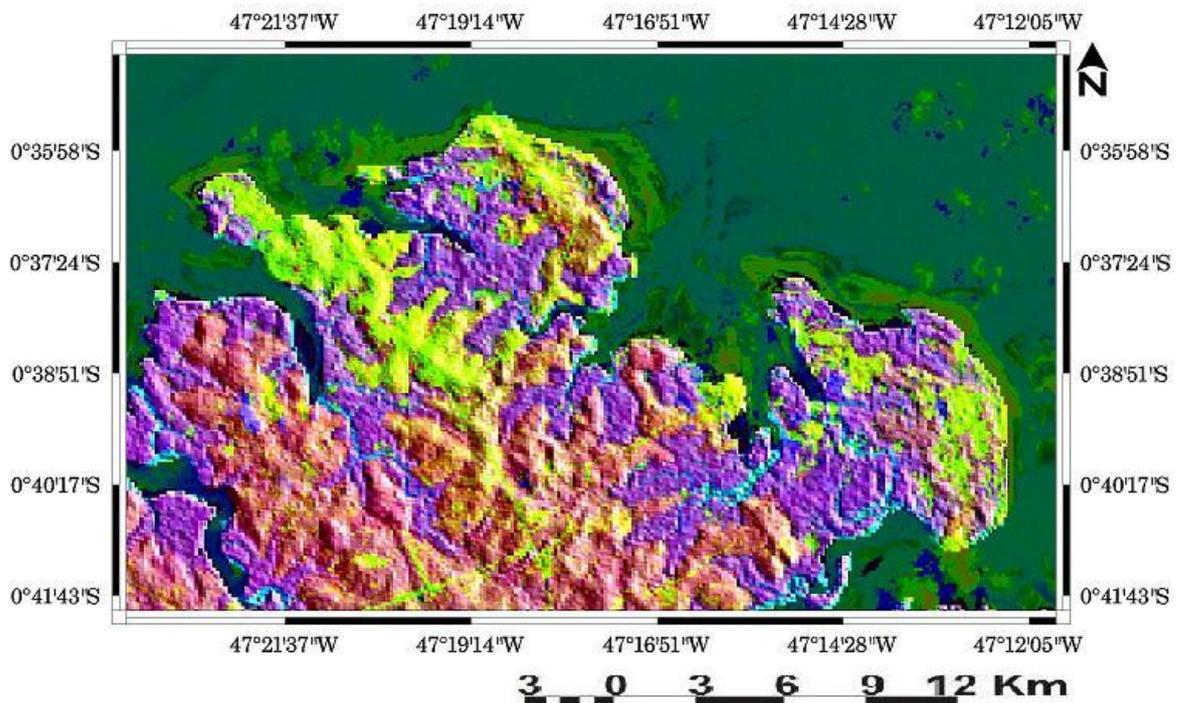


Figura 5.18: Fusão REL-PCA seletiva com realce linear

5.2. GERAÇÃO DE BANCO DE DADOS

As informações de dados georreferenciado obtidos por sistemas sensores serão integradas em um ambiente de SIG do ArcView 3.2, onde é possível armazenar, gerenciar, manipular e analisar os dados desde a sua coleta até a geração de saídas na forma de mapas convencionais, relatórios, arquivos digitais, devendo prever recursos para sua estocagem, gerenciamento, manipulação e análise. Como produto final desta análise integrada de dados será possível gerar o mapa Geológico-geomorfológico e o Mapa de Sensibilidade Ambiental ao derrame de óleo.

O método para elaboração dos mapas dos ambientes e feições costeiras e de índices de sensibilidade ao derrame de óleo está baseada na proposta metodológica de Jensen et al. (1993), que utiliza a integração de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (**Figura 5.18**).

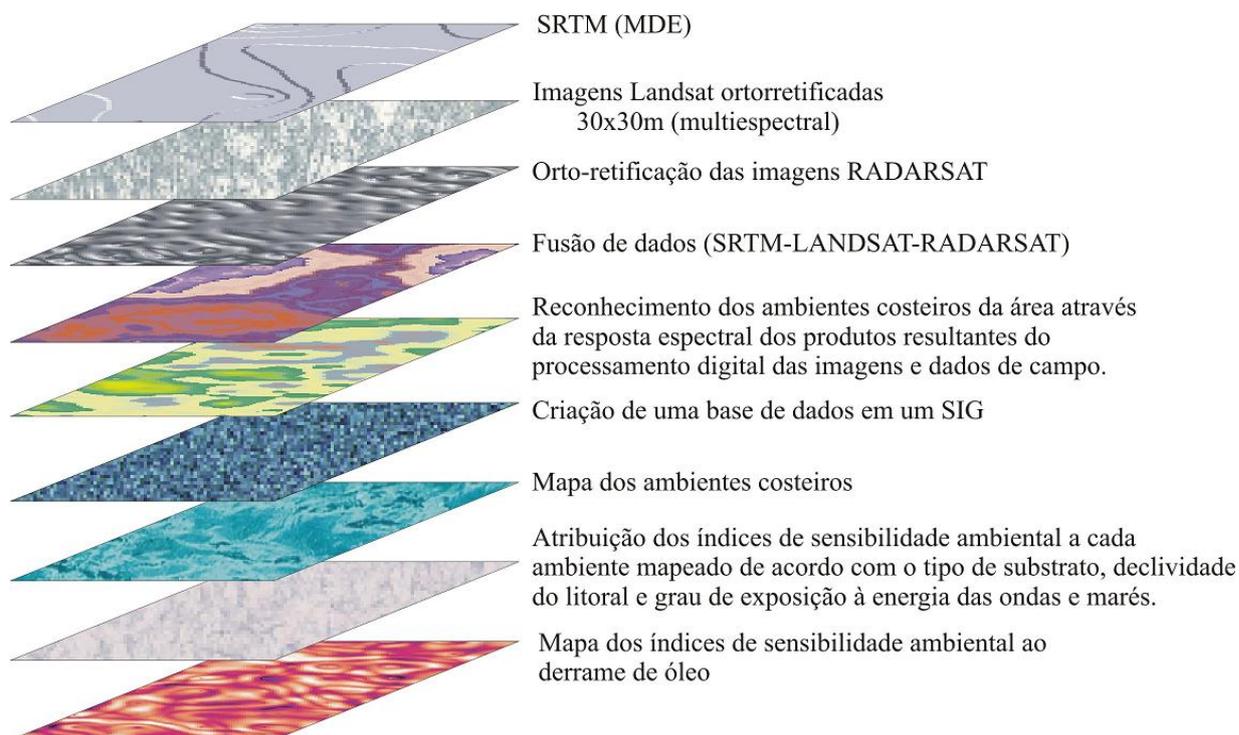


Figura 5.19: Esquema mostrando o conceito de índice de sensibilidade ambiental usando integração de dados de sensores remotos, SIG e informações de campo.

CAPÍTULO 6

6. RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS USANDO IMAGENS LANDSAT ETM +7, RADARSAT W-1, SRTM E FUSÃO DE DADOS.

A interpretação dos ambientes costeiros do nordeste do Pará foi realizada pela análise das imagens Landsat ETM+7, Radarsat-1, ortofoto digitais e SRTM, de maneira integrada e individualmente através dos parâmetros de foto-interpretação como cor, textura e contexto, que somados aos dados observados no campo possibilitaram identificar e mapear os diferentes ambientes deposicionais costeiros.

O objetivo do levantamento geomorfológico é gerar informações precisas e sistemáticas sobre as formas de relevo, os processos geomorfológicos e os fenômenos naturais relacionados (Van Zuidam & Verstappen, 1991). A abordagem adotada neste trabalho segue as normas do sistema ITC, no qual através das imagens é possível fazer um levantamento geomorfológico rápido e preciso dos fenômenos geomorfológicos presentes, suas formas e padrões, além de informações morfométricas e muitos dados litológicos.

As *Unidades Geomorfológicas* expressam as informações morfogenéticas, onde as formas do terreno e sua distribuição espacial são especificadas e classificadas do ponto de vista geomorfológico, as quais são representadas de maneira que sua origem e desenvolvimento sejam claramente reconhecidas.

A costa nordeste do estado do Pará encontra-se vulnerável a um complexo sistema de modificação da paisagem dada, principalmente, por fatores naturais dos processos costeiros e por fatores antropogênicos onde o homem atua na configuração atual da paisagem. Nos produtos gerados a partir do processamento digital de imagens de sensores remotos foram identificadas e delimitadas diferentes unidades geomorfológicas, através da manipulação das informações espectrais, texturais e espaciais presentes. Desta forma, o estudo realizado na área permitiu o aperfeiçoamento da compartimentação e definição dos diferentes ambientes deposicionais costeiros.

Para a delimitação dessas unidades aplicou-se técnicas de classificação digital automática e visual, que foram avaliados quanto à eficácia de forma comparativa. As características da paisagem determinadas a partir das imagens foram confirmadas pelo levantamento de campo e pelas análises laboratoriais. A seqüência seguida durante o processo de identificação e mapeamento perpassa pelas etapas está descrita a seguir.

6.1. INTERPRETAÇÃO PRELIMINAR DAS IMAGENS DE SATÉLITE

Considerações sobre paisagem, relevo, litologia, drenagem, solo, processos geomorfológicos e geologia, obtidas tanto pela interpretação das respostas espectrais e espaciais distintas nas imagens como pela análise da literatura, permitiram um reconhecimento preliminar das diferentes unidades e subunidades presentes na região, que foram consideradas para nortear os trabalhos de campo.

6.2. TRABALHO DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram realizados no mês de novembro e tiveram como objetivo coletar pontos de controle no campo através do GPS (*Global Positioning System*) GARMIN, modelo e-trex e DGPS (*Diferencial Global Positioning System*), de acurácia sub-centimétrica – ASHTECH prosicion 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 TrackMaker*, no qual foi possível gerar trilhas que demonstram todo caminho percorrido durante a validação de campo **(Figura 6.1)**.

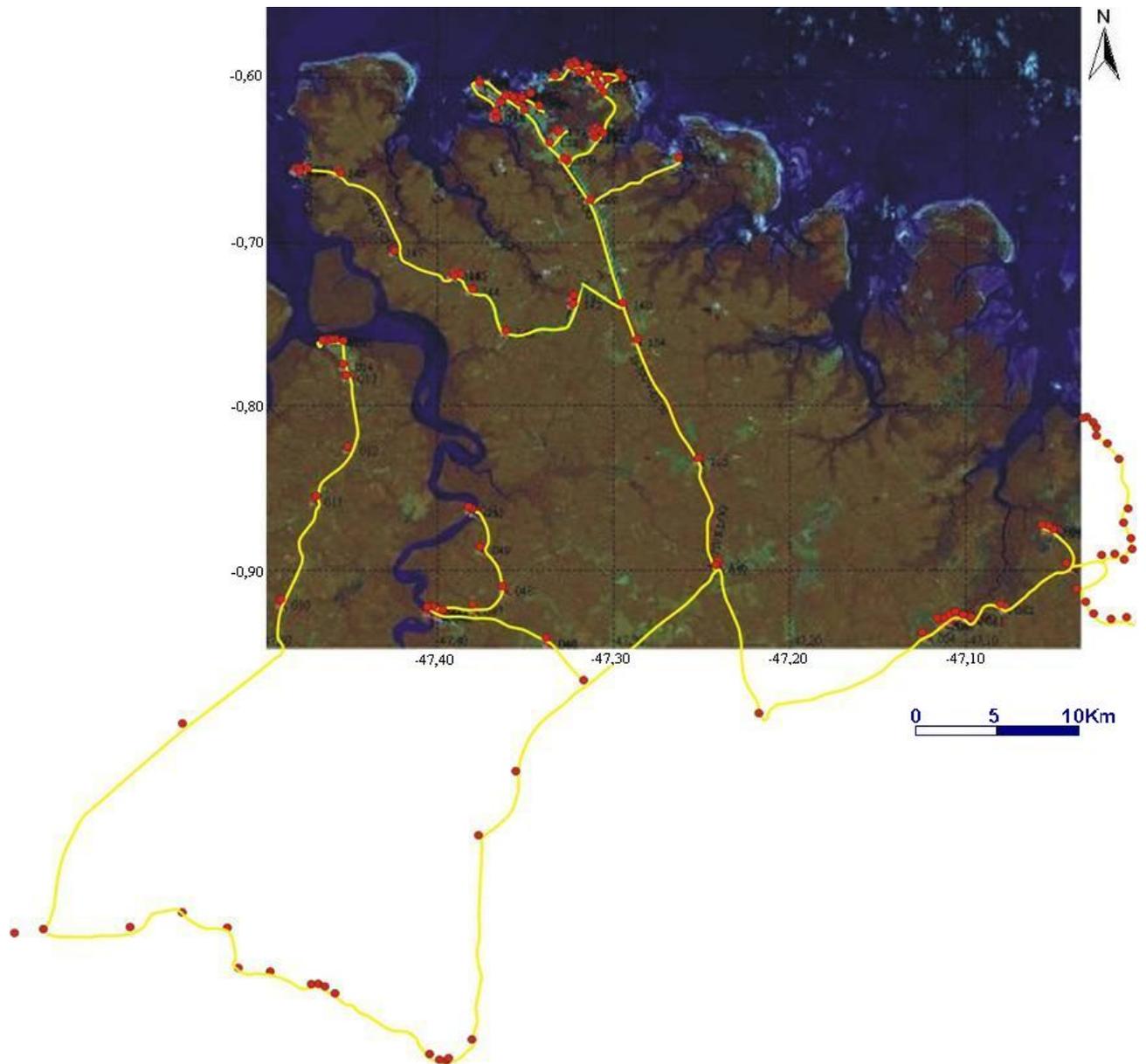


Figura 6.1: Principais caminhos percorridos e os pontos de GPS plotados na imagem Landsat composição 4R5G3B.

Foram tiradas fotografias de cada ambiente deposicional visitado, sendo que em alguns pontos foram coletadas amostras dos sedimentos para análise granulométrica em laboratório com o objetivo de caracterizar os sedimentos que compõem cada ambiente. As amostras de sedimentos foram retiradas com auxílio de canos de PVC de aproximadamente 50 cm, que foram devidamente lacrados e identificados quanto à sua posição geográfica (**Figuras 6.2**).



Figura 6.2: Método de amostragem dos sedimentos.

6.3. ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA

O trabalho laboratorial consistiu na análise granulométrica das amostras coletadas. As amostras de material arenoso, representantes das praias, planície arenosa e dunas foram submetidas ao peneiramento (Suguio, 1973). Esses sedimentos foram lavados para a retirada dos sais e secados na estufa à temperatura de 60° C. Em seguida, foi feito o quarteamento da amostra total, da qual se retirou 100g de material. Essa quantidade foi peneirada em peneiras com intervalo de $1/5 \phi$ (0.350; 0.250; 0.177; 0.125; 0.088 e 0.062 mm) em um agitador automático por 10 minutos e uma média de 7 minutos manualmente, obtendo-se diretamente as percentagens relativas de abundância de cada classe.

Nas amostras que continham sedimentos lamosos - dos mangues, lagos e pântanos - a separação silte-argila foi realizada por peneiramento via úmido, 0,062mm.

A determinação e análise dos parâmetros estatísticos granulométricos foi realizada da seguinte forma: os dados relativos aos pesos percentuais das classes granulométricas foram inicialmente armazenados em planilha Excel e posteriormente processados no software SysGran[®] 2.4, desenvolvido por Camargo (1999) na Fundação Universidade do Rio Grande (FURG). Os parâmetros estatísticos granulométricos (média, mediana, selecionamento, assimetria e curtose) foram definidos segundo a classificação de Folk & Ward (1957). Tais procedimentos permitiram a análise dos parâmetros estatísticos e da classificação sedimentológica das amostras que foram relacionadas aos seus respectivos ambientes com o objetivo de descrevê-los.

6.4. RECONHECIMENTO DOS AMBIENTES DEPOSICIONAIS COSTEIROS

O reconhecimento dos ambientes costeiros foi possível através da interpretação visual das imagens pela análise das propriedades Físicoquímicas nas imagens ópticas e da análise visual da textura, forma, tons e tamanho nas imagens SAR.

Foram reconhecidos dezessete ambientes costeiros que foram agrupados em cinco unidades morfológicas. Planalto Costeiro que predomina em cotas médias abaixo de 50 m; Planície de Maré, definido entre 10 e 20m de altitude; Planície Litorânea, que ocorre abaixo das cotas de 20m como observado no Modelo Digital de Elevação, e a Planície estuarina onde os ambientes ocorrem em cotas abaixo da linha de costa, ou seja, cotas menores que zero, sendo que foram incluídas também nesta classificação as feições antrópicas como áreas construídas e lago artificial. Esta divisão pode ser vista na **Tabela 6.1**.

Tabela 6.1: **Unidades morfológicas e ambientes costeiros mapeados**

Unidades morfológicas	Ambientes costeiros
Planalto costeiro	<ul style="list-style-type: none">• Planalto costeiro (Grupo Barreiras)
Planície de maré	<ul style="list-style-type: none">• Manguezal• Cobertura arenosa de supramaré• Campo• Chenier• Planície de maré lamosa
Planície litorânea	<ul style="list-style-type: none">• Paleodunas• Dunas costeiras atuais• Praia-Placha Barreira• lagos
Planície estuarina	<ul style="list-style-type: none">• Várzea• Barras arenosas
Sistema Antropogênc	<ul style="list-style-type: none">• Área urbana / construída• Lago artificial

6.4.1. Planalto Costeiro

O arcabouço geológico é integrado pelo Grupo Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras, que correspondem ao embasamento da planície costeira estudada. Este contato é marcado por uma mudança litológica entre os sedimentos areno-argilosos avermelhados do Grupo Barreiras e lamosos da planície costeira; vegetacional brusco entre a floresta secundária do planalto costeiro e mangue da planície costeira; e morfológica brusca marcada pelas falésias mortas de até 11 m de altura (Souza Filho, 1995).

De acordo com Silva (1996), o Planalto Costeiro consiste principalmente de um relevo continental caracterizado por uma superfície plana, suavemente ondulada e fortemente dissecada, por vezes apresentando elevada declividade formando falésias ativas, ao longo da costa, e falésias inativas, em porções mais internas da zona costeira e nas margens dos estuários e rios.

Compreende, portanto um relevo colinoso com amplitudes variadas, altitudes médias de 30 m e máxima de 70 m, estas obtidas através de perfis gerados pelos dados SRTM, como foi demonstrado nos perfis topográficos apresentados no Capítulo 5 (item 5.1.3.2). Através do produto SRTM também foi possível reconhecer a ocorrência das falésias ativas em porções onde o Planalto costeiro ocorre diretamente em contato com a linha de costa, causando uma mudança abrupta na declividade do relevo do Planalto costeiro. A **Figura 6.3 B** mostra um exemplo de ocorrência de falésia ativa localizada na orla da cidade de Salinópolis, onde o Planalto Costeiro (em verde na escala de cores) com altitude de aproximadamente 30m encontra-se em contato com a linha de costa representada pela praia do Massarico.

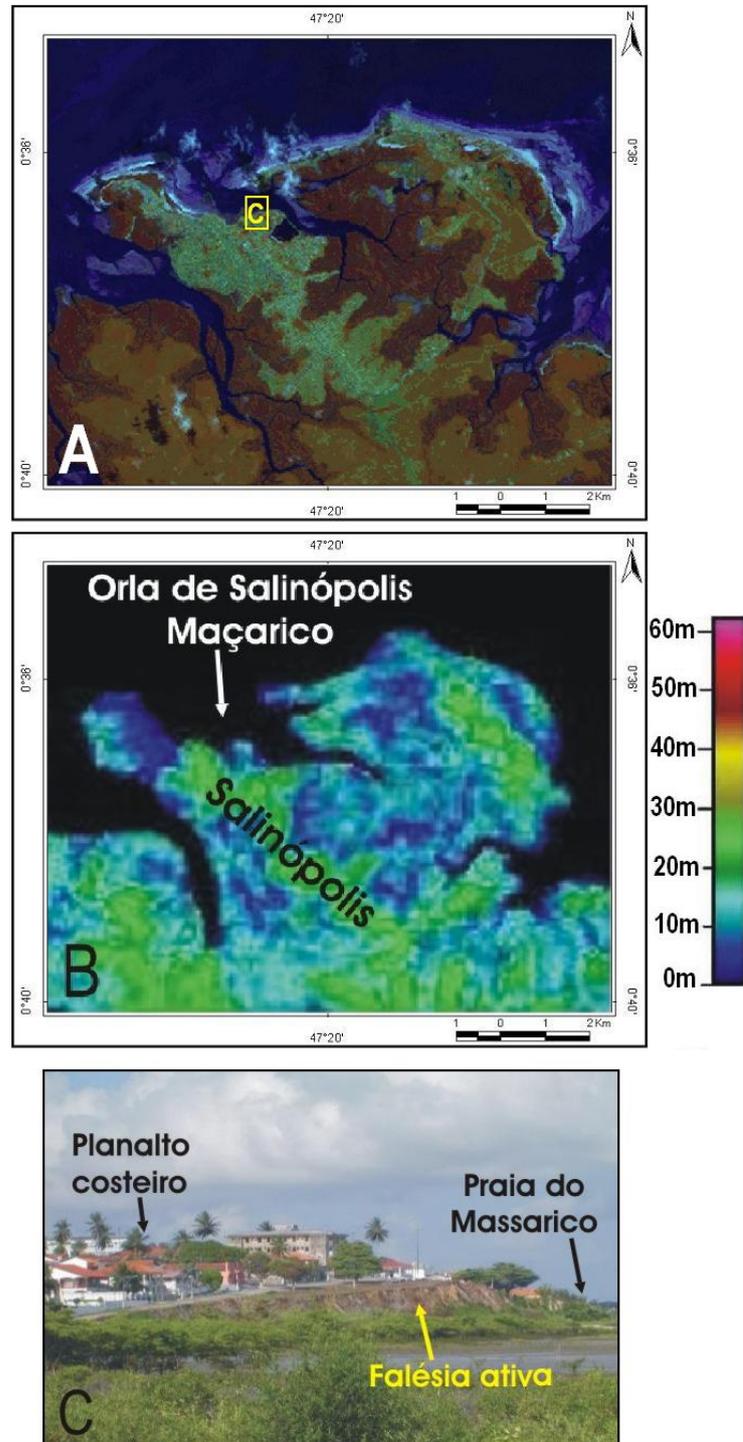


Figura 6.3: Imagem ETM, Composição 453 (A) mostrando detalhe da cidade e orla de Salinópolis, (B) Paleta de cores mostrando o contato direto do planalto costeiro com a linha de costa na orla do Maçarico (seta branca) e (C) uma foto com o detalhe do desnível abrupto do terreno formando uma falésia ativa.

O Planalto Costeiro é evidenciado na imagem Landsat ETM +7 pela cor laranja avermelhada, com pequenas porções esverdeadas (**Figura 6.4 A**). Este comportamento espectral ocorre em virtude da alta reflectância da vegetação juntamente com o solo, nas bandas 4 (canal vermelho) e 5 (canal verde) respectivamente, fornecendo assim uma perfeita distinção entre as áreas do Planalto e Manguezais, o que facilita a delimitação da interface entre esse dois ambientes.

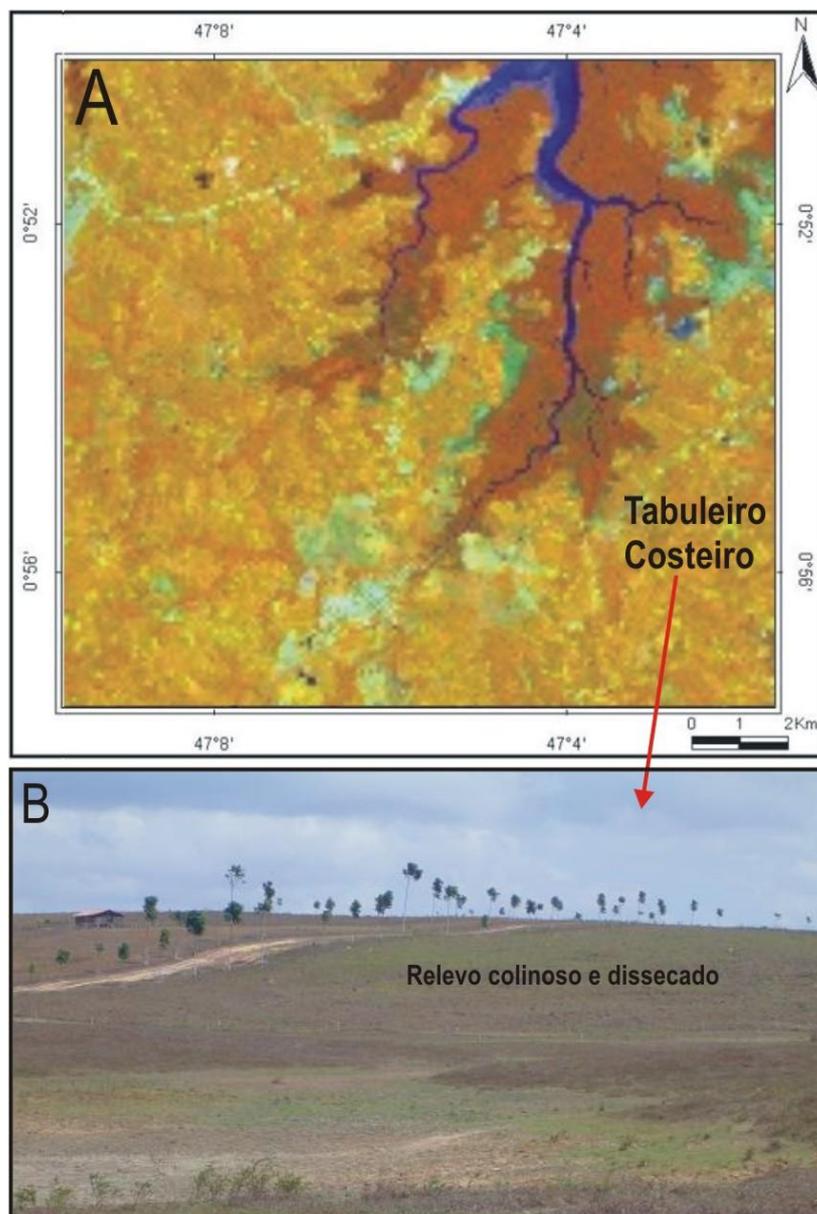


Figura 6.4: Planalto costeiro, A- Composição ETM 4R5G3B, B- Foto mostrando relevo característico do ambiente.

De forma contrária, as imagens RADARSAT-1 W1 não apresentaram bons resultados para a diferenciação e mapeamento do planalto costeiro, bem como para a delimitação da interface Planalto/ manguezal (**Figura 6.5-A**). Isso ocorre em função do mecanismo similar de retroespalhamento nessas duas áreas resultando em padrões homogêneos de textura e tons de cinza.

No entanto, na imagem integrada SPC-SAR foi possível reconhecer o Planalto costeiro pela cor azul claro com textura suavemente rugosa (**Figura 6.5-B**). Esta resposta foi bem aceita no que diz respeito à delimitação da sua interface supracitada, em função da contribuição integrada da resposta espectral do ótico, que nos proporcionou uma boa percepção desta, em conjunto com as propriedades dielétricas e de microtopografia proporcionada pelo sensor SAR. A **Figura 6.5** mostra a otimização da delimitação da interface Planalto Costeiro/manguezal na imagem integrada, em comparação com a imagem SAR analisada individualmente.

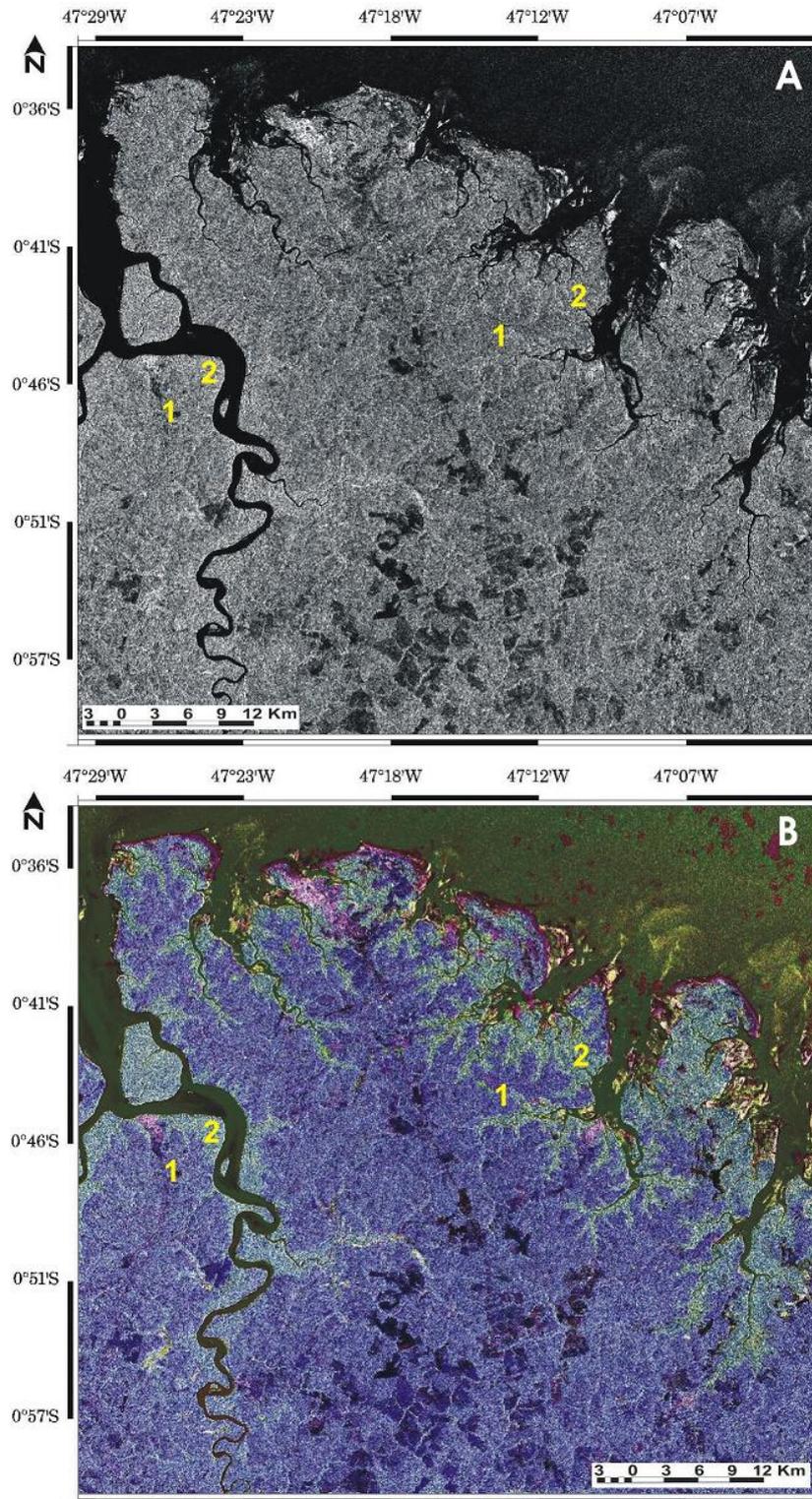


Figura 6.5: (A) imagem SAR (04 outubro 2004), (B) imagem hibrida mostrando clara distinção da interface Planalto costeiro/manguezal. 1 - Planalto costeiro, 2-Manguezal.

6.4.2. Planície de maré

A unidade acompanha a linha de costa e está associada a uma série de ilhas, baías e canais. Ocorre nas áreas mais internas e protegidas da ação energética das ondas (Silva, 1996; Mendes et.al, 1997).

Nos dados de sensoriamento remoto foi possível diferenciar quatro subunidades com características espectrais e morfológicas distintas: Manguezais, Planície arenosa de supramaré, campos (Pântanos salinos) e cristas de praias.

6.4.2.1. Manguezal

O manguezal constitui uma zona de transição entre ambientes oceânico e continental. Corresponde à unidade de maior ocorrência na planície costeira estudada constituindo extensas planícies lamosas ricas em matéria orgânica, colonizadas principalmente por *Rhizophora* e *avicennia*. (**Figura 6.6**). Elas estão situadas entre os níveis de maré alta de sizígia e a média das marés e circundando os canais estuarinos, canais de maré e baías.

Faz contato abrupto (tanto morfológico quanto vegetacional) com o Planalto Costeiro, e gradacional com a zona de supramaré (em direção ao mar) com as praias-flecha barreiras e campo de dunas costeiras atuais. Em algumas áreas faz contato gradacional com a cobertura arenosa retrabalhada de supramaré (**Figura 6.7 C**) ou com campos antes de encontrar o planalto costeiro (Silva, 1996; Silva Jr. & El-Robrini, 2001).

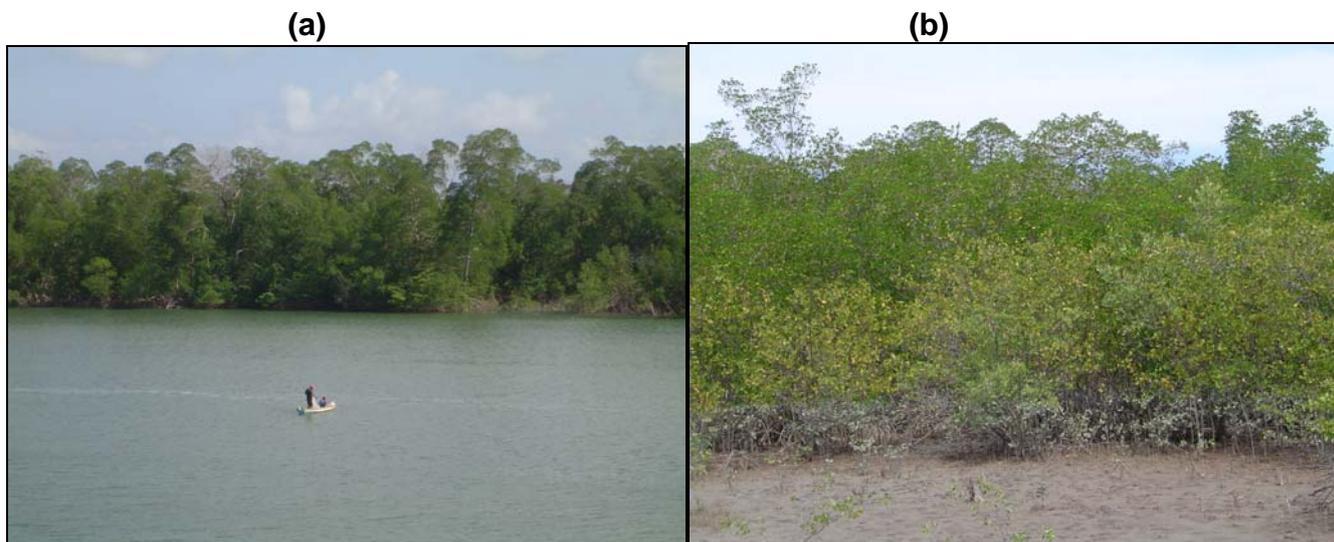


Figura 6.6: Vegetação de manguezal, (a) *Rhizophora*, Ilha do atalaia-Salinópolis (b) *Avicennia*, estrada Quatipuru-boá vista.

Na composição colorida Landsat ETM +7 os manguezais apresentam alta reflectância na banda 4 resultando em uma cor marrom avermelhada como resposta da interação da radiação com a densa floresta de manguezais (**Figura 6.7 A**). O aumento da quantidade de água e do teor de matéria orgânica presente nos manguezais tem o poder de aumentar a absorção da radiação eletromagnética tornando o tom de marrom um pouco mais escuro.

Como citado, no capítulo que discute o uso das imagens RADARSAT, o mapeamento das áreas inundadas na região amazônica tem sido realizado com base no efeito de *double bounce*, cujo mecanismo de retroespalhamento resulta em uma alta resposta, e conseqüentemente na imagem de pixels com níveis de cinza altos (alto brilho), porém não tão diferentes das regiões adjacentes (Planalto costeiro), com pode ser observado no detalhe da **Figura 6.7 B**.

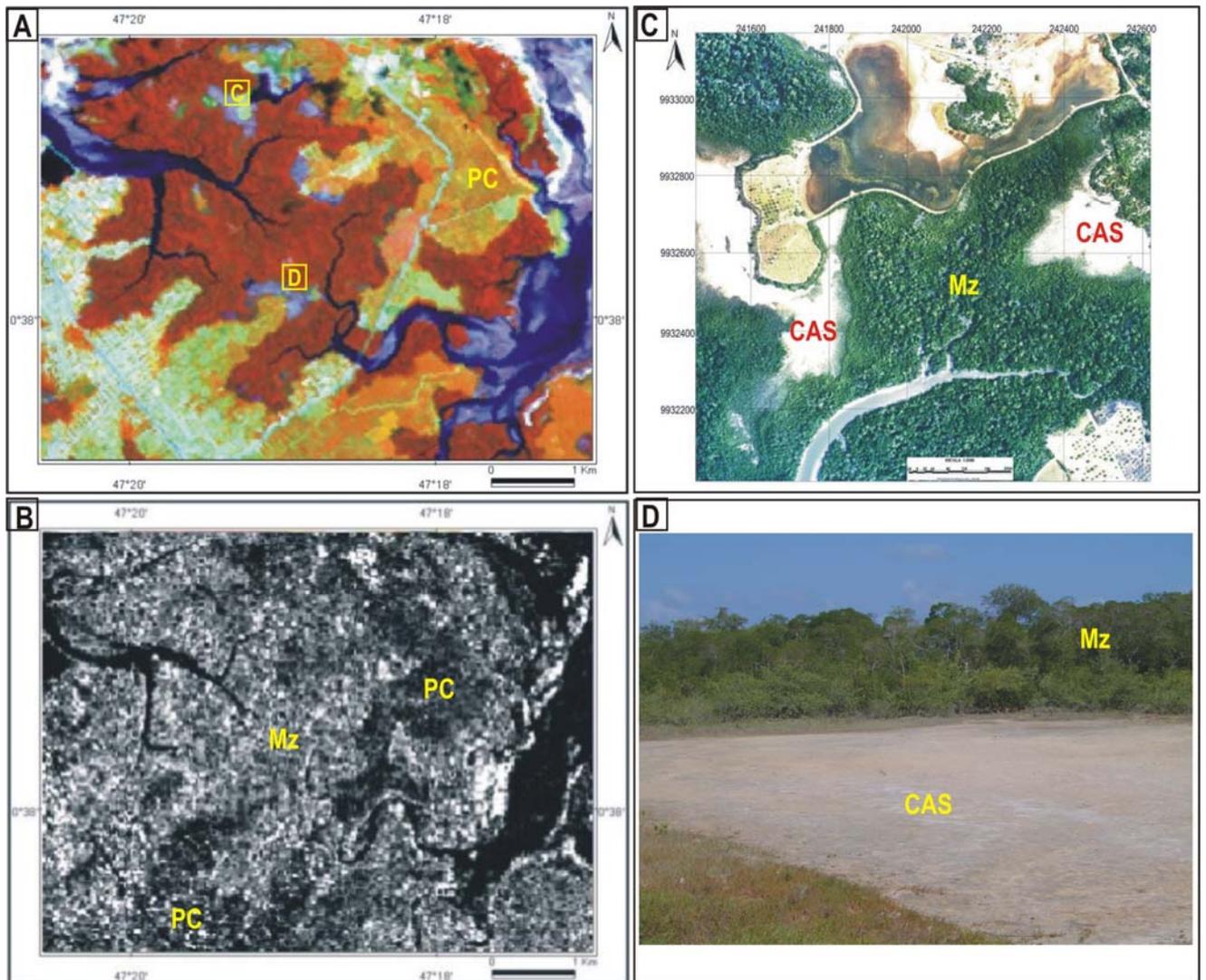


Figura 6.7: Resposta espectral dos principais ambientes da planície de maré e sua interação com o planalto costeiro. (A) Imagem ETM composição 4R5G3B; (B) Radarsat-W1 de 04 outubro 2004; (C) Ortofoto da cidade de Salinópolis (outubro-2001) mostrando a floresta densa de médio porte nos manguezais. Mz = Manguezal, CAS = Cobertura arenosa de supramaré, PC = planalto costeiro

As condições ambientais (maré e chuva) no momento da aquisição das imagens também podem influenciar diretamente na intensidade desse efeito. Porém, apesar das imagens usadas neste trabalho terem sido obtidas em condições e amplitudes de marés distintas (**Tabela 6.2**), o retroespalhamento apresenta-se de maneira semelhante tanto em áreas inundáveis, quanto em terra firme, diferentemente da teoria na qual se espera um aumento do efeito *double bounce* nos manguezais.

Tabela 6.2: **altitude de marés no momento da aquisição de cada uma das imagens SAR**

Imagem RADARSAT-1	Altitude de maré (m)
19 Janeiro 2003	3,3
12 Fevereiro 2003	2,2
10 Setembro 2004	2,4
04 Outubro 2004	1,5

Desta forma, supõe-se que a disposição dos elementos naturais na região em estudo, juntamente com a configuração do sistema RADARSAT-1 não favoreceram a separação de áreas de terra firme dos manguezais com base no mecanismo *double bounce*, apesar deste ter permitido o mapeamento desse tipo em vários trabalhos citados na literatura (Hess *et al.*, 1995; Souza Filho, 2000; Souza Filho & Paradella, 2002; Beisl *et al.*, 2003; Teixeira, 2006).

Entre os fatores considerados importantes para explicar esta resposta, cita-se: 1) A possibilidade da amplitude das marés, não tenha sido suficientemente grande para inundar significativamente as extensas áreas dos manguezais; 2) A similaridade dos mecanismos de retroespalhamento entre os ambientes; 3) O arranjo da cobertura vegetal na região, floresta densa de médio porte, não permitiu a penetração das microondas no dossel, uma vez que no sistema SAR de banda C ocorre interação apenas com o topo das árvores.

Ademais, a escassez de dados de precipitação na região nos dias que antecederam a aquisição das imagens tornou inviável fazer maiores interpretações sobre o comportamento do retroespalhamento nas imagens.

Na imagem híbrida SPC-SAR esta unidade é reconhecida pela cor verde claro com rugosidade moderada, sendo esta de difícil percepção devido à influência do ruído que se torna mais intenso em regiões com vegetação densa, a exemplo dos manguezais.

Quanto à resposta nas imagens SRTM, o ambiente manguezal caracteriza-se por uma superfície plana que ocorre em intervalos de 0 a 5m. Entretanto, vale ressaltar que essa elevação foi obtida pelo DEM do SRTM que registra a superfície da cobertura vegetal, a copa das árvores do manguezal que atinge 20m de altura. Porém, sabe-se que a elevação média dos depósitos de manguezais que ocorrem na Planície Costeira de Bragança é de 2,5m (Cohen, 2005). Lateralmente, os manguezais bordejam o Planalto Costeiro em toda a sua extensão, exceto onde ocorrem falésias ativas, onde o Planalto Costeiro é interrompido abruptamente.

6.4.2.2. Cobertura arenosa de supramaré

A Cobertura arenosa de supramaré foi correlacionada com a superfície arenosa retrabalhada de supramaré descrita por Silva (1996) e Silva Jr. & El-Robrini (2001), que a descreveram como uma superfície areno-argilosa resultante da dissipação de dunas, cujo limite inferior é o manguezal, o superior está associado ou a porções de baixa declividade do Planalto Costeiro (formando contato abrupto evidenciado por falésias inativas, ou pela vegetação) ou com as Paleodunas (com contatos dos tipos gradacional e vegetacional abrupto). Nas imagens Landsat ETM +7 é reconhecida pela cor roxa esverdeado, com média ou pouca reflectância nas três bandas, em resposta à presença de sedimentos arenosos úmidos com pouca vegetação (**Figura 6.7 A**). Ocorrem bordejando o planalto costeiro em quase toda a sua extensão sempre de maneira descontínua. Topograficamente ocorre logo acima dos Manguezais e abaixo do Planalto Costeiro, em elevações entre 5 e 7m.

Na imagem de Radar e no produto híbrido SPC-SAR a resposta desse ambiente não pôde ser observada, isso foi atribuído à sua distribuição espacial muito restrita em relação à resolução espacial desses sensores.

6.4.2.3. Campos / Pântanos salinos

Os pântanos estão situados na zona de inter-maré superior e representam a zona de transição entre o planalto costeiro e o sistema de manguezais. (Souza Filho & El-Robrini, 1996). Sofrem influência das marés somente durante os períodos de marés de sizígia.

Na composição colorida Landsat ETM +7, os campos ou pântanos salinos são identificados por uma cor verde claro (**Figura 6.8**) em resposta ao comportamento espectral da vegetação rasteira juntamente com os sedimentos lamosos. Ocorrem somente na porção leste da área estudada em elevações superiores às dos manguezais entre 5 e 8m aproximadamente, sendo esta medida do SRTM corresponde à altura do solo.

Nas microondas, os campos não puderam ser diferenciados nas imagens obtidas em Janeiro e fevereiro, apresentando-se em um tom de cinza claro, semelhante ao das unidades ao redor, manguezal e planalto costeiro (**Figura 6.8**). Uma interpretação para esse comportamento do retroespalhamento seria devido ao provável aumento de umidade resultante das chuvas que são intensificadas neste período do ano, que provocam um aumento da constante dielétrica no ambiente e dificultam a propagação da onda no meio, resultando em um brilho mais intenso na imagem, semelhante ao ocorrido nos manguezais.

Porém, nas imagens dos meses de setembro e outubro os campos puderam ser perfeitamente diferenciados pela sua resposta em tom de cinza médio a escuro (**Figura 6.8**). Seguindo o mesmo raciocínio, esse comportamento do retroespalhamento poderia ser explicado pelo fato de que normalmente na época menos chuvosa a umidade dos campos dessa região é muito pequena, tornando tanto o solo lamoso, quanto a vegetação ressecados e com aspecto semelhante ao de regiões desmatadas como pode ser observado nas fotos da **Figura 6.8**.

Ademais o fato de as imagens terem sido adquiridas em condições de maré baixa (1,5m em 04 de outubro) e média (2,4 em 10 de setembro) complementa essa idéia, uma vez que este ambiente é alagado somente durante os períodos de maré de sizígia, principalmente de equinócios (março e setembro).

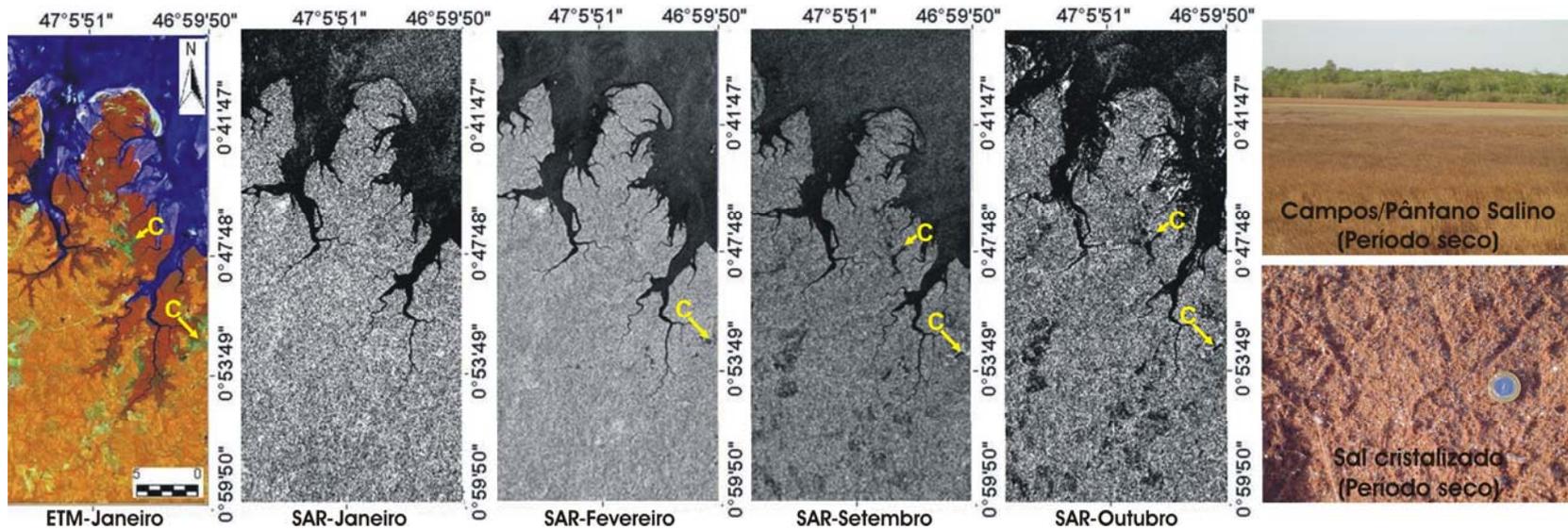


Figura 6.8: Imagem ETM mostrando a resposta espectral que identificaram os campos e imagens RADARSAT-W1 demonstram a variação do comportamento do retroespalhamento da superfície dos campos em função de mudanças nos parâmetros ambientais, as fotos mostram os campos em período seco. C = Campos

Dessa forma a interação das microondas com a superfície menos rugosa dos campos em condições de seca (precipitação e maré) resulta no espalhamento difuso em terra, onde parte da radiação retorna ao sensor e outra parte é refletida no sentido oposto.

A imagem híbrida SPC-SAR revela para este ambiente uma cor verde muito escuro a preto, em resposta ao comportamento do retroespalhamento discutido anteriormente para as imagens de setembro e outubro, juntamente com a contribuição espectral do sensor ótico.

6.4.2.4. Cristas de praia

Corresponde a corpos arenosos alongados que repousam sobre depósitos lamosos de manguezais que foram isolados dos processos costeiros por uma planície lamosa subsequente, representando uma interrupção temporária da propagação da planície costeira. Estes depósitos são interpretados por Silva (1996) como Chenier. São caracterizados pela suas formas geométricas lineares e curvados e pela sua topografia com divisa marcada por maré progradante (manguezais), são reconhecidos nas imagens pela sua forma espacial e contexto (limitados por manguezais) do que pela sua resposta espectral que é semelhante à das praias atuais (Silva, 1996; Souza Filho & El-Robrini, 1996; Silva Jr. & El-Robrini, 2001).

Estes ocorrem em cotas inferiores a 6 m, são reconhecidos na imagem Landsat ETM⁺7 por uma cor verde azulado claro, em resposta espectral da areia e fina cobertura por vegetação espalhada que expõe o solo (areia), resultando em uma alta reflectância nas bandas 3 e 5. Nas imagens de Radar e na fusão SPC-SAR a resposta desse ambiente não pôde ser observada, isso foi atribuído à sua distribuição espacial restrita.

As cristas de praia são feições importantes inseridas na planície de maré e são facilmente identificados pela sua forma geométrica em planta composta por cordões arenosos alongados e isolados dentro dos manguezais (**Figura 6.9**). Ocorrem em altitudes médias de 10 m. Vale lembrar que a unidade também é coberta por vegetação e que esta elevação determinada pelo DEM do SRTM corresponde à altura média da copa das árvores.



Figura 6.9: Figura mostrando a forma alongada do corpo arenoso em meio ao manguezal no município de Salinópolis. (CP = crista de praia)

6.4.2.5. Planície de maré lamosa

A planície de maré lamosa é constituída por sedimentos lamosos que ocorrem em algumas áreas bordejando as regiões de mangue e são expostos somente nos períodos de maré baixa. Este ambiente pode atingir grandes extensões em virtude de esta área estar submetida ao regime de macromaré, como demonstrado nas fotos em frente às cidades de Maracanã e Salinópolis (**Figura 6.10**).

Nas imagens de satélite não foi possível discriminar as áreas de planície de maré lamosa, em decorrência da mesma não estar exposta no momento da tomada das imagens que foram adquiridas em condições de maré vazante, enchente e alta. A sua identificação foi feita, portanto, com base nos registros de campo.

(A)



(B)



**Figura 6.10: Planície de maré Lamosa
(A) orla da cidade de Maracanã, (B) orla da cidade de Salinópolis**

6.4.3. Planície Litorânea ou Litoral

A Planície Litorânea compreende um sistema complexo por estar sofrendo diretamente as influências oceanográficas e meteorológicas, que são muito severas na região e provocam intensas modificações. Esta unidade é considerada a mais complexa, pois corresponde à zona de transição entre os ambientes continentais e os ambientes marinhos, sendo resultante da ação construtiva de marés, ondas e ventos, em função desses processos oceanográficos e atmosféricos atuantes (Silva, 1996).

Na área de estudo a unidade planície litorânea é subdividida em seis subunidades com características distintas: Paleodunas, interdunas, dunas atuais, barras arenosas, praias, sistema de lagos. Na **Figura 6.11** encontra-se a identificação dos ambientes da planície litorânea nas imagens ETM, SAR e na fusão SPC/SAR.

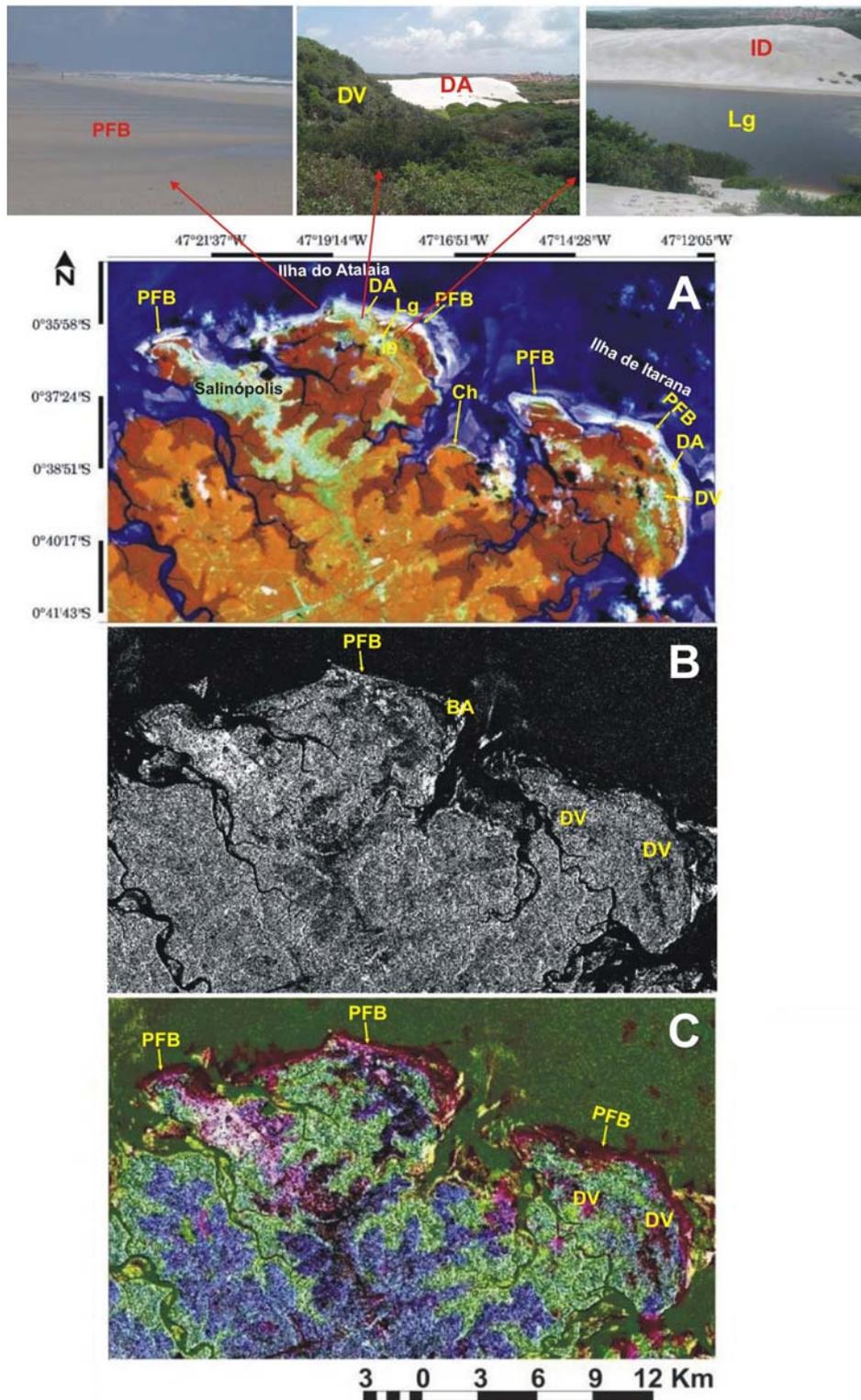


Figura 6.11: A - Imagem ETM, composição 453 mostrando os ambientes da Planície litorânea com detalhes de fotos de campo, B- Imagem SAR e C- Imagem produto da fusão SPC-SAR. PFB: Praia flecha barreira, DA: Dunas atuais, LG: Lagos, Ch: Chenier, DV: Dunas Vegetadas.

6.4.3.1. Dunas vegetadas

Encontram-se sobrepostas e limitadas pelo Planalto Costeiro, manguezais e cobertura arenosa retrabalhada de supramaré. São colonizadas por espécies arbóreas, arbustivas e cipós, alcançando por vezes uma vegetação exuberante e diversificada com o porte de mata. Esta subunidade foi correlacionada com as Paleodunas descritas por Silva (1996) e Silva Jr. & El-Robrini (2001).

Na imagem Landsat ETM⁺ 7 as paleodunas são associadas com a cor 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. Na ilha de Itarana possui resposta espectral alta também na banda 4, em resposta à densidade da vegetação ser maior **(Figura 6.11 A)**.

As dunas vegetadas são identificadas no DEM como extensos campos arenosos nos intervalos de cota entre 5 e 20m, correspondendo àquelas dunas que foram isoladas pelos processos costeiros eólicos.

Na imagem de radar, as dunas vegetadas puderam ser observadas somente na Ilha de Itarana, onde ocorrem em maiores dimensões espaciais, podendo ser reconhecidas na imagem pelo tom de cinza médio a escuro **(Figura 6.11 B)**, devido absorção dos sedimentos de areia das dunas, e textura rugosa, em decorrência da macro e microtopografia desenvolvidas tanto pelo relevo, quanto pela vegetação de grande porte. As mesmas também podem ser discriminadas pelo tom rosa na imagem híbrida SPC-SAR, **(Figura 6.11 C)**.

6.4.3.2 Interdunas

As interdunas são semelhantes às dunas vegetadas, porém sua distribuição lateral é mais restrita e abriga os sistemas de lagos em suas porções mais baixas **(Figura 6.11 A)**, em torno de 5 a 10 m.

Na imagem de radar as interdunas puderam ser bem identificadas somente na Ilha de Atalaia, onde possuem maior distribuição espacial. Estas são distinguidas, na imagem pelo tom de cinza médio a escuro, devido absorção da microonda pelos

sedimentos de areia, e textura rugosa, em decorrência da macro e microtopografia desenvolvidas tanto pelo relevo, quanto pela vegetação. Na imagem híbrida a resposta foi semelhante à apresentada pelas dunas vegetadas.

6.4.3.3. Dunas costeiras atuais

Essa subunidade é representada por dunas móveis transversais e parabólicas orientadas na direção geral E-W (**Figura 6.11 A**). São formadas a partir do retrabalhamento dos sedimentos provenientes das praias e barras litorâneas. Na área estudada, situam-se logo após o pós-praia ou a partir do nível de maré alta média. Estes sedimentos clásticos costeiros merecem atenção especial, pois são resultantes da dinâmica costeira, e são indicadores das mudanças sofridas na área. As dunas transversais e piramidais são compostas de areias bem selecionadas (**Figura 6.12**), e são parcialmente ou completamente cobertas por vegetação. (Silva, 1996; Silva Jr. & El-Robrini, 2001).

As dunas costeiras atuais são reconhecidas por uma cor verde clara, devido à resposta espectral alta na banda 5, causada pela presença de depósitos arenosos bem selecionados secos e brancos encontrados nas dunas (Figura 26). Nas imagens RADARSAT as dunas não aparecem claramente em função do baixo contraste principalmente por apresentarem propriedades semelhantes às das praias, que se encontram geograficamente em contato lateral com as dunas. Dessa forma, a resposta entre essas duas unidades se confunde.

São caracterizadas por uma superfície levemente ondulada que ocorrem em todas as Ilhas da área entre as cotas de 10 e 25 m, sendo esta a sua altura real, pois desenvolvem vegetação somente em suas partes mais baixas. Lateralmente as dunas atuais bordejam as Praias Flecha Barreira em praticamente toda a sua extensão.

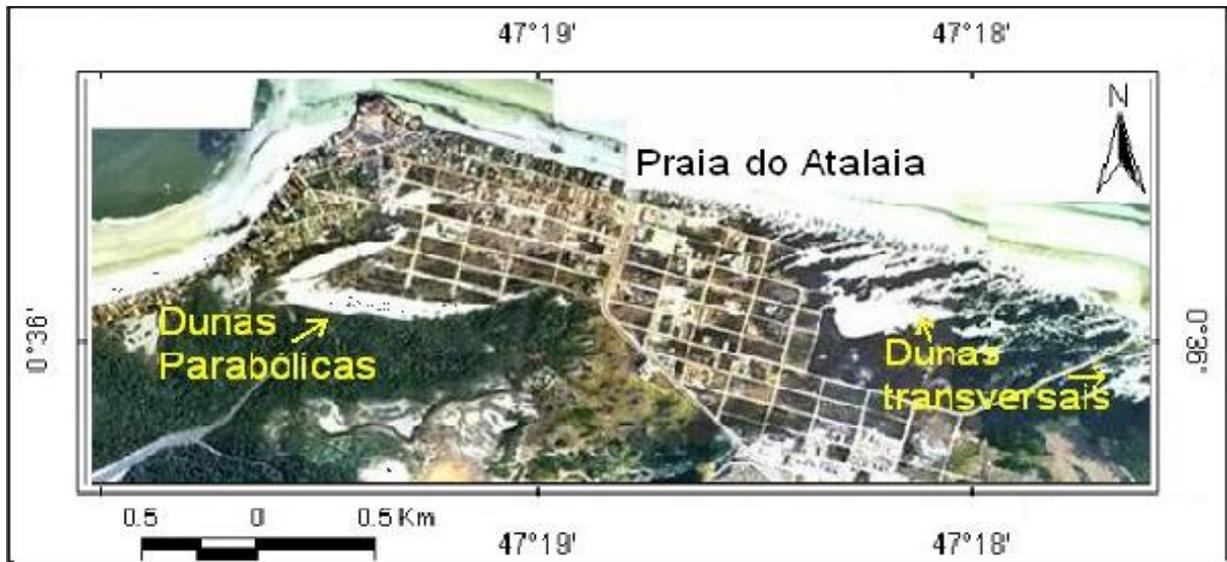


Figura 6.12: Ortofoto mostrando detalhe das dunas costeiras atuais, dunas transversais e parabólicas localizadas na Ilha do Atalaia.

6.4.3.4. Praias-flecha barreira

Estão localizadas na zona de maior energia do litoral e se estendem desde o nível de baixa-mar de sizígia, até a linha máxima de alcance das marés sizígia e / ou de tempestade (base do Campo de Dunas e falésias ativas), (Silva, 1996). Esta unidade gera zonas internas protegidas da ação direta das ondas e marés, possibilitando o desenvolvimento de manguezais (planície de maré) os quais estão sendo também soterradas pela migração dessas praias em direção ao continente. As praias são subdivididas em: zona de supramaré, zona de intermaré e zona de inframaré (Souza Filho et.al., 2003).

As praias-flecha barreira podem ser identificadas nas margens dos manguezais em porções onde os processos costeiros são mais intensos. Ocorrem em altitudes inferiores a 5m e sua extensão lateral é variável até alcançar o nível do mar. Ocorrem na margem de todas as ilhas da área, especificamente nas porções que sofrem intenso retrabalhamento das ondas.

Na composição colorida da imagem landsat ETM +7 as praias são associadas com a cor branca, devido à resposta espectral alta nas três bandas, em consequência da presença de depósitos arenosos bem selecionados secos e brancos encontrados

nas praias (**Figura 6.11 A**). Nas imagens RADARSAT as praias não aparecem claramente em função do baixo contraste, devido absorção e/ou espalhamento especular da radiação. Na imagem produto da fusão SPC-SAR esta unidade pode ser identificada pela cor rosa escuro.

6.4.3.5. Sistema de lagos

Corresponde aos corpos hídricos associados aos campos de dunas vegetadas e móveis, estando limitados pelas mesmas. São abastecidos por águas pluviais e pela subida do nível freático no período chuvoso (Silva, 1996; Silva Jr. & El-Robrini, 2001). Ocorrem principalmente na ilhas do Atalaia e Itarana.

Na imagem Landsat ETM⁺7 esta subunidade 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. São identificados pela cor cinza escuro a preto (**Figura 6.11 A**). Nas imagens RADARSAT e na fusão SPC-SAR os lagos não aparecem claramente em função do baixo contraste, devido o espalhamento especular.

6.4.4. Planície Estuarina

As planícies estuarinas compõem extensas unidades morfológicas de planície costeira. Essa unidade está inserida dentro dos limites de influência da maré rio acima e domínio de processos marinhos na foz (Mendes, *et. al.*, 1997). É representada pelas planícies de várzeas e pelas barras arenosas de maré.

6.4.4.1. Várzeas

Esta unidade é caracterizada pelo seu posicionamento geográfico ao longo dos canais fluviais. São planícies sujeitas à inundação durante a elevação das marés e ação das chuvas, ou ambas (Pereira, 1995).

As várzeas podem ser reconhecidas na imagem Landsat-7 pelo tom vermelho escuro a marrom (**Figura 6.13 A**), semelhante à resposta espectral apresentada pelos

manguezais, estes dois ambientes foram diferenciados pela sua distribuição espacial margeando os grandes rios, não foi possível.

Nas imagens RADARSAT-W1 e SPC-SAR esta unidade não apresenta boa resposta em função da sua distribuição espacial restrita e do baixo contraste, sendo que a identificação da interface terra firme várzea não foi possível.

Na área de estudo esta unidade ocorre principalmente ao longo do rio Maracanã, **(Figura 6.13 B).**

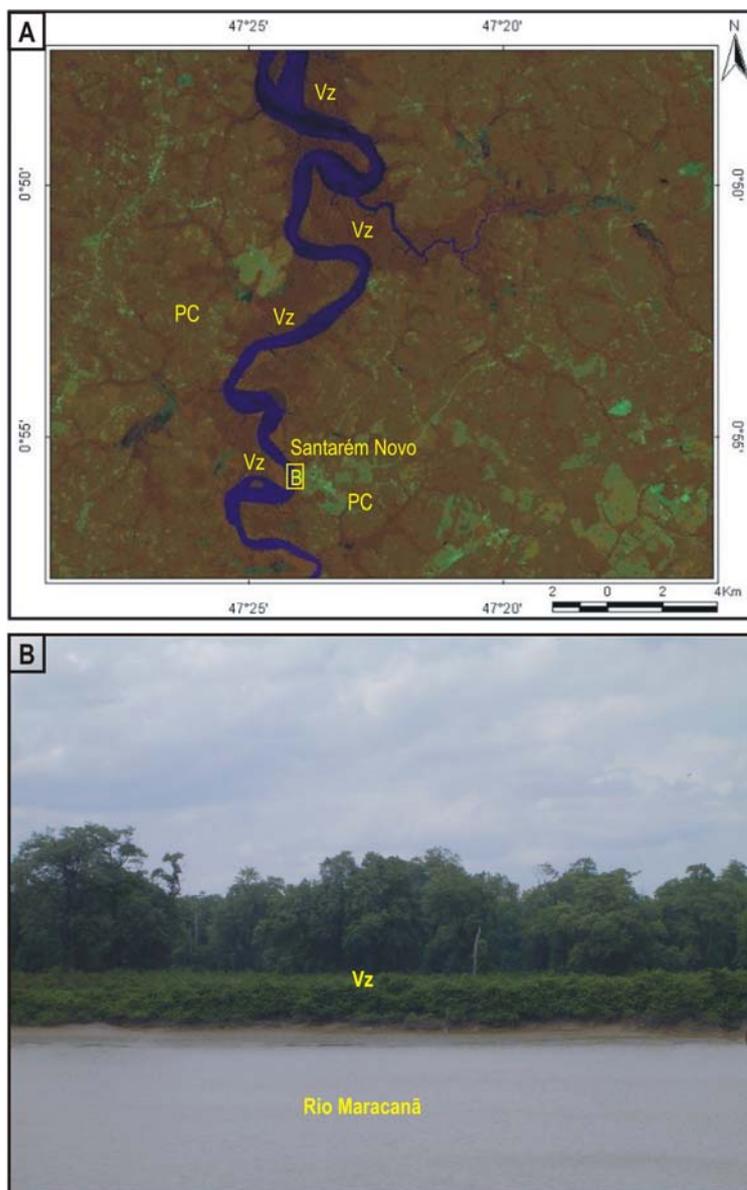


Figura 6.13: Planície de Várzea, Santarém Novo, mostrando vegetação densa e sedimentos lamosos ao longo da planície de inundação. A- Imagem ETM, composição 453, B- Foto das várzeas que bordejam o rio Maracanã

6.4.4.2. Barras arenosas de maré / Delta de maré vazante

São representadas por barras longitudinais desenvolvidas, principalmente na foz dos canais de maré e de baías. Ocorrem como corpos alongados dispostos de forma paralela ou perpendicular à linha de costa, migrando em alguns casos sobre os manguezais causando o seu soterramento. Ficam totalmente expostas durante a baixa-mar e submersas na preamar.

Na imagem Landsat ETM⁺ 7 as barras são associadas com cores 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 (**Figura 6.14 A**), sendo que na imagem produto da decorrelação da composição colorida 4R5G3B foi possível realçar ainda mais este ambiente (**Figura 6.14 B**). São caracterizados por bancos de areia que ocorrem em cotas inferiores a 0 m.

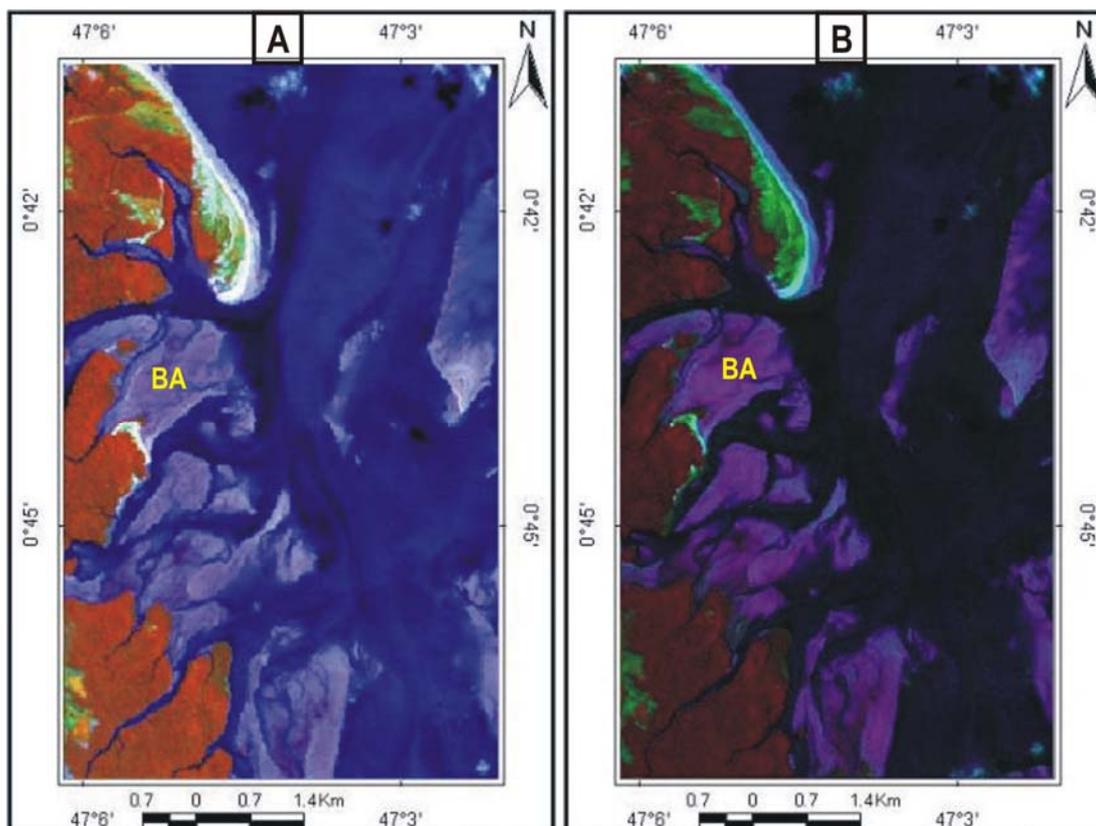


Figura 6.14: A- Imagem ETM, Composição 453 com realce linear mostrando resposta espectral das Barras arenosas (BA), B- Imagem ETM após processamento de realce por decorrelação mostrando maior contraste das barras arenosas.

Com o RADARSAT-1 foi possível obter informações morfológicas em função das variações de rugosidade e tons de cinza. Na imagem de 04 de outubro, adquirida em condições de maré enchente, com amplitude aproximada de 1,5m, onde é observado barras arenosas de intermarés emersas (**Figura 6.15 A**), foi possível distinguir as direções de alinhamento paralela e perpendiculares das barras em relação à linha de costa. No entanto, somente na imagem de 12 de Fevereiro de 2003 foi possível traçar linhas de fluxo nos canais de marés, pois esta foi adquirida em condições de maré vazante, o que proporcionou uma maior rugosidade superficial da água. Ambas as situações podem ser observadas na **Figura 6.15 B**. A configuração das linhas permite inferir a influência das correntes de marés na costa. Estes dados podem contribuir nas investigações dos processos e modificações hidrodinâmicos atuantes na região, bem como para uma primeira abordagem sobre os mecanismos de dispersão de sedimentos na costa e nos estuários em estudo.

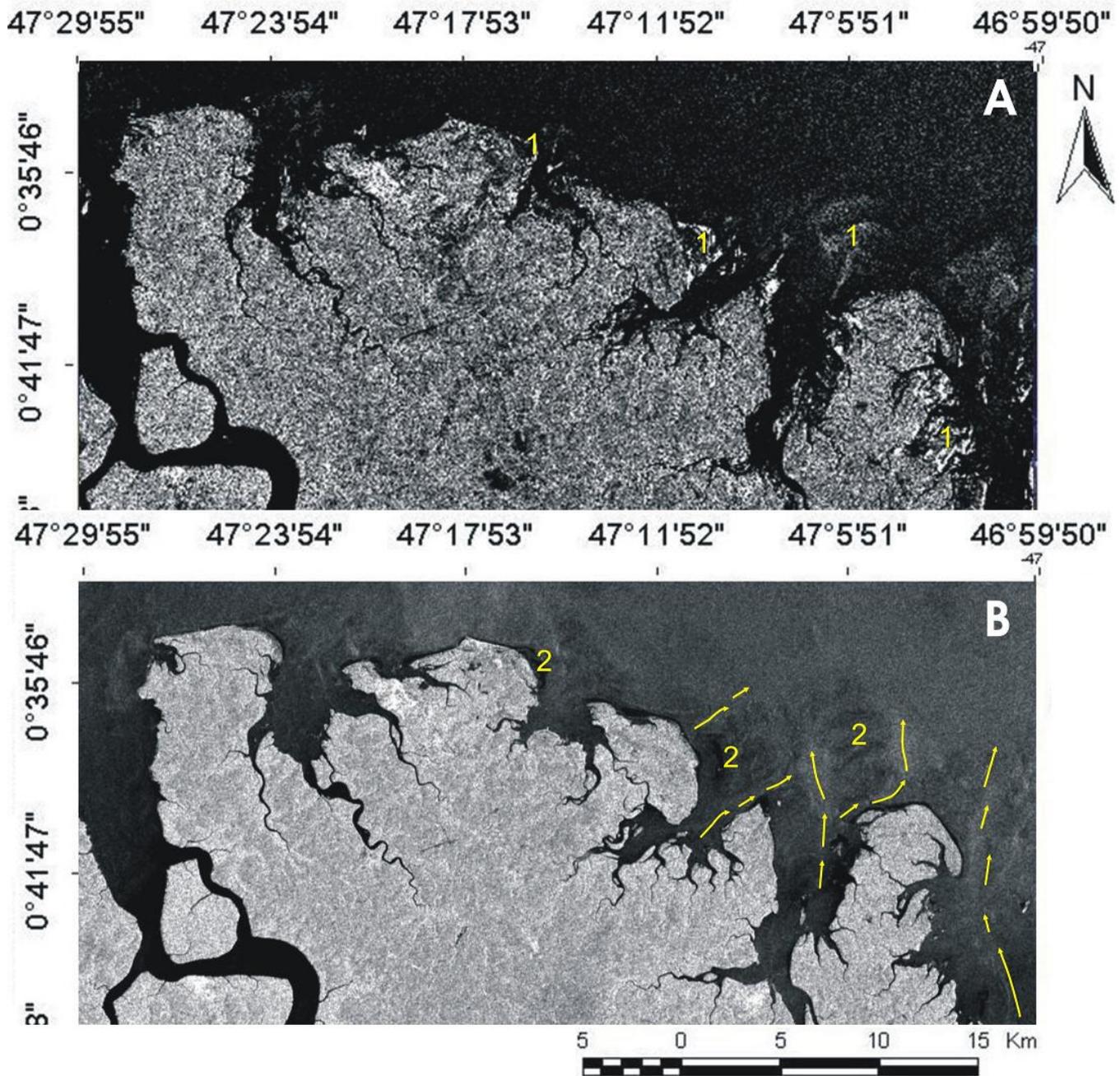


Figura 6.15: Imagens RADARSAT-1 Wide-1 órbita descendente. (A) Imagem adquirida em 04 de outubro de 2004, condições de maré enchente mostrando em (1) as Barras arenosas emersas. (B) imagem adquirida em 12 de fevereiro de 2003, condição de maré vazante, mostrando as principais direções de fluxo dos estuários, e em (2) a morfologia das barras arenosas submersas dada pela rugosidade superficial da água.

6.4.5. Sistema Antropogênico

Os sistemas antropogênicos estão diretamente relacionados com o processo de ocupação urbana que resulta em áreas construídas que podem ser mapeadas pelas imagens de satélite. São observadas em diversas dimensões, sendo que na cidade de Salinópolis foi possível subdividir o sistema antropogênico em duas unidades antrópicas: área construída e lago artificial.

6.4.5.1. Áreas construídas

Correspondem às áreas urbanas consolidadas, cidades e vilarejos, e também as áreas em expansão, as principais cidades são Salinópolis, São João de Pirabas e Maracanã, dentre outras.

São identificadas na imagem ETM pela cor verde claro (**Figura 6.16 A**), em decorrência da mistura espectral proveniente tanto da região do infra-vermelho quanto do visível. Nas imagens SAR são reconhecidas pelos tons de cinza mais claros (**Figura 6.16 B**) em decorrência do efeito de reflexão de canto (*double bounce*).

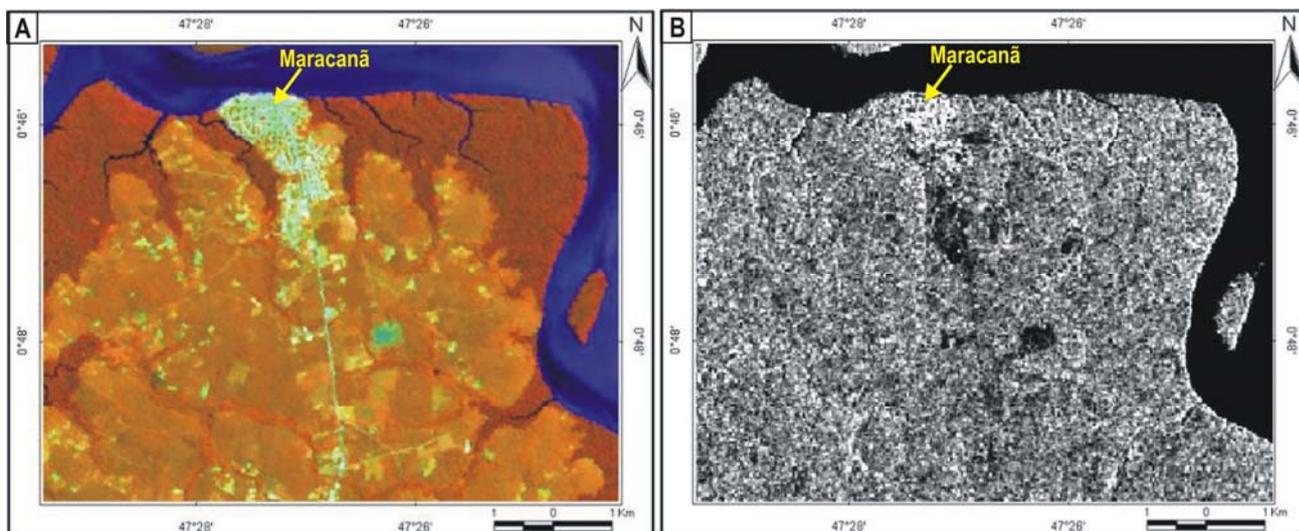


Figura 6.16: Resposta espectral da áreas construída correspondente à cidade de Maracanã (A) Imagem ETM 453, e (B) Imagem Radarsat-W1.

6.4.5.2. Lago artificial

Corresponde a lagos que foram construídos por meios artificiais para diversos fins. Ocorre na cidade de Salinópolis que foi identificado na imagem ETM pela cor azul escuro (**Figura 6.17 A**) em resposta ao comportamento espectral da água ser alto no visível e baixo na região do infra-vermelho. Nas imagens o lago artificial foi identificado pelas tonalidades cinza escuro a preto (**Figura 6.17 B**), decorrentes do padrão de retroespalhamento especular da água.

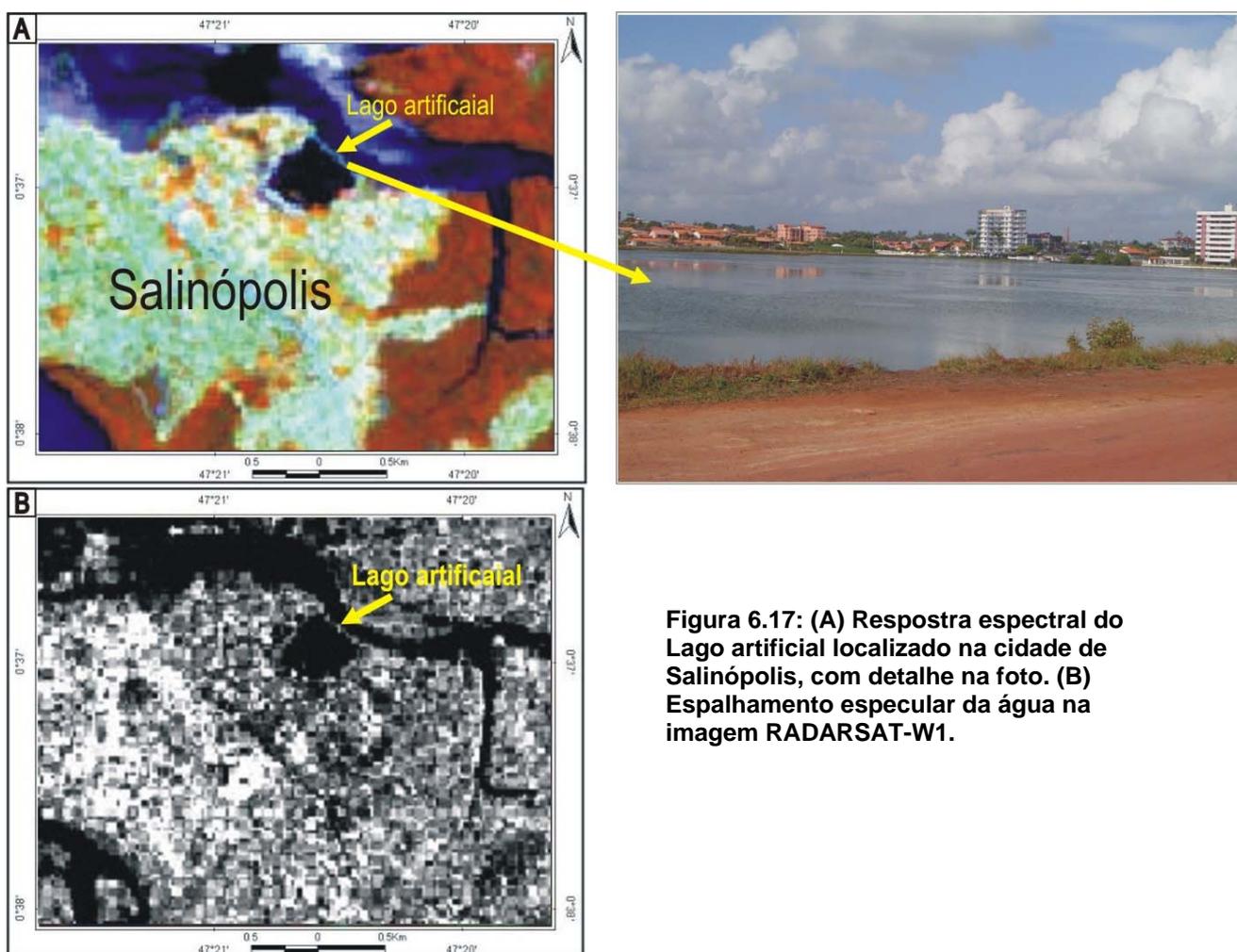


Figura 6.17: (A) Resposta espectral do Lago artificial localizado na cidade de Salinópolis, com detalhe na foto. (B) Espalhamento especular da água na imagem RADARSAT-W1.

6.4.6. Discussão

A análise dos produtos resultantes do processamento digital das imagens Landsat ETM⁺ 7 mostra uma grande quantidade de informações espectrais, que traduzem as propriedades físico-químicas da superfície, e permitiram uma clara distinção das diversas feições da área de estudo. Em contrapartida as imagens óticas apresentam desvantagens por possuírem baixa informação textural, e aquisição limitada em condições atmosféricas adversas, dada a grande cobertura de nuvens na região.

Para as imagens RADARSAT-1 W1, a delimitação das unidades foi bastante difícil, em função principalmente da estrutura homogênea da superfície e que resultou em um baixo contraste entre os ambientes, o que impossibilitou o mapeamento dos ambientes usando somente esses dados.

Porém, as imagens SAR permitiram estender à faixa espectral de observação até as microondas, o que revelou informações únicas, através da análise do comportamento do espalhamento associado às condições ambientais atuantes no momento de aquisição da imagem. Assim foi possível observar a circulação durante os períodos de maré vazante fornecendo informações sobre a morfologia dos ambientes costeiros sob águas rasas.

As técnicas de integração digital de dados de diferentes sensores remotos foram realizadas com sucesso, possibilitando maximizar a extração de informações em diferentes faixas do espectro eletromagnético, e avaliar o sinergismo dos produtos híbridos. Porém não de maneira satisfatória, no que diz respeito delimitação dos ambientes costeiros, diferentemente dos diversos trabalhos realizados na costa Amazônica na Região de Belém (Gonçalves, 2005), Planície costeira de Bragança nordeste do Pará (Souza Filho & Paradella, 2002; Souza Filho & Paradella, 2003, 2005) e em São Luís (Teixeira, 2006).

Os dados do Modelo Digital de Elevação do SRTM contribuíram de forma ímpar para a análise e entendimento da morfologia da região fornecendo medidas de elevação do terreno, que mesmo sendo referentes à interação das microondas com a copa das árvores, permitiram uma boa avaliação do relevo da área através da paleta de

cores e dos perfis topográficos. A fusão do relevo sombreado, derivado dos dados SRTM, com as imagens Landsat ETM+7 complementou essas informações da morfologia.

Assim a identificação dos diversos ambientes foi possível graças tanto à análise individual, quanto integrada dos diversos produtos resultantes do processamento digital dos dados multisensores, contribuindo distintamente para o reconhecimento de cada ambiente de acordo com as características individuais tanto dos ambientes quanto dos sensores.

A **Tabela 6.3** demonstra a contribuição de cada sensor, analisados separadamente e integrados, na identificação de cada um dos ambientes mapeados.

Tabela 6.3: Diferentes sensores usados e sua contribuição para o reconhecimento dos ambientes costeiros

Sensor	Utilidade
Landsat ETM+7	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação de todos os ambientes mapeados em função da sua resposta espectral • Delimitação da interface Planalto/Mangue
RADARSAT-W1	<ul style="list-style-type: none"> • Delimitação dos campos/ Pântanos salinos e caracterização quanto ao conteúdo de umidade em diferentes épocas do ano, pela análise do retroespalhamento. • Reconhecimento das áreas de praias e dunas atuais • Rugosidade da superfície de águas rasas para traçado de linhas de fluxo nos estuários.
Fusão ETM/SAR	<ul style="list-style-type: none"> • Delimitação da interface Planalto/Mangue • Rugosidade da superfície presente no planalto e nas outras unidades com relevo proeminente como dunas vegetadas.
SRTM	<ul style="list-style-type: none"> • Percepção da altitude em planta e em perfil de todos os ambientes

São considerados elementares para a geração de mapas temáticos (morfológicos e de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo) os resultados da classificação automática realizada nesta Dissertação em função do pequeno intervalo de tempo necessário para tal, podendo então, ser de grande utilidade para representar um mapa preliminar em situações de emergência, em caso de inexistência de outros mais consistentes. Situação esta que é muito comum na região amazônica, onde há escassez de bases planimétricas em escala adequada tendendo à uma constante necessidade de desenvolvimento de técnicas que resultem na elaboração de mapas preliminares com acurácia e rapidez e que venham a reduzir os custos e o tempo de elaboração.

Porém, é importante afirmar que a classificação visual supera as imperfeições geradas pela classificação automática, e na prática, consiste no método mais preciso para a classificação de ambientes costeiros.

6.5. MAPEAMENTO DOS AMBIENTES DEPOSICIONAIS COSTEIROS

O reconhecimento dos ambientes costeiros foi realizado com base nos dados extraídos das diferentes imagens (Landsat-ETM +7, RADARSAT-W1, SRTM e fusão de dados multisensores). O mapeamento foi realizado através da aplicação de técnicas de classificação automática e visual descritas e apresentadas no capítulo 5 (**Tabela 6.4**). O mapa resultante desta análise é mostrado na **Figura 6.18**, que ilustra a distribuição espacial das unidades geomorfológicas da área de estudo. A **Figura 6.19** mostra os perfis topográficos gerados a partir das imagens SRTM que foram correlacionados com os dados de mapeamento e de campo. Uma correção dos dados de elevação do SRTM foi feita para a unidade manguezal, pois a elevação dada pelo SRTM (10 a 15m) representa a copa das árvores deste ambiente, a correção se deu no sentido de desconsiderar a elevação do bosque e atribuir a elevação reconhecida em campo, estimada entre 0 e 2,5m.

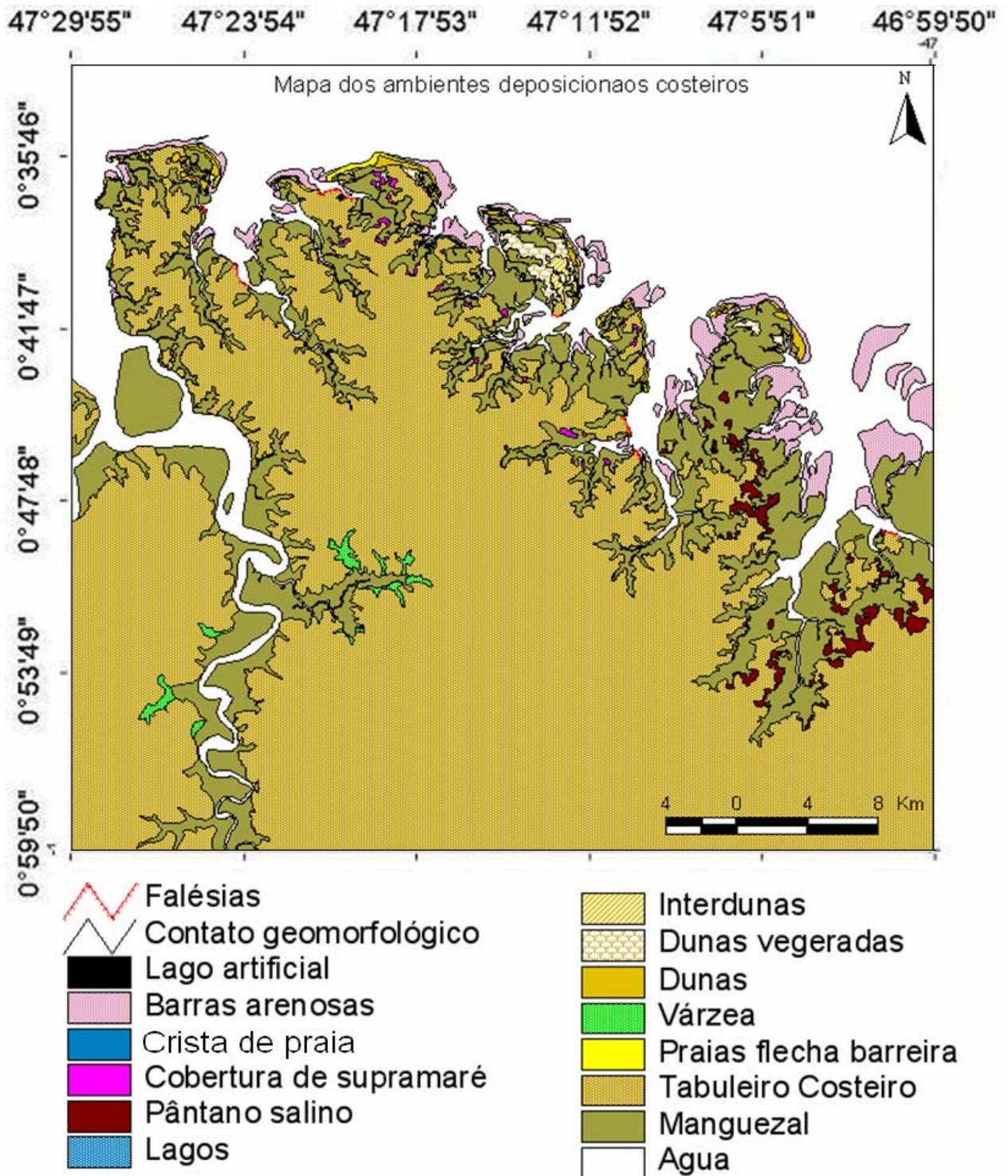


Figura 6.18: Mapa dos ambientes deposicionais costeiro da costa nordeste do Pará

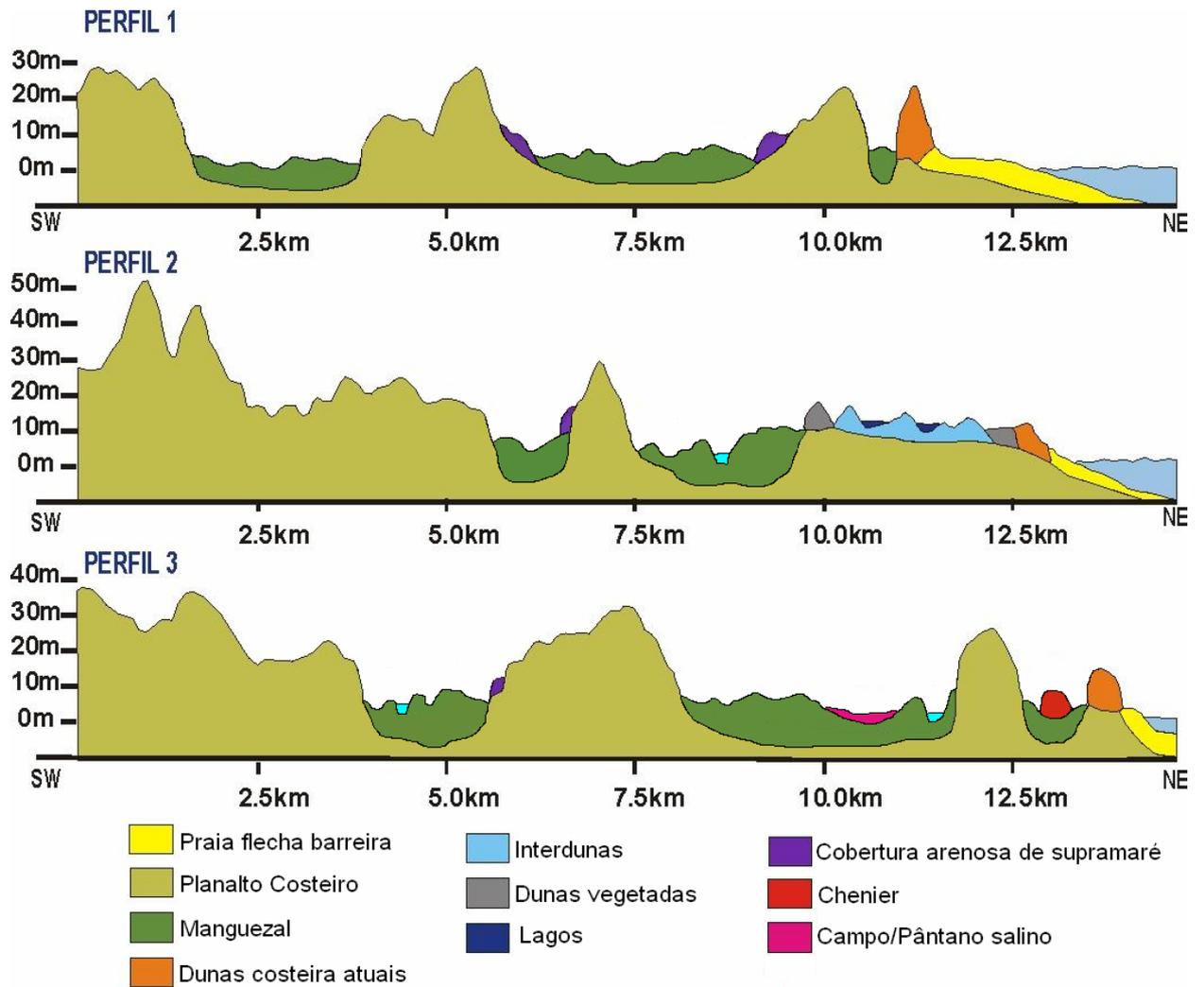


Figura 6.19: Perfis topográficos gerados pelo DEM mostrando a distribuição espacial dos ambientes costeiros mapeados.

Tabela 6.4: Classificação geomorfológica dos sistemas costeiros mapeados na área de estudo.

Unidade geomorfológica	Área (km²)	Litologia/Sedimentos (Silva, 1996)	Cor na Composição Colorida 3R 4G 5B	Características gerais na imagem	Elevação SRTM (m)
Planalto Costeiro	1364.8220	Sedimentos areno-ardilosos	Laranja avermelhado	Colinas amplas do embasamento da Planície Costeira	30-50m
Planícies de Maré					
Manguezal	440.03215	Lama rica em matéria orgânica	Marrom avermelhada	Planície lamosa, que sofre a influência de marés, e processos estuarinos.	0-5m
Cobertura arenosa de supramaré	13.185453	Areias finas a muito finas com pequena quantidade de lama.	Roxo esverdeado	superfície areno-argilosa resultante da dissipação de dunas	5-15m
Campo	13.062685	Lama e areia	Verde claro	pântanos situados na zona de maré alta.	5-8m
Chenier	1.035683	Areia siliciclástica fina, bem selecionada, rica em minerais pesados.	Verde azulado claro	corpos arenosos alongados e isolados que repousam sobre depósitos lamosos de manguezais	10-20m
Planície Litorânea					
Paleodunas	17.137694	Areias siliciclásticas finas a muito finas.	Verde clara	Campos arenosos que foram totalmente descaracterizados e depleciados.	5-20 m
Dunas costeiras atuais	6.526258	Areias siliciclásticas finas a muito finas, bem selecionadas	Verde clara	Dunas fixas e móveis paralelas à linha de costa	até 25m
Praia-Flacha Barreira	18.327606	Areias siliciclásticas finas, bem selecionadas, ricas em minerais pesados	Branco	Estão localizadas na zona de maior energia do litoral desde o nível de baixa-mar até a linha máxima de alcance das marés	até 5m
lagos	0.289710	Areias siliciclásticas finas, rica em matéria orgânica e argila.	Cinza escuro.	Corpos hídricos associados aos campos de dunas atuais e paleodunas, estando limitados pelas mesmas.	5-10m
Planície estuarina					
Várzea	9.84104	Lama rica em matéria orgânica	Marron esverdeada	Planície de inundação lamosa que sofre a influência de marés no interior dos rios.	0-5m
Barras arenosas	7.280234	Areia siliciclástica fina, bem selecionada, com fragmentos de vegetais e conchas.	Azul claro	Barras arenosas longitudinais desenvolvidas na foz dos canais de maré e de baías	0m

CAPÍTULO 7

7. 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, é possível gerar o mapa de índice de sensibilidade ambiental (ISA) ao derramamento de óleo na área estudada (**Figura 7.1**), a partir de adaptações do método proposto pela NOAA (2002) e PETROBRAS (2002). No entanto, os ambientes e feições geomorfológicas da área de estudo apresentam particularidades de ecossistemas costeiros tropicais da Amazônia, que não são discutidos nas metodologias propostas pela NOAA. Souza Filho *et al.* (2004) fez uma adaptação desses métodos para a região costeira Amazônica, o qual foi adotado nesta Dissertação.

Foram identificados oito índices de sensibilidade ambiental (ISA) ao derramamento de óleo na área estudada (**Figura 7.1, Tabela 7.1**), que serão descritos a seguir.

Tabela 7.1: Índices de sensibilidade ambiental mapeados na área de estudo e seus respectivos ambientes costeiros

ISA Índice de sensibilidade ambiental	Ambiente costeiro
ISA 1B	Muro de arrimo
ISA 3A	Prais de granulometria fina a média
ISA 3B	Escarpas expostas com declives íngremes em areia
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

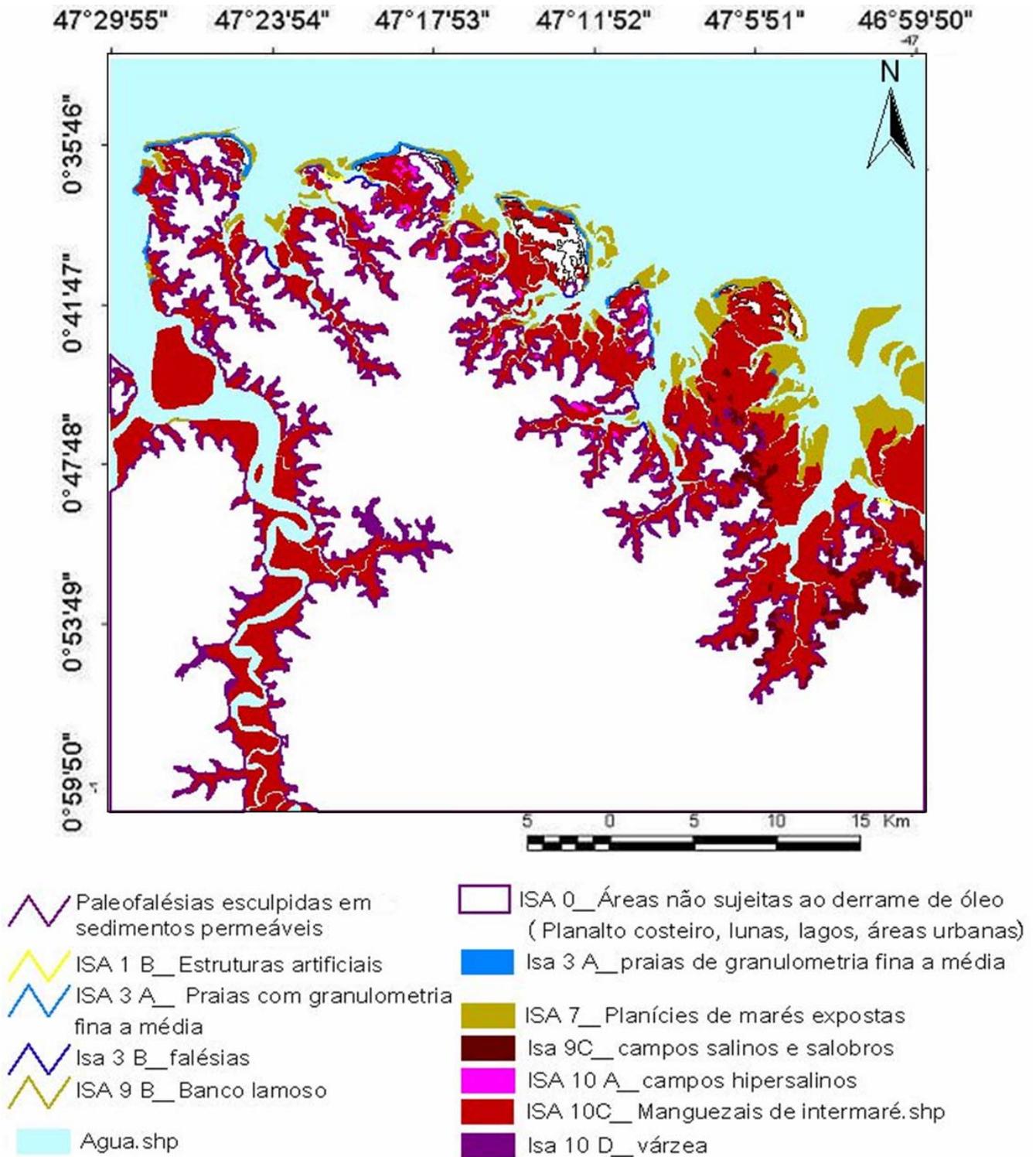


Figura 7.1: Mapa dos índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo do NE do Pará

7.1. 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.

(A)



(B)

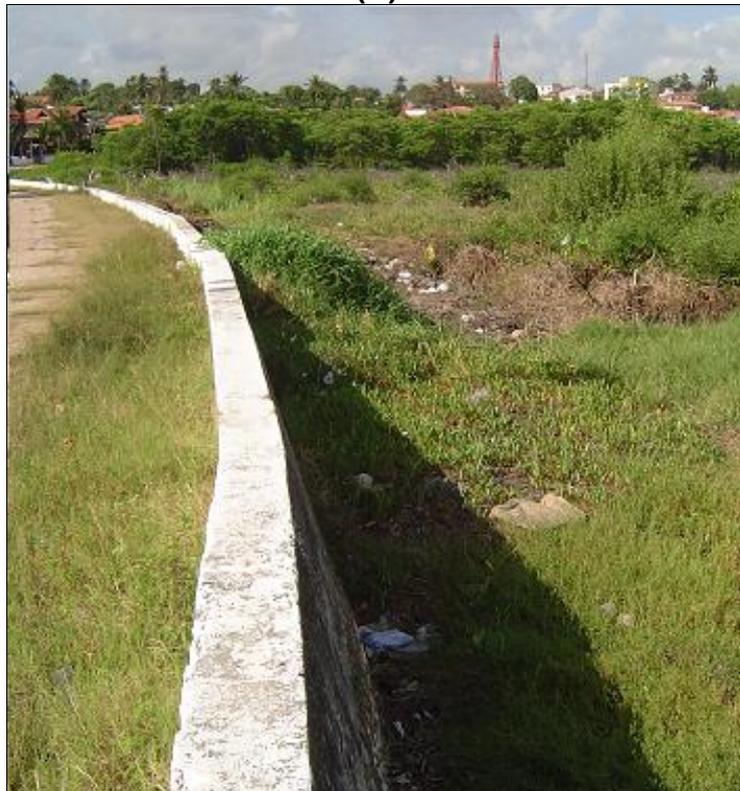


Figura 7.2: ISA 1B - Muros de arrimo em concreto construídos na área de estudo. (A) orla da localidade de Boa Vista (B) orla da cidade de Salinópolis

7.2. ISA 3A: PRAIAS COM GRANULOMETRIA FINA A MÉDIA

Características:

- Praias de areia fina, com face de baixa declividade (zona intermarés larga)
- Reflexão baixa das 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.
- Geralmente, diante da presença de óleo, a limpeza da praia se faz necessária.

(A)



(B)



(C)



Figura 7.3: ISA 3A - Praia da área em estudo
(A) Farol Velho, Ilha do Atalaia; (B) Praia do Atalaia; (C) Praia Penha da Marieta na Ilha do Marco

7.3. ISA 3B: ESCARPAS EXPOSTAS COM DECLIVES ÍNGRIMES EM AREIA

Características

- Substratos semipermeáveis com pequena penetração de petróleo.
- Formam escarpas ao longo dos cursos fluviais e falésias ao longo das praias estuarinas a partir da ação das ondas (Grupo Barreiras). **Figura 74.**
- 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, atingem 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.

(A)



(B)



**Figura 7.4: ISA 3A - Falésias ativas da área de estudo
(A) Falésia na localidade de Boa Vista (B) Falésia na orla da cidade de Salinópolis**

7.4. 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 torna quase impossível devido a dificuldade de locomoção no substrato mole e a dificuldade de acesso, sendo que qualquer esforço nesse sentido tende a introduzir o óleo nas camadas mais profundas.

(A)



(B)



**Figura 7.5: ISA 9C - Planície de maré lamosa da área de estudo
(A) banco de lama na orla da cidade de Salinópolis, próximo ao mercado municipal;
(B) Banco de lama na orla da cidade de Maracanã**

7.5. ISA 9C: CAMPOS HERBACEOS HIPERSALINAS

Características:

- Estão situados na zona de inter-maré 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.

(A)



(B)



Figura 7.6: ISA 9C - Campos hipersalinos da área de estudo (A) campos com vegetação adaptada ao meio salgado; (B) Detalhe do sal cristalizado caracterizando o ambiente hipersalino

7.6. ISA 10 A: CAMPOS HERBACEOUS SALINOS E SALOBROS (SALT AND BRACKISH WATER MARSHES)

Características:

- Estão situados na zona de inter-maré 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.

(A)



(B)



Figura 7.7: ISA 10A - Campos/pântanos salinos
(A) localizado próximo à cidade de Quatipuru
(B) localizado próximo à localidade de Boas Vosta (Quatipuru)

7.7. 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 a 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 habitats mais sensíveis devido à elevada riqueza e valor biológico, e funcionam como verdadeiras armadilhas de retenção de óleo, ou seja, o tempo de permanência do óleo é prolongado em função da menor ação de limpeza natural e manual.

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 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.

(A)



(B)



Figura 7.8: ISA 10C - Manguezais
(A) Manguezal da Ilha do Atalaia com vegetação *Rysophora* típica de manguê;
(B) Manguezal da Praia da Curvina, detalhe mostrando substrato lamoso e as árvores pneumatóforas com raízes aéreas típicas de ambiente salobro.

7.8. 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 a 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.

(A)



(B)



Figura 7.9: ISA 10D - Planície de inundação, Várzeas
(A) várzea próximo à localidade de Boa Vista; (B) Várzea, próximo à localidade de Boa Vista

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de dados de sensores remotos orbitais, em função da rapidez, precisão e periodicidade de obtenção, permite a produção de mapas atualizados, e em escala adequada, 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 inter-relações. 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,

Sendo 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.

Portanto, a análise das imagens orbitais separadamente e em conjunto permitiu uma clara distinção das áreas inundáveis e, e a influência da amplitude de marés e da precipitação na análise das imagens. Esta dissertação mostra então a importância da utilização de imagens em diversas faixas do espectro eletromagnético para o monitoramento das zonas costeiras amazônicas, bem como a possibilidade de uma análise integrada dos diferentes sensores, óticas e radar para o monitoramento sistemático da região a curto prazo. A utilização de técnicas de fusão de dados se mostrou de grande importância, pois permitiram maximizar a extração de informações, aproveitando o sinergismo obtido, porém ficou comprometida para a delimitação de algumas unidades de paisagem, principalmente aquelas com pouca distribuição espacial, sendo estas melhor assimiladas ao analisar as imagens isoladamente.

A utilização dos dados de sensores remotos orbitais propiciou 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 de ambientes sensíveis aos danos gerados por um evento de derramamento de óleo. Além disso, permitiu a geração de mapas atualizados, em escala adequada, com maior rapidez, acurácia e menor custo.

Os produtos desta dissertação poderão ser de grande importância também para as populações que vivem na zona costeira, uma vez que os ambientes mais sensíveis são os que representam maior importância econômica e social para comunidade da região, contribuindo então para a manutenção das atividades de subsistência e das condições de vida das populações ribeirinhas da costa do Pará e da região amazônica, visando o uso sustentável dos recursos naturais e a conservação destes ecossistemas tão ricos e tão frágeis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-KADER, A. F.; NASR, S. M.; EL-GAMILY, H. I.; EL-RAEY, M. 1998. Environmental sensitivity analysis of potential oil spill for Ras-Mohammed coastal zone, Egypt. *Journal of Coastal Research*, 14 (2): 502-510.
- ARAI M.; TRUCKENBRODT, W; NOGUEIRA, A.S.R.; GÓES, A. M.; ROSSETI, D. F., 1994. Novos dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, 1988. *Anais*. Belém, SBG-Núcleo Norte. p. 185-187.
- ARAI M.; UESSUGUI, N.; ROSSETI, D. F.; GÓES, A. M. 1988. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Noroeste do estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, 1988. *Anais*. Belém, SBG. v 2, p. 738-752.
- ARANHA, L.G.F.; LIMA, H.P.; SOUZA, J.M.P.; MARINHO, R.K. 1990. Origem e evolução das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e ilha nova. In: RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. *Origem e Evolução de Bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. p. 221-133.
- ARZANDEH, S. & WANG, J. 2002. Texture evaluation of RADARSAT imagery for wetland mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28 (5), p: 653-666.
- BEHLING ET.AL, H.; COHEN, M. C. L.; LARA, R. J. 2001. Studies on Holocene mangrove ecosystem dynamics of the Bragança Peninsula in north-eastern Pará, Brasil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. **167**: 225-242.
- BEISL, C.H.; MIRANDA, F.P.; PEDROSO, E.C.; LANDAU, L. 2003. Generation of oil sensitivity index information in Western Amazonia, Brazil, using dual season SAR image mosaics of the Global Rain Forest Mapping Project. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. Belo Horizonte. *Anais...Belo Horizonte INPE*. p. 823-830.
- BERREDO, J.F.; MENDES, A.C.; SALES, M.E.C.; SARMENTO, J.P. 2001. Nível de Contaminação por Óleo nos Sedimentos de Fundo e na Água do Rio Pará, Decorrente do Acidente com a Balsa Miss Rondônia. In: PROST, M.T. *Ecossistemas Costeiros: Impactos e Gestão Ambiental*. Belém Museu Paraense Emílio Goeldi.
- BOULHOSA, M.B.M. 2003. *Uso de imagens landsat etm +7, modelo numérico de terreno e sistema de informação geográfica para o mapeamento de ambientes sedimentares costeiros dominados por macromaré na costa nordeste do Pará*. 40p. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de geociências. (Trabalho de Conclusão de Curso).

- BOULHOSA, M.B.M.; SOUZA FILHO, P.W.M; GONÇALVES, F. 2005. Uso de Imagens SRTM e Landsat ETM+7 para o mapeamento geomorfológico dos ambientes costeiros do nordeste do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. Goiânia. *Anais...* Goiânia, INPE: p. 1745-1747.
- CAMÂRA, G. 1995. *Conceitos básicos em Geoprocessamento*. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/cap2-conceito.pdf>>. Acesso em: 23 set 2006.
- CAMARGO, M. G. 1999. *SYSGRAN para Windows: Sistema de análises granulométricas*. [mcamargo@cem.ufpr.br].
- 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 D.F.M. 2003. Uso de transformação HIS e classificação não supervisionada por regiões para o mapeamento de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, INPE: p. 1515 - 1523
- CASTRO A.F.C., AMARO, V.E., 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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, INPE: p. 1533-1540.
- CHAVES, J.M. 2002. *Discriminação de litotipos com base em dados de radar de abertura sintética e sinergismo radar/ sistema óptico*. Brasília-DF, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 154 p. (Tese de Doutorado).
- CHAVEZ JR. P. S. & KWARTENG, A. Y. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55** (3): 339-348.
- CHAVEZ JR., P.S.; BERLIN, G.L.; SOWERS, L.B. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, **8**: 23-31.
- COHEN, M. C. L.; BEHLING, Hermann ; LARA, Rubén José. 2005. Amazonian mangrove dynamics during the last millennium: The relative sea-level and the Little Ice Age. *Review of Palaeobotany and Palynology, Holanda*, **136** (1-2): 93-108.
- CONGALTON, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classification or remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, **37**: 35- 45.

- COSTA, J.B.S., BORGES, M.S., BEMERGUY, R.L., FERNANDES, J.M.G., COSTA Jr. P.S., COSTA, M.L. 1993. Evolução cenozóica da região de Salinópolis, nordeste do estado do Pará. *Geociências*, São Paulo, **12** (2): 373-396.
- COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; IGREJA, H.L.S.; PINHEIRO, R.V.L. 1991. Aspectos da tectônica cenozóica na região do Salgado, litoral nordeste do estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., Belém, 1991. *Anais...* Belém, SBG-Núcleo Norte: p. 156-165.
- CRACKNELL, A.P. 1999. Remote Sensing Techniques in Estuaries and Coastal Zones – An Update. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (3): 485-496.
- CT-PETRO. 2004. Anexo III - *Informações a serem consideradas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental em nível estratégico*. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/servicos/editais/ct/anexos/402004/anexo3.pdf>> Acesso em: 20 abr 2005.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. 2004. *Tábuas de maré para o fundeadouro de Salinópolis (Estado do Pará)*. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br/chm/tabuas>>. Acesso em: 28 de abr de 2005.
- DUTRA, L.V.; MURA, J.C.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R.; ELMIRO, M.T. 2003. Processamento de Imagens de Radar de Abertura Sintética - Princípios e Aplicações. In: WORKSHOP EM TRATAMENTO DE IMAGENS, NPDI, DCC, ICex/UFMG: Disponível em: <<http://www.npdi.dcc.ufmg.br/workshop/wti2003/pdfs/p04-dutra.pdf>> Acesso em: 17 out 2004
- EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2000. Oil spill in Brazil. *Oil Drop: The U. S. EPA's Oil Program Center Journal*. 4 (1)
- ESA (European Space Agency). 1998. *ERS and it's Marine Application*. Noordwijk.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. 1957. Brazos River Bar: a study in the significance of grain parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1):3-26.
- FONSECA, L.M.G.; LOPES, E.S.S.; YAMAGUCHI, F.Y.; VINHAS, L. 2000. *Processamento Digital de Imagens*. Apostila digital do INPE. INPE. 2000. Disponível em <<http://www.inpe.br>> Acesso em: 25 jul 2004.
- FRANZINELLI, E. 1982. Contribuição à geologia da costa do estado do Pará (entre as baías de Curuçá e Maiaú). In: SIMPÓSIO MAT. BRAS., 4., Manaus. 1982. *Atlas...* Manaus. p. 305-322.

- GÓES A. M., ROSSETTI D. F., NOGUEIRA A. C. R., TOLEDO P. M. 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, F.D. 2003. *Mapeamento da Sensibilidade Ambiental a Derrame de Óleo na Baía de Guajará (Belém-PA) Usando Imagens ETM+ Landsat 7 e Sistema de Informações Geográficas*. 57p. Belém. Universidade Federal do Pará, Centro de geociências. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- GONÇALVES, F.D. 2005. *Utilização de Dados de Sensores Remotos para o Mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamento de Óleo na Baía de Guajará, Belém-PA*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 162p. (Dissertação de Mestrado).
- GONÇALVES, F.D. & SOUZA FILHO, P.W.M. 2004. Mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derrames de óleo na Baía de Guajará (Belém-PA) usando imagens Radarsat-1, Landsat ETM+ 7 e sistema de infomação geográfica. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 1., 2004, Anais... Itajaí., UNIVALI. CD-ROM.*
- GONÇALVES F.D. & SOUZA FILHO, P.W.M. 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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia, Anais... INPE: p. 1789-1796.*
- GREGÓRIO, A.M.S. 2004. *Caracterização Morfo-sedimentológica da praia do Atalaia, Salinópolis*, Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de geociências. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- HARRIS, J. R., BOWIE, C., RENCZ, A. N., 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.
- HARRIS, J. R., VILJOEN, D. W., RENCZ, A. N. 1999. Integration and Visualization of Geoscience Data. *In: Remote Sensing for the Earth Sciences*, A. N. Rencz Ed., John Wiley & Sons, Am. Soc.. Phot. & R. S., **3**: 307-354.
- HESS, L.L.; MELACK, J.M.; FILOSO, S.; WANG, Y. 1995. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4): 896-904.
- IGREJA, H.L.S. 1991. *Aspectos tectono-sedimentares do Fanerozóico do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, Brasil*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 191p. Tese (Doutorado em Geologia).

- INMET. 2004. *Tábuas de maré*. Disponível em: <http://www.dhn.mar.mil.br/chm/tabuas> Acesso em: 30 julho 2004.
- IRISH, R. 1998. *Landsat 7 science data users handbook*. Greenbelt, Maryland, GSFC. Versão eletrônica. Disponível em: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html acesso em 30 nov 2005.
- JENSEN, J.R. 1996. *Introductory digital image processing - A remote sensing perspective*. 2nd ed. New Jersey, Prentice Hall. Information Science, 318p. (Prentice Hall Series in Geographic)
- JENSEN, J.R.; MURDAY, M.; SEXTON, W.J.; GREEN, C.J. 1993. Coastal environment sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. *Geocarto International*, **2**: 5-13.
- JENSEN, J. R.; RAMSEY, E. W.; HOLMES, J. M.; MICHEL, J. E.; SAVITSKY, B.; DAVIS, B. A. 1990. Environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and GIS technology. *International of Geographical information systems*, 4 (2): 181-201.
- KAMPEL, M. & AMARAL, S. 2001. Imagens TM/LANDSAT na Detecção de Mancha de Óleo na Baía da Guanabara - RJ - Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu, *Anais...INPE*: p. 801-809.
- KRISHMAN, P., 1995. Research report – A geographical information system for oil spills sensitivity mapping in the Shetland Island (United Kingdom). *Ocean & Coastal Management*. 26 (3): 247-255.
- LEWIS, A. J.; HENDERSON, F.M.; HOLCOMB, D. W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. *Principles & applications of imaging Radar. Manual of Remote Sensing*. 3 rd ed. New York, John Willey & Sons. p. 131-180.
- MASON, P. J.; GUO, L. J.; MOORE, M. 1994. Integration of LANDSAT TM with SPOT Panchromatic and ERS-1 SAR Imagery for Neotectonic Studies. In: TENTH THEM. CONF. ON GEOL. R. S., San Antonio, *Anais...* Texas p. 253-262.
- MELO, D.H.C.T.B. 2002. Uso de dados IKONOS II na análise urbana: Testes operacionais na zona leste de São Paulo. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 148 p. (Dissertação de mestrado).
- MENDES, A.C.; SANTOS, V.F.; SILVA, M.S. 2001. Análise do meio físico para a gestão ambiental das ilhas de algodoal e Atalaia (NE do Pará). In: Prost, M.T.R. & MEDES, A.C. (Org.). *Ecossistemas Costeiros: Impactos e Gestão Ambiental*. (1Ed.). Belém: MPEG - Comissão de Editoração Científica, p. 103-112.

- MENDES, A.C.; SILVA, M.S. & FARIA Jr., L.E.C., 1997. A expansão urbana e seus efeitos danosos ao meio ambiente da Ilha do Atalaia-Salinópolis/PA. In: COSTA, M.L. & ANGÉLICA, R.S. (1. ed.), *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém: SBG-NO, p. 359-396.
- MENGAWACO, A. 1995. *Caracterização da cidade de Salinópolis/Pa*. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 37p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- MMA. 2002. *Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo (cartas SAO)*. Rio de Janeiro: MMA, 22p.
- 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, 89p.
- PACLAN Pacific Islands Regional Regional Marine Spill. 2000. *Marine Spill Contingency Plan Contingency Plan. PACPLAN . Final Draft*. Disponível em: http://202.4.49.28/Events/2000/11SM/WP7_3_2_6_Att_1.pdf Acesso em: 25 fev 2005.
- PARADELLA, W.R., 1996. *Imageamento por Radar: Princípios e Aplicações Gerais*. Apostila do curso “Sensoriamento remoto com radar em aplicações geoambientais”.
- PARADELLA, W.R. & BIGNELLI, P. A., 1996. *Radar em Geociências: Princípios e Aplicações*. Apostila do curso “Radar e a Integração Digital com Dados Auxiliares Aplicados a Geologia”.
- PARADELLA, W. R., BIGNELLI, P. A., VENEZIANI, P., PIETSCH, R. W. 1997. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (7): 1483-1501.
- PARADELLA, W. R., SANTOS, A. R., DALL'AGNOL, R. PIETSCH, R. W. 1998. A Geological Investigation Based on Airborne (SAREX) and Spaceborne (RADARSAT-1) SAR Integrated Products in the Central Serra dos Carajás Granite Area, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21 (4): 376-392.
- PARADELLA W. R., SANTOS A.R., VENEZIANI P., CUNHA E.P. 2005. Radares imageadores nas geociências: estado da arte e perspectivas. *Revista Brasileira de Cartografia*. 1808-0936.

- PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P. MORAIS, M. C. 2000. Synthetic aperture radar for geological applications in the moist tropics: experiences from the brazilian amazon region. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (3): 538-542.
- PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; MORAES, M.C. 2001 O Sinergismo de Imagens Standart Descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do Landsat-5 em Aplicação Geológica na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguazu, *Anais...INPE*: p. 315-322.
- PARASHAR, S.; LANGHAM, E.; MCNALLY, J.; AHMED, S. 1993. RADARSAT mission requirements and concept. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 19 (4): 280- 288.
- PCI GEOMATICS. 2004. *Geomatica: User Manual*. PCI geomatics, Version 9.1, Canada.
- PEREIRA, S. W. M., 1995. *Mapeamento planialtimétrico e morfo-topográfico da micro região do Salgado Paraense a partir de procedimentos fotogramétricos*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 126p. (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, 134p.
- 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. *ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **57**: 241-262.
- RANEY, K. 1998. Radar Fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. *Principles & applications of imaging Radar, Manual of Remote Sensing*. New York, Jonh Willey & Sons, p. 8-130.
- REINECK, H.E. & SING, I.B. 1980. *Depositional sedimentary environment*. New York, Springer-Verlag. 549p.
- ROSENQVIST, O. 1997. *Analysis of the backscatter characteristics of rubber, oil palm and irrigated rice in multi-band polarimetric synthetic aperture radar imagery*. Tokyo, University of Tokyo (Institute of Industrial Science), 116 p. (PhD. Thesis).
- ROSOT N.C.& LOCH C. 2003. Diferenciação de tipologias florestais usando imagens combinadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte, *Anais... INPE*: p. 2885 - 2893.
- ROSSETI D.F.; TRUCKENBRODT, W; GÓES, A.M. 1989. Estudo Paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na Região Bragantina, Nordeste do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeld, Série Ciências da Terra*, Belém, **1**: 25-74.

- ROSSETI, D.F. & GOES, A.M. 2001. Imaging Upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brazil, applying ground penetrating radar. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo. 31 (2): 113-130.
- ROSSETI, F.R., GÓES, A.M., SOUZA, S.B. 2001. Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. *Brasilian Journal of Geophysics*. 19 (2): 113-130.
- SÁ, J. H. S. 1969. Contribuição à Geologia e os sedimentos Terciários e Quaternários da Região Bragantina. *Bol. Inst. Geol*, 3: 21-36.
- SANTOS, V.F.dos. 1996. *Estratigrafia holocênica e morfodinâmica atual da planície costeira da ilha de algodão e Marudá*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 139p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA, C.A. da. 1998. *Análise Morfoestratigráfica do Estuário do Rio Marapanim – NE do Pará*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 133p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA M. S. 1996. *Morfoestratigrafia e evolução holocênica da Planície Costeira de Salinópolis, Nordeste do Estado do Pará*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 142p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA, W.S.B. 2002. *Uso de imagens RADARSAT-1 para fins de mapeamento de uso da Terra e cobertura do solo em ambiente tropical úmido urbano: o caso de Manaus, Estado do Amazonas*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 61p. (Dissertação de mestrado).
- SILVA JÚNIOR, O. G. 1998. *Morfoestratigrafia da planície costeira de São João de Pirabas (porção NW)- NE do estado do Pará*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 87p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA JR, O.G. & EL-ROBRINI, M. 2001. Morfoestratigrafia do nordeste da planície costeira de São João de Pirabas (Nordeste do Pará). *Revista Brasileira de Oceanografia*, 49 (1/2): 99-114.
- SOUZA FILHO, P.W.M. 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, P.W.M. 2000. *Avaliação e aplicação de dados de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, Bragança, Norte do Brasil*. Belém, Universidade Federal do Pará. 219p. (Tese de Doutorado).

- SOUZA FILHO, P.W.M. 2005. Costa de manguezais de macromaré da amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação do maior cinturão contínuo de manguezais do mundo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23 (4): 427-435.
- SOUZA FILHO, P. W. M. & EL-ROBRINI, M. 1996. Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfosedimentares da Planície Costeira Bragantina – Nordeste do Pará (Brasil). *Geocronos*, 4: 1-16.
- SOUZA FILHO, P. W. M. & EL-ROBRINI, M. 1998. As variações do nível do mar e a estratigrafia de sequências da Planície Costeira Bragantina – Nordeste do Pará, Brasil. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da terra*. **10**: 1-34.
- SOUZA FILHO, P.W.M.; PARADELLA, W.R. 2001. Estudo da Geomorfologia de Ambientes Costeiros Tropicais Úmidos a partir das imagens de sensores remotos. *Revista Pesquisas*, 28 (2): 359-368.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R., 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**: 123-132.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. 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, P.W.M.; PARADELLA, W.R. 2005. Use of RADARSAT-1 Fine and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast, Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31 (3): 214-224.
- SOUZA FILHO, P.W.M.; MIRANDA, F.P.; BEISL, C.H.; ALMEIDA, E.F.; GONÇALVES, F.D. 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.
- SOUZA FILHO, P.W.M.; PARADELLA, W.R.; SILVEIRA, O.F.M. 2005. Synthetic Aperture Radar for Recognition of coastal Features in the Wet Tropics: Applications in the Brazilian Amazon Coast. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, série ciências naturais*, Belém, 1 (1):149-154.
- SPALDING, M.; BLASCO, F.; COLIN, D. 1997. World Mangrove Atlas Okinawa (Japan): International Society for Mangrove Ecosystems.
- SUGUIO, K. 1973. *Introdução à Sedimentologia*. São Paulo, Edgard Blücher. 342p.

- TEIXEIRA, S. G., 2006. *Análise de Imagens de Sensores Remotos Orbitais para Mapeamento de Ambientes Costeiros Tropicais e de Índices de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo no Golfão Maranhense*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 160p. (Dissertação de Mestrado).
- TEIXEIRA S.G.T. & SOUZA FILHO P.W.M. 2005 Utilização de imagens CBERS-2 com modelo digital de elevação SRTM para estudos costeiros na Ilha de São Luís (MA). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia, *Anais...* INPE: p. 1915-1922.
- TOUTIN, T. 1995. Multi-source data fusion with an integrated and unified geometric modelling. *Earsel Journal –Advances in Remote Sensing*, 4 (2): p118-129.
- TUCKER, C.J., GRANT, D.M. DYKSTRA, J.D. 2004. NASA's Global Orthorectified Landsat Data Set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70 (3): 313–322.
- VAN ZUIDAM R. A. & VERSTAPPEN H. T, 1991. The ITC system of Geomorphologic Survey, 89p.
- VEIGA R.Q. & ANDRADE N.S.O., 2005, *Imageamento Por Radar, Versão eletrônica*. 2003, disponível em: <<http://www.cic.unb.br/docentes/nuno/Radar/Apostila%20Imageamento%20por%20Radar>>, acesso em: 25 mai 2005