



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**“RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DE AMBIENTES  
SEDIMENTARES ATRAVÉS DE IMAGENS LANDSAT-7 ETM+,  
RADARSAT-1 WIDE E SRTM DA BAÍA DO CAETÉ (PA) A BAÍA  
DE MARACAÇUMÉ (MA)”.**

---

**Dissertação apresentada por:**

SUZAN WALESKA PEQUENO RODRIGUES

**BELÉM  
2008**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)  
Biblioteca Geól. Rd° Montenegro G. de Montalvão

---

- R696r                    Rodrigues, Suzan Waleska Pequeno  
                              Reconhecimento e mapeamento de ambientes sedimentares  
                              através de imagens LANDSAT-7 ETM+, RADARSAT-1 WIDE e SRTM  
                              da baía do Caeté (PA) a baía de Maracaçumé (MA)/ Suzan Waleska  
                              Pequeno Rodrigues. – 2008  
                              114f. : il.  
                              Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-  
                              Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências,  
                              Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.  
                              Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho
1. Sensoriamento remoto. 2. Mapeamento de ambientes costeiros.  
                              3. Baía do Caeté (PA). 4. Baía de Maracaçumé (MA).  
                              I. Universidade Federal do Pará II. Souza Filho, Pedro Walfir Martins e,  
                              Orient. III. Título.

CDD 20°ed.:621.3678098115

---



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

**RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DE AMBIENTES  
SEDIMENTARES ATRAVÉS DE IMAGENS LANDSAT-7 ETM+,  
RADARSAT-1 WIDE E SRTM DA BAÍA DO CAETÉ (PA) A BAÍA  
DE MARACAÇUMÉ (MA).**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR**

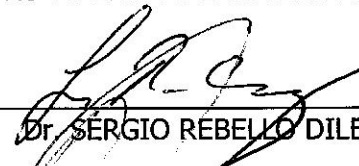
**SUZAN WALESKA PEQUENO RODRIGUES**

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

Data de Aprovação: **29/07/2008**

**Comitê de Dissertação:**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. PEDRO WALFIR M. E SOUZA FILHO (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. SÉRGIO REBELLO DILENBURG

  
\_\_\_\_\_  
Dr. DOUGLAS FRANCISCO M. GHERARDI

Belém

*Aos meus queridos pais Waldete e  
Salatiel e irmãos Thanan, Walesson e Rejane que  
me deram apoio e suporte incondicional .*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço as seguintes pessoas, Instituições e Projetos:

A minha família, meus pais Waldete e Salatiel, meus irmãos, meus tios Cristina, Heloisa, Walmir e Waldomir pelo apoio e incentivo.

Ao professor Dr. Pedro Walfir, meu orientador, pela paciência, grandes informações e orientação para este trabalho.

A Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG)

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa.

Ao Projeto de Pesquisa PIATAM mar II e ao Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT).

Aos colegas de curso, de mestrado, de laboratório Msc. Cléa, Msc. Messiana, Msc. Francisco, Msc. Sheila, Msc. Fabrício, Fernando, Mestranda Elaine, e aos técnicos Afonso Quaresma, Helenice, Lorival, Wilson, Paulo, Glenda, Karla e Carlos, pela atenção, ajuda em campo e troca de informações.

A Msc. Paula Lima e ao Mestrando Igor pela ajuda com as análises granulométricas.

Ao Msc. Aderson Gregório pela atenção e ajuda com as disciplinas da UFRGS.

Por fim, agradeço a todos aqueles que estiveram presentes em minha vida direta e indiretamente e que contribuíram para meu crescimento.

*“Tentar e falhar é, pelo menos, aprender.  
Não chegar a tentar é sofrer a inestimável perda do que poderia ter sido.”  
(Geraldo Eustáquio)*

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b>	i
<b>AGRADECIMENTOS</b>	ii
<b>EPÍGRAFE</b>	iii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	iv
<b>LISTA DE ABREVIações E SIGLAS</b>	x
<b>RESUMO</b> .....	16
<b>ABSTRACT</b> .....	17
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	20
2.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS .....	21
2.2.1 <b>Geologia</b> .....	21
2.2.2 <b>Geomorfologia</b> .....	23
2.2.2.1 Vegetação .....	24
2.3 ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS E METEOROLÓGICOS .....	24
2.3.1 <b>Dados oceanográficos</b> .....	24
2.3.2 <b>Clima</b> .....	25
<b>3 MATERIAIS UTILIZADOS</b> .....	28
3.1 SATÉLITE LANDSAT ETM+7 .....	28
3.2 SATÉLITE RADARSAT-1 .....	29
3.3 MISSÃO SRTM .....	31
<b>4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS</b> .....	32
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	32
4.2 METODOS UTILIZADOS .....	32
4.2.1 <b>Processamento dos dados do SRTM</b> .....	32
4.2.1.1 Relevo Sombreado.....	33
4.2.2 <b>Processamento Digital das Imagens (PDI) ópticas</b> .....	34
4.2.2.1 Correção atmosférica .....	34
4.2.2.2 Ortorectificação da imagem Landsat -7 .....	35

4.2.2.4	Realce Linear .....	35
4.2.2.5	Composição Colorida (Landsat ETM+) e calculo OIF ( <i>Optimum Index factor</i> ) .....	35
4.2.2.6	Classificação automática.....	36
4.2.2.7	Interpretação visual dos produtos gerados.....	37
4.2.3	<b>Processamento das imagens RADARSAT-1 Wide-1</b> .....	37
4.2.3.1	Correção do padrão da antena (APC).....	37
4.2.3.2	Ortorretificação de imagens SAR .....	37
4.2.3.3	Reescalamento.....	38
4.2.3.4	Semivariograma STC ( <i>Sensivity time control</i> ) .....	38
4.2.3.5	Classificação automática para dados STC do Radarsat -1 .....	39
4.2.3.6	Calibração Radiométrica (Retrosalhamento - Backscatter).....	39
4.2.4	<b>Fusão de imagens multisensores Landsat-7, RADARSAT-1 e SRTM</b> .....	41
4.2.4.1	Transformação RGB - IHS .....	41
4.2.4.2	Análise por Componente Principal (ACP) ou PCA ( <i>Principial Anaysis</i> ).....	42
4.2.4.3	Realce por Decorrelação.....	44
4.2.5	<b>Trabalho de Campo</b> .....	45
4.2.6	Análise Granulométrica .....	48
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	50
5.1	AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS .....	50
5.1.1	<b>SRTM</b> .....	50
5.1.2	<b>Imagens Landsat-7 ETM+</b> .....	52
5.1.3	<b>Imagens RADARSAT-1 W1</b> .....	59
5.1.4	<b>Fusão SRTM/ ETM+</b> .....	61
5.1.5	<b>Fusão RADARSAT-1/ETM+</b> .....	62
5.1.6	<b>Fusão SAR/ETM+ pela técnica SAR/SPC</b> .....	62
5.2	CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DAS IMAGENS.....	63
5.2.1	<b>Classificação automática não supervisionada</b> .....	64
5.2.1.1	LANDSAT-7.....	64
5.2.1.2	RADARSAT-1 x STC.....	67
5.2.1.3	SAR x SPC.....	68
5.3	AVALIAÇÃO DOS PRODUTOS GERADOS PARA O MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS.....	70

5.4	RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS USANDO DADOS DO LANDSAT-7, RADARSAT-1 E SRTM .....	72
5.4.1	<b>Planalto Costeiro</b> .....	73
5.4.2	<b>Planície de Inundação</b> .....	77
5.4.3	<b>Planície Estuarina</b> .....	79
5.4.3.1	Canal estuarino .....	79
5.4.3.1.1	Funil estuarino .....	80
5.4.3.1.2	Segmento retilíneo .....	82
5.4.3.1.3	Segmento Meandrante Sinuoso .....	82
5.4.3.1.4	Segmento de curso superior .....	83
5.4.3.2	Delta de maré vazante .....	83
5.4.3.3	Barra Arenosa de Maré .....	84
5.4.4	<b>Planície Costeira</b> .....	84
5.4.4.1	Planície de Maré.....	85
5.4.4.1.1	Planície de Maré Lamosa (sem/pouca vegetação).....	85
5.4.4.1.2	Planície de Maré Lamosa - Manguezal .....	86
5.4.4.1.3	Planície de maré arenosa.....	88
5.4.4.2	Lagos.....	90
5.4.4.3	Pântano de Água Doce .....	90
5.4.4.4	Pântanos salinos .....	91
5.4.4.5	Paleodunas .....	93
5.4.4.6	Cordão de dunas frontais .....	95
5.4.4.7	Interdunas .....	95
5.4.4.8	Dunas móveis.....	98
5.4.4.9	Praia de macro-maré.....	99
<b>5.4.5</b>	<b>Sistemas Antropogênicos</b> .....	99
5.4.5.1	Área construída .....	100
5.5	MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS .....	101
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b> .....	106
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 2.1</b> - Mapa de localização.....	20
<b>Figura 2.2</b> - Mapa geológico da área de estudo .....	22
<b>Figura 2.3</b> - Estruturas neotectônicas do noroeste do maranhão - Domínio I .....	23
<b>Figura 2.4</b> - Média mensal de temperatura para as capitais referências: Belém e São Luis no período de 1961-1990 .....	26
<b>Figura 2.5</b> Média mensal de precipitação para as capitais referências: Belém e São Luis no período de 1961-1990 .....	26
<b>Figura 3.1</b> - Diferentes tipos de resposta que o radar pode fornecer .....	30
<b>Figura 3.2</b> - Modos de Imageamento do RADARSAT -1. ....	31
<b>Figura 4.1</b> - Fluxograma das etapas de processamento dos dados SRTM para esta dissertação.....	33
<b>Figura 4.2</b> - fluxograma das etapas de PDI das imagens Landsat 7 .....	34
<b>Figura 4.3</b> - Fluxograma das principais etapas do processamento de imagens SAR efetuadas nesta dissertação .....	40
<b>Figura 4.4</b> - Fluxograma do processamento por transformação IHS - RGB das imagens.....	42
<b>Figura 4.5</b> - fluxograma representativo das PC1 .....	43
<b>Figura 4.6</b> - Fluxograma representativo da PCA não selecionada .....	44
<b>Figura 4.7</b> - (A) barco de pequeno porte para acesso as áreas de ilhas e pontais (B) o transporte terrestre foi através de carro.....	45
<b>Figura 4.8</b> - DGPS em uso na (A) e (B) Praça da cidade de Carutapera –MA;(C) Porto do Gurupí , DGPS em cima do marco geodésico na cidade de Boa Vista do Gurupi. ....	46
<b>Figura 4.9</b> - Carta-imagem da área de estudo na composição 3R4G5B do Landsat ETM+, com as rotas de barco e carro realizadas.....	47
<b>Figura 4.10</b> - GPS e altímetro em uso (A) GPS etrex Vista e (B) Altímetro Suunto Digital Escape 203 .....	47
<b>Figura 4.11</b> - Amostragem e coleta dos ambientes costeiros – Foto: Campo salino .....	48

<b>Figura 5.1</b> - (A) Modelo digital de elevação do SRTM; (B) Relevo sombreado; (C) Paleta de cores com tons indicativos da topografia da área em estudo e (D) Integração da paleta de cores com o relevo sombreado.....	51
<b>Figura 5.2</b> - Imagens Landsat-7(Ranking OIF): (A) Composição 4R 3G 1B; (B) 1R 2G 4B; (C) 4R 2G 3B e (D) 5R 4G 1B.....	55
Legenda: Planalto costeiro (Pc); Manguezal(Mz);.....	56
<b>Figura 5.3</b> - Imagens Landsat-7: (A) 1R 2G 3B; (B) 4R 5G 3B e (C)7R 2G 1B. ...	56
<b>Figura 5.4</b> - Imagem PC seletivo com o composição das PC's: PC1(1,2,3) no canal R, banda ETM+ 4 no canal G e PC1(5,7) no canal B. Legenda: Pc-lanalto costeiro; Mz- Manguezal; Pm- planície de maré;PML- planície de maré lamosa; Pma- planície de maré arenosa; PMM- plabnície de maré mista,Pad- Pântano de água doce;P.s- pântano salino;Pi- Planície de inundação; Ba-Barras arenosas; Cpd- Cordões de paleodunas; Pa- praias arenosas e Pfb- Praias flecha barreira; Dv- Delta de maré vazante e Ce- Canal estuarino. ....	58
<b>Figura 5.5</b> - Composição das pc's PC1, PC2 e PC3 da imagem Landsat 7 da área de estudo.....	59
<b>Figura 5.6-</b> Imagens RADARSAT-1 Wide-1 órbita descendente. (A) Imagem adquirida em 26 de janeiro de 2003, condição de maré vazante, mostrando as principais direções de fluxo dos estuários, e em (1) a morfologia das barras arenosas submersas dada pela rugosidade superficial da água. (B) imagem adquirida em 17 de outubro de 2003, condições de maré enchente mostrando em (2) as Barras arenosas emersas. ....	60
<b>Figura 5.7</b> - integração de dados de DEM com informações físico-químicas do Landsat -7, composição 4R 5G 3B.....	61
<b>Figura 5.8</b> - integração de dados do SRTM com imagens Landsat -7 composição 4R 5G 3B com realce por decorrelação. ....	62
<b>Figura 5.9</b> - imagem produto da fusão da imagem RADARSAT-1 (17 de outubro de 2004) com a PC seletiva da imagem Landsat ETM+(07 de agosto de 1999). .	63
<b>Figura 5.10</b> - Mapa de ambientes costeiros da área de estudo classificada automaticamente através do algoritmo de classificação ISODATA, a partir de imagens Landsat 7 (1,2,3,4,5 e 7). Legenda: A(sm) area sem teor de materias em suspensão;A(cm) área com alto teor de materiais em suspensão; Pm-planície de maré;Pml- planicie de maré lamosa; Pma- Planície de maré arenosa;Mz-	

Manguezal;Pc-Planalto costeiro, Cpd- Cordão de paleodunas; Da- Dunas atuais; Pa- Praias arenosas e Pi- Planície de inundação fluvial. ....	66
<b>Figura 5.11</b> - Imagem gerada da classificação automática não supervisionada do processamento STC do RADARASTt-1. Legenda A= Massa d água; B=Planalto Costeiro; C=Manguezal e D= superfície arenosa.....	67
<b>Figura 5.12</b> - Imagem gerada da classificação automática da fusão SAR/SPC ...	69
<b>Figura 5.13</b> – Representação do Planalto costeiro (coordenadas 46°15´W e 45°45´W e 1° 10´S e 1° 16´S) na área de estudo atra vés de diferentes dados (A) imagem fusionada SAR/SPC;(B) Imagem fusionada Landsat/SRTM (C) RADARSAT-1 passagem 17/10/2004 e (D) Imagem Landsat 7 composição 4R 5G 3B.....	73
<b>Figura 5.14</b> - SRTM com o perfil da Serra do Piriá.....	74
<b>Figura 5.15</b> - imagens mostrando o contato manguezal x planalto costeiro (A) Landsat-7; (B) RADARSAT-1; (C)fusão SAR/SPC - fotos representativas do contato;(D) Paleo-falésia no povoado de Porto do Campo (B)contato suave entre o planalto costeiro e o manguezal próximo ao povoado de Porto do campo- PA ...	75
<b>Figura 5.16</b> - Fotos (F e G) de falésias (Fm. Barreiras) localizada no povoado de Giz, há aproximadamente 10km de Fernandes Belo-MA.....	76
<b>Figura 5.17</b> – Representação do Planalto costeiro (coordenadas 46°15´W e 45°45´W e 1° 10´S e 1° 16´S) na área de estudo atra vés de diferentes dados (A) imagem fusionada SAR/SPC; (B) Imagem fusionada Landsat/SRTM (C) Imagem Landsat 7 composição 4R 5G 3B e (D) RADARSAT-1 passagem 17/10/2004.....	77
<b>Figura 5.18</b> - imagens: (A) Landsat ETM+ composição 4 R 5G 3B; (B) RADARSAT-1 da planície de inundação ; (C) Fusão SAR/SPC e (D) SRTM integrada a paleta de cores.....	78
<b>Figura 5.19</b> - Canal estuarino no rio Piriá (A) Landsat-7, (B) RADARSAT-1, Fev/2003 e (C) RADARSAT-1, out/2004 (D) produto híbrido SAR/SPC. ....	80
<b>Figura 5.20</b> - Imagens (A) Landsat-7,(B) RADARSAT-1, jan 2003, (C) RADARSAT-1, out. 2004, (D) produto híbrido SAR/SPC. Localização Rio Piriá. Legenda: (1) Barras arenosas; (2)Funil estuarino; (3) segmento retilíneo e (4) Segmento de curso superior .....	81
<b>Figura 5.21</b> - Imagem Landsat -7 composição 4R 5G 3B próximo ao rio Emboraí (B) lado W, margem direita do rio Emboraí (C) Rio Piriá, porto em maré baixa. ....	82

<b>Figura 5.22</b> - Delta de maré vazante na Baía de Emboraí.....	83
<b>Figura 5.23</b> - (A) imagem Landsat 7 composição 4R, 5G 3B representando a planície de maré lamosa (sem/pouca vegetação);(B)Produto híbrido SAR/SPC (C)Radarsat-1passagem fev/2003; (D)Radarsat-1 passagem out./2004; (E) Rio Gurupi margem esquerda sentido pedra do Gurupí e (F) Planície de maré lamosa localizada no "furo" (entrada) para acesso a cidade de Carutapera – MA.....	87
<b>Figura 5.24</b> -(A)Landsat-7; (B ) RADARSAT-1 jan/2003 e (C)produto híbrido SAR/SPC - manguezal (D e E) mangue branco na ilha Apeú Salvador (vegetado por <i>laguncularia</i> ); (F) <i>Rhizophora</i> e (G) <i>Avicennia</i> , localização: Rio Gurupi em direção a Carutapera-Ma .....	88
<b>Figura 5.25</b> - Planície de maré arenosa (Pma) (A) Landsat-7; (B) RADARSAT-1jan/2003; (C) produto híbrido SAR/SPC - fotos (D) e (E) ao sul da “pedra do Gurupí”, a 20km do Porto do Gurupí e a 6km da vila do Rabo de Rato; (F) e (G) Ilha de Apeú Salvador. ....	89
<b>Figura 5.26.</b> - Foto digital (A e B) Pântano de água doce próximo 10km da cidade de Aurizona-MA.....	90
<b>Figura 5.27</b> - Pântano salino exterior próximo ao povoado de GIZ a 10 km de Fernandes Belo- PA (A) Imagem Landsat- 7 composição 4R 5G 3B (B) RADARSAT-1 passagem 17/10/2004 e (C) produto híbrido SAR/SPC. (D), (E) fotos digitais de campos salinos da margem esquerda da estrada, sentido Fernandes Belo- PA e (F) Pântanos salinos, margem direita sentido Fernandes Belo - PA.....	92
<b>Figura 5.28</b> -(G) foto digital do campo salino da margem esquerda da estrada, sentido Fernandes Belo- PA e (1) zoom mostrando cristais de sal no campo e (2) cristais de sal nas folhas da vegetação do campo (agirú). ....	93
<b>Figura 5.29</b> – Paleoduna do povoado de Giz, Pará (A) Imagem Landsat-7, Composição colorida 4R 5G 3B, (B)Radarsat-1 (17/09/2004),(C) Imagem fusionada SPC/SAR, (D) e (E) estrada de acesso ao povoado de GIZ.....	94
<b>Figura 5.30</b> - Imagens (A e D)Landsat-7, (B e E) Radarsat-1 , out./2004 e (C e F) Produto híbrido SAR/SPC. Legenda: Cpf- cordão de dunas frontais ; Pa- Praia de macromaré .....	96
<b>Figura 5.31</b> - (A) e (B) Cordão de dunas frontais (NW) na ilha de Apeú Salvador, Pará e (C) e (D) NE da ilha de Apeú Salvador .....	97

<b>Figura 5.32</b> - (A) e (B)- Interdunas (NE) na ilha de Apeú Salvador (C) Interdunas (NW) na ilha de Apeú Salvador,(D) após o campo de paleo-dunas.....	97
<b>Figura 5.33</b> - (A) dunas móveis, ilha Apeú Salvador .....	98
<b>Figura 5.34-</b> (A) imagem Landsat-7 composição 4R 5G 3B; (B), (C) e(D) fotos da praia flecha barreira, localizada na ilha Apeú Salvador.....	99
<b>Figura 5.35</b> - Circunferência apontando para a cidade de Viseu - Pa (A) imagem Landsat- 7 composição 4R 5G 3B; (B) Imagem RADARSAT-1 (17/10/04) .....	100
<b>Figura 5.36</b> - Contribuição de diferentes sensores para o reconhecimento de ambientes costeiros modificada de Boulhosa (2006) .....	101
<b>Figura 5.37</b> - Mapa dos ambientes sedimentares costeiros gerado a partir da edição da classificação automática e da identificação visual. ....	102

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1-</b> Micromédia dos dados de precipitação anual a partir de dados do INMET .....	27
<b>Tabela 3.1</b> - Características das imagens Landsat - 7 .....	29
<b>Tabela 3.2</b> – Características das cenas do RADARSAT-1 utilizadas .....	29
<b>Tabela 4.1</b> - Características dos dados de sensoriamento remoto utilizados. ....	32
<b>Tabela 4.2</b> - valor apresentado pela estatística <i>Kappa</i> indica o desempenho da classificação gerada, segundo Cohen <i>apud</i> Fonseca <i>et al.</i> , 2000. ....	36
<b>Tabela 5.1</b> - Estatística das bandas (1,2,3,4,5 e 7) espectrais da Imagem Landsat 7 .....	52
<b>Tabela 5.2</b> - Matriz de covariância entre as bandas ETM+ .....	53
<b>Tabela 5.3</b> - Matriz de correlação entre as bandas ETM+ .....	53
<b>Tabela 5.4</b> - cálculo do OIF das combinações possíveis e ranking dos três primeiros OIF e visual .....	54
<b>Tabela 5.5</b> - Desempenho da classificação das imagens processadas por classificação não supervisionada .....	64
<b>Tabela 5.6</b> - classificação automática não supervisionada aplicada na imagem Landsat 7, índice <i>Kappa</i> e desempenho da classificação. ....	66
<b>Tabela 5.7</b> - Dados de referência: matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada para STC/RADARSAT-1 (26/01/2003) .....	67
<b>Tabela 5.8</b> - informações da matriz de confusão, erro de comissão e omissão e exatidão geral da classificação não supervisionada da fusão SAR/SPC. ....	69
<b>Tabela 5.9</b> - Aproveitamento do processamento dos sensores remotos para reconhecimento das feições costeiras .....	71
<b>Tabela 5.10</b> - unidades morfológicas e ambientes costeiros .....	72
<b>Tabela 5.11-</b> característica dos ambientes costeiros mapeados.....	103

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DEM - Digital Elevation Model

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus

FURG - Fundação universidade do Rio Grande

GCP- Ground Control Point

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia

LAIT - Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido

MDT - Modelo Digital de Terreno

OIF - Optimum Index Factor

PDI - Processamento Digital de Imagens

PIXEL - Picture x Elements

RADAR - Radio Detection Ranging

RMS-*Room Mean Square*

SAR -*Synthetic Apertura Radar*

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TM - Thematic Mapper

UFPA - Universidade Federal do Pará

IHS - Intensity - Hue - Saturation

## RESUMO

A partir da década de 80, com o lançamento da série de satélites Landsat TM, imagens orbitais começaram a ser extensivamente utilizadas no mapeamento geológico e geomorfológico costeiro. Esses produtos de sensores remotos são fontes de informações geográficas, fornecendo importantes subsídios para análises no domínio do espaço e do tempo. A área estudada encontra-se localizada no 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 e noroeste do Maranhão. A área faz parte de um conjunto de bacias independentes, onde o principal rio é o Gurupi, na divisa entre Pará e Maranhão. O objetivo desta dissertação foi reconhecer e mapear com acurácia os diferentes ambientes costeiros, a partir da utilização de imagens de sensores remotos ópticos e nas microondas integrados a modelos digitais de elevação (MDE), gerados pelo programa Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). O conjunto de dados utilizados para este fim incluiu imagens do RADARSAT-1 de janeiro e fevereiro de 2003 e setembro e outubro de 2004; Landsat ETM+ 7 de agosto de 1999; e modelos digitais de elevação (SRTM) de fevereiro de 2000. Os sinergismos destes dados utilizaram técnicas de transformação IHS e principais componentes. Desta forma, foi possível aplicar metodologias clássicas em Sistemas de Informações Geográficas para o mapeamento de ambientes costeiros. Como resultado, foram mapeados 15 ambientes costeiros, agrupados em 4 domínios geomorfológicos: Planalto costeiro, paleodunas, Planície costeira (planície de maré lamosa sem vegetação, manguezal, pântanos salinos, pântano de água doce, cordão de dunas frontais, interdunas, dunas atuais, praia de macro-maré), Planície estuarina (canal estuarino, barra arenosa de maré, delta de maré vazante) e Planície aluvial (lagos e planície de inundação). Assim pode-se concluir que os processamentos como o sinergismo entre os sensores SAR, ETM+ E SRTM, geraram inúmeras informações para o reconhecimento dos ambientes costeiros, pois estes conseguiram integrar em um único produto características importantes sobre seu determinado sensor com as de outro, completando-se entre si, produzindo mapas com alto detalhe.

## ABSTRACT

From the 80s, with the launch of the series of satellites Landsat TM, orbital images began to be extensively used in the geological and geomorphologic coastal mapping. These remote sensing products are sources of geographic information, providing significant subsidies for analysis in the field of space and time. The area studied is located in the best preserved tropical moist environment of the planet, the Amazon region, especially in the coast, mangroves of the northeastern state of Pará and the northwestern of Maranhão. The area is part of a set of independent basins, where the main river is the Gurupi, in the border between Para and Maranhão. The goal of this paper is to recognize and accurately map the different coastal environments, through the use of microwaves and optical remote sensing images integrated with the digital elevation models (MDE), generated by the program Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The dataset used for this purpose included images from RADARSAT-1 January and February 2003 and September and October 2004; Landsat ETM + on August 7, 1999, and from digital elevation models (SRTM) in February 2000. The synergism of these data processing techniques used IHS and key components. Thus, it was possible to apply traditional methods in Geographic Information Systems for mapping the coastal environment. As a result, 15 coastal environments were mapped, grouped into 4 geomorphologic areas: coastal Plateau, Coastal Plain (muddy tidal plains with no vegetation , mangrove, salt marshes, fresh water marshes, front dune lines, current sand dunes, interdunes, beach of macro tides), Plain estuarine (estuarine channel, tidal sandbar, the ebb tide delta) and Plain alluvial (lakes in the floodplain). So we can conclude that the processes as the synergism between the SAR sensors, ETM+ e SRTM, generated a great amount of information for the recognition of coastal environments, as they managed to integrate into a single product important characteristics about their particular sensor with other ones, complementing themselves, producing high detail maps.

## 1 INTRODUÇÃO

A partir do lançamento da série de satélites Landsat TM, imagens de sensores remotos orbitais começaram a ser intensamente utilizadas no mapeamento geológico e geomorfológico de ambientes costeiros. Esse marco inicial foi muito ampliado com o advento, na década de 1990, dos recobrimentos orbitais (Jers-1 SAR, RADARSAT-1) tendo maior disponibilidade de imagens de radar, uma experiência considerável em aplicações geológicas consolidada no país. As aplicações têm adaptado técnicas de foto-interpretação às características do imageamento radar (imagens de amplitude) e focado estudos tectônicos e fusão de radar com dados ópticos e aerogeofísica (Paradella, et al, 2000).

Nesse contexto, Santos (1996), Mendes et al, (1997), Silva, (1998), Prost et al (2001), Souza Filho (2000), Souza Filho & Paradella, (2002), Souza Filho & Paradella (2005); Gonçalves (2005); Batista (2005), Teixeira (2006); Boulhosa (2006), Rodrigues (2006); entre outros, mapearam diversos setores da costa do Amapá, Pará e Maranhão, principalmente no que se refere às aplicações em geomorfologia e distribuição dos ambientes costeiros. Assim, as lacunas cartográficas, que representam um dos mais graves empecilhos para o estabelecimento de corretas estratégias de ações de planejamento de uso e ocupação do espaço costeiro, estão sendo sanados com o aumento destes estudos.

O limite Pará-Maranhão foi escolhido como área de estudo desta dissertação por estar inserido em uma zona importante dentro das regiões dos trópicos úmidos, que ainda encontra-se desprovida de estudos mais detalhados (escala de 1:50.000) dos ambientes costeiros. Assim, pretendeu-se utilizar dados orbitais de sensores remotos, como as imagens do RADARSAT-1, que representam uma ferramenta eficaz para o estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, principalmente em costa de manguezais, onde imagens SAR tem capacidade de percepção remota em todas as condições de tempo, em resposta a dificuldade de se obter imagens no espectro óptico na área, devido a permanente cobertura de nuvens. Outra técnica usada neste trabalho foi o sinergismo de dados do SAR e óptico que vem apresentando melhores performances na discriminação dos ambientes costeiros, pois os produtos gerados permitiram o

realce da linha de costa e das feições costeiras submersas, como a morfologia de canais de maré, de barras arenosas emersas e submersas e de zonas de arrebatamento de ondas, além do mais realçam as áreas com solos expostos, permitindo a discriminação espectral entre pântanos salinos, Planície de maré arenosa, Planície de maré lamosa, crista de chenier, duna-praia barreira e barras estuarinas. Os dados SAR são responsáveis pelo realce de feições topográficas, diferenças na altura da vegetação, geometria dos corpos e conteúdo de umidade, enquanto os dados ópticos fornecem informações da cobertura vegetal e variações em sua tipologia (Souza Filho & Paradella, 2002).

O Objetivo deste trabalho foi realizar o reconhecimento dos ambientes sedimentares tendo por finalidade mapear e cartografar com acurácia os diferentes ambientes costeiros; avaliar o processamento e efetividade de realces de imagens, técnicas de fusão (integração) de dados de sensores remotos ópticos e microondas para mapeamento geológico-geomorfológico de ambientes costeiros na região dos trópicos úmidos; avaliar as aplicações de dados de sensores remotos integrados, processamento digital de imagens e técnicas de sistemas de informações geográficas (SIG) na cartografia de ambientes costeiros do Rio Caeté no Pará até o Rio Maracaçumé a noroeste do Maranhão, a partir do processamento e integração de dados de sensores remotos ópticos e microondas (Landsat TM e ETM+ e RADARSAT-1), e modelo numérico de terreno (MNT). além de usar o RADARSAT- 1 para discriminação do manguezal.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está limitada a leste pela baía do rio Caeté (PA), a oeste pela baía do rio Maracaçumé (MA), a sul pelo planalto costeiro e norte pelo Oceano Atlântico (Figura 2.1).

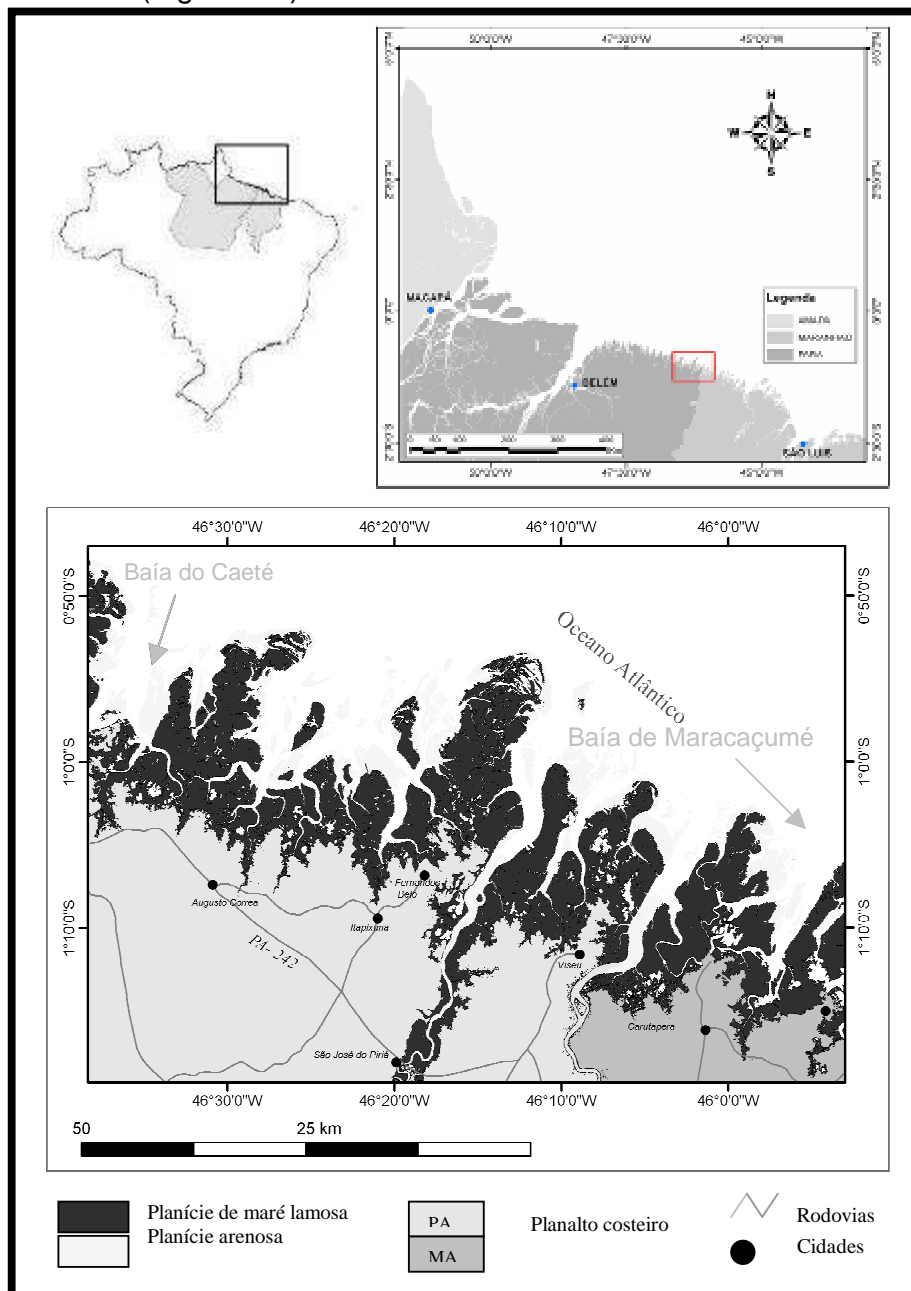


Figura 2.1 - Mapa de localização (Pará - Maranhão)

## 2.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

### 2.2.1 Geologia

Com relação ao arcabouço geológico, os depósitos miocênicos nos estados do Pará e Maranhão referidos as Formações Barreiras (Meso a Neomioceno) e Pirabas (Neo-Oligoceno/Eomioceno) são bem expostos no norte da Bacia de São Luis, Centro Leste da sub Bacia de Cametá na porção leste do sistema de Graben do Marajó, Bacia de Bragança - Viseu, e nas plataformas bragantinas e do Pará. Rosetti et al. (2006) relatam que as bacias de São Luis, Cametá e Bragança-Viseu representam estruturas alongadas na direção NW-SE, cujas gênese estão relacionadas a estiramento litosférico relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Equatorial. Os processos tectônicos nestas bacias mostram-se presentes não só durante o período da fragmentação principal, mas continuam ativos durante o Cretáceo e Cenozóico (Costa et al, 2002). Segundo Costa et al (1996) destaca-se o tectonismo em regime de transcorrência, devido às falhas normais NW- SE e transcorrentes E-W e NE-SW que tem continuidade até o recente.

Segundo Klein (2004) e CPRM (2004), o embasamento da área e a cobertura sedimentar estão descritos a seguir e presentes na Figura 2.2.

O Paleoproterozoico e Mezoproterozoico são marcados pelo Grupo Aurizona, Suíte intrusiva Tromai e Formação Viseu, constituídos por rochas de uma seqüência metavulcano-sedimentar metamorfizada, compostas por xistos de natureza diversa; conjunto vulcano-plutônico constituído por tonalitos, trondhjemitos e granodioritos (TTG) e conglomerados areníticos, respectivamente.

O Cretáceo é representado na área de estudo pelo Grupo Itapecuru. Este é formado por uma unidade basal indiferenciada, pela formação Alcântara e pela Formação Cujupe que representa seu topo, constituídos de arenitos caulíníficos, que se intercalam com argilitos.

O Neógeno de cobertura Plio-pleistocênica é formado pelo Grupo Barreiras, sendo constituído por sedimento areno-argilosos, mal consolidados, discordantes das rochas cretáceas ou do embasamento.

Os depósitos do Neógeno de cobertura Pleistocênica são representados pelos depósitos fluvio-marinhos, são constituídos por terrenos relativamente

planos e descontínuos na orla litorânea. Esta unidade regional é compartimentada em três unidades geomorfológicas: (i) planície aluvial; (ii) planície estuarina; e (iii) planície costeira. O Sistema de terraço marinho constitui superfícies aplainadas por agradação.

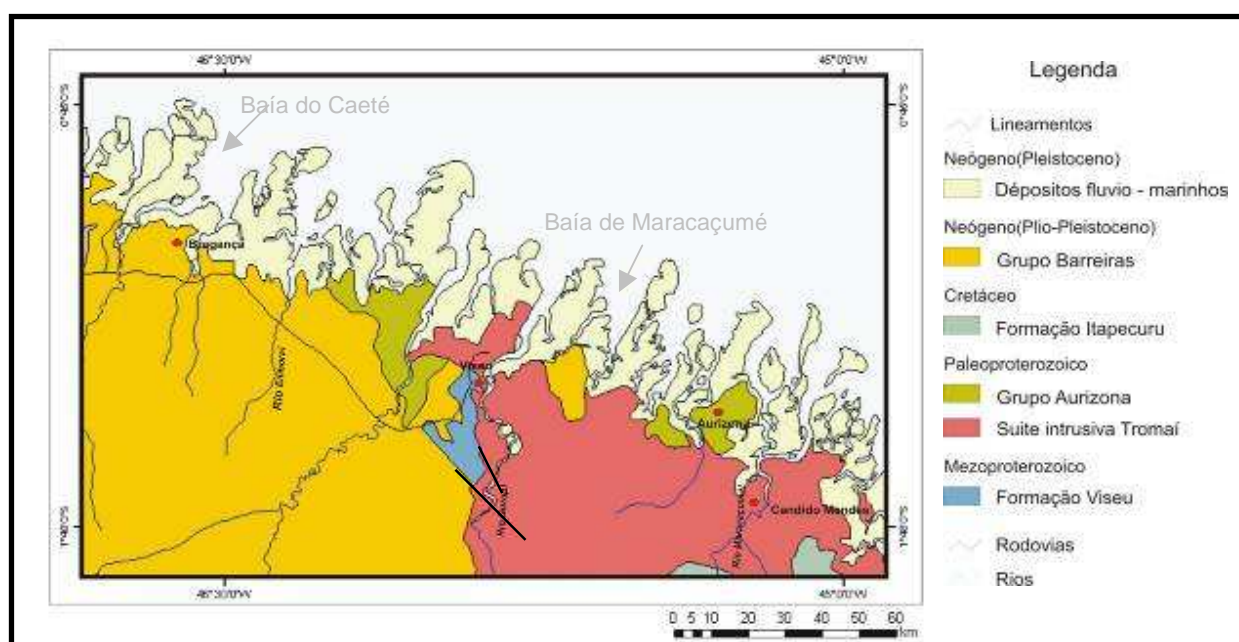


Figura 2.2 - Mapa geológico da área de estudo (Modificado de CPRM, 2004)

A região NW do Maranhão entre os vales dos rios Gurupi e Mearim (Figura 2.3) possui também elementos estruturais originados por movimentações do Neógeno ao Quaternário (Ferreira Jr. *et al.* 1996). As estruturas do Neógeno Superior localizam-se no extremo nordeste da área e equivalem a falhas normais de direção NW-SE e inclinadas para NE, que limitam um depocentro preenchido por sedimentos do Grupo Barreiras. As informações sedimentológicas segundo Costa *et al.* (1996) mostram que os desnivelamentos influenciados pelos movimentos verticais propiciaram a instalação das seguintes seqüências, do interior do continente em direção ao paleolitoral: (A) seqüência de leques aluviais caracterizados por conglomerados e arenitos conglomeráticos na porção proximal e arenitos maciços de granulometria fina na porção distal; (B) seqüência ligada a sistemas fluviais meandantes e a extensas planícies de inundação; e (C) seqüência transicional dominada por marés de baixa energia. Trata-se de uma

bacia assimétrica, cujo limite SW corresponde a áreas elevadas, alongadas na direção NW-SE e sustentadas principalmente por sedimentos do Cretáceo (Formação Itapecuru), marcando uma zona de ombreira.

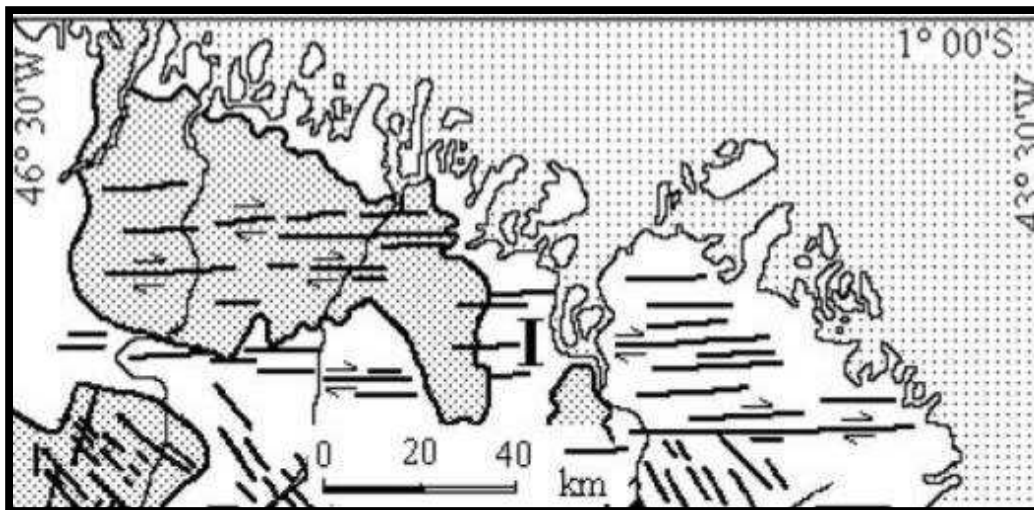


Figura 2.3 - Estruturas neotectônicas do noroeste do Maranhão - Domínio I (Costa et al 1996).

### 2.2.2 Geomorfologia.

É representada pelas unidades geomorfológicas, descritas a seguir:

(A) *Planalto Costeiro* – apresenta um relevo aplainado com suaves ondulações e cotas topográficas acima de 5m (baixo platô), com exceção de algumas áreas como as imediações de São José do Piriá-Pa com serras e topografia de 150m.

B) *Planície Flúvio-Marinha* – são representadas por terrenos relativamente planos e descontínuos na orla litorânea. Esta unidade regional é compartimentada em três unidades geomorfológicas: (i) planície aluvial; (ii) planície estuarina; e (iii) planície costeira. O Sistema de terraço marinho constitui superfícies aplainadas por agradação.

Segundo Mendes (2005), na costa amazônica são identificados dois cenários geomorfológicos e sedimentológicos para a presença dos manguezais: Na parte leste do rio Amazonas ocorrem reentrâncias paraense-maranhense com um grande número de baías e estuários. Na parte oeste, na costa amapaense, é

definida por uma extensa faixa de sedimentos argilosos, influenciado pelo sistema de dispersão do Rio Amazonas.

### 2.2.2.1 Vegetação

A costa brasileira possui uma das maiores áreas contínuas de manguezal do mundo, cuja vegetação apresenta-se em sua exuberância no Litoral Amazônico, próximo a linha do Equador, entre a foz do rio Oiapoque (Norte do Amapá) e a baía de São Marcos (Maranhão) chamada de costa norte (Fernandes, 2003)

A vegetação da área em estudo corresponde ao tipo geral das Florestas Tropicais Úmidas, e ao subtipo Floresta Densa dos baixos platôs Pará-Maranhão. Nas áreas sujeitas a inundações, predominam os manguezais, com suas espécies características (*Rhizophora* e *Avicennia nitida*), devido à influência salina da água do mar. Ao longo do litoral, também é possível detectar a presença de pequenas áreas de vegetação em dunas. Ao longo dos altos cursos d'água e pequenos igarapés, onde não ocorre a influência salina, ainda é possível encontrar as matas ciliares com elevada presença de palmeiras, dentre as quais destaca-se o buriti e o *miriti* (*Mauritia* spp.).

## 2.3 ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS E METEOROLÓGICOS

### 2.3.1 Dados oceanográficos

A área em estudo está sujeita a um regime de macromarés semidiurnas, com variações de 4 a 7 m e velocidades de corrente de marés vazantes de até 1,43 m/s no sentido de SE para NW e correntes de marés enchente com velocidade 1,13 m/s no sentido de NW para SE na costa nordeste do Pará, atingindo até 4 m/s na Baía de São Marcos no Maranhão ([www.dhn.mar.mil.br/](http://www.dhn.mar.mil.br/)). Estes são os responsáveis em grande parte pelo transporte de sedimentos, assim como na orientação dos canais estuarinos. Estas condições hidrodinâmicas influenciam consideravelmente a sedimentação e a dinâmica das áreas costeiras.

### 2.3.2 Clima

O clima é o superúmido da Amazônia, podendo ser classificado segundo Köppen como tropical úmido, do tipo Aw com inverso seco e com precipitação média. A região está a 1° S do Equador e caracteriza-se por baixas altitudes (0 a 200 m). São quatro os principais sistemas de circulação atmosférica que atuam na região, a saber: sistema de ventos de Nordeste (NE) a Leste (E) dos anticiclones subtropicais do Atlântico Sul e dos Açores, geralmente acompanhados de tempo estável; sistema de ventos de Oeste (O) da massa equatorial continental (MEC); sistema de ventos de Norte (N) da Convergência Intertropical (CIT); e sistema de ventos de Sul (S) do anticiclone Polar. Estes três últimos sistemas são responsáveis por instabilidade e chuvas na área.

Quanto ao regime térmico, o clima é quente, com temperaturas médias anuais variando entre 24° e 26°C. (Fonte site: [www.bractaceae.org/clima.html](http://www.bractaceae.org/clima.html)).

O sistema de grande escala que regula o regime de precipitação (~ 3.000 mm/ano) no litoral do estado do Pará é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O período chuvoso concentra-se durante os meses de fevereiro a abril, embora a distribuição de chuvas seja satisfatoriamente regular o ano todo, com uma variação na taxa de insolação entre 216 e 200 dias de sol ao ano. A nebulosidade é freqüente no litoral e a marcha de temperatura é relativamente estável. A característica predominante do vento é de fluxo zonal de leste em quase todo o litoral. A velocidade observada à superfície em média no ano fica em torno de 7 km/h.

Os sistemas atmosféricos atuantes são (Brisas Marítima e Terrestre, Linhas de Instabilidade (LIs), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), El Niño e La Nina) (Fonte: INPE/CEPETC).

As Figuras 2.4 e 2.5 e a Tabela 2.1 descrevem de modo geral como varia a temperatura e a micromédia anual dos dados pluviométricos nas cidades de Belém e São Luis, dados estes utilizados como referência.

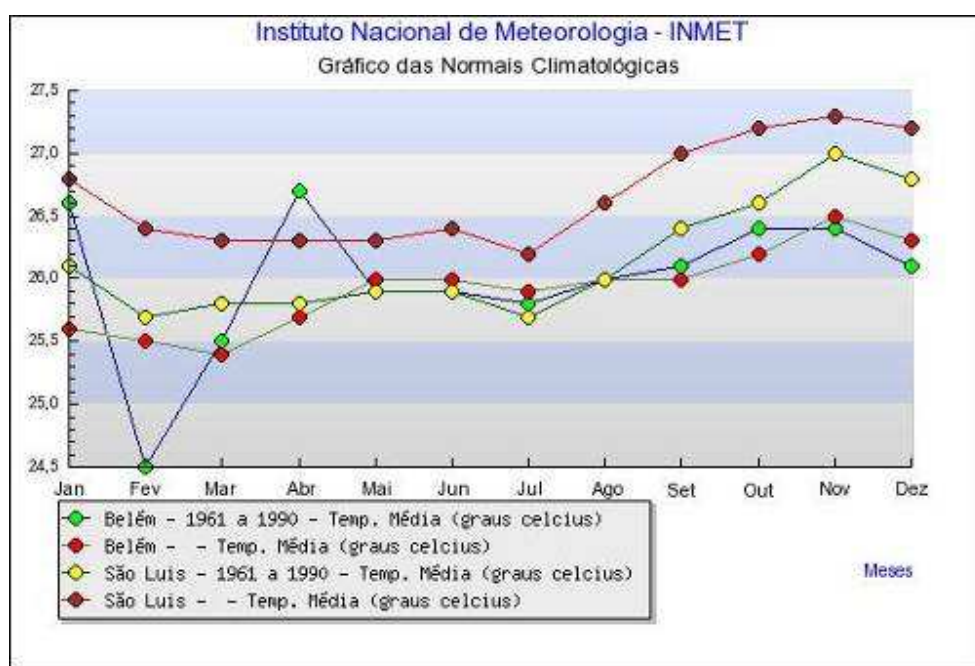


Figura 2.4 - Média mensal de temperatura para as capitais referências: Belém e São Luis no período de 1961-1990

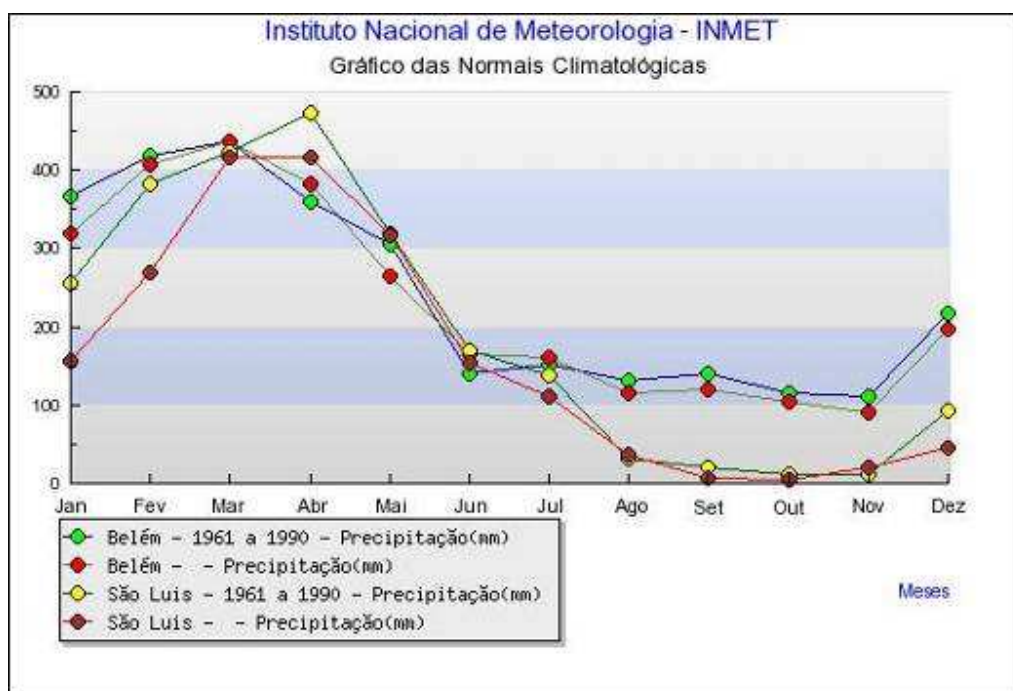


Figura 2.5 Média mensal de precipitação para as capitais referências: Belém e São Luis no período de 1961-1990

Tabela 2.1- Micromédia dos dados de precipitação anual a partir de dados do INMET

<b>Micromédia da precipitação anual calculada a partir de dados do INMET</b>	
<b>Belém:</b>	<b>São Luís:</b>
2005:3.505mm	2005:1.780mm
<b>2004:2.955mm</b>	<b>2004:2.460mm</b>
2003:2.780mm	2003:2.355mm
2002:2.855mm	2002:1.860mm
2001:3.290mm	2001:2.460mm
2000:3.305mm	2000:2.730mm
<b>Média:3.115mm</b>	<b>Média:2.274mm</b>

### 3 MATERIAIS UTILIZADOS

Principais características dos sensores ópticos e microondas utilizadas nesta dissertação, seguem descritas a seguir:

#### 3.1 SATÉLITE LANDSAT ETM+7

O sensor ETM (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) a bordo do Landsat 7, lançado em 15/04/99 pelo lançador Delta-II Expendable Launch Vehicle. Apresenta resolução temporal de 16 dias e a área imageada é 185x185Km (Irish, 1998). Ativo normalmente até 31.05.2003, e em modo SLC-OFF depois desta data, com a qualidade das imagens muito prejudicada.

Uma órbita do Landsat -7 é realizada em aproximadamente 99 minutos, sendo completada em 16 dias. A órbita é descendente, ou seja, de norte para sul, o satélite cruza a linha do Equador 09h30min (hora local) em cada passagem (heliosincrona) (NASA, 2004).

**As bandas espectrais, resolução espacial e largura da faixa de imageamento do ETM+ são descritas abaixo:**

- As bandas do visível e do infravermelho mantiveram a resolução espacial de 28.5 m do Landsat -5 (canais 1,2,3,4,5 e 7)
- As bandas do infravermelho termal (canais 6L e 6H) passam a ser adquiridas com resolução de 60 metros, contra 120 m no Landsat -5.
- A nova banda Pancromática (canal 8) tem 15 m de resolução espacial.

As cenas utilizadas do sensor ETM+ foram adquiridas através do acervo do Laboratório de análises de imagens do trópico úmido (LAIT), pois as cenas gratuitas mais atuais apresentavam um alto índice de recobrimento por nuvens.

A tabela 3.1 apresenta características da imagem Landsat -7 utilizada:

Tabela 3.1 - Características das imagens Landsat - 7

Plataforma /sensor	Data de Aquisição	Ângulo de incidência	Área imageada (km)	Bandas	Resolução Espacial
Landsat 7 (222-61) ETM+	7 de Agosto 1999	Nadir	185x185	1,2,3,4,5,7 e 8	30m (8 15m)

### 3.2 SATÉLITE RADARSAT-1

“Radio Detection and Ranging” que denomina o dispositivo sensor capaz de detectar alvos, indicando sua posição e distância através das ondas de rádio (Sabins 1996). Esse termo tem sido utilizado de forma genérica para classificar os sistemas de sensores ativos que operam na faixa de frequência das microondas e foram utilizados, inicialmente para fins militares durante a II Guerra Mundial, posteriormente para fins civis, a partir da década de 60.

A órbita descrita pelo RADARSAT-1 é circular, quase polar e solar síncrona, com período de 101 minutos, perfazendo um total de 14 órbitas por dia. Devido às características da órbita e das baterias utilizadas, o sensor tem capacidade de operar imageando por 28 minutos em cada órbita. A inclinação da órbita é de 98,6° em relação ao Equador. Em média, o período de revisita é de 24 dias com uma variação possível de 24 horas a 24 dias dependendo do ângulo de visada e da latitude da região imageada e modo de imageamento na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características das cenas do RADARSAT-1 utilizadas

Plataforma/sensor	Data de aquisição	Ângulo de incidência	Resolução nominal (Ranger x azimute) (m)	Tamanho do pixel (m)	Swath (km)	Tipo de órbita	Maré
RADARST-1/SAR	JAN	2003	20-31°	33x27	12,5	descendente	alta
	FEV						baixa
	SET	2004					alta
	OUT						alta

Uma característica importante na imagem de radar é sua forma de imageamento de visada lateral que, além de eliminar as ambigüidades, causadas por pontos situados simetricamente à direita e à esquerda da antena, possibilita a geração de sombreamento, dando às imagens aspecto tridimensional, isto é, com sensação de relevo, que é de suma importância para o mapeamento de unidades de paisagem (Paradella & Souza Filho, 2002)

Na Figura 3.1 observa-se os diferentes tipos de resposta para cada tipo de superfície e na figura 3.2 os modos de imageamento do RADARSAT-1:

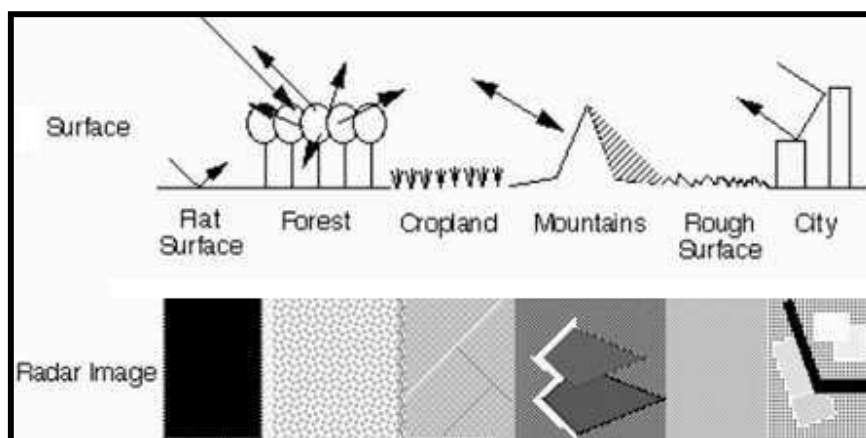


Figura 3.1 - Diferentes tipos de resposta que o radar pode fornecer (CCRS, 2000).  
 Legenda: Surface= superfície; Flat Surface= superfície lisa; Forest = Floresta; Cropland= área agrícola; Mountains= montanhas; Rough Surface= superfície áspera; City= Cidade e RadarImage=Imagem de Radar.

Para esta dissertação foram utilizadas quatro cenas do RADARSAT -1, do modo de imageamento "Wide Swath Beams -1" de órbita descendente. Estas cenas foram adquiridas com a finalidade de cobrir a área em diferentes situações de precipitação e de maré. A visada da antena sempre é feita à direita, às 18 horas na visada ascendente e às 6 horas no modo descendente, horário local.

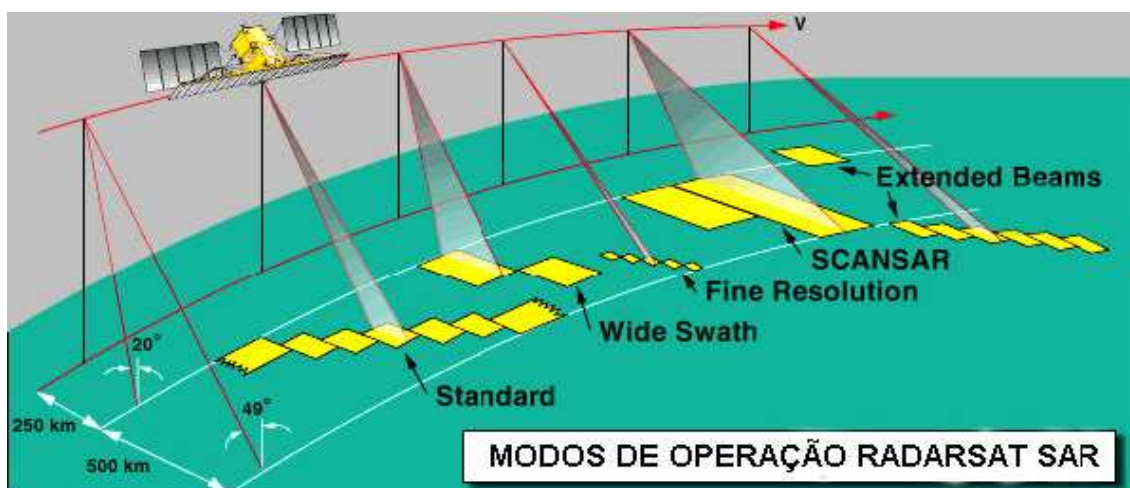


Figura 3.2 - Modos de Imageamento do RADARSAT -1Fonte CCRS (2001), termos em inglês sem tradução para o português.

### 3.3 MISSÃO SRTM

Os dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) são o resultado de uma missão espacial da NASA (National Aeronautics and Space Administration), NIMA (National Imagery and Mapping Agency), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana) com o objetivo de gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE) da Terra usando a interferometria (NASA, 2001).

A coleta de dados da missão espacial SRTM aconteceu entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 e cumpriu todos os objetivos. Após um processo longo de calibração e validação dos dados, estão sendo processados cerca de 12 terabytes de dados brutos para criação de modelos digitais de elevação (MDE).

O projeto SRTM teve como veículo espacial a nave *Endeavour*. O equipamento de Interferometria utilizado era uma versão modificada do mesmo instrumento (*C/X-Band Synthetic Aperture Radar*) usado duas vezes na *Endeavour* em 1994 (NASA, 2000).

A missão coletou medidas 3-D da superfície terrestre usando interferometria. A Interferometria compara duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obter elevação ou informação de mudanças na superfície.

Os dados foram adquiridos gratuitamente com resolução espacial de 90 m, no site [http://www.jpl.nasa.gov/srtm/southamerica\\_radar\\_imagens.html](http://www.jpl.nasa.gov/srtm/southamerica_radar_imagens.html)

## 4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

As características dos parâmetros das diferentes imagens utilizadas podem ser observadas na tabela 4.1 abaixo;

Tabela 4.1 - Características dos dados de sensoriamento remoto utilizados.

Plataforma	Senso/mo	Aquisição	Angulo de incidência	Resolução espacial (m)	Swath (km)	Maré
RADARSAT-1	SAR/Wide 1	jan/fev, 2003	20-31°	33x27	165	alta/baixa
RADARSAT-1	SAR/Wide 1	Se/outt, 2004	20-31°	33x27	165	alta
Landsat 7	ETM+	ago,1999	Nadir	28,5 (pan/15)	120	alta
Landsat 5	TM	ago,1986	Nadir	30	10	alta
SRTM	InSAR	fev,2000	off-Nadir	90	111	baixa

### 4.2 METODOS UTILIZADOS

A metodologia utilizada nesta dissertação foi desenvolvida em duas etapas. Na primeira foi realizado o processamento digital das imagens ópticas e de microondas, bem como, aplicação de técnicas de integração digital de dados multi-sensores, geração e avaliação do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ) das imagens RADARSAT-1, e na segunda etapa do trabalho, a elaboração do mapa dos ambientes sedimentares costeiros.

Assim, para o processamento digital das imagens de sensores remotos foi utilizado o programa PCI *Geomatics* V. 10 (PCI *Geomatics*, 2005), enquanto que, o programa para geração dos mapas e manipulação espacial de dados foi o Arc GIS 9.2 (ESRI, 2003).

#### 4.2.1 Processamento dos dados do SRTM

Para o processamento dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foram utilizados os softwares Global Mapper V. 8 para conversão da

extensão do dado em formato “.hgt” para geoTiff, reamostragem da resolução espacial de 90 para 30 m, para futura ortorretificação da imagem Landsat-7 *no Software PCI v.10 (PCI Geomatics,2005).*

#### 4.2.1.1 Relevo Sombreado

Na ferramenta REL do pacote Algorithm Librarian, do software PCI foi possível a geração do relevo sombreado que consistiu na aplicação de combinações de ângulos de visada sendo que com a iluminação azimute = 70 e iluminação = 30 (mesmo dado de entrada de Boulhosa et al , 2006 que consiste numa simulação de uma visada lateral da área através da mudança do ângulo azimute da iluminação solar e sua elevação, gerando sombras) apresentou os melhores resultados e destacou uma importante ferramenta para o entendimento das vertentes do relevo além de fornecerem importantes informações para a compreensão do relevo da área através do DEM, além de ser também um bom dado para integração com o Landsat.

Abaixo na Figura 4.1, fluxograma representativo das etapas de processamento para o SRTM.

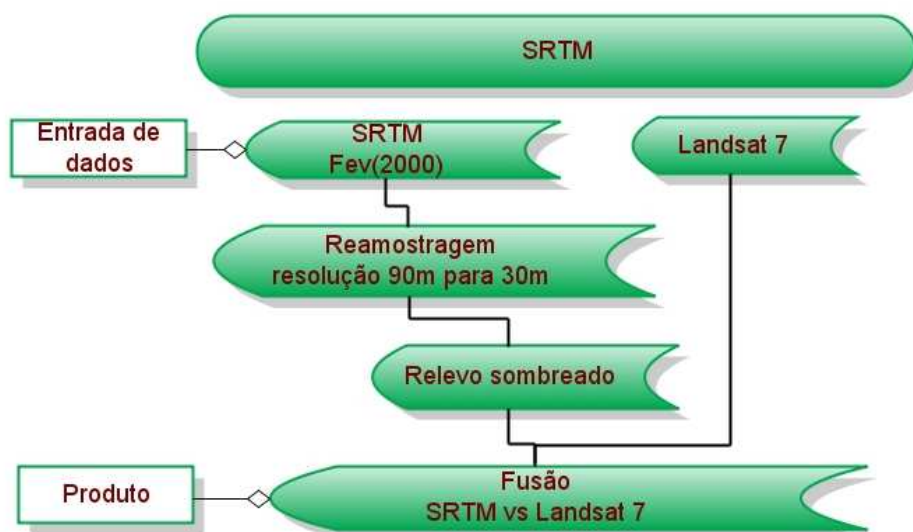


Figura 4.1- Fluxograma das etapas de processamento dos dados SRTM para esta dissertação

## 4.2.2 Processamento Digital das Imagens (PDI) ópticas

Para o processamento das imagens Landsat ETM+ foram seguidas as seguintes etapas indicadas pela figura 4.2 do fluxograma abaixo:

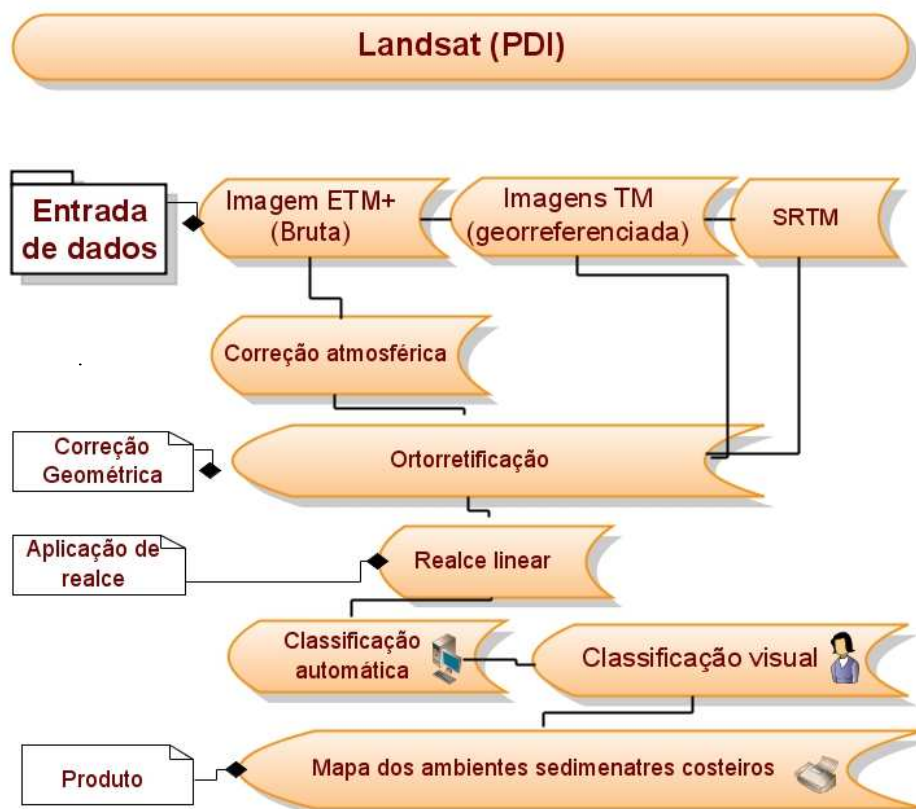


Figura 4.2 - fluxograma das etapas de PDI das imagens Landsat 7.

### 4.2.2.1 Correção atmosférica

A correção atmosférica foi feita em cada banda da cena da área de interesse, que teve a função de reduzir o efeito da atmosfera nas imagens, pois removeu valores adicionais de nível de cinza resultantes da interação da radiação com a atmosfera (consiste na subtração de unidades do pixel), com isso houve uma melhora na qualidade visual das imagens otimizando a classificação das imagens. O método utilizado foi Chavez (1982).

#### 4.2.2.2 Ortorretificação da imagem Landsat -7

Foram ortorretificadas as bandas 1,2,3,4,5,7 e 8 da imagem Landsat 7 ETM+ da passagem de 07 de agosto de 1999 através da ferramenta *GCP collection* do software *Ortoengine* do software PCI Geomatics 10, em que foi utilizada uma imagem já georreferenciada do Landsat - 5 TM de 28 de agosto de 1986 (Geocover) juntamente com o modelo digital de elevação MDE do SRTM.

A ortorretificação baseou-se na coleta de pontos via tela, a partir das imagens *geocover* do Landsat TM. O método de reamostragem foi o vizinho mais próximo, em que foram coletados 40 pontos de controle com um erro remissivo de RMS 0,90 para cada uma das cenas.

#### 4.2.2.4 Realce Linear

Para realçar a imagem foi aplicado um realce linear com o objetivo de melhorar a qualidade visual sob os critérios subjetivos do observador, podendo revelar informações novas. Esse realce foi obtido por uma transformação linear na edição do LUT presente na ferramenta *Enhance - Edit LUT* do software PCI Geomatics 10 ou na ferramenta LUT na função do *Algorithm Librarian* na barra de ferramentas *Focus* do software PCI v. 10, em que são alterados os histogramas representativos de cada banda e salvos posteriormente com sua nova apresentação.

#### 4.2.2.5 Composição Colorida (Landsat ETM+) e cálculo OIF (*Optimum Index factor*)

Para a composição dos triletes, com a finalidade do reconhecimento dos ambientes costeiros em imagens Landsat-7, foram utilizados 6 (1,2,3,4,5 e 7) das 8 bandas do sensor ETM+, com isso utilizou-se do cálculo do OIF para gerar as melhores composições coloridas para as imagens. Esta técnica foi desenvolvida por Chavez Jr. *et al* (1982) em que utiliza-se uma combinação de 20 tríades para

seleção da melhor composição para o mapa . O valor do OIF determina a as três bandas com maior variância e menor covariância entre si.

O cálculo do OIF é feito da seguinte forma:

$$\text{OIF} = \frac{\sum_{a=1}^3 \text{DP}_a}{\sum_{c=1}^3 \text{CC}_{(bc)}} \Rightarrow \boxed{\text{OIF} = \frac{\text{DP}(a)+\text{DP}(b)+\text{DP}(c)}{\text{Correlação}(a,c)+\text{Correlação}(a,b)+\text{Correlação}(b,c)}}$$

(1)

DP é o desvio padrão que avalia o grau de dispersão dos dados numéricos em torno de um valor médio para uma banda a, bc e o CC é o valor absoluto do coeficiente de correlação entre duas bandas qualquer para um conjunto de três.

O Calculo do CC é feito pela fórmula:

$$\boxed{\text{CC} = \frac{\text{Covariância}(a,b)}{\text{DP}_a \times \text{DP}_b}}$$

(2)

#### 4.2.2.6 Classificação automática

A classificação automática utilizada foi a não supervisionada, utilizando-se a ferramenta *Classification* via método ISODATA nas bandas 1,2,3,4,5 e 7, a técnica de classificação automática está classificada segundo os dados da tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4.2 - valor apresentado pela estatística *Kappa* indica o desempenho da classificação gerada, segundo Cohen *apud* Fonseca *et al.*, 2000.

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

#### 4.2.2.7 Interpretação visual dos produtos gerados

Através dos dados processados da imagem Landsat-7 e da classificação automática, foi possível a edição e reclassificação dos ambientes atribuídos a área de estudo, delimitando com melhor critério as classes identificadas anteriormente, não desconsiderando a classificação automática, que foi responsável por bons resultados para a área de estudo, com a ferramenta *Analyses - Post Classification - Agregation do Focus do software PCI*, foi possível concluir parte da edição sendo esta, vetorizada, e finalizada no pacote ArcMap do software ArcGis 9.2.

#### 4.2.3 Processamento das imagens RADARSAT-1 Wide-1

##### 4.2.3.1 Correção do padrão da antena (APC)

Foi utilizado o software Geomatic PCI V.10 com o programa APC, para correção do padrão de antena, para posterior ortorretificação. A correção baseia-se na função polinomial de mínimos quadrados para estimar o nível de cinza médio em cada posição da imagem original. Usando uma função polinomial pode ser definida uma correção de suavização, este processo leva em conta a preservação e variação que é resultante das feições presentes em cada coluna (PCI, 2005).

##### 4.2.3.2 Ortorretificação de imagens SAR

Para o RADARSAT-1 foi feito a ortorretificação baseada na imagem Landsat-5 TM de 28 de agosto de 1986 (Geocover) para extração das coordenadas geográficas e no modelo digital de elevação do SRTM, para extração da elevação. O processo de ortorretificação seguiu as seguintes etapas: (1) Leitura do CD utilizando a função CDSAR no Pacote do Algorithm Librarian no programa Focus do software PCI Geomatics 10; (2) Utilização do programa OrthoEngine do PCI para ortorretificação, criando inicialmente um projeto, selecionando o modelo matemático a ser utilizado (*Satelite Orbital Modeling -*

*Toutin/S Model*), posteriormente seleciona-se o sistema de projeção (*Universal transversa de mercator - UTM*); elipsoide e Datum WGS 84 com 30m de pixel; (3) Na função GCP/ TP collection do software PCI forama coletados 30 pontos de controle para a passagem dos meses de jan/fev de 2003 e 45 pontos para os meses de set/out de 2004 juntamente com dados de elevação do SRTM; (4) salvando os pontos coletados , passa-se para a etapa Ortho Generation aplicando o filtro enhanced-frost 3x3 para finalização da ortorretificação da imagem SAR. Após a ortorretificação a imagem foi reescalada de 16 para 8 bits através do programa SCALE do software PCI Geomatics 10, posteriormente foi aplicado um realce linear ao radar.

#### 4.2.3.3 Reescalamento

Para a correção radiométrica (reescalamento) foi realizada a função SCALE do PCI (*PCI Geomatics 10, 2005*), seguindo o seguinte procedimento:

As imagens RADARSAT-1 foram reescaladas de 16 bits para 8 bits, ou seja, de um intervalo de 0 à 255 níveis digitais. Este processamento foi feito para aumentar a capacidade computacional de processamento, já que o olho humano distingue apenas algumas dezenas de tons de cinza, não sendo necessária a utilização de imagens com 16 bits para análise visual.

#### 4.2.3.4 Semivariograma STC (*Sensivity time control*)

Redução do eco do mar, o processamento permite diminuir o grau dos ecos emitidos pelo pulso que bate nas ondas (ou marolas) e retorna ao radar informando na tela vários pontos salpicados (conhecido também como retorno do mar) (Reis, 2003).

O Classificador Textural por Semivariograma (STC) possui aplicação comprovada para imagens SAR, definido como um classificador supervisionado e contextual, que leva em consideração o pixel a classificar e seus vizinhos (Miranda et. al, 1998). Emprega o critério do paralelepípedo, que combina informações radiométricas e texturais, sendo alimentado pelo filtro de média adaptativo. A forma do semivariograma está relacionada ao grau de correlação entre os níveis

de cinza. Para o classificador não-supervisionado foi utilizado o método *Isodata* que é um algoritmo de classificação que identifica padrões típicos nos níveis de cinza. Esses padrões são classificados efetuando-se visitas de reconhecimento a alguns exemplos escolhidos para determinar sua interpretação. Para o método de classificação não supervisionada utilizou-se conjuntamente o filtro frost de matriz 3x3 e 5x5 para suavizar os efeitos do ruído de espalhamento (speckle), objetivando estabelecer a melhor classificação.

O programa utilizado foi o STC (software *free* encontrado no site [www.multsoftware.com.br/flash/download.swf](http://www.multsoftware.com.br/flash/download.swf)) para posterior classificação automática no software PCI Geomatics 10.

#### 4.2.3.5 Classificação automática para dados STC do Radarsat -1

O sistema de classificação não supervisionada segue o mesmo passo que a classificação feita na imagem Landsat ETM+, os nove dados fornecidos pelo processamento STC são colocados na ferramenta ISDODATA do pacote *Classification do software PCI Geomatics V.10* gerando uma imagem classificada do Radarsat/STC, esse dado então passa por outra ferramenta do *Geomatica Focus* chamada *Post classification Analysis*, em que a imagem classificada é editada por agregação de classes comuns pela ferramenta *Aggregation*, para posterior cálculo da acurácia da imagem (*índice Kappa*) em relação a imagem classificada e a verdade terreno(sem classificação). Foram coletados 200 pontos aleatórios com a ferramenta *Accuracy assesement*, sendo possível calcular, por conseguinte a matriz de confusão (soma dos valores da diagonal principal da matriz - Jensen, 1996), o índice geral de exatidão, e o erro de comissão e omissão.

#### 4.2.3.6 Calibração Radiométrica (Retrosespalhamento - Backscatter)

Para gerar as imagens  $\sigma^0$  referente às imagens RADARSAT-1 Wide 1 (órbita descendente) usadas neste trabalho, foi usado o programa PCI (*PCI Geomatics*, 2005). A primeira etapa foi à leitura dos dados de efemérides do satélite RADARSAT-1, que estão disponíveis no cabeçalho (*header*) das imagens. Em

seguida, usa-se a função SARINCD para gerar uma tabela com os ângulos de incidência para cada coluna da imagem (direção em *range*), que será usada pelo programa SRSIGM durante a conversão para imagem  $\sigma^0$ . Por fim, a função SRSIGM gerou um canal de saída com uma imagem calibrada radiométricamente, imagem coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ), que é uma imagem em 32 bits (real). Em seguida, as imagens calibradas radiométricamente, foram ortoretificadas, (não foi usado filtro adaptativo para redução de *Speckle*, uma vez que essa filtragem poderia degradar a informação radiométrica calibrada), foi aplicada durante o processo de ortoretificação uma reamostragem por vizinho mais próximo, que minimiza a perda de informação e mantém a integridade radiométrica da imagem.

Abaixo figura 4.3 do fluxograma representativo das etapas de processamento para o RADARSAT-1

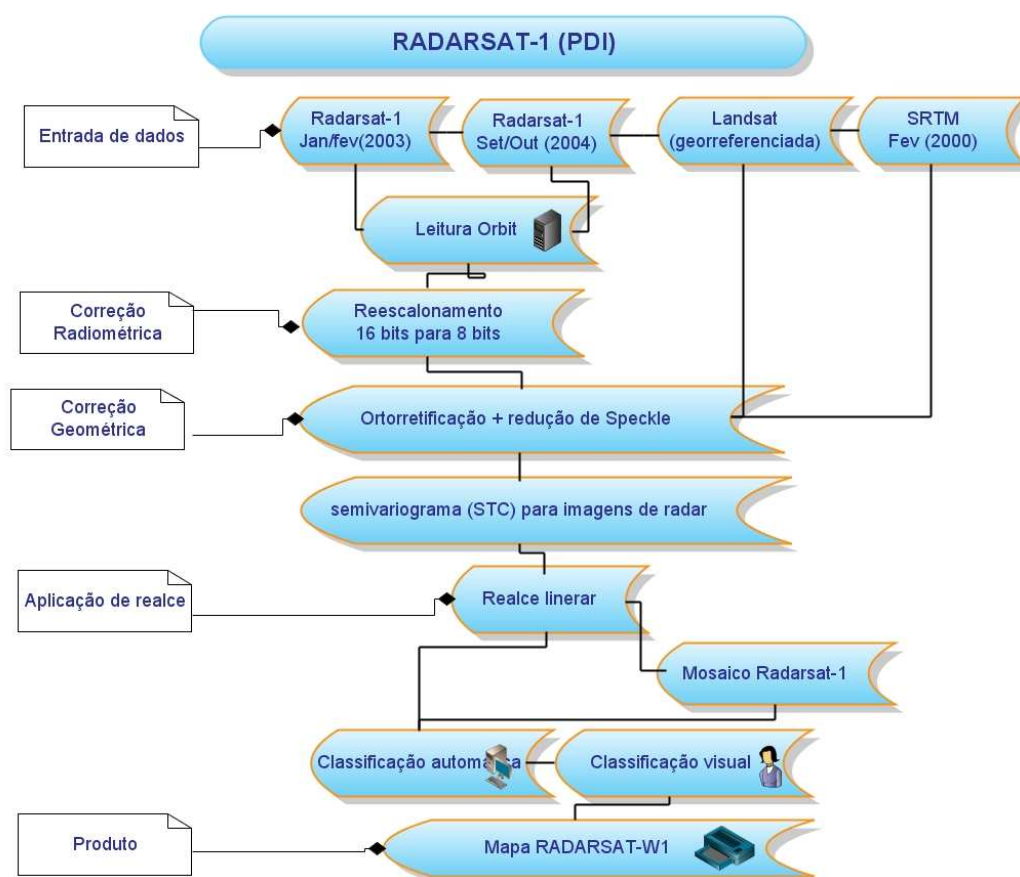


Figura 4.3 - Fluxograma das principais etapas do processamento de imagens SAR efetuadas nesta dissertação

#### 4.2.4 Fusão de imagens multisensores Landsat-7, RADARSAT-1 e SRTM

A fusão de dados multisensores foi realizada através da técnica de transformação IHS.

O sinergismo tem sido usado como uma ferramenta bastante prática para a interpretação de imagens de multisensores, pois este integra informações específicas de cada sensor para um único produto, fornecendo dados que estes isoladamente não teriam sido percebidos isoladamente (Paradella *et al*, 2001). Para esta dissertação, a fusão integrou bandas (30 m de resolução) do LANDSAT-7 com imagens RADARSAT-1 e SRTM, possibilitando obter uma imagem híbrida com melhor interpretação visual.

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 ópticas contribuem a informação espectral (cromaticidade) ligada à interação da vegetação com o relevo (Paradella *et. al*, 2001).

Hoje, 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, Rodrigues *et al*, 2006), comprovando que o método tem grande confiabilidade e aplicação.

##### 4.2.4.1 Transformação RGB - IHS

Na literatura (Harris *et al.* 1994 e Wald, 1998) foi possível identificar vários métodos de fusão como: **Combinações de banda**, que é a combinação de três bandas, onde cada banda é colocada em um canal de cor do sistema RGB (“red, green, blue”), produzindo uma imagem colorida; **Transformação IHS (Intensity-Hue-Saturation)**, que é a transformação dos componentes vermelho, verde, azul (RGB) nos componentes: intensidade, matiz e saturação (IHS), produziram

composições coloridas com reduzida correlação interbanda, podendo combinar imagens de diferentes sensores.

O processo de fusão por transformação RGB - IHS foi aplicada nesta dissertação para combinar imagens de diferentes sensores (ETM+, SRTM e RADARSAT-1) e com diferentes resoluções espaciais (30m-ETM+, 30m-SAR, 90m-SRTM), gerando uma imagem colorida de resolução espectral das três bandas ETM e resolução espacial do segundo sensor (SRTM, SAR). Seguindo o fluxograma da Figura 4.4.

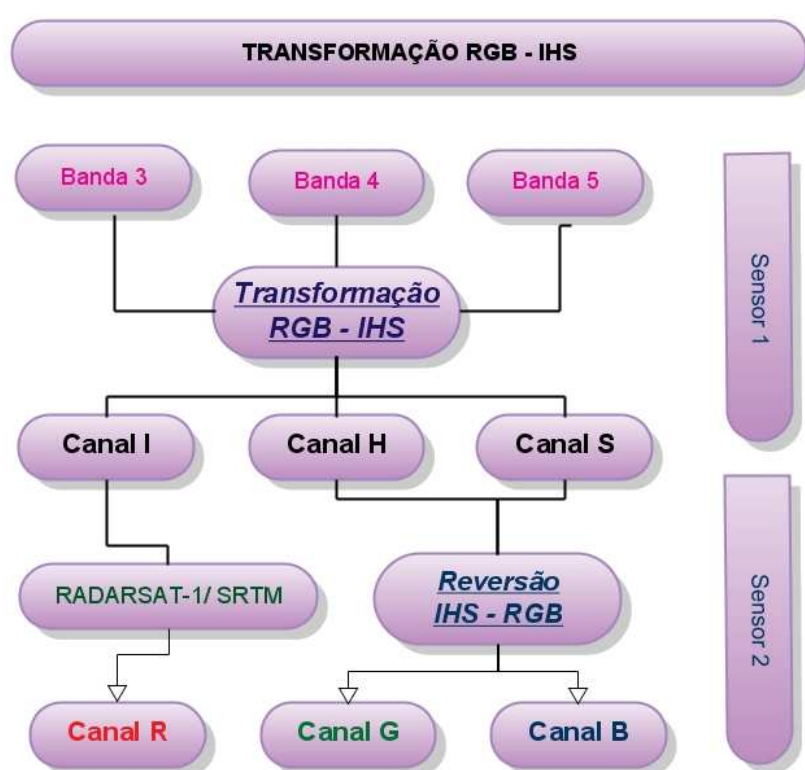


Figura 4.4 - Fluxograma do processamento por transformação RGB - IHS das imagens

#### 4.2.4.2 Análise por Componente Principal (ACP) ou PCA (*Principal Analysis*)

A aplicação da análise por componente principal (ACP) tem como objetivo a redução da redundância espectral entre os dados das imagens multiespectrais, gerando novas imagens com informações não-correlacionadas.

A primeira componente apresenta maior variação de brilho e maior número de informações, que irão diminuindo, sucessivamente de tal forma que as três primeiras componentes reunirão aproximadamente 97% da variância total.

Existem dois métodos de geração de principais componentes: Principal Componente seletiva e Principal Componente não seletiva

SPCA conhecida como *Selective Principal Component analysis*, que usa um subconjunto de bandas ETM+ altamente correlacionadas na ACP. Essas bandas são agrupadas seletivamente, Paradella et al (1997 e 2001), Souza Filho (2000) e Chaves (2002). A SPCA usa a primeira componente das bandas 1, 2 e 3, e a primeira componente das bandas 5 e 7 (Figura 4.5), em que tendem a concentrar a grande maioria da variância deste conjunto de bandas. A composição colorida é formada por estas duas principais componentes mais a banda 4, tomando assim toda a faixa espectral das bandas multiespectrais em apenas um conjunto de três canais.

A ferramenta PCA do pacote *Algorithm Librarian* do software *PCI Geomatics 10* além de fazer o processamento gerou um relatório que consta todos os valores estatísticos de autovalores, desvio padrão e variância das principais componentes do visível (1, 2 e 3) e Infravermelhos (5 e 7).

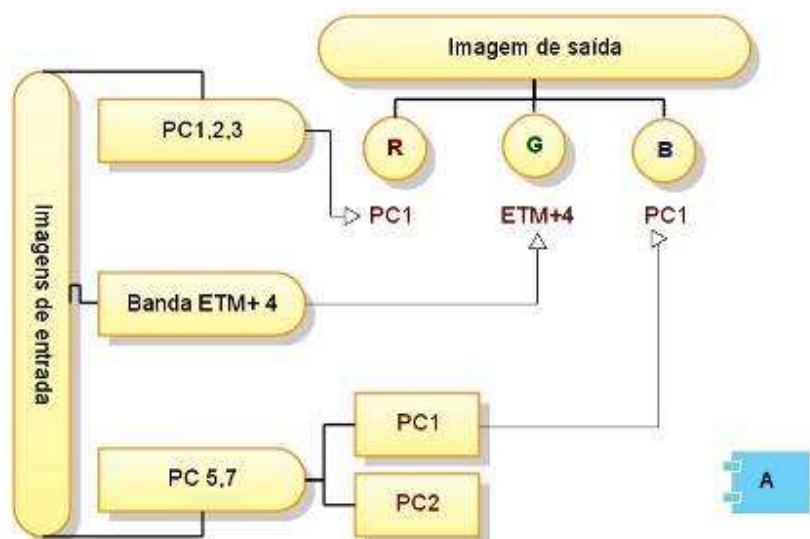


Figura 4.5- Fluxograma representativo das PC 1

O PCA não seletivo produziu apenas um conjunto de seis principais componentes resultantes das seis bandas ETM+, em que a composição colorida é composta pela primeira, segunda e terceira componente, as quais tenderam a reunir quase 100% da variância das seis bandas originais. Abaixo, Figura 4.6 representava do PCA.

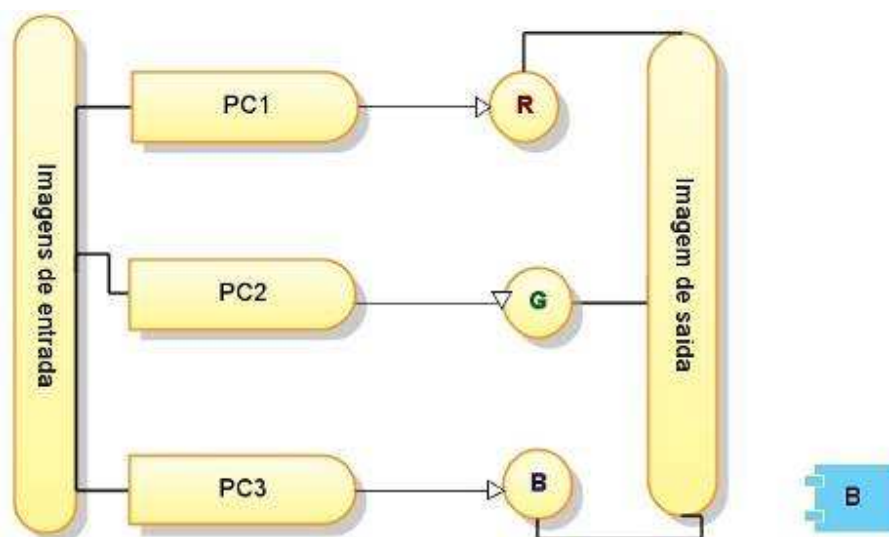


Figura 4.6 - Fluxograma representativo da PCA não selecionada

#### 4.2.4.3 Realce por Decorrelação

Técnica baseada em uma rotação espectral, gerando imagens não correlacionadas, no entanto estas imagens possuem cores semelhantes às das imagens originais e com menos perdas das assinaturas espectrais, facilitando assim a interpretação (Gillespie et al., 1986; Crosta, 1992; Harris et al., 1994).

Segundo Crosta (1992), o realce por decorrelação visa principalmente o realce da distribuição de cores, através da eliminação da correlação entre bandas. Por se tratar de uma técnica de realce de cores ela só faz sentido ao ser aplicado a uma composição de bandas. Abaixo mapa com realce por decorrelação na composição 4R 5G 3B.

#### 4.2.5 Trabalho de Campo

O trabalho de campo foi realizado no período de 19 a 23 de novembro de 2007, com a finalidade de reconhecimento e mapeamento da área de estudo tendo em vista a validação dos dados interpretados em laboratório.

Abaixo equipamentos e métodos utilizados no campo:

→ Transporte para acesso à área de estudo:

O transporte ocorreu utilizando - se carro de pequeno porte para o reconhecimento em terra dos ambientes identificados no mapa dos ambientes costeiros produzidos em laboratório. Para acesso aos furos, ilhas e pontais, foi necessária a utilização de embarcações de pequeno porte para acesso e transporte do DGPS (Figura 4.7).



Figura 4.7- (A) barco de pequeno porte para acesso as áreas de ilhas e pontais (B) o transporte terrestre foi através de carro.

Equipamentos:

→ DGPS (*Diferencial Global Positioning System*)

O DGPS de acurácia centimétrica – ASTHECH *procion products*, modelo Z- Xtreme foi usado para localização de feições costeiras, sejam naturais ou construídas pelo homem, a fim de se validar as interpretações realizadas nas

imagens. Com a finalidade de se organizar um banco de dados de pontos de controle de alta resolução espacial, GCPs foram coletados em marcadores geodésicos do IBGE, Marinha e CPRM encontrados na área de estudo (Figura 4.8).

Os dados foram processados no Laboratório de análise de imagens do trópico úmidos (LAIT), sendo anexados nos dados de imagens e mapas produzidos.



Figura 4.8 - DGPS em uso na (A) e (B) Praça da cidade de Carutapera –MA;(C) Porto do Gurupí , DGPS em cima do marco geodésico na cidade de Boa Vista do Gurupi.

→GPS (Global Positioning System ) e ALTÍMETRO

O GPS GARMIN Vista modelo e-trex foi utilizado também para a coleta de pontos de controle e validação dos ambientes costeiros reconhecidos no mapa base produzido, além de usar a ferramenta de rastreamento para controle de rota e trilhas percorridas na área de estudo como no mapa da Figura 4.9. O programa para visualização dos dados do GPS foi o TrackMaker.

O Altímetro Suunto Digital Escape modelo 203, foi utilizado para controle das altitudes na área de estudo, apresentando um erro médio de 5m.

A Figura 4.10 apresenta parte dos equipamento utilizados no estudo.

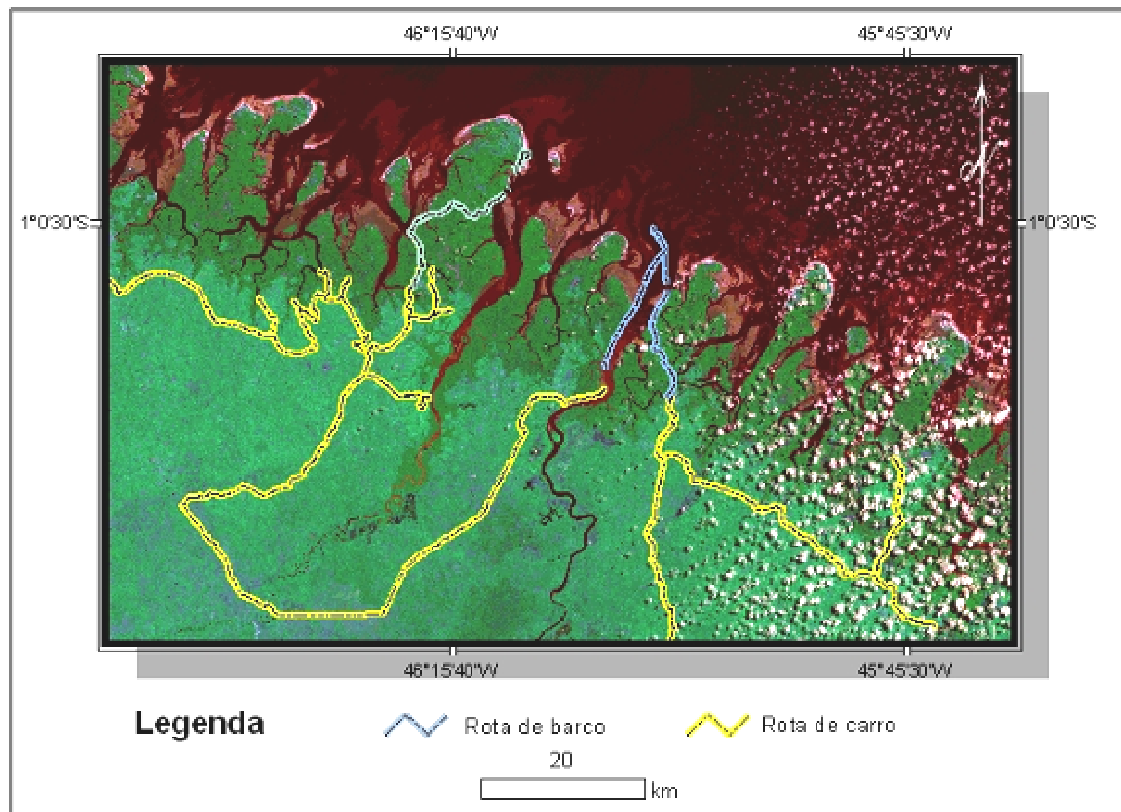


Figura 4.9 - Carta-imagem da área de estudo na composição 3R4G5B do Landsat ETM+, com as rotas de barco e carro realizadas.



Figura 4.10 - GPS e altímetro em uso (A) GPS etrex Vista e (B) Altímetro Suunto Digital Escape 203

### → Push Core

Para a coleta de amostras relacionadas aos ambientes da área em estudo foi utilizado o método *push core*. Foram utilizados tubos de PVC com altura de 20 a 30 cm e diâmetro de 5cm (Figura 4.11). Essa coleta foi realizada para se estudar a granulometria e textura dos sedimentos em alguns dos ambientes costeiros mapeados.



Figura 4.11 - Coleta de amostra no ambiente – Foto: Pântano salino

#### 4.2.6 Análise Granulométrica

As amostras foram processadas passando por 4 etapas:

- (1) lavagem das amostras (mínimo 3 vezes) para retirada do sal e de impurezas desnecessárias para a análise granulométrica e secagem em temperatura de 60° C em estufas;
- (2) quarteamento e pesagem de 100g da amostra já seca para posterior peneiramento;
- (3) peneiramento das frações arenosas em peneiras com intervalo de  $1/2 \phi$  (>2,000; 1,410; 0,710; 1,000; 0,500; 0,350; 0,250; 0,177; 0,125; 0,088 e 0,062 mm) em um agitador automático por 10 minutos e reostato de 6 (trifugação) e uma média de 5 minutos manualmente, obtendo-se diretamente as percentagens relativas de abundância de cada classe;

(4) os sedimentos lamosos amostrados foram separados da fração arenosa através da peneiração a úmido, em uma peneira de 0,062 mm.

Os parâmetros estatísticos granulométricos (média, mediana, selecionamento, assimetria e curtose) foram definidos segundo a classificação de Folk & Ward (1957) e os dados relativos aos pesos percentuais das classes granulométricas foram previamente armazenados em planilha Excel e posteriormente processados no software SysGran® 3.0, desenvolvido por Camargo (1999) na Fundação Universidade do Rio Grande (FURG).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os principais produtos obtidos neste trabalho utilizando dados de sensores remotos e técnicas de processamento digital para mapeamento dos ambientes costeiros da área em estudo.

### 5.1 AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS.

#### 5.1.1 SRTM

O modelo digital de elevação representada pelos dados do SRTM, forneceram dados topográficos que variam de 0 (zero) a 179m, estando os valores de elevação da planície costeira influenciados pela altura das copas das árvores presente na área estudada. O modelo digital de elevação, o relevo sombreado, a palheta de cores e a integração dos dois últimos são apresentados na Figura 5.1

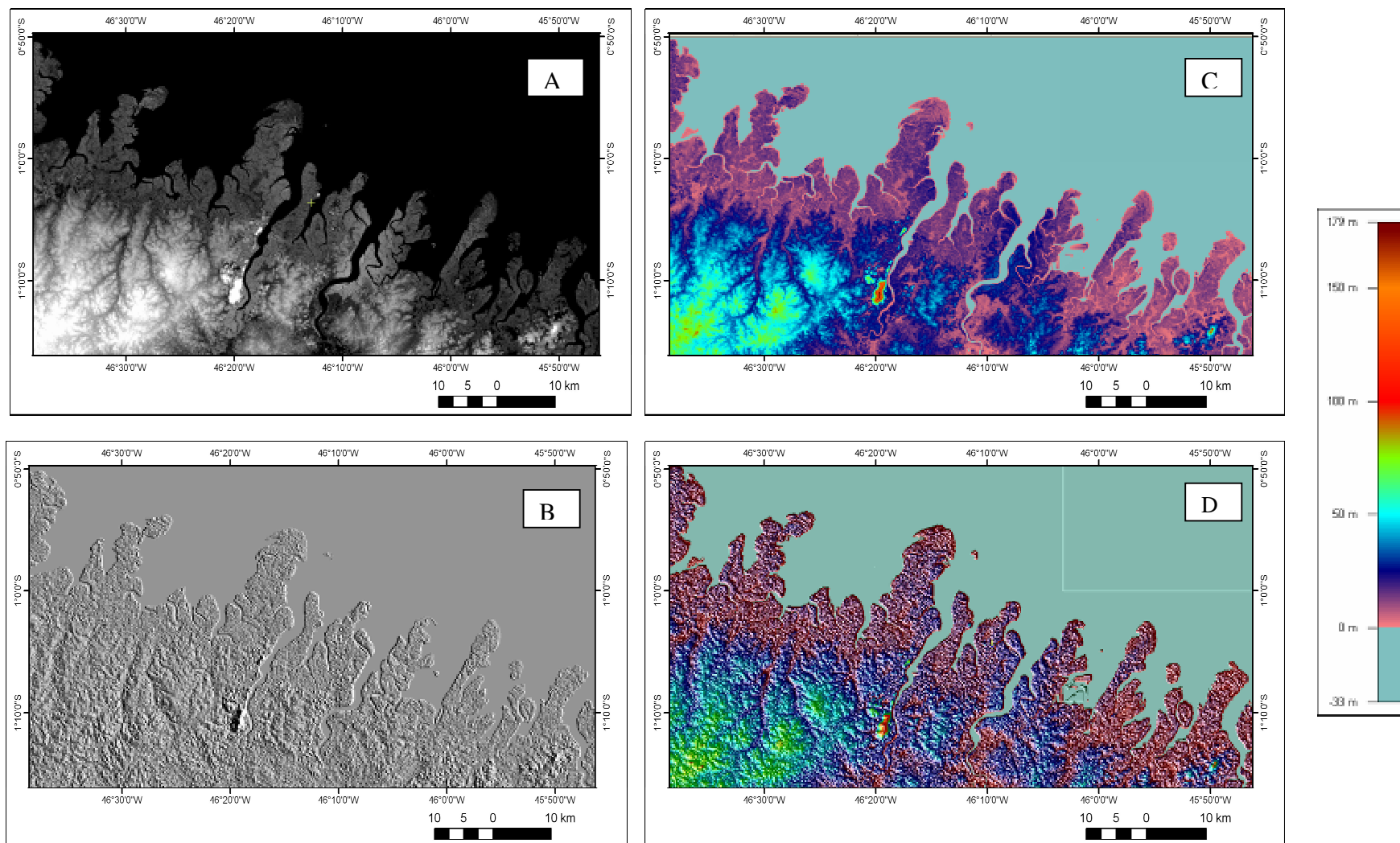


Figura 5.1 - (A) Modelo digital de elevação do SRTM; (B) Relevo sombreado; (C) Paleta de cores com tons indicativos da topografia da área em estudo e (D) Integração da paleta de cores com o relevo sombreado.

### 5.1.2 Imagens Landsat-7 ETM+

A correção atmosférica aplicada nas imagens do Landsat 7, pelo método Chavez,1986, aumentou o contraste das cenas, ocasionado pelo resposta do espalhamento atmosférico, melhorando a qualidade visual e radiométrica das imagens.

O cálculo de desvio padrão das bandas (1, 2, 3, 4, 5 e 7), assim como das matrizes de covariância e de correlação entre bandas, permitiu através do OIF(Optimum Index Factor) escolher a melhor composição para uma composição colorida. Os maiores desvios padrões encontrados foram nas bandas 4,5 e 3. Os dados estatísticos das bandas usadas são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Estatística das bandas (1,2,3,4,5 e 7) espectrais da Imagem Landsat-7

<b>Bandas</b>	<b>Media</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>1</b>	76,0651	21,2262
<b>2</b>	59,8785	20,7827
<b>3</b>	47,3095	25,8580
<b>4</b>	87,1316	52,2956
<b>5</b>	49,9432	32,8786
<b>7</b>	26,1886	18,9413

A matriz de covariância (Tabela 5.2) representa em sua diagonal a variância de cada banda e os valores vizinhos na tabela. Pode-se perceber a maior variância na banda 4 (apresente bom contraste entre solos e corpos d'água, além da alta resposta para a vegetação),5 (bom contraste para observar diferenças do teor de umidade na vegetação) e 3 (bom contraste para visualização de solo vegetação , além de perceber sedimentos em suspensão em corpos d' água) que resultam em uma maior variação de níveis de cinza, acusando maior individualização entre os alvos presentes na cena.

Tabela 5.2 - Matriz de covariância entre as bandas ETM+

<b>Bandas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>450,55</b>					
<b>2</b>	429,12	<b>431,92</b>				
<b>3</b>	511,88	523,87	<b>668,63</b>			
<b>4</b>	-205,51	-73,19	-2,71	<b>2734,83</b>		
<b>5</b>	111,76	187,82	289,69	1484,02	<b>1081,00</b>	
<b>7</b>	221,69	243,93	322,19	583,09	550,17	<b>358,77</b>

Os maiores valores de correlação foram percebidos nas bandas referentes as mesmas bandas citadas anteriormente, 4, 5 e 3 (Tabela 5.3), sendo que esta repetição de informação é característica de imagens multiespectrais com dados correlacionados entre si (Almeida Filho, 2002). Com relação aos resultados obtidos para a matriz de correlação para as bandas 1,2,3,4,5 e 7 obteve índice maior que 1, devido a possível sobreposição entre as faixas espectrais de imageamento.

Tabela 5.3 - Matriz de correlação entre as bandas ETM+

<b>Bandas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	1,0000					
<b>2</b>	0,9935	1,0000				
<b>3</b>	0,7656	0,7835	1,0000			
<b>4</b>	-0,0751	-0,0268	-0,0010	1,0000		
<b>5</b>	0,1034	0,1737	0,2680	1,3728	1,0000	
<b>7</b>	0,6179	0,6799	0,8980	1,6252	1,5335	1,0000

As menores correlações foram percebidas na banda 4, devido esta apresentar uma alta resposta para a vegetação, dando a esta banda maior variância entre as bandas analisadas.

O cálculo OIF foi responsável pela seleção da melhor composição para uma composição colorida. Foram calculadas vinte combinações (Tabela 5.4), representando quais das bandas melhor se destacaram por apresentar maior valor de OIF; entretanto, algumas não apresentaram resposta visual satisfatória, como é o caso da composição 4R 3G 1B. Em função disto, foram selecionadas as bandas 4,5,3 como a melhor combinação (visual).

Percebe-se que com as composições relacionadas ao ranking OIF (Tabela 5.4B e Figura 5.2), há uma presença de pelo menos duas bandas no visível e uma no infravermelho próximo, isto é devido a área em estudo apresentar, quase 50% terra firme e 50% zona costeira e massa d'água (alto teor de materiais em suspensão), em que apresentam alta resposta espectrais nas bandas do visível, e uma grande quantidade de cobertura vegetal, sendo representado pelo espectro relacionado ao infravermelho próximo, contrario da composição clássica (uma banda no visível , uma no infravermelho próximo e uma no infravermelho médio) presente no ranking (visual), onde as feições estão melhor individualizadas na Figura 5.3.

Tabela 5.4 - cálculo do OIF das combinações possíveis e ranking dos três primeiros OIF e visual

A

Número	Composição	OIF
1	123	26,6923
2	124	<b>105,7690</b>
3	125	58,9365
4	127	26,6004
5	135	70,3324
6	237	27,7722
7	147	42,6490
8	<b>541</b>	<b>75,9429</b>
9	453	67,7104
10	431	<b>144,1494</b>
11	257	38,5483
12	547	22,9758
13	321	26,6923
14	425	69,7175
15	417	42,6490
16	247	40,3883
17	235	64,9021
18	473	38,4949
19	423	<b>130,9136</b>
20	357	28,7750

B

Ranking OIF	Composição	OIF
1	431	144,1494
2	423	130,9136
3	124	105,7690
4	541	75,9429

Ranking (visual)	Composição	OIF
1	453	67,7104
2	257	38,5483
3	123	26,6923

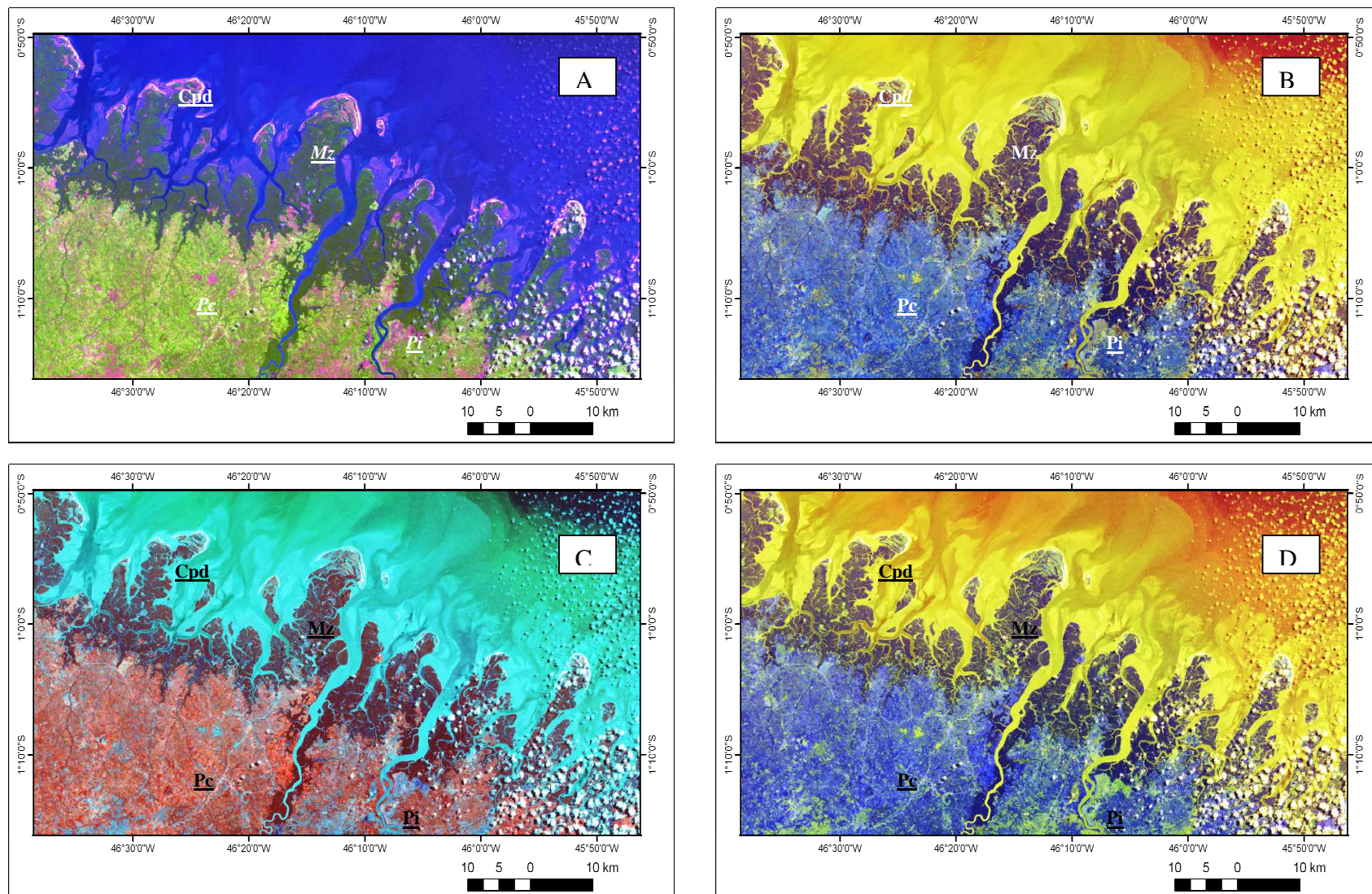
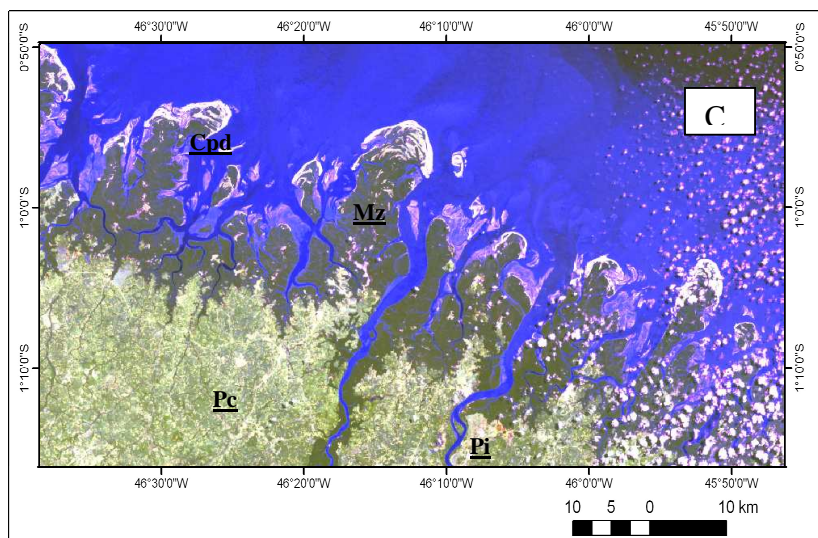
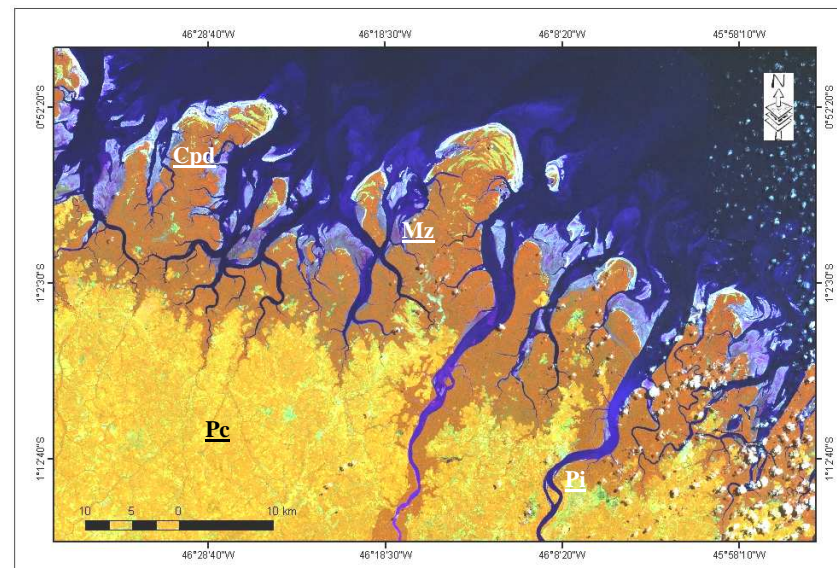
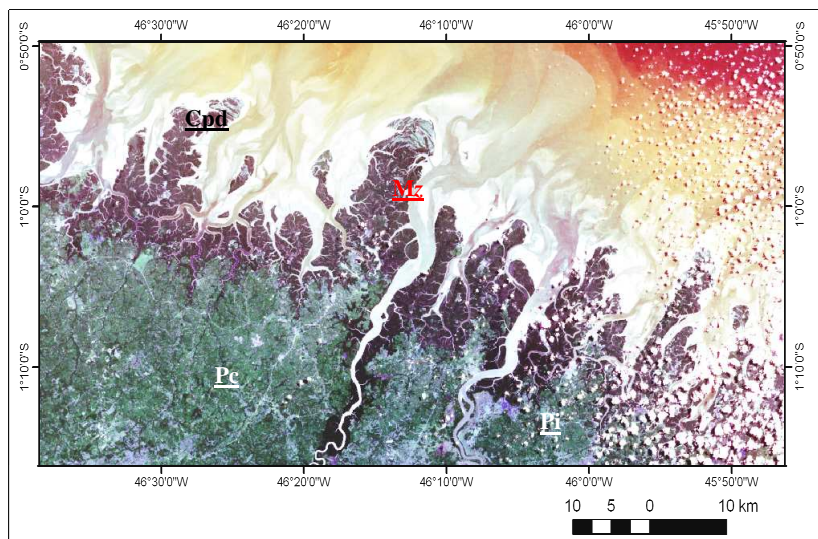


Figura 5.2 - Imagens Landsat-7(Ranking OIF): (A) Composição 4R 3G 1B; (B) 1R 2G 4B; (C) 4R 2G 3B e (D) 5R 4G 1B Legenda: Planalto costeiro (Pc); Manguezal (Mz); Planície de inundação (Pi) e Cordão de dunas frontais (Cpd).



Legenda: Planalto costeiro (Pc); Manguezal (Mz);  
Planície de inundação (Pi) e Cordão de dunas frontais (Cpd)

Figura 5.3 - Imagens Landsat-7: (A) 1R 2G 3B; (B) 4R 5G 3B e (C) 7R 2G 1B.

Para a integração do Landsat-7 com o RADARSAT-1, foi determinada a principal componente seletiva usando a variação da técnica de PCA de Chavez Jr. & Kwarteng (1994) com uma nova abordagem de Souza Filho & Paradella (2005) para feições geomorfológicas na zona costeira, que utiliza-se de subconjuntos das bandas (TM, ETM+), altamente correlacionadas, para eliminar a redundância de informação contidas nas bandas refletidas, realçando feições espectrais sutis (exclusivas de cada banda espectral).

Os subconjuntos de bandas usados como dados de entrada na ACP foram, ETM+ 1,2,3 (grupo 1) e ETM 5,7 (grupo 2), usando o módulo PCA (*Principal Component Analysis*) disponível no X-PACE (*PCI Geomatics, 2005*), gerando assim, 1 PC (1,2,3) e 1 PC (5,7), que detêm a máxima variância do visível e infravermelho médio. Em seguida, as primeiras componentes principais do grupo 1 e grupo 2 foram associadas com a banda 4 na transformação do espaço de cores RGB-IHS, buscando modelar um amplo espectro de respostas dos alvos na superfície terrestre (Paradella *et al.*, 2001).

As três primeiras componentes principais retêm 97% da variância, via transformação IHS, esta composição (PC1- 1,2,3 R; banda 4ETM+G PC1-5,7 B) encerra a maioria das informações contidas nas seis bandas originais (Figura 5.4)

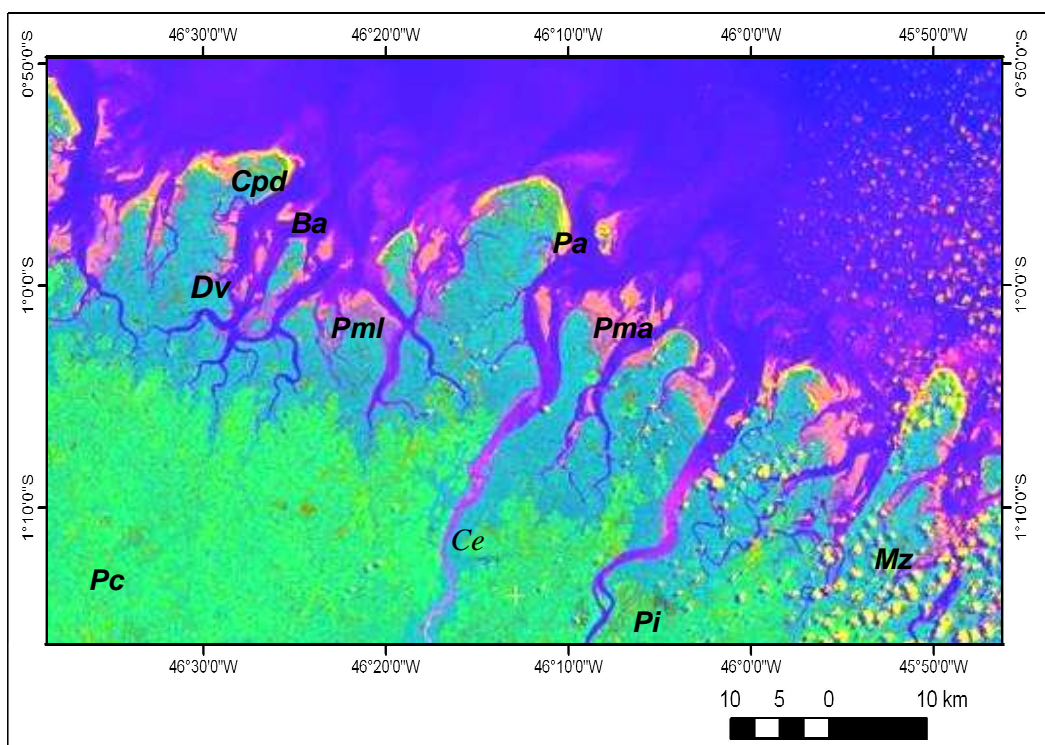


Figura 5.4 - Imagem PC seletivo com o composição das PC's: PC1(1,2,3) no canal R, banda ETM+ 4 no canal G e PC1(5,7) no canal B. Legenda: Pc-planalto costeiro; Mz-manguezal;PML- planície de maré lamosa; Pma- planície de maré arenosa;Pad- Pântano de água doce;P.s- pântano salino;Pi- Planície de inundação; Ba-Barras arenosas; Cpd-cordão de dunas frontais; Pa- praias de macro-maré; Dv- Delta de maré vazante e Ce- Canal estuarino.

O resultado da composição das PC1, PC2 e PC3 (Figura 5.5) fornecem boas informações sobre os ambientes costeiros, mas não tão satisfatórios como as da PCA seletiva.

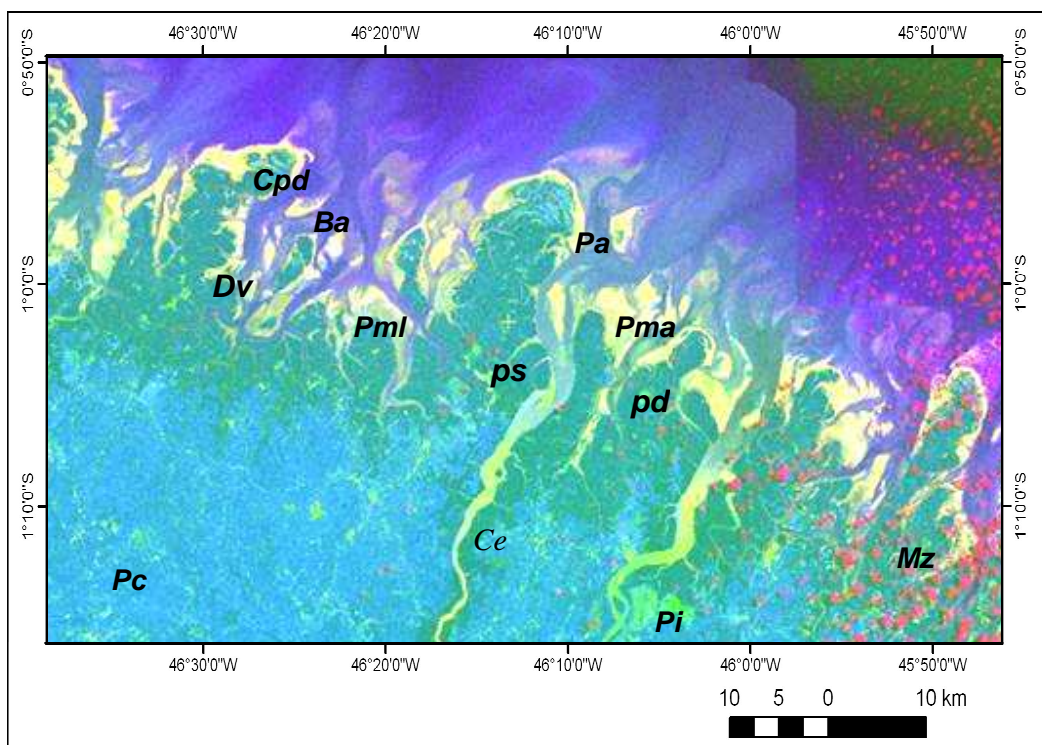


Figura 5.5 - Composição das pc's PC1, PC2 e PC3 da imagem Landsat 7 da área de estudo.

Legenda: Pc-planalto costeiro;Pd- Paleodunas; Mz- Manguezal;PML- planície de maré lamosa; Pma- planície de maré arenosa;Pad- Pântano de água doce;Ps- pântano salino;Pi- Planície de inundação; Lg- lagos; Ba- Barras arenosas; Cpd- cordão de dunas frontais; Pa- praias de macro-maré; Dv- Delta de maré vazante e Ce- canais estuarinos.

### 5.1.3 Imagens RADARSAT-1 W1

As imagens RADARSAT-1 foram visualmente interpretadas, usando parâmetros de foto interpretação, como: textura, padrão, forma, possibilitando mapear os ambientes costeiros. Feições geomorfológicas com maior destaque na área, como: planalto costeiro e planície costeira foram bem individualizados nas imagens representativas do mês de outubro (período seco).

Percebe-se nas figuras 5.6A e 5.6B as imagens processadas das passagens de 17/10/2004 e 26/01/2003 mostrando um esboço de linhas de fluxo, para inferir a influencia de correntes de maré nas regiões fluvio estuarinas e a morfologia e barras emersas, além da visualização do contraste Manguezal terra firme evidenciado pelas tonalidades de cinza.

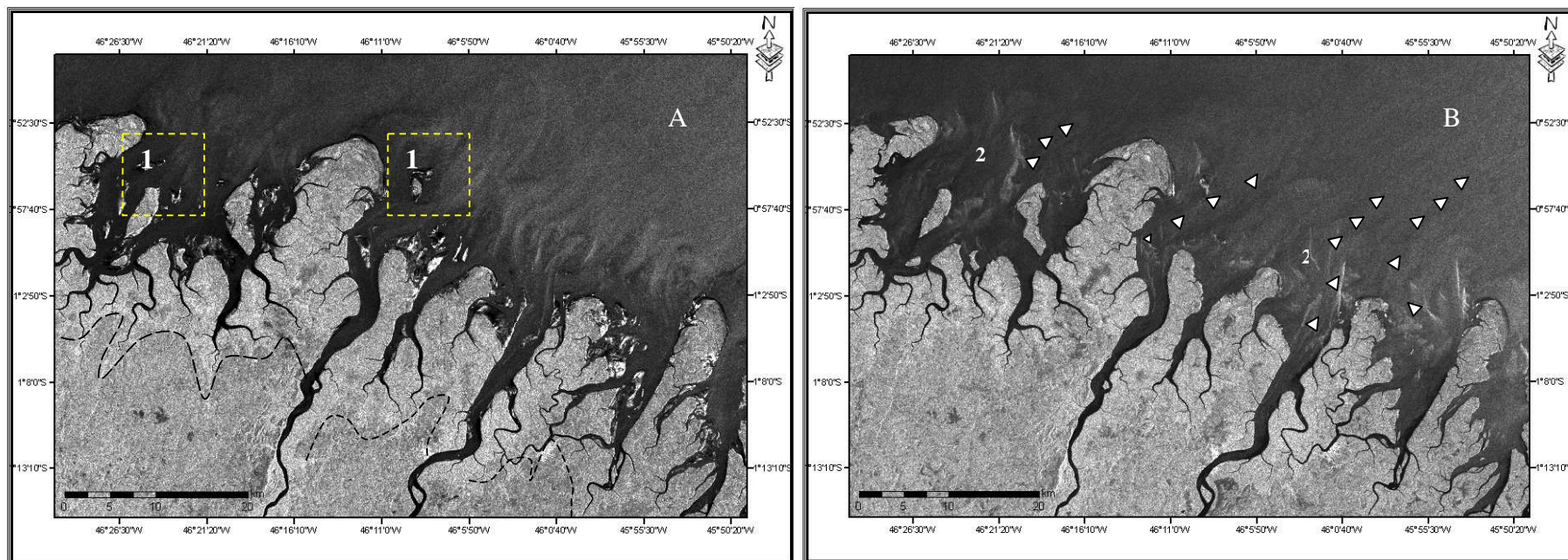


Figura 5.6- Imagens RADARSAT-1 Wide-1 órbita descendente. (A) Imagem adquirida em 26 de janeiro de 2003, condição de maré vazante, mostrando as principais direções de fluxo dos estuários, e em (1) a morfologia das barras arenosas submersas dada pela rugosidade superficial da água. (B) imagem adquirida em 17 de outubro de 2003, condições de maré enchente mostrando em (2) as Barras arenosas emersas.

#### 5.1.4 Fusão SRTM/ ETM+

O produto híbrido SRTM / ótico (Figura 5.7 e 5.8), 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.

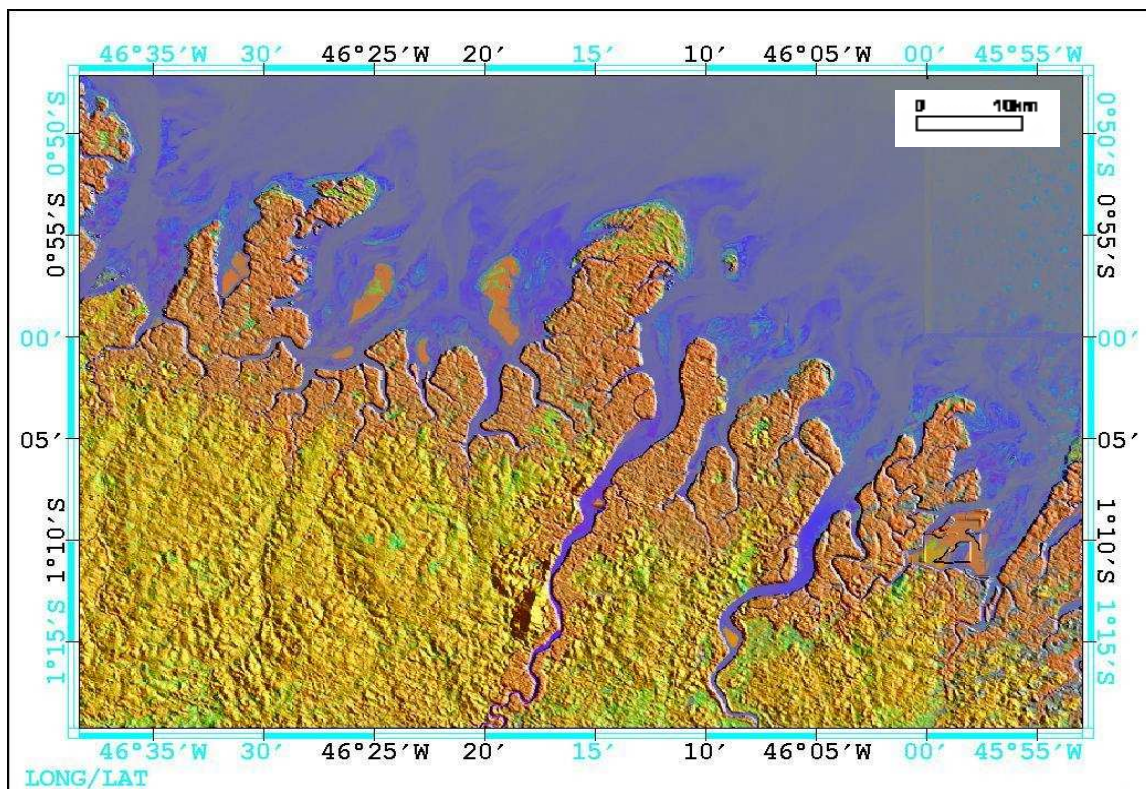


Figura 5.7 - integração de dados de DEM com informações físico-químicas do Landsat -7, composição 4R 5G 3B

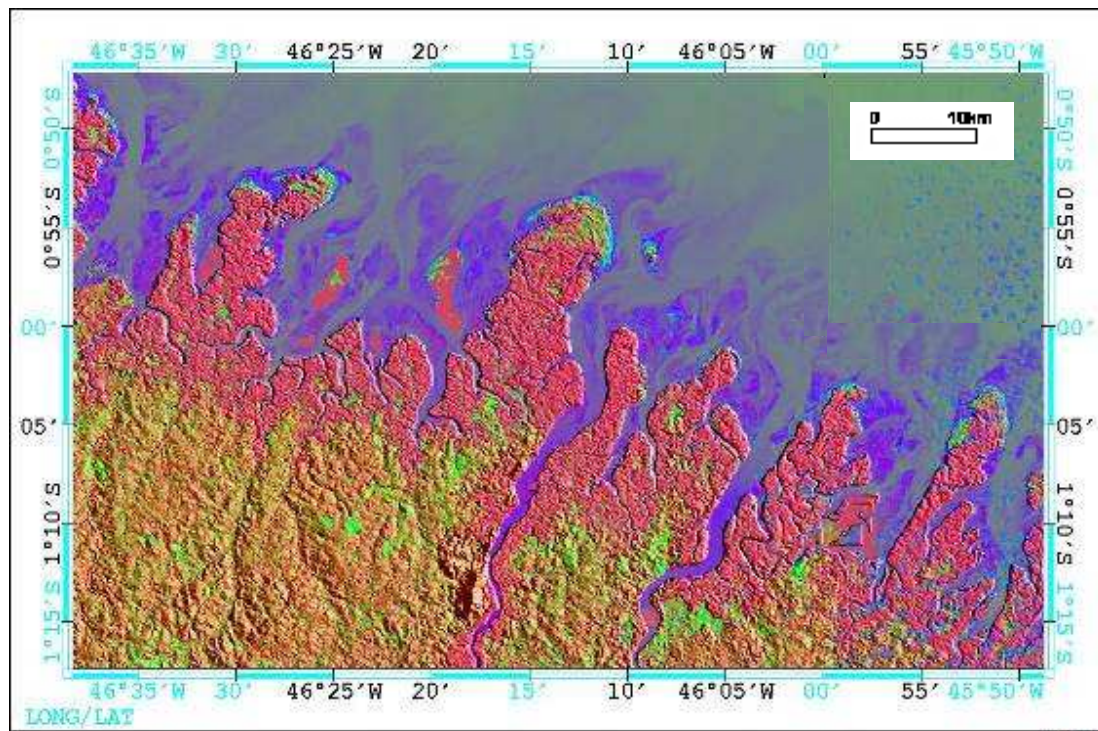


Figura 5.8 - integração de dados do SRTM com imagens Landsat -7 composição 4R 5G 3B com realce por decorrelação.

### 5.1.5 Fusão RADARSAT-1/ETM+

O RADARSAT-1 foi integrado a composição 4R 5G 3B da imagem Landsat-7 utilizando a transformação IHS, em que a I (intensidade) foi substituída pela imagem RADARSAT-1 e o H (matiz) e o S (saturação) substituídos pela matiz e saturação das bandas 4,5 e 3 sugeridas pelo valor do OIF calculado .

O resultado para esta fusão (sinergismo) não foi um dos melhores pra visualização dos ambientes a serem reconhecidos devido a fraca resposta visual.

### 5.1.6 Fusão SAR/ETM+ pela técnica SAR/SPC

O produto da fusão (Figura 5.9) contribuiu para uma boa resposta em relação ao reconhecimento de alguns dos ambientes costeiros estudados, como é o caso do manguezal que se mostra bastante evidente com esta integração mais do que os outros processamentos, além dos Pântanos salinos/campos salinos,

planície de maré, campo de paleodunas, planície de inundação, planalto costeiro e praias de macromaré.

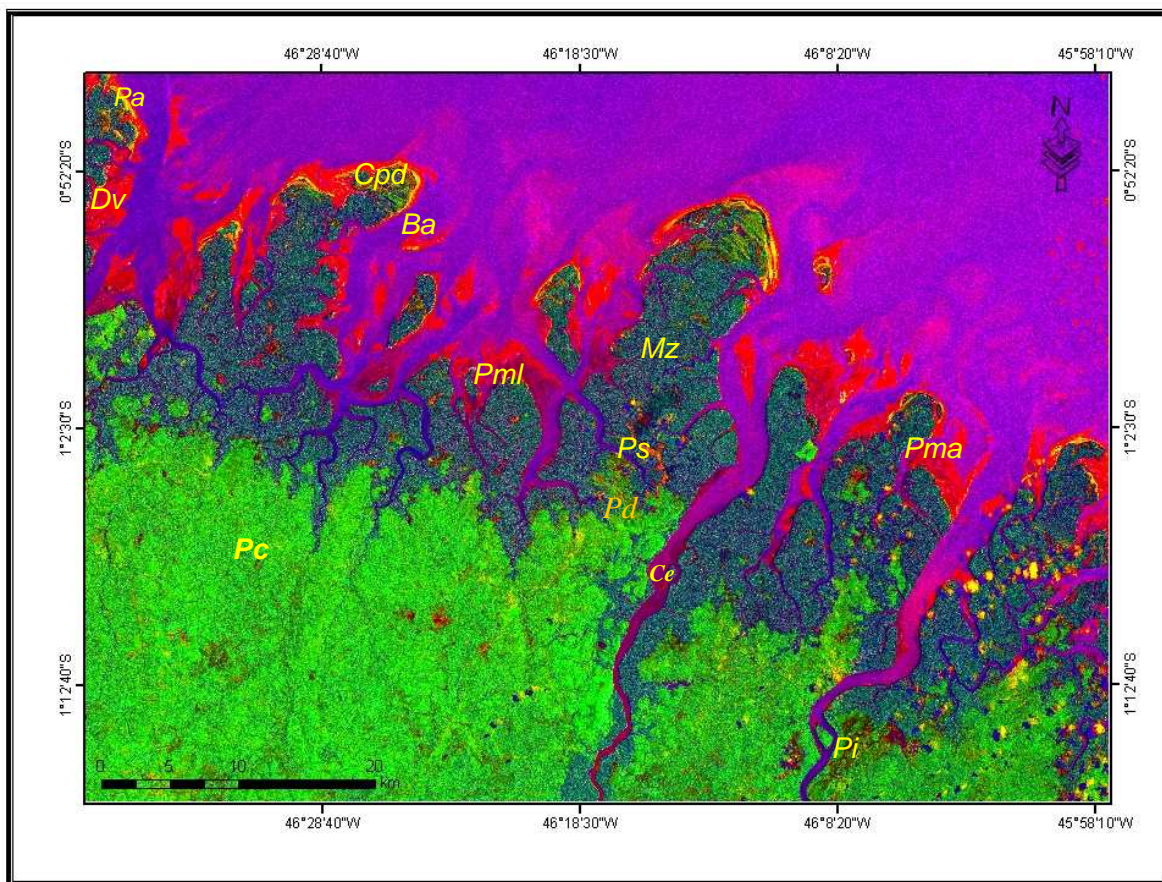


Figura 5.9 - imagem produto da fusão da imagem RADARSAT-1 (17 de outubro de 2004) com a PC seletiva da imagem Landsat ETM+(07 de agosto de 1999).Legenda: Pc-planalto costeiro;Pd- paleoduna; Mz- Manguezal; Pml- planície de maré lamosa; Pma- planície de maré arenosa;P.s- pântano salino;Pi- Planície de inundação; Ba- Barras arenosas; Cpd- Cordão de dunas frontais; Pa- Praias de macro-maré ; Dv- Delta de maré vazante e Ce- canais estuarinos.

## 5.2 Classificação automática das imagens

As técnicas de classificação automática mostraram ter um bom desempenho com relação à identificação de feições geomorfológicas costeiras, o produto destas classificações foi usado para contribuir com o melhor produto para o mapeamento e identificação destes ambientes, ajudando no seu reconhecimento. Assim foi possível reconhecer e mapear as seguintes feições costeiras: Planalto Costeiro (Pc), Paleoduna(Pd), Planície de inundação (Pi), Lagos (Lg), Planície estuarina (Pe), Segmento meandrante sinuoso (Ms), Barra

arenosa de maré (Ba) , Delta de maré vazante (Dv), Pântano de água doce (Pad), Pantanos salinos (Ps), Planície costeira, Planície de maré: Planície de maré arenosa (Pma) , Planície de maré lamosa sem/pouca vegetação (Pml), Manguezal (Mz), - Praia de flecha macromaré (Pa), Cordão de dunas frontais (Cpd ), Interdunas (Id), Dunas móveis (Da ).

### 5.2.1 Classificação automática não supervisionada

Nesta fase são apresentados os resultados da classificação automática (não supervisionada) para a classificação automática efetuada a cada processamento (imagem Landsat -7 e fusão SAR/SPC). Foi possível avaliar o desempenho de cada classificação utilizando-se o *índice kappa* apresentado na Tabela 5.5 (Cohen, 1960).

Tabela 5.5 - Desempenho da classificação das imagens processadas por classificação não supervisionada

<b>Classificação (Não supervisionada)</b>	<b>Índice Kappa</b>	<b>Desempenho da classificação</b>
Landsat-7 (Isodata)	0,743	Muito bom
Imagem SAR/SPC (Isodata)	0,795	Muito bom

Para a verificação da acurácia foi analisada a matriz de confusão (pixel's classificados corretamente e erroneamente a partir de dados de referencia com a classificação produzida, matriz de correlação e índice de exatidão geral (percentual de todos os pixel classificados corretamente) para cada processamento (Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8)

#### 5.2.1.1 LANDSAT-7

O Produto da *classificação não-supervisionada* da imagem Landsat-7 demonstrou 11 classes com respostas espectrais distintas. Contudo, ao analisar as classes em detalhe observou-se que o método gerou erro de 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 pontos diferentes foi classificada como duas ou mais classes distintas.

Analisando a matriz de confusão pode-se observar os erros ou confusões na classificação digital das classes propostas, que a maior confusão ocorreu com a classe Água com materiais em suspensão (Acm), em que foram classificados 8 pontos como sendo Água sem materiais em suspensão (Asm), 3 pontos como planície de maré, 1 ponto como manguezal e 1 como planície de maré arenosa. Portanto dos 33 pontos da classe água com materiais em suspensão, 21 pontos (60,61%) foram bem classificados, enquanto que 12 pontos (39,39%), foram mal classificados.

Dentre os 45 pontos da classe manguezal, 40 pontos (88,89%) foram classificados corretamente, enquanto que 1 ponto foi classificado como A(cm), 1 ponto como Pm, 1 ponto como Pi e 2 pontos como Pa, perfazendo um total de (11,11%) de erro de classificação chamado de erro de omissão.

Para excluir o erro gerado pelo classificador, a classificação não supervisionada foi editada pelo programa *Aggregation* do pacote *Geomatica Focus* do software CI *Geomatics* 10, onde se fez uma agregação de classes de acordo com o que se conhece pela interpretação visual, esse procedimento gerou produtos mais coerentes, considerando assim, apenas 11 classes foram consideradas. (Figura 5.10).

Tabela 5.6 - classificação automática não supervisionada aplicada na imagem Landsat 7, índice Kappa e desempenho da classificação.

Classes	A(sm)	A(cm)	Pm	Pml	Mz	Pc	Cpd	Pi	Pma	Da	Pa	∑ Inhas	Comissão (%)
A(sm)	24	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	27	11,11
A(cm)	8	20	3	0	1	0	0	0	1	0	0	33	39,39
Pm	2	2	17	0	1	0	0	0	0	0	0	22	22,72
Pml	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	4	50
Mz	0	0	0	1	40	1	0	0	0	0	0	42	4,76
Pc	0	0	0	0	0	51	1	1	0	0	0	53	3,77
Cpd	0	0	0	0	0	6	0	1	0	0	0	7	14,28
Pi	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	3	33,33
Pma	0	1	0	1	0	0	0	0	4	0	0	6	33,33
Da	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	100
Pa	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	100
∑ colunas	36	25	20	4	45	59	3	2	6	0	0	200	
Omissão(%)	33,33	20	15	50	11,11	13,55	100	100	33,33	0	0		
Índice Kappa = 0,743													
Exatidão geral = 79%													

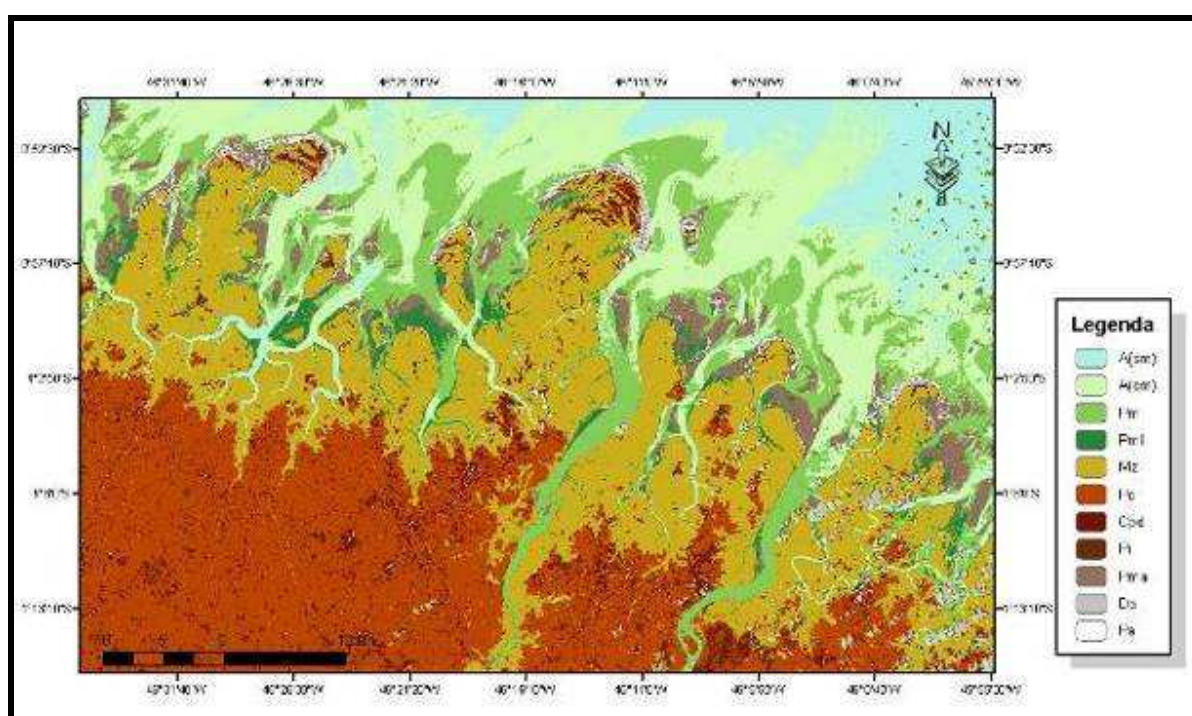


Figura 5.10 - Mapa de ambientes costeiros da área de estudo classificado automaticamente através do algoritmo de classificação ISODATA, a partir de imagens Landsat 7 (1,2,3,4,5 e 7). Legenda: A(sm) área sem teor de materiais em suspensão; A(cm) área com alto teor de materiais em suspensão; Pm-planície de maré; Pml- planície de maré lamosa; Pma- Planície de maré arenosa; Mz- Manguezal; Pc- Planalto costeiro, Cpd- Cordão de dunas frontais; Da- Dunas móveis; Pa- Praias de macro-maré e Pi- Planície de inundação fluvial.

### 5.2.1.2 RADARSAT-1 x STC

Para a classificação automática não supervisionada das imagens RADARSAT-1, pós-processamento STC, teve como matriz de confusão com maior percentagem a classe A (Tabela 5.7), contudo foram totalmente mal classificadas, assim como, as demais classes, obtendo um produto muito ruim de acordo com a figura 5.11.

Tabela 5.7 - Dados de referência: matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada para STC/RADARSAT-1 (26/01/2003)

Dados classificados	A	B	C	D	$\Sigma$ linha	Comissão (%)
A	52	1	0	0	53	1,92
B	1	24	12	0	37	54,16
C	2	2	5	0	9	44
D	0	0	0	1	1	0
$\Sigma$ Coluna	55	27	17	1	100	
Omissão (%)	5,46	11,12	29,42	100		
<b>Índice Kappa = 0.697</b>						
<b>Exatidão geral = 82%</b>						

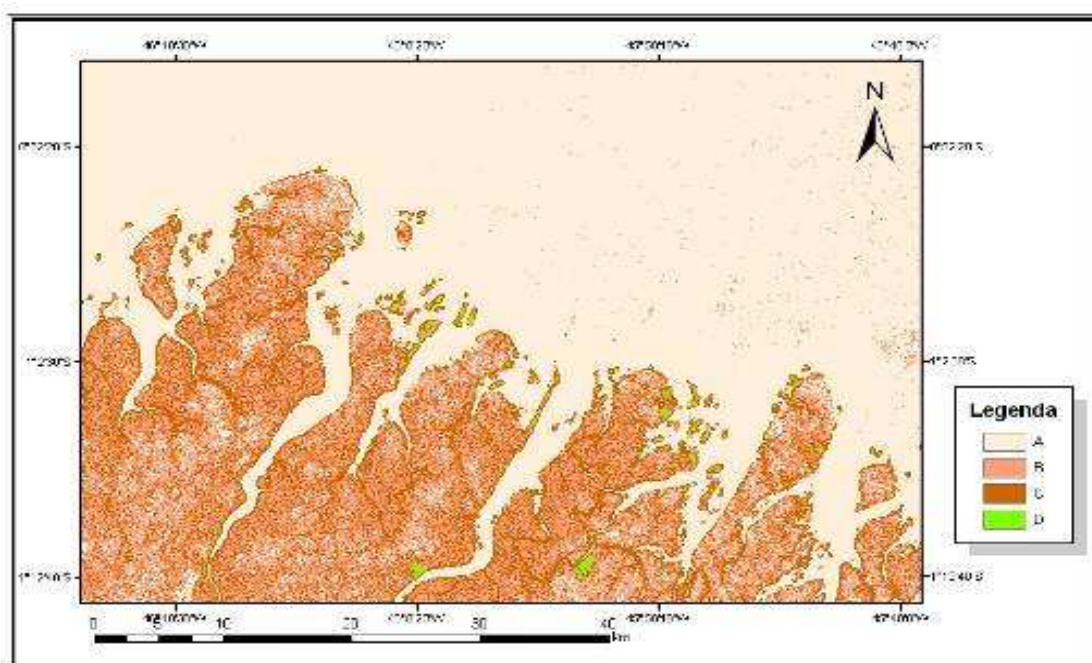


Figura 5.11 - Imagem gerada da classificação automática não supervisionada do processamento STC do RADARSAT-1. Legenda A= Massa d'água; B=Planalto Costeiro; C=Manguezal e D= superfície arenosa

### 5.2.1.3 SAR x SPC

Para a classificação não supervisionada do sinergismo das imagens RADARSAT-1e SPC, teve como matriz de confusão com maior percentagem a classe A (materiais em suspensão na água), em que foram classificados 68 pontos (98,5%) na classe o qual pertence e 1 ponto (1,44%) como classe Mz (Manguezal). Este erro é classificado como erro de omissão (isso ocorre quando pontos de uma determinada classe são classificados em classes diferentes), isto pode ter sido ocasionado pela resposta similar espectral devido a proximidade deste ambientes com a classe A.

A omissão é caracterizada pela resposta da tabela na vertical, em que valores como no exemplo da classe Pm (Planície de maré), 12 pontos (85,71%) foram bem classificados, 1 ponto (7,14%) foi mal classificados como classe Mz (Manguezal) e 1 ponto (7,14%) mal classificado como classe Pa (Praia de macromaré), devido estas emitirem características espectrais similares, além da proximidade entre estes ambientes na coleta dos pontos.

As classes determinadas (Figura 5.12) por este método são de grande ajuda na interpretação e facilitação do reconhecimento dos ambientes costeiros, produzindo automaticamente dados rápidos, pela classificação automática *isodata*.

A classificação automática e índice *kappa* para a fusão SAR/ SPC teve a seguinte informação (tabela 5.8).

Tabela 5.8 - informações da matriz de confusão, erro de comissão e omissão e exatidão geral da classificação não supervisionada da fusão SAR/SPC.

Dados Classificados	Mz	Pc	Cpd	A	Pm	Pa	Pi	$\Sigma$ linha	Comissão (%)
Mz	42	4	1	5	1	0	0	53	20,75
Pc	0	44	0	0	0	0	0	44	0
Cpd	1	4	0	0	0	0	0	5	20
A	1	0	0	68	0	0	0	69	1,44
Pm	0	2	0	5	12	0	0	19	36,84
Pa	1	0	0	1	1	4	0	7	42,85
Pi	0	2	0	1	0	0	0	3	20
$\Sigma$ Coluna	45	56	1	80	14	4	0	200	
Omissão(%)	6,66	21,42	0	15	14,28	0	0		
Índice Kappa= 0,795									
Exatidão Geral $\rightarrow 85/100= 85\%$									

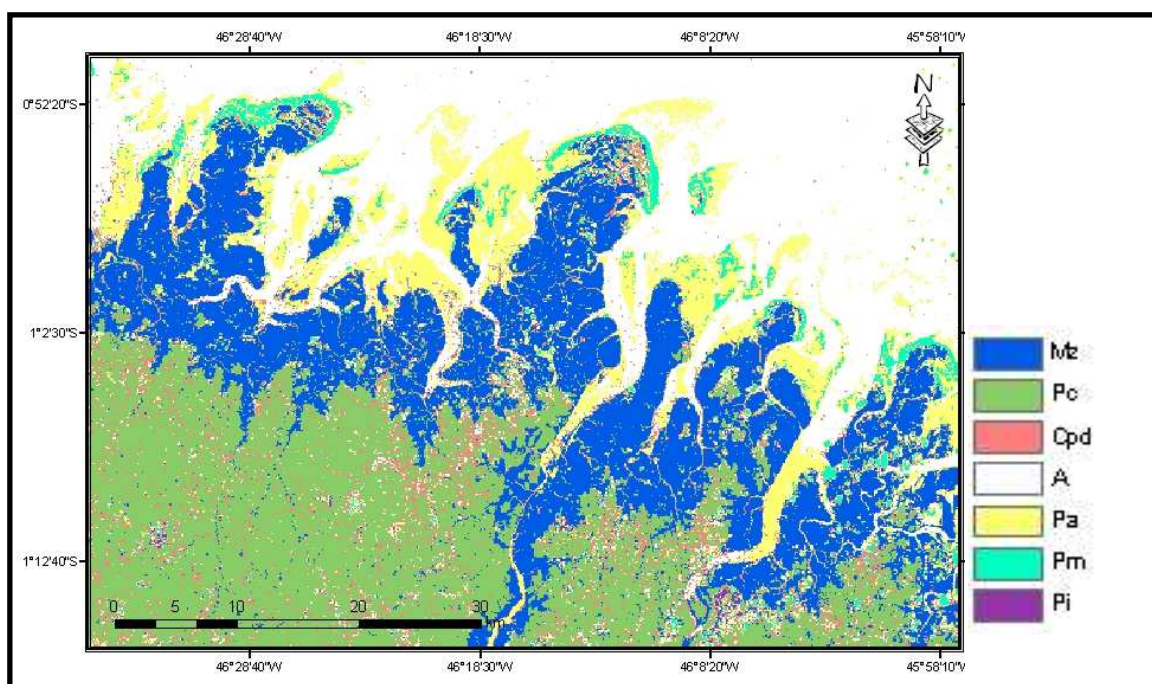


Figura 5.12 - Imagem gerada da classificação automática da fusão SAR/SPC. Legenda: Mz-Manguezal; Pc- planalto costeiro; Cpd- cordão de dunas frontais; A- massa d'água; Pa- praia de macro-maré; Pm- planície de maré; Pi- Planície de inundação

### 5.3 AVALIAÇÃO DOS PRODUTOS GERADOS PARA O MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS

A partir dos vários processamentos efetuados nas imagens Landsat-7, RADARSAT-1, SRTM, e sinergismos dos multissensores, foi possível elaborar uma tabela comparativa (Tabela 5.9) da eficiência de cada produto no reconhecimento e mapeamento das feições costeiras.

Tabela 5.9 - Aproveitamento do processamento dos sensores remotos para reconhecimento das feições costeiras.

<b>Produtos</b>	<b>Feições costeiras</b>															<b>AcM</b>			<b>Total</b>	
	<b>PC</b>	<b>PI</b>	<b>DV</b>	<b>PM</b>	<b>PML</b>	<b>MZ</b>	<b>PMA</b>	<b>PA</b>	<b>PAD</b>	<b>PD</b>	<b>PS</b>	<b>LG</b>	<b>CPD</b>	<b>DA</b>	<b>BA</b>	<b>A▼M</b>	<b>A▲M</b>	<b>AsM</b>		
Landsat 7	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	-	M	M	M	M	M	M	<b>51</b>	
Radarsat-1 (fevereiro)	M	M	B	R	M	B	R	R	R	R	M	-	R	R	M	-	R	-	27	
RADARSAT-1 (outubro)	M	M	R	R	R	M	R	B	R	R	M	-	R	R	-	-	-	-	24	
PC1, PC2 e PC3	M	M	B	B	B	M	B	B	-	M	B	-	M	B	B	B	B	B	<b>37</b>	
STC (SAR)	R	-	-	-	-	R	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	
SRTM/ETM+	M	R	R	R	R	M	R	R	R	B	B	-	B	B	B	B	B	B	26	
SAR/ETM+	M	R	R	R	R	M	R	R	R	R	R	-	R	R	R	B	B	-	22	
SAR/SPC	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	-	M	M	M	M	M	B	<b>50</b>	
Clas. aut. Landsat 7 1,2,3,4,5 e7	M	M	B	M	M	M	M	M	B	M	R	-	M	M	B	M	M	R	<b>44</b>	
Clas. aut. Sinergismo SAR/SPC	M	M	R	M	R	M	M	R	R	R	R	-	R	R	R	B	B	M	31	
<b>M (%)</b>	<b>90</b>	<b>70</b>	20	40	40	<b>80</b>	40	30	20	40	40	-	40	30	30	30	30	20		
<b>Interpretação</b>	<b>M=Muito bom = 3</b>					<b>B=Bom = 2</b>					<b>R= Ruim=1</b>					<b>(-) s/ informação=0</b>				

PC-planalto costeiro; PI-planície de inundação; DV-delta de maré vazante; PM-planície de maré; PML- planície de maré lamosa; MZ-manguezal; PMA- planície de maré arenosa; PA-praia macromaré; PAD-pântano de água doce; PS- pântano salino; LG- lagos; Pd- Paleodunas; CPD-cordão de paleodunas; DA- dunas móveis; BA-barras arenosas; AsM- água s/materiais em suspensão, AcM-água com materiais em suspensão (**A▼M e A▲M**).

**Obs.:** As feições costeiras mais facilmente reconhecidas foram: Planalto costeiro com 90%, Manguezal com 80% e Planície de inundação com 70%, em termos de resposta muito boa ou resposta imediata.

#### 5.4 RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS USANDO DADOS DO LANDSAT-7, RADARSAT-1 E SRTM

A partir dos melhores produtos gerados a partir do processamento das imagens Landsat-7 composição 4R 5G 3B, RADARSAT-1 WIDE - 1, SAR/SPC e dados de elevação SRTM foi possível uma análise individual e integrada dos diferentes ambientes sedimentares da costa e ao longo da área de estudo, sendo identificados os seguintes domínios: Planalto Costeiro, Planície Aluvial, Planície estuarina, Planície Costeira (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 - unidades morfológicas e ambientes costeiros

<b>UNIDADES MORFOLÓGICAS</b>	<b>AMBIENTES COSTEIROS</b>
Planalto Costeiro	
Planície Aluvial	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Planície de inundação</i></li> </ul>
Planície Estuarina	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Canal estuarino</i></li> <li>▪ <i>Delta de maré vazante</i></li> <li>▪ <i>Barras arenosas</i></li> </ul>
Planície Costeira	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Lagos</i></li> <li>▪ <i>Pântano salino</i></li> <li>▪ <i>Pântano de água doce</i></li> <li>▪ <i>Planície de maré lamosa</i></li> <li>▪ <i>Manguezal</i></li> <li>▪ <i>Planície de maré arenosa</i></li> <li>▪ <i>Praia de macro-maré</i></li> <li>▪ <i>Cordão de dunas frontais</i></li> <li>▪ <i>Paleodunas</i></li> <li>▪ <i>Interdunas</i></li> <li>▪ <i>Dunas móveis</i></li> </ul>

### 5.4.1 Planalto Costeiro

O Planalto Costeiro apresenta-se como superfície ondulada formando um relevo suavemente ondulado, por vezes com vertentes retilíneas e íngrimes, podendo mostrar uma superfície com alturas que atingem cerca de 150m, como é o caso da Serra do Piriá (Figura 5.13 e 5.14).

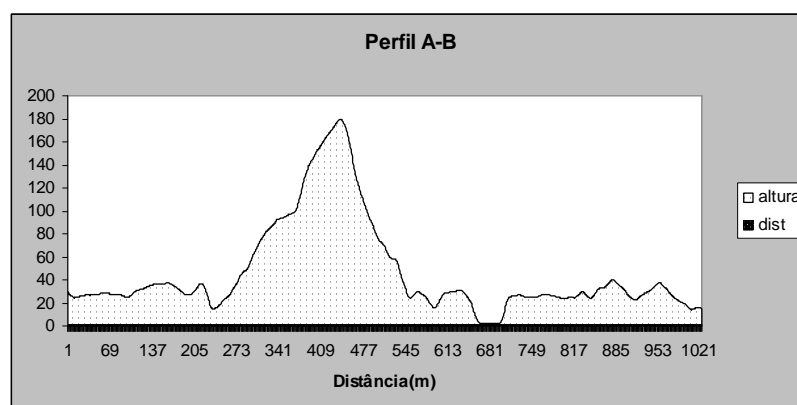
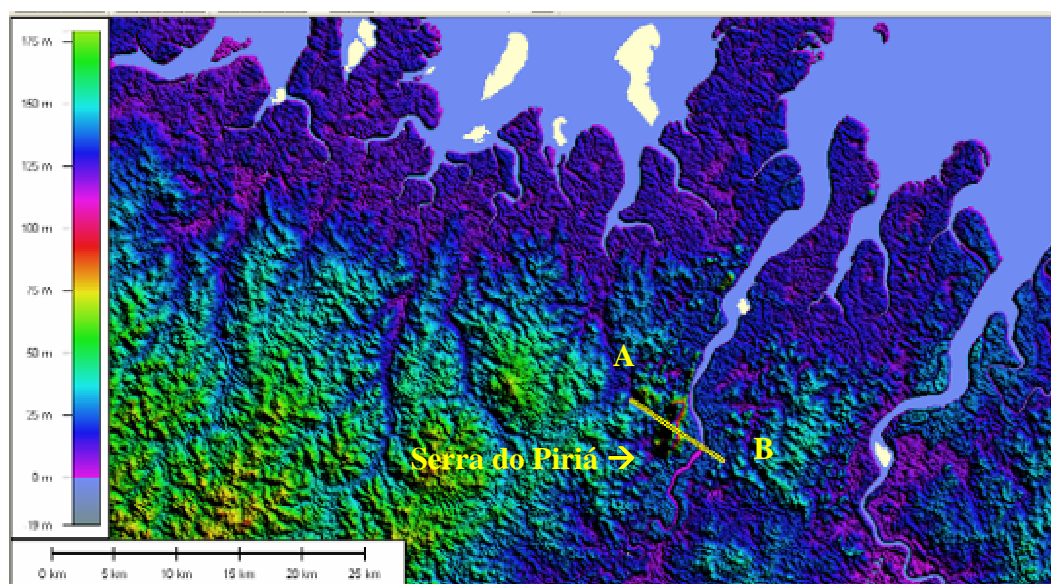


Figura 5.13 - SRTM com o perfil da Serra do Piriá

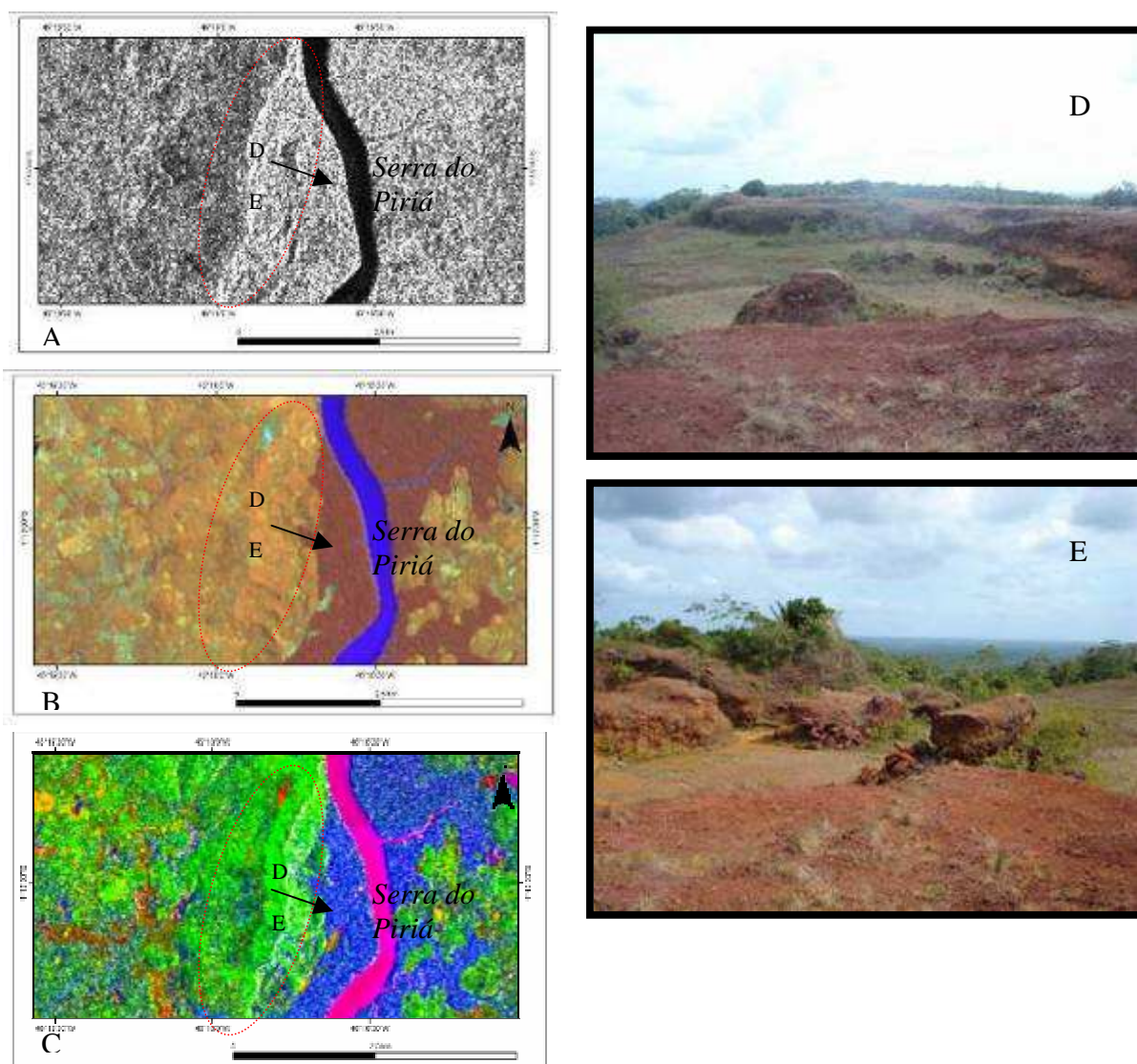


Figura 5.14 - Imagens (A) RADARSAT-1; (B) Landsat-7 e (C) fusão SAR/SPC ; (D) e (E) fotos de cima da serra do Piriá. Cobertura laterítica, horizonte ferruginoso, constituído de goetita e hematita (enriquecida no topo), mas ainda contendo gibbsita de acordo com (Oliveira & Aquino, 2006)

Na área estudada, há ocorrência de rochas cristalinas metamórficas e metassedimentares, pertencentes ao Grupo Gurupi, de idade Pré-cambriana, cortadas por veios de quartzo auríferos, além de rochas sedimentares recentes de idades Terciárias e Quaternárias. Refletindo sua constituição geológica, seu relevo apresenta algumas formas mais movimentadas, fazendo parte do Planalto rebaixado da Zona Bragantina e do litoral de estuários e Lençóis Maranhenses (Klein *et al*, 2004). Apresenta pequenos morros e colinas, áreas aplainadas que constituem os pediplanos, além de alguns terraços nas áreas sedimentares e

interpenetrações de influências litorâneas. Esta unidade, quando em contato com a planície costeira, apresenta-se como paleo-falésias (Figura 5.15 e 5.16).

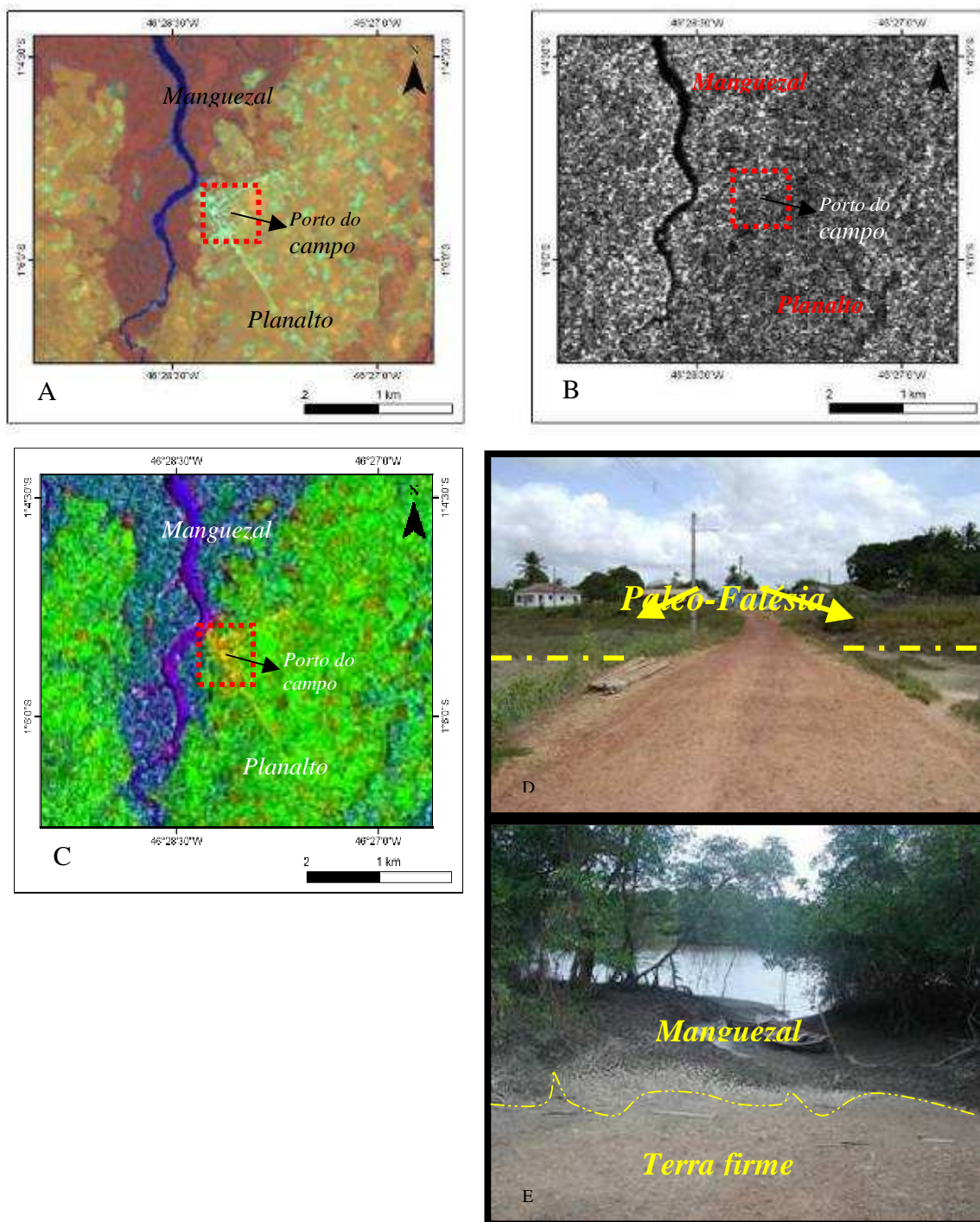


Figura 5.15 - imagens mostrando o contato manguezal x planalto costeiro (A) Landsat-7; (B) RADARSAT-1; (C) fusão SAR/SPC - fotos representativas do contato; (D) Paleofalésia no povoado de Porto do Campo (B) contato suave entre o planalto costeiro e o manguezal próximo ao povoado de Porto do campo- PA



Figura 5.16 - Fotos (F e G) de falésias (Fm. Barreiras) localizada no povoado de Giz, há aproximadamente 10km de Fernandes Belo-MA.

O Planalto Costeiro é evidenciado na imagem processada Landsat-7, composição 4R 5G 3B pela cor laranja avermelhada, com pequenas porções esverdeadas, em resposta a sua alta reflectância na banda 4, na presença da vegetação juntamente com o solo, e na banda 5 nas porções de solo exposto (Figura 5.17D). Percebe-se excelente distinção entre planalto costeiro vs planície costeira (Figura 5.17).

Na imagem processada do RADARSAT-1, o Planalto Costeiro é evidenciado por um tom de cinza claro com textura rugosa dominando a maior parte da área estudada (Figura 5.17C).

No produto híbrido SAR/SPC (Figura 5.17 A) a região estudada apresenta-se com coloração verde percebendo-se uma boa distinção do limite Manguezal de coloração verde oliva. Para o produto híbrido SRTM/Landsat (5.17 B), percebe-se ainda o limite Planalto costeiro vs manguezal, muito bem definido, em função do relevo.

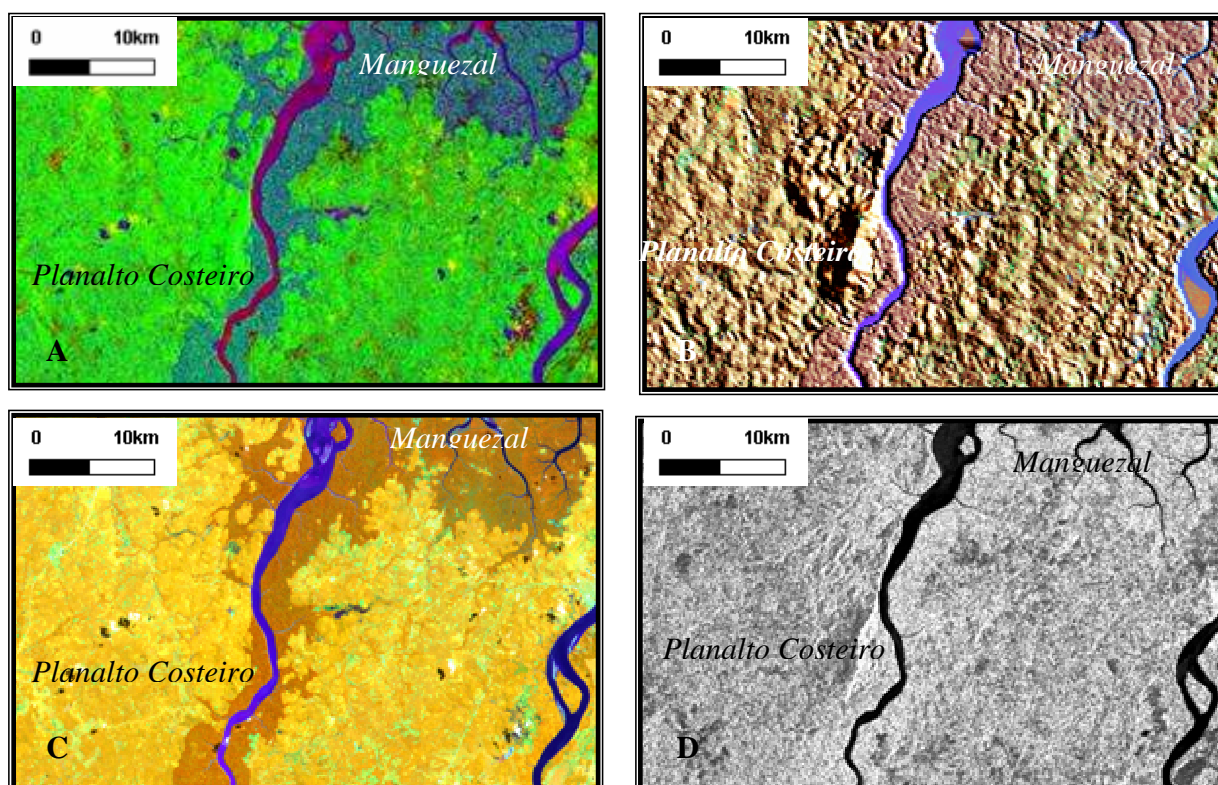


Figura 5.17 – Representação do Planalto costeiro (coordenadas  $46^{\circ}15'W$  e  $45^{\circ}45'W$  e  $1^{\circ}10'S$  e  $1^{\circ}16'S$ ) na área de estudo através de diferentes dados (A) imagem fusionada SAR/SPC; (B) Imagem fusionada Landsat/SRTM (C) Imagem Landsat 7 composição 4R 5G 3B e (D) RADARSAT-1 passagem 17/10/2004.

#### 5.4.2 Planície de Inundação

A planície de inundação corresponde à área mais baixa da planície aluvial funcionando como uma bacia plana, pobremente drenada, localizada nas adjacências dos meandros ativos e abandonados. Essas bacias atuam como áreas de decantação, onde os sedimentos mais finos são depositados nos períodos de cheia. Encontram-se associados a esta, pântanos de água doce e lagoas.

As figuras 5.18A, 5.18B, mostram em diferentes sensores a representatividade deste ambiente. Na imagem Landsat-7, composição 4R 5G 3B, foi possível visualizar uma coloração ciano devido a umidade ser captada e ressaltada pela banda 5 e 3. Na imagem RADARSAT-1, a resposta é um tom de

cinza escuro levemente rugoso que se destaca em relação ao planalto costeiro. O produto híbrido SAR/SPC ressalta ainda com mais clareza este ambiente, denotando uma cor avermelhada nas partes possivelmente inundadas.

Este ambiente é correlacionado a estudos feitos ao longo da costa paraense por Boulhosa (2006) e a noroeste do Maranhão (São Luis) por Teixeira (2006) através de imagens Landsat ETM+ e TM, CBERS, SPOT e RADARSAT-1. Estes apresentaram resposta espectral similar ao estudado nesta dissertação, utilizando-se de diferentes composições, como a 4R 5G 3B de Boulhosa (2006) e 4R 5G 1B de Teixeira (2006), em que fica claro perceber como estas composições contribuem para o reconhecimento deste ambiente. Nas imagens RADARSAT-W1 e SPC-SAR destas autoras, esta unidade não apresentou boa resposta em função da sua distribuição espacial restrita e do baixo contraste, sendo que a identificação da interface terra firme *versus* planície de inundação não foi possível.

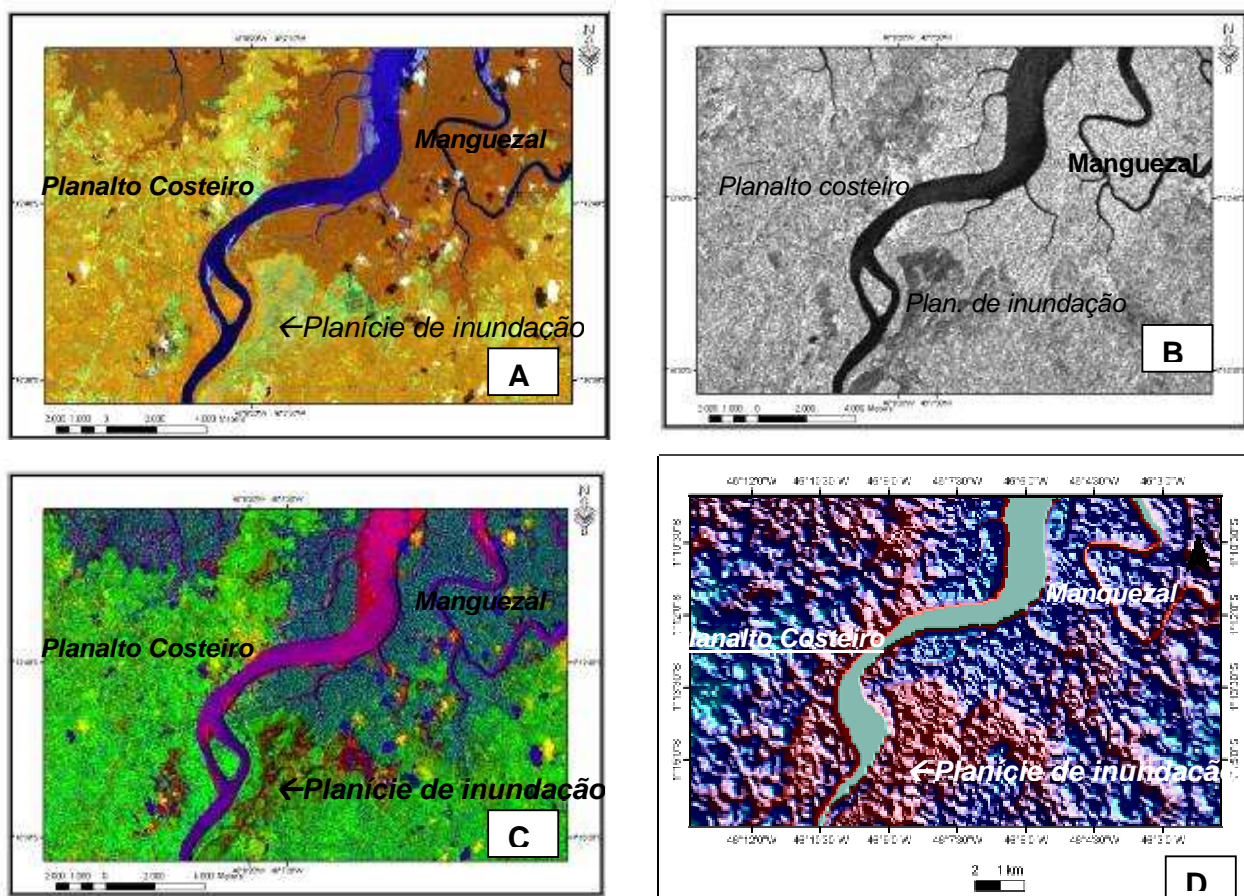


Figura 5.18 - imagens: (A) Landsat ETM+ composição 4 R 5G 3B; (B) RADARSAT-1 da planície de inundação ; (C) Fusão SAR/SPC e (D) SRTM integrada a paleta de cores.

### 5.4.3 Planície Estuarina

É limitada a norte pela plataforma interna, onde os processos marinhos são dominantes, e a sul, pela Planície Aluvial, no limite superior da maré salina (Souza Filho & EL-Robrini, 1996). Encontra-se margeada pelo Planalto Costeiro na sua porção próxima, apresentando uma largura de aproximadamente 250m e um comprimento de canal de 28.530 km, assim como, a localizada no rio Emboraí próximo a Itapixuna-PA.

Segundo estudos feitos na zona do Salgado paraense (Salinópolis -Pa) por Mendes et al (1997) e Boulhosa (2006) e no setor maranhense por Teixeira (2006), percebeu-se que esta unidade está inserida dentro dos limites de influência da maré e de processos marinhos na foz, representada pelas planícies de inundação e pelas barras arenosas de maré.

Na área em estudo foi possível destacar três unidades morfológicas: canal estuarino, delta de maré vazante e barras arenosas.

#### 5.4.3.1 Canal estuarino

São representados por ordem pelos rios Emboraí, Piriá, Gurupi, Tromaí e Maracaçumé. O canal estuarino foi compartimentado em quatro padrões morfológicos distintos: funil estuarino, segmento retilíneo, segmento meandrante e segmento de curso superior (Figura 5.20), semelhante à subdivisão proposta por Woodroffe et al (1989) para o Rio Alligator na Austrália.

Estes foram identificados pelo contraste da resposta espectral da água. Nas imagens Landsat-7, composição 4R 5G 3B, RADARASAT-1, passagens fevereiro/2003 e outubro/2004 e produto híbrido SAR/SPC, o canal ficou bastante evidenciado (Figura 5.19A).

Teixeira (2006) obteve a mesma resposta espectral para este ambiente, assegurando uma boa interpretação através do processamento das imagens Landsat e Radarsat-1, mas no seu trabalho não houve a compartimentação dos padrões morfológicos inviabilizando a comparação com os descritos nesta dissertação.

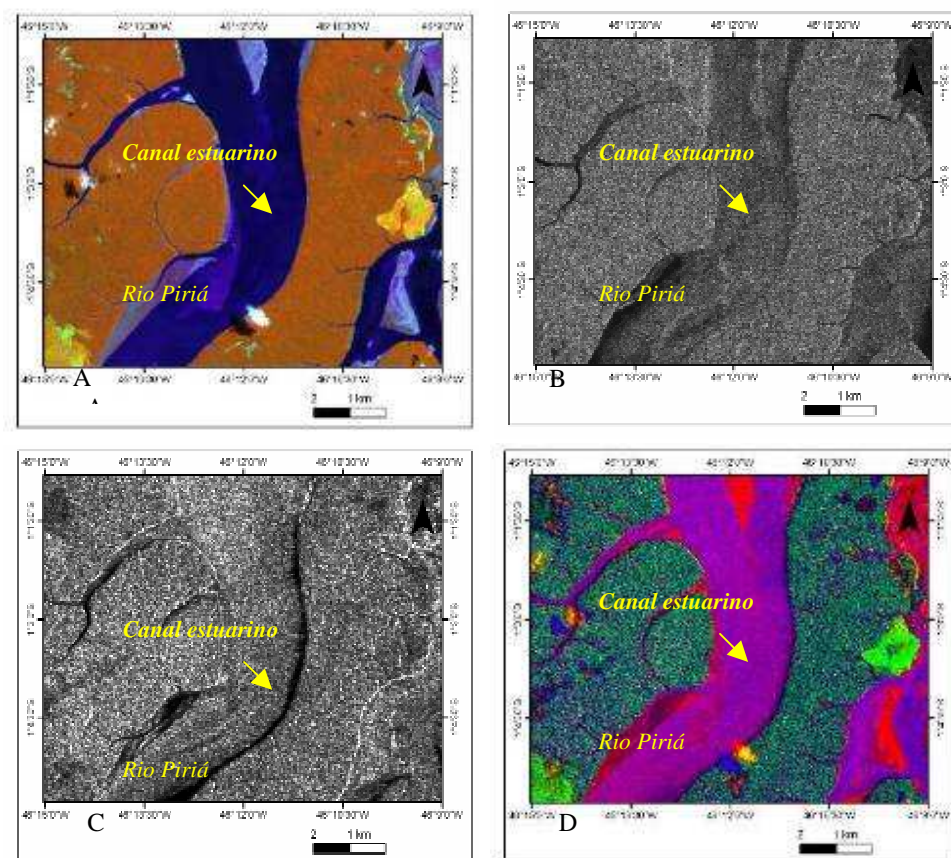


Figura 5.19 - Canal estuarino no rio Piriá (A) Landsat-7, (B) RADARSAT-1, Fev/2003 e (C) RADARSAT-1, out/2004 (D) produto híbrido SAR/SPC.

#### 5.4.3.1.1 Funil estuarino

Corresponde à zona mais distal do estuário, sua foz, caracterizada por uma ampla abertura (5.5 km de largura) em direção ao oceano atlântico, afunilando-se para 1.13km em direção ao continente. Percebeu-se assim como em Souza Filho *et al* (1996) na zona Bragantina, barras arenosas de maré e ilhas de manguezais freqüentes e amplamente distribuídas no trecho do estuário.

A resposta da imagem Landsat-7 e RADARSAT-1 é quase a mesma do ambiente anterior, mantendo-se as mesmas características em seu sinergismo (Figura 5.20).

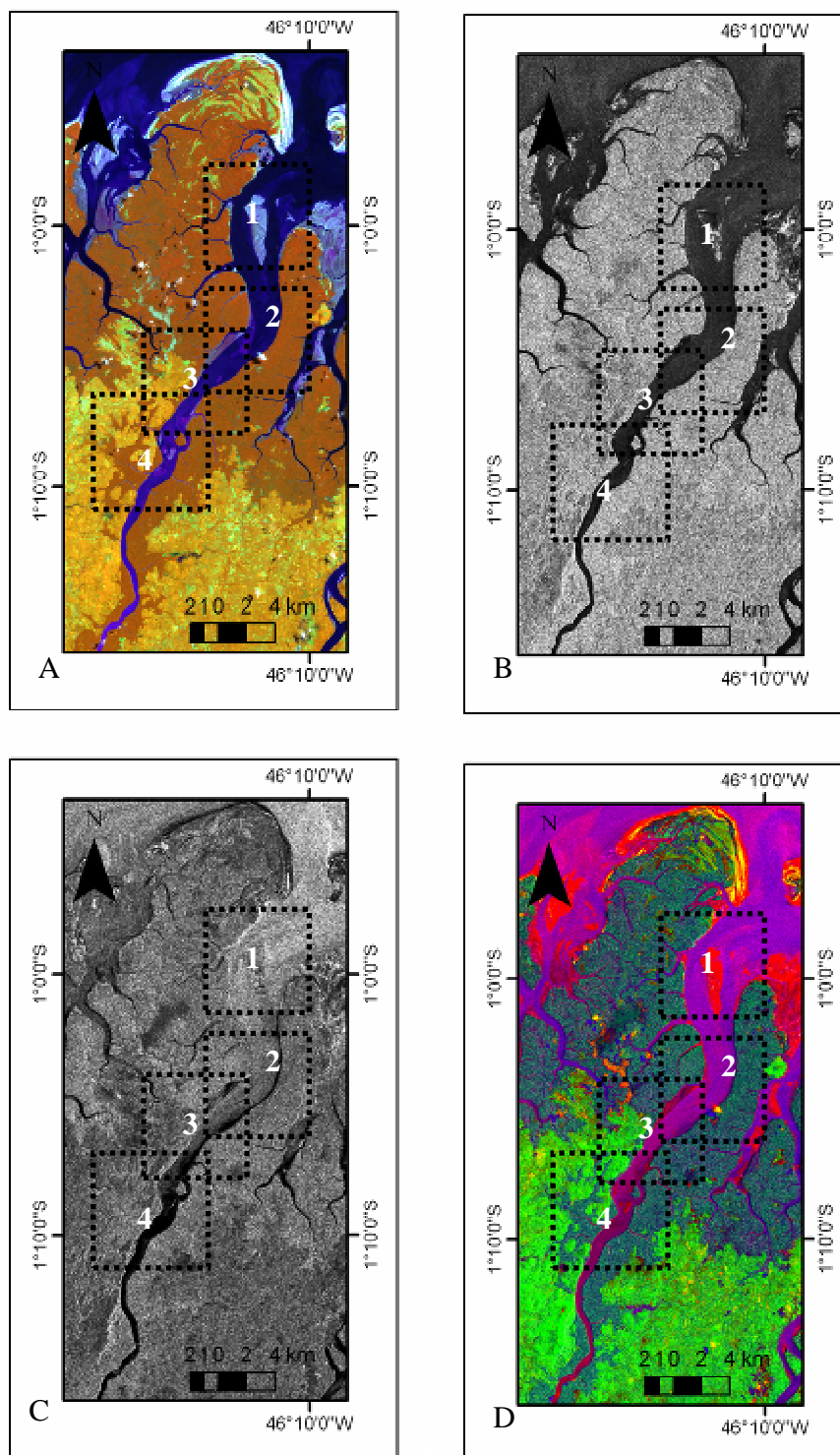


Figura 5.20 - Imagens: (A) Landsat-7, (B) RADARSAT-1, jan 2003, (C) RADARSAT-1, out. 2004, (D) produto híbrido SAR/SPC. Localização Rio Piriá. Legenda: (1) Barras arenosas; (2) Funil estuarino; (3) segmento retilíneo e (4) Segmento de curso superior

#### 5.4.3.1.2 Segmento retilíneo

São dominados por fortes correntes de marés, em que os sedimentos são transportados em direção a montante. É bordejado por terraços de abrasão esculpidos nos depósitos de manguezais, submersos durante as marés altas. Barras arenosas de maré também ocorrem ao longo desse trecho. A figura 5.20 destaca o segmento retilíneo nas imagens Landsat-7, RADARSAT-1 e produto híbrido SAR/SPC.

#### 5.4.3.1.3 Segmento Meandrante Sinuoso

Corresponde ao setor estuarino com fortes correntes de maré, onde ocorrem meandros com sinuosidade regular, formando curvas amplas (Figura 5.21), com largura em torno de 200m. Neste setor a profundidade média é de 7m e, em suas margens, por vezes, afloram terraços de Planalto Costeiro (Formação Barreiras).

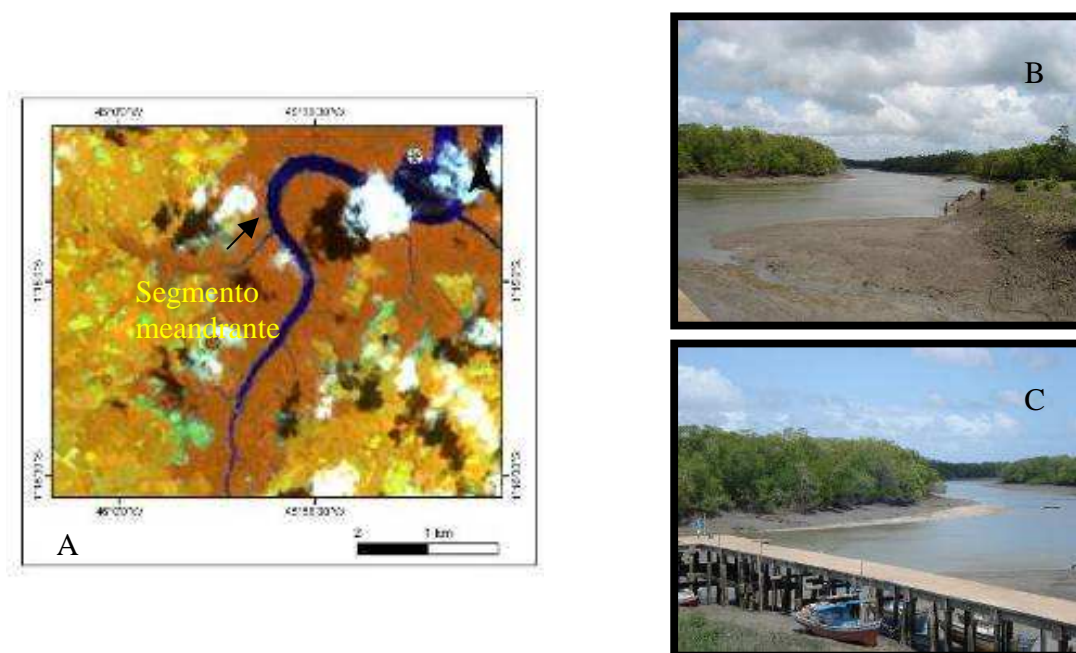


Figura 5.21- Imagem Landsat -7 composição 4R 5G 3B próximo ao rio Emboraí (B) lado W, margem direita do rio Emboraí (C) Rio Piriá, porto em maré baixa.

#### 5.4.3.1.4 Segmento de curso superior

Encontra-se encaixado no Planalto Costeiro, mostrando alternância de segmentos retos e sinuosos, espaçados irregularmente. Franjas de manguezal bordejam o canal, onde barras em pontal e longitudinais são freqüentes. As imagens Landsat-7, Radarsat-1 e o produto híbrido SAR/SPC mostram esta feição na figura 5.20.

#### 5.4.3.2 Delta de maré vazante

Presente na desembocadura de alguns canais e baías, como a de Emboraí, estes deltas ficam expostos durante a baixamar, formado em condições de alta energia, este ambiente foi estudado por Souza Filho *et al* (1996) e Souza Filho (2000) na zona bragantina, reconhecido através de imagens de satélites. Na imagem Landsat-7 (Figura 5.22), estes ambientes apresentam a mesma resposta das barras arenosas, devido as respostas espectrais nas bandas 3,4 e 5, apresentado coloração azulada característicos de depósitos arenosos úmidos. Na imagem do RADARSAT-1 foi possível obter informações morfológicas em função das variações de rugosidade e tons de cinza.

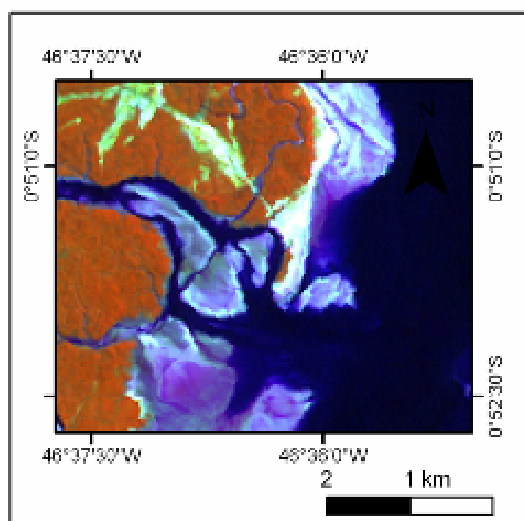


Figura 5.22 - Delta de maré vazante na Baía de Emboraí.

#### 5.4.3.3 - Barra Arenosa de Maré

Constitui corpos longitudinais, alongados segundo o fluxo de maré. Estão associadas às cores branca azulada devido à resposta espectral alta nas três bandas espectrais 3, 4 e 5, causada pela presença de depósitos arenosos bem selecionados e úmidos encontrados nas desembocaduras dos canais de maré e estuários. Nas imagens RADARSAT-1, as barras apresentam uma rugosidade com tons de cinza escuro, enquanto que no produto híbrido SAR/SPC, apresentam coloração laranja avermelhado rugosa, estando bem destacada em relação aos outros ambientes costeiros. A Figura 5.20 ilustra as características das barras em cada produto gerado.

Na imagem de outubro de 2004, adquirida em condições de maré enchente foram observados barras arenosas de intermarés emersas. Foi possível distinguir as direções de alinhamento paralelas e perpendiculares das barras em relação à linha de costa. No entanto, na imagem 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 realçou as formas de fundo em função do aumento da rugosidade superficial da água. A configuração das linhas permite inferir a influência das correntes de marés na planície estuarina. Estes dados podem contribuir nas investigações dos processos e modificações hidrodinâmicos atuantes na região (Figura 5.6).

#### 5.4.4 Planície Costeira

Corresponde aos depósitos arenosos e argilosos Pleistocênicos e Holocênicos. É limitada, a sul, pelo Planalto Costeiro e Planície Estuarina e a norte, pela Plataforma continental interna. Assim como em Souza Filho & El Robrini (1996) ela está inserida em uma costa embaiada (reentrância na linha costeira formando uma baía muito aberta) transgressiva dominada por macromaré.

#### 5.4.4.1 Planície de Maré

É a unidade mais facilmente reconhecida dentro da Planície Costeira. Desenvolve-se em áreas protegidas da ação de ondas, estando sob a influência de macro-maré semi-diurna e interagindo com falésias inativas, ou ocorrendo ao longo das margens dos córregos de maré e em áreas protegidas por praias arenosas. Através dos sensores ópticos e microondas para esta dissertação juntamente com o trabalho de campo podemos compartimentá-la em planície de maré lamosa (sem / pouca vegetação), planície de maré lamosa densamente colonizada por manguezais, e em planície de maré arenosa. Esta feição está representada na costa em toda a área de estudo. As características estudadas neste ambiente podem ser correlacionadas a estudos feitos por Souza Filho *et al* (1996), Souza Filho (2000), Baptista *et al* (2005), Boulhosa (2006), Teixeira (2006) e Rodrigues (2006).

##### 5.4.4.1.1 - Planície de Maré Lamosa (sem/pouca vegetação)

Localizam-se entre o nível de maré baixa e alta a média, sendo atingida diariamente pelas marés, constituindo, portanto, manguezais de intermaré. Atingem, neste setor, cerca de 40km de largura. Na composição colorida da imagem Landsat-7 (Figura 5.23A) estudada a matiz é marrom suavemente avermelhada, apresenta uma alta reflectancia na banda 4, causada pela densa floresta de manguezais (Figura 5.23E e F), sendo que a absorção da radiação eletromagnética aumenta com o aumento da quantidade de água e do teor de matéria orgânica. No Radarsat-1 (Figura 5.23C e D) ela apresenta uma superfície rugosa com tons de cinza claro, sendo mais bem evidenciado na passagem do mês de fevereiro. No produto híbrido (Figura 5.23B) a planície de maré lamosa é bem demarcada, apresenta coloração vermelho escuro e um alto contraste com o Manguezal devido a resposta da integração dos dois sensores (Landsat-7 e Radarsat-1). Com o sensor microondas a resposta é expressa em pequena superfície com um tom de cinza escuro. Esse fator produz um alto retorno de radar.

#### 5.4.4.1.2 Planície de Maré Lamosa - Manguezal

Localizada em toda a planície costeira de estudo possui uma extensão de 27.325 km em direção ao continente e um dos ambientes mais representativos da costa estudada, é formado por vegetação de mangue, colonizadas principalmente por *Rhizophora* e *Avicennia* e *Laguncularia* (Figura 5.24 D,E,F e G). 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 supra-maré (em direção ao mar) com as praias de macro-marés e cordões de dunas frontais e paleodunas. Em algumas áreas faz contato gradacional com a cobertura arenosa retrabalhada de supramaré.

Na composição colorida 4R 5G 3B da imagem do 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. A imagem do RADARSAT-1 das passagens 17/10/2004 e 26/01/2003 mostram que o reconhecimento das áreas inundadas na região amazônica tem sido realizado com base no efeito de espalhamento volumétrico 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), como pode ser observado no detalhe da Figura 5.24. A fusão SAR/PCAS mostra com melhor evidencia a separação do manguezal com o planalto costeiro sendo este bastante evidenciado no mapa representativo do sinergismo.

Em estudos anteriores, Teixeira (2006) obteve um bom resultado para o reconhecimento deste ambiente, em seu trabalho, a autora utilizou-se de imagens CBERS, SPOT, Landsat TM e RADARSAT-1, mas a mesma delimitação não foi observada na CBERS e SPOT, pois a cobertura vegetal e a reflectancia dificultou a sua identificação, Boulhosa (2006) obteve resultados semelhantes e bastante aproximado da figura 5.24, pois se utilizou da mesma composição colorida e mesmo sensor, por sua vez Baptista et al (2005) estudando o litoral amapaense, utilizou-se da fusão de imagens Landsat TM com o SRTM para o reconhecimento deste ambiente, composição colorida 5R 4G 3B, este obteve um bom resultado

para a identificação deste ambiente com destaque e bons contrastes. O que se pode perceber com o produto destes autores, é como a utilização de sensores ópticos e microondas contribuem em diferentes áreas com resultados tão aproximados, o que corrobora com o bom reconhecimento deste ambiente costeiro no litoral paraense e maranhense.

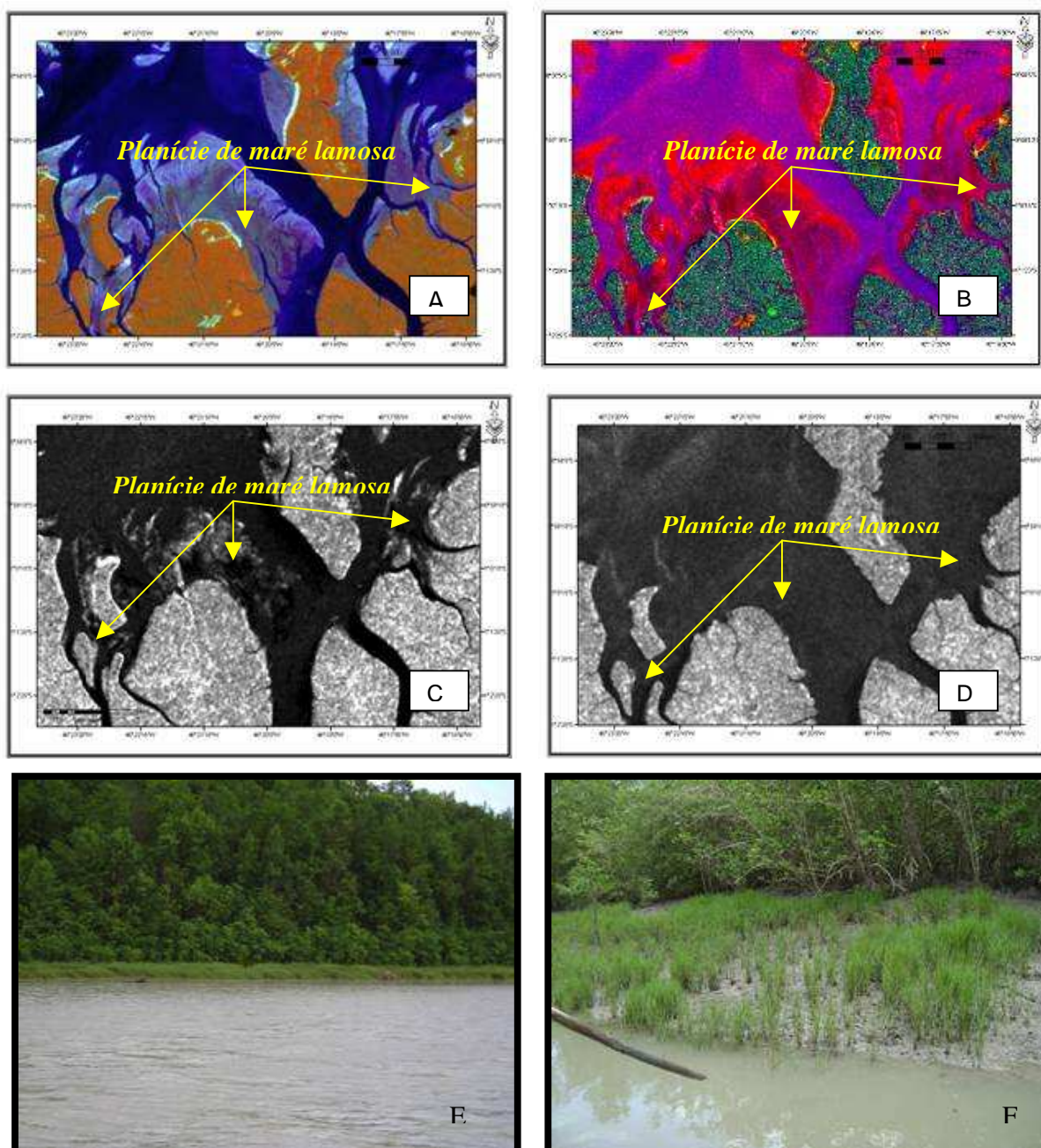


Figura 5.23 - (A) imagem Landsat 7 composição 4R, 5G 3B representando a planície de maré lamosa (sem/pouca vegetação);(B)Produto híbrido SAR/SPC (C)Radarsat-1passagem fev/2003; (D)Radarsat-1 passagem out./2004; (E) Rio Gurupi margem esquerda sentido pedra do Gurupí e (F) Planície de maré lamosa localizada no "furo" (entrada) para acesso a cidade de Carutapera – MA.

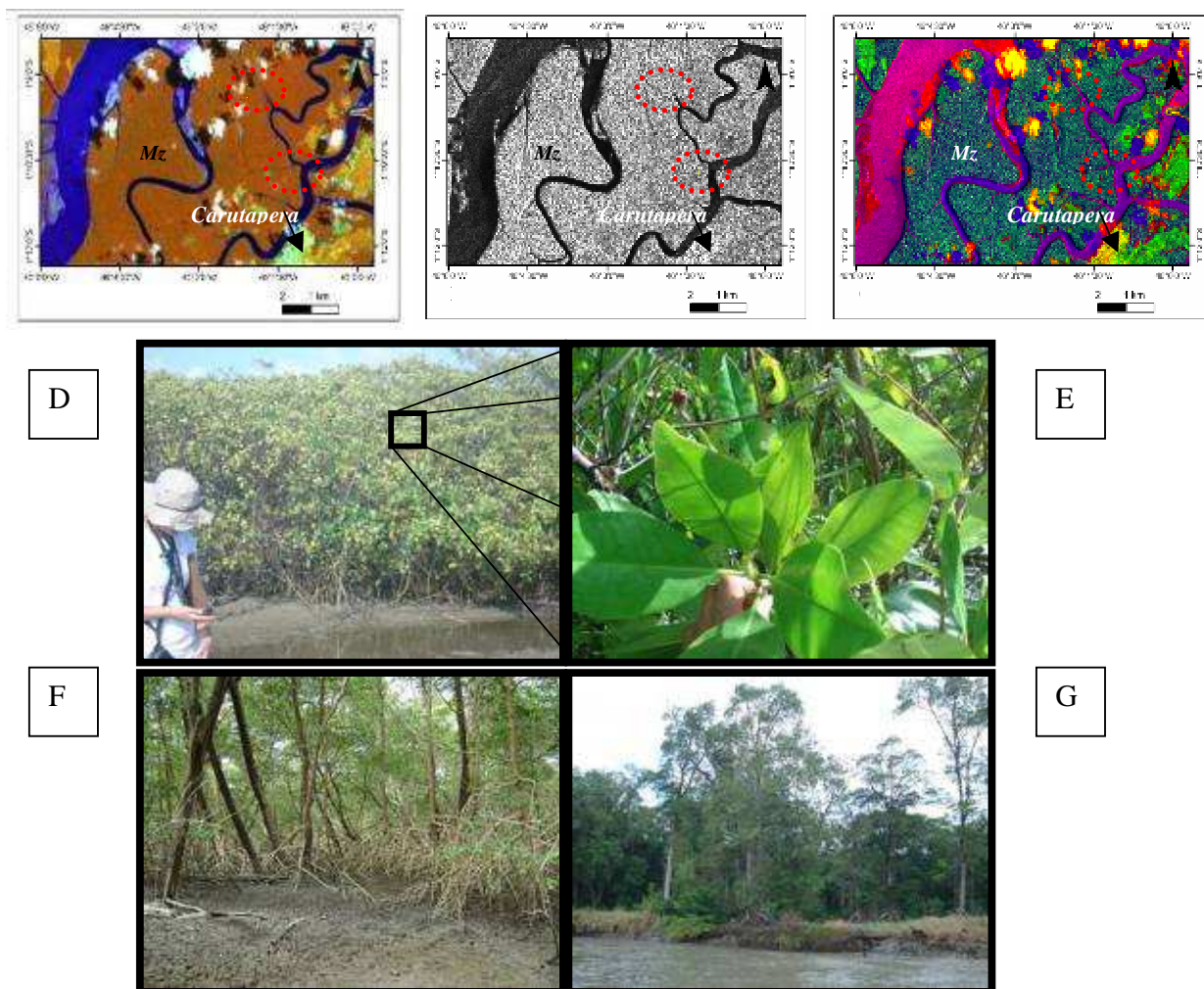


Figura 5.24 - (A) Landsat-7; (B) RADARSAT-1 jan/2003 e (C) produto híbrido SAR/SPC - manguezal (D e E) mangue branco na ilha Apeú Salvador (vegetado por *laguncularia*); (F) *Rhizophora* e (G) *Avicennia*, localização: Rio Gurupi em direção a Carutapeira-Ma

#### 5.4.4.1.3 Planície de maré arenosa

Constitui o leito dos estuários e apresenta-se parcialmente exposto durante a maré baixa. São extensos depósitos que margeiam as unidades de planície de maré lamosa (Figura 5.25), paleoduna, praia de macromaré, falésias do Planalto Costeiro, integrando a zona de intermaré e inframaré.

Apresenta coloração branca azulada devido a alta reflectância na banda 3,4 e 5 em contraste com a resposta da água na imagem Landsat-7. Para o

RADARSAT-1 a resposta é em tom de cinza claro, levemente rugosa.

Na imagem fusionada SPC/SAR a resposta integrada fornece informações em destaque desse ambiente costeiro de coloração vermelho rugoso.

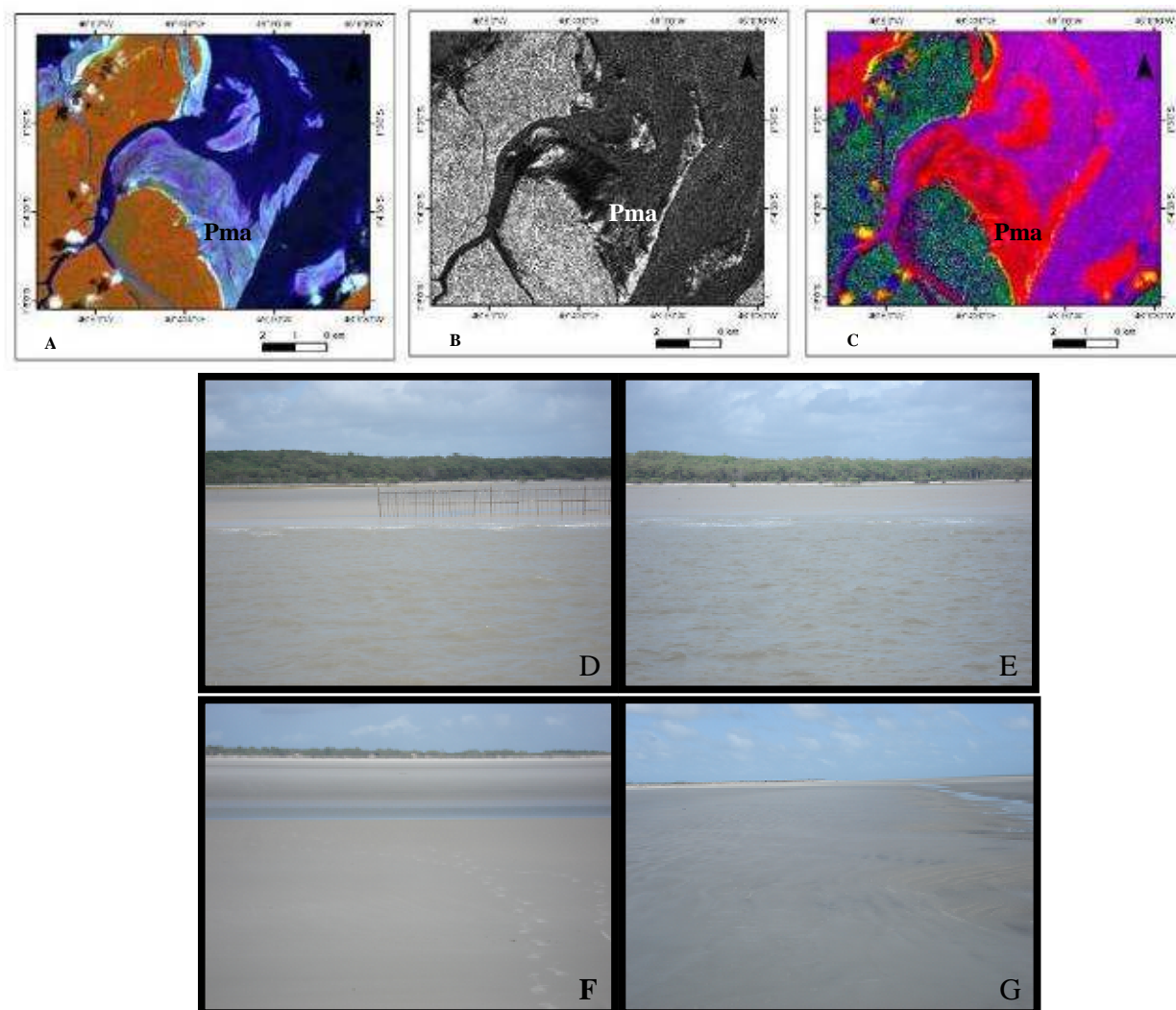


Figura 5.25 - Planície de maré arenosa (Pma) (A) Landsat-7; (B) RADARSAT-1jan/2003; (C) produto híbrido SAR/SPC - fotos (D) e (E) ao sul da “pedra do Gurupi”, a 20km do Porto do Gurupí e a 6km da vila do Rabo de Rato; (F) e (G) Ilha de Apeú Salvador.

#### 5.4.4.2 Lagos

Estão relacionados aos corpos isolados hídricos localizados nos pântanos de água doce, abastecidos por águas pluviais, e identificados em trabalho de campo, este ambiente não foi representado no mapa gerado devido não aparecer na escala utilizada.

O mesmo ambiente estudado por Teixeira (2006) na região maranhense, foi identificado através do retroespalhamento da água na imagem do Radarsat-1 de Fevereiro de 2003, sendo este não observado em Janeiro de 2003 do mesmo estudo, o que corrobora que este ambiente é controlado pela precipitação.

#### 5.4.4.3 Pântano de Água Doce

É periodicamente inundado durante as épocas de grandes chuvas, apresentando lagos fluviais e sendo bordejada pelo planalto costeiro.

A resposta espectral para este ambiente é cinza em função das bandas 3 e 5 com uma alta refletância nas mesmas. O RADARSAT-1 mostra tons de cinza claro e cinza escuro, variando com a quantidade de umidade na área, há uma alta rugosidade devido, em sua superfície, apresentar uma vegetação de baixo porte.

A Foto (B) está associada à vegetação arbórea, enquanto que a Foto (A), está associada exclusivamente à vegetação de pequeno porte (gramíneas, juncos, ervas), tal como é observado nesta planície (Figura 5.26).

**Foto A**



**Foto B**



Figura 5.26.- Foto digital (A e B) Pântano de água doce próximo 10km da cidade de Aurizona-MA

#### 5.4.4.4 Pântanos salinos

Os pântanos estão situados na zona de supra-maré; a sedimentação é marcada pela deposição da lama carregada pelos fluxos de maré ao longo dos córregos (Souza Filho & EL-Robrini 1996). São subdivididos em pântanos salinos internos e externos. O pântano salino interno ocorre sob os manguezais e é inundado somente durante a estação chuvosa (Figura 5.27 e 5.28) e as águas da maré influenciam seus córregos somente durante a estação seca. O pântano salino exterior ocorre sobre depósitos velhos do cume da praia arenosa ao longo da planície de maré lamosa. Os pântanos externos são constituídos por lama maciça, mas é possível observar as lentes finas da areia intercaladas pela lama que caracterizam um acamamento lenticular simples.

Na área visitada (Figura 5.28), foi possível visualizar cristais de sal, localizados também nas folhas da vegetação dominante (agirú e cajueiro).

Na imagem Landsat-7 com composição 4R 5G 3B, o ambiente costeiro estudado apresenta coloração ciano devido a cobertura de campo com a areia descoberta representadas pelas bandas 5 e 3. Para o RADARSAT-1 é possível visualizar o pântano salino com uma coloração cinza escuro contrastando com os ambientes adjacentes observados na imagem.

No produto SAR/SPC a resposta é boa, apresentando coloração alaranjada mostrando um bom contraste com o Manguezal.

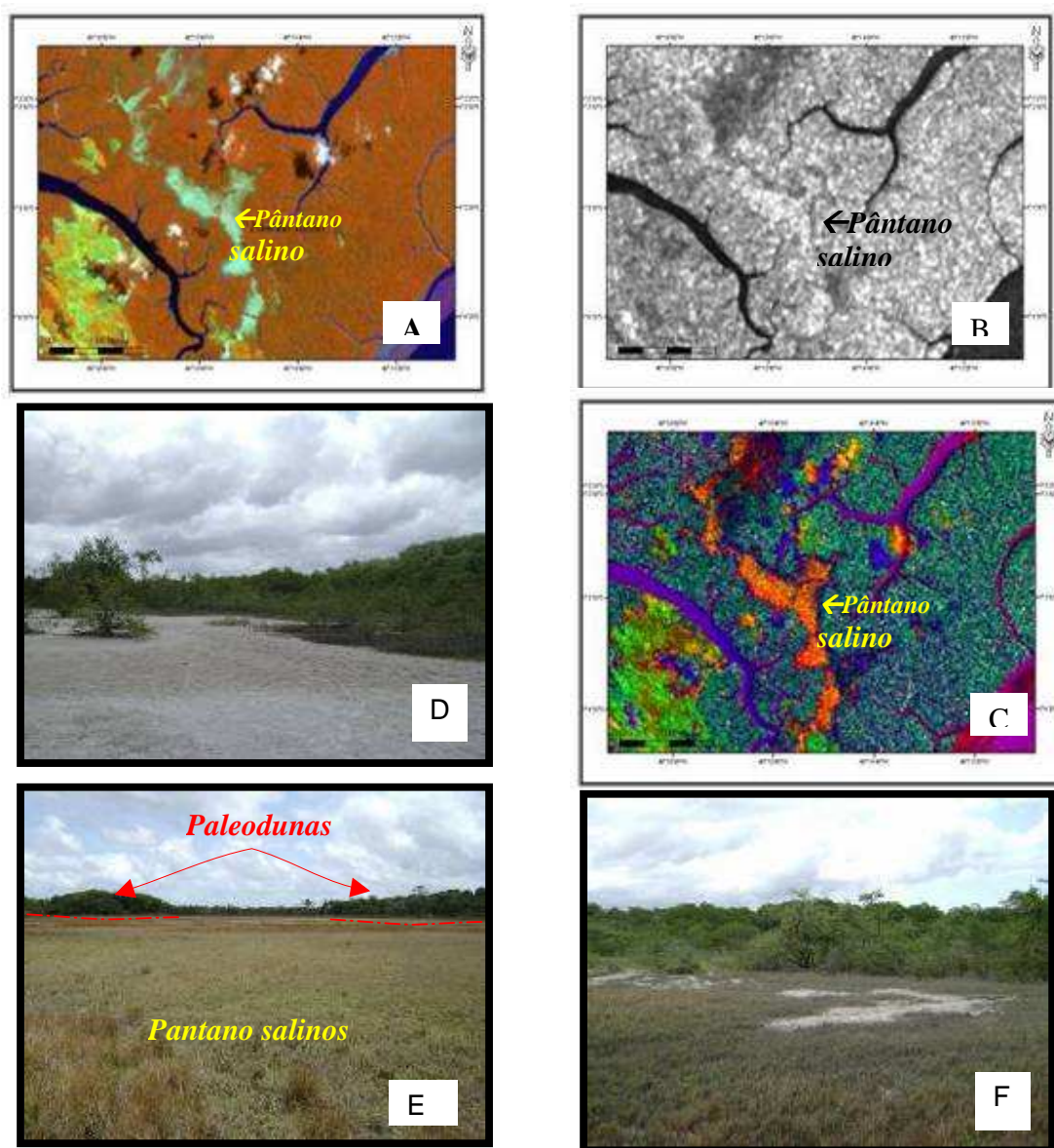


Figura 5.27 - Pântano salino exterior próximo ao povoado de GIZ a 10 km de Fernandes Belo- PA (A) Imagem Landsat- 7 composição 4R 5G 3B (B) RADARSAT-1 passagem 17/10/2004 e (C) produto híbrido SAR/SPC. (D), (E) fotos digitais de campos salinos da margem esquerda da estrada, sentido Fernandes Belo- PA e (F) Pântanos salinos, margem direita sentido Fernandes Belo - PA

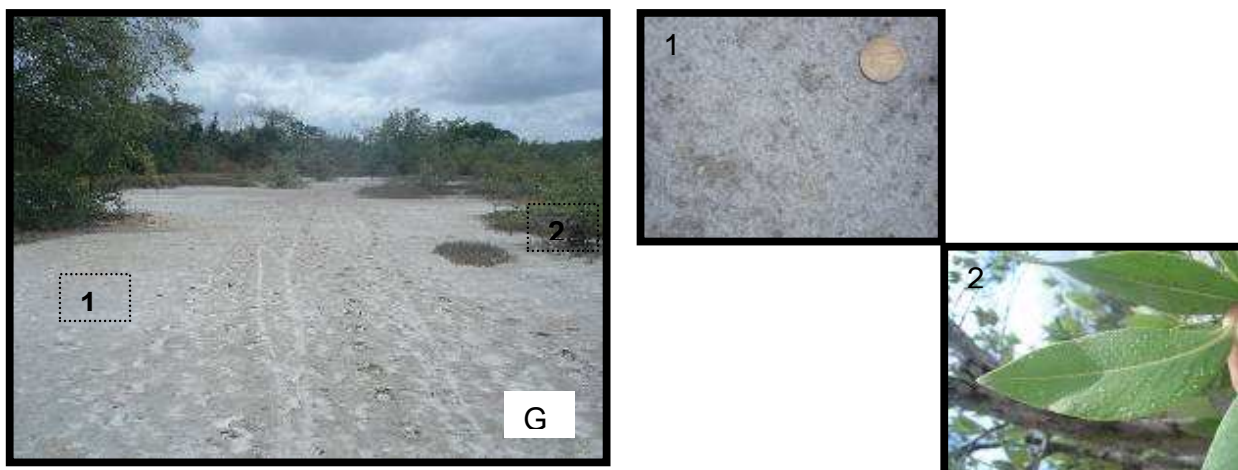


Figura 5.28 -(G) foto digital do campo salino da margem esquerda da estrada, sentido Fernandes Belo-PA e (1) zoom mostrando cristais de sal no campo e (2) cristais de sal nas folhas da vegetação do campo (agirú).

#### 5.4.4.5 Paleodunas

São constituídas por areia fina branca coberta pela vegetação regional (ex agirú, cajueiro). O campo de paleoduna (Figura 5.29) localizado no povoado de GIZ e presente ao longo da área em estudo tem um formato linear e curvado geométrico muito bem caracterizado cujo limite é marcado pela progradação das lamas de maré. As análises dos dados dos tubos de pvc coletados com amostras forneceram classificações de areia variando de areia fina a muito fina e de pobremente a bem selecionada. Nas imagens Landsat-7 percebe-se alta reflectância nas bandas 5 e 4 apresentando uma coloração esverdeada levemente laranja. Na imagem do RADARSAT-1 apresenta uma textura rugosa com tons de cinza médios. No produto SAR/SPC é possível perceber coloração esverdeada devido a grande influencia da cobertura vegetal e pontos laranjados, representando partes descobertas.

As paleodunas identificadas em trabalhos ao logo do litoral maranhense por Teixeira (2006), destacam formas alongadas paralelas, em que nas imagens ópticas são observados coloração branco esverdeado, em virtude da mistura dos sedimentos com a cobertura vegetal, assim como tons de cinza escuro nas imagens de microondas devido ao espalhamento volumétrico, causado pela

presença da vegetação. Estes dados são similares aos encontrados nesta dissertação, assim como em Boulhosa (2006) e em Rodrigues (2006).

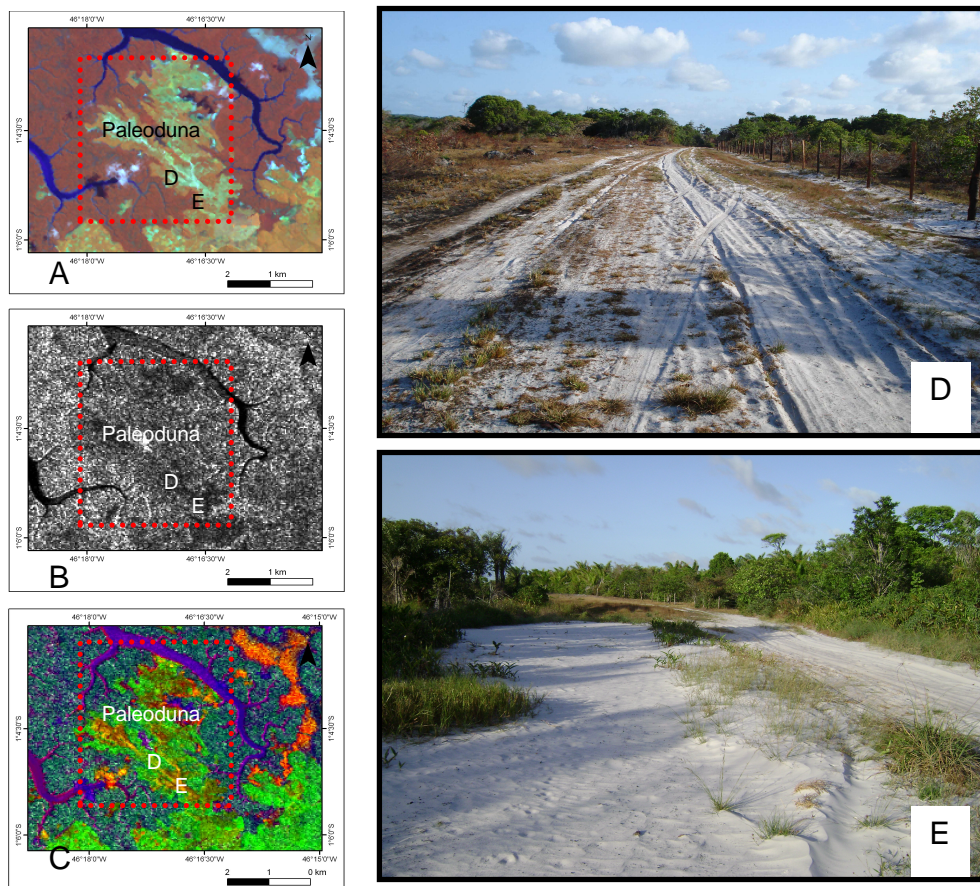


Figura 5.29 – Paleoduna do povoado de Giz, Pará (A) Imagem Landsat-7, Composição colorida 4R 5G 3B, (B) Radarsat-1 (17/09/2004), (C) Imagem fusionada SPC/SAR, (D) e (E) estrada de acesso ao povoado de GIZ.

#### 5.4.4.6 Cordão de dunas frontais

Formados por deposição eólica de areia na vegetação pós-praia desenvolvem barreiras relativamente retilíneas com cordões paralelos à linha de praia, assim como em Hesp *et al* (2005), apresentam espaçamentos que variam de 30 a 50m em toda a sua extensão, e alturas que variam de 5 a 15m, formam rastros lineares, depressões interdunares e montes residuais (Figura 5.30 e Figura 5.31), presentes principalmente no povoado de Camaraçu, Serrambi e Apeú Salvador.

#### 5.4.4.7 Interdunas

As interdunas possuem respostas espectrais semelhantes aos da planície de maré arenosa, apresentam coloração branca azulada devido a alta reflectancia da banda 3,4 e 5 em contraste com a resposta da água na imagem Landsat-7, sua distribuição lateral é mais restrita e abriga os sistemas de lagos em suas porções mais baixas de acordo com a figura 5.30 e da figura 5.32.

Este ambiente foi melhor identificado nas imagens Landsat -7 e no produto híbrido (Figura 30C) contrastando com resultados de Teixeira (2006) que obteve melhor resposta com imagens do SPOT para este ambiente em sua área de estudo composição HRV 3R 2G 1B, que aparece em tonalidades mais escuras que as demais, em função da absorção da radiação, pela matéria orgânica presente.

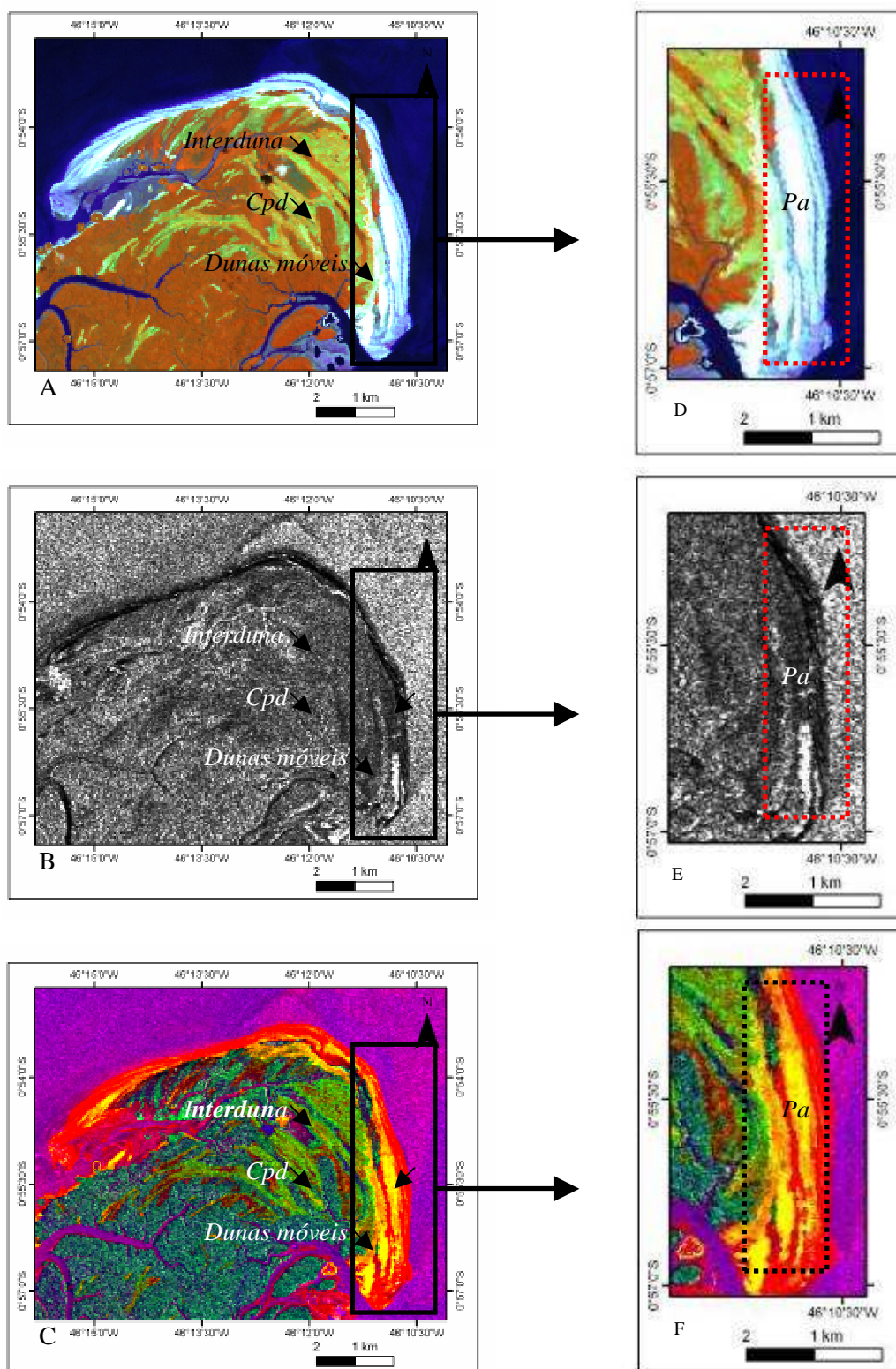


Figura 5.30 - Imagens (A e D) Landsat-7, (B e E) Radarsat-1 , out./2004 e (C e F) Produto híbrido SAR/SPC. Legenda: Cpf - cordão de dunas frontais ; Pa- Praia de macromaré

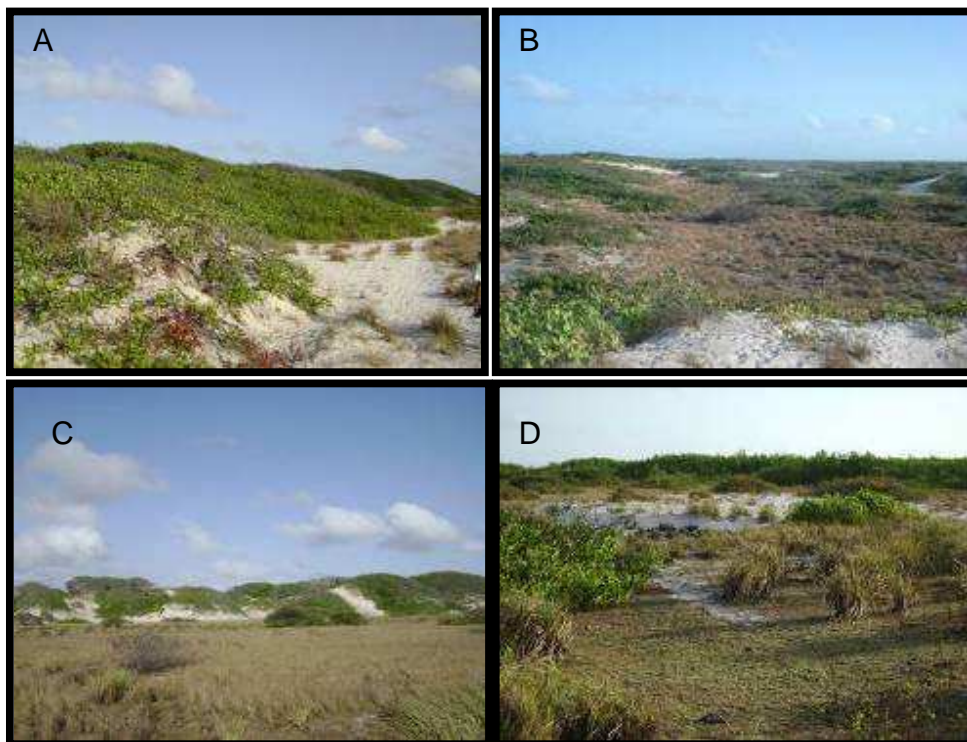


Figura 5.31 - (A) e (B) Cordão de dunas frontais (NW) na ilha de Apeú Salvador, Pará e (C) e (D) NE da ilha de Apeú Salvador



Figura 5.32 - (A) e (B)- Interdunas (NE) na ilha de Apeú Salvador (C) Interdunas (NW) na ilha de Apeú Salvador,(D) após o campo de paleo-dunas.

#### 5.4.4.8 Dunas móveis

As dunas móveis distribuem-se como um cordão contínuo disposto paralelamente à linha de costa. São formações resultantes da acumulação de sedimentos removidos da praia por processos eólicos em direção ao continente (Figura 5.30 e 5.33).

Está representada pela cor verde clara devido a alta reflectancia na banda 5, causada pela presença de depósitos arenosos bem selecionados secos e brancos encontrados nas dunas. É observada ao longo da costa, na Ilha de Apeú Salvador, Serrambi e Camaraçu no Pará, ela está associada as praias de macro-maré.

A resposta do RADARSAT-1 é uma superfície em tom de cinza presente em pequena superfície devido à presença de sedimentos arenosos. A resposta da fusão SAR/SPC é uma coloração amarelada com grade resposta e contraste.

Foram coletadas duas amostras representativas deste ambiente (areia finas bem selecionadas), sendo a análise baseada na interpretação de Folk & Ward (1957).

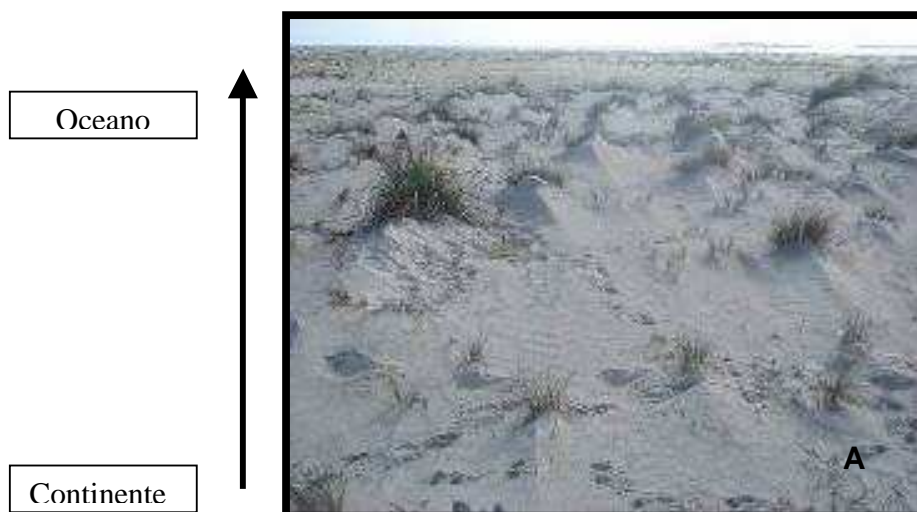


Figura 5.33 - (A) dunas móveis, ilha Apeú Salvador

#### 5.4.4.9 Praia de macro-maré

Esta unidade encontra-se limitada internamente por Planície de Maré Lamosa, Dunas móveis, Cordão de dunas frontais, e externamente, pela Planície de Maré Arenosa. Este ambiente é muito citado em trabalhos ao longo do litoral amapaense e maranhense como os de e Baptista (2005) e Teixeira (2006).

A cor correspondente à imagem estudada é branca (composição 4R 5G 3B) devido a alta resposta espectral na banda 3, 4 e 5 em consequência da presença de depósitos arenosos, quartzozos, bem selecionados secos e brancos encontrados nas praias. A resposta RADARSAT-1 é parecida com as relacionadas a ambientes arenosos, tons de cinza escuro e uma textura lisa (Figura 5.34).

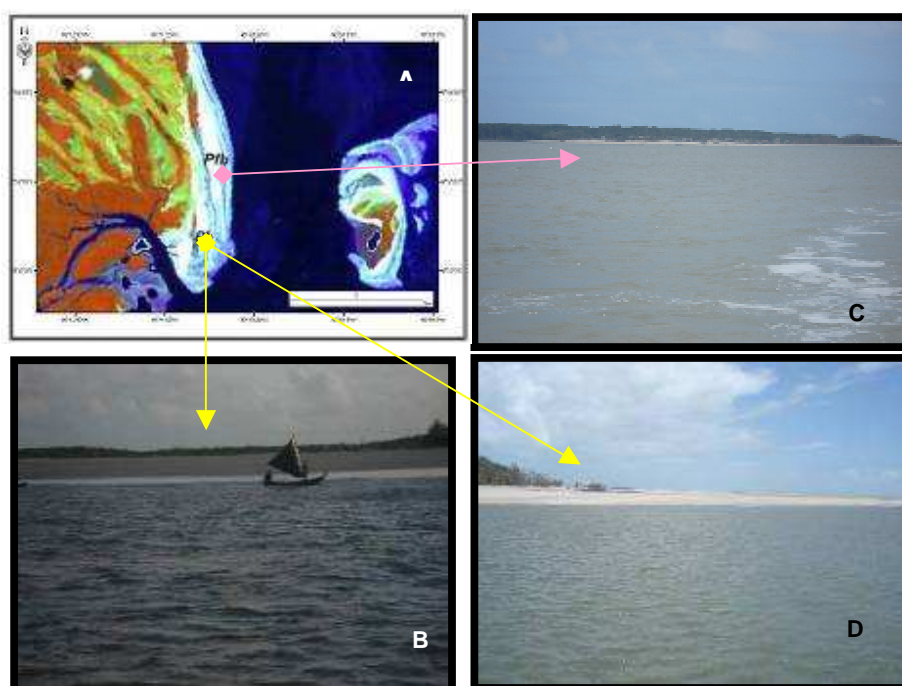


Figura 5.34- (A) imagem Landsat-7 composição 4R 5G 3B; (B), (C) e(D) fotos da praia arenosa, localizada na ilha Apeú Salvador.

#### 5.4.5 Sistemas Antropogênicos

Os sistemas Antropogênicos estão inferidos na área como construções: cidades, aeroportos e minas construídas (como na cidade de Aurizona - Ma).

#### 5.4.5.1 Área construída

São caracterizadas pelas áreas urbanas (cidades) ao longo da área de estudo que se localizam na costa, como nas cidades do estado do Pará: Bragança, Augusto Correa, Itapixuna, Fernandes Belo, e cidades do Maranhão: Viseu, Boa vista do Gurupi, Carutapera, Luis Domingues, Aurizona e Cândido Mendes.

A resposta espectral para estas áreas é identificada pela coloração esbranquiçada ou até mesmo levemente amareladas, e no RADARSAT-1 apresentam tons mais claros de cinza devido ao efeito de reflexão de canto (Figura 5.35).

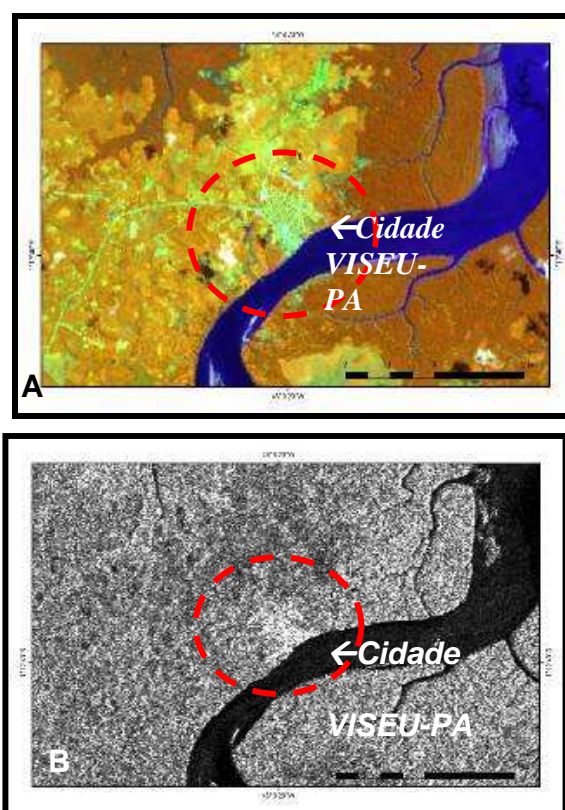


Figura 5.35 - Circunferência apontando para a cidade de Viseu - Pa (A) imagem Landsat-7 composição 4R 5G 3B; (B) Imagem RADARSAT-1 (17/10/04)

## 5.5 MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIROS

Os produtos da composição colorida 4R 5G 3B, RADARSAT-1 e SRTM delimitaram a interface Manguezal/ Planalto costeiro e Pântanos salinos, e juntamente com estes foi elaborado um mapa (Figura 5.37) de ambientes costeiros reconhecidos com este processamento, juntamente com uma tabela 5.11 com a composição, textura e detalhes dos ambientes costeiros reconhecidos nas imagens processadas.

Abaixo figura 5.36 com as contribuições de sensores e sinergismo para o reconhecimento de ambientes costeiros.

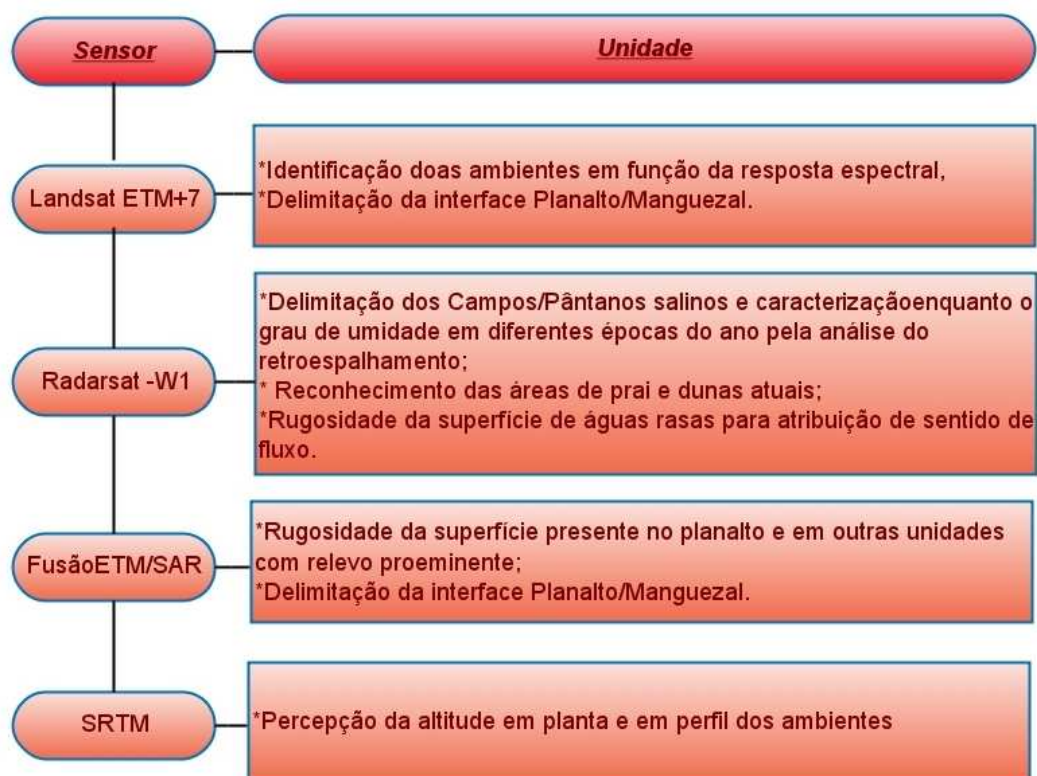


Figura 5.36 - Contribuição de diferentes sensores para o reconhecimento de ambientes costeiros modificada de Boulhosa (2006)

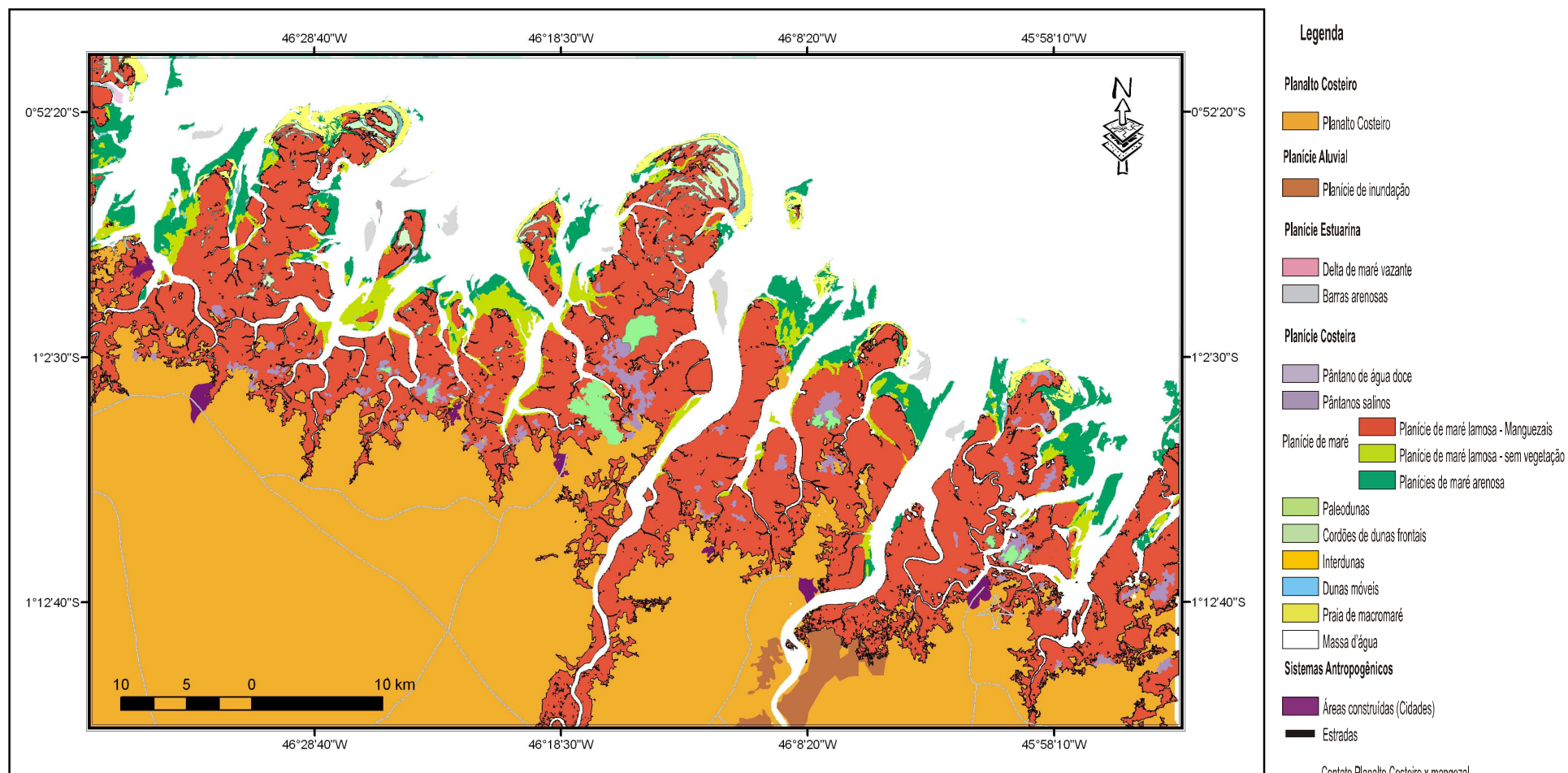


Figura 5.37 - Mapa dos ambientes sedimentares costeiros gerado a partir da edição da classificação automática e da identificação visual.

Tabela 5.11- característica dos ambientes costeiros mapeados

<b>Ambientes costeiros</b>	<b>Morfologia</b>	<b>Imagem Landsat 7 composição 453 RGB</b>	<b>Características das imagens RADARSAT-1(jan./2003 e out./2004)</b>
Planalto costeiro	Colinas amplas do embasamento da planície costeira(Fm Barreiras, Gurupi)	Tons de laranja	Superfície rugosa com tons de cinza claro
Planície Aluvial			
Planície de inundação Fluvial	Áreas baixas planas que ocorrem bordejando os cursos d'água	Tons de laranja	Superfície lisa com tons de cinza escuro
Planície Estuarina			
Canal estuarino	Canais com processos de acreção e erosão das margens	Tons em azul escuro	Superfície lisa com tons escuros
Delta de maré vazante	Área plana, observada na maré baixa, na desembocadura de alguns canais estuarinos.	----	Superfície intermediária com tons claros
Barras arenosas	Desenvolvidas na foz dos canais de maré de baías	Branco com tons azulados	Superfície rugosa com tons de cinza escuro
Planície de maré lamosa (sem/pouca vegetação)	Área baixa e plana recoberta pela maré alta, bordejando áreas com mangue.	Tons de marrom claro	Superfície lisa com tons de cinza claro
Manguezal	Planície lamosa que sofre a influencia de marés, e processos estuarinos.	Tons de marrom escuro	Superfície muito rugosa com tons de cinza claro
Planície de maré arenosa	Bordeja as dunas móveis costeiras, possui forma (spit)	Tons de ciano	Superfície rugosa com tons de cinza médios
Pântanos salinos	Pântanos situados na zona de maré alta, ocorrem sob o manguezal, sendo inundados periodicamente por águas salobras.	Tons em verde claro	Superfície levemente rugosa com tons de cinza claro/escuro
Pântanos de água doce	Região baixa alagada pelos estuários, ex.: Rio Piriá	Tons de cinza	Superfície lisa com tons de escuros de cinza
Planície Costeira			
Paleoduna	Formas irregulares, alongadas paralelas a linha de costa	Tons de verde	Superfície rugosa com tons de cinza escuro
Cordão de dunas frontais	Superfície ondulada, às vezes dissecada com bordas abruptas.	Tons de verde esbranquiçado	Superfície rugosa com tons de cinza escuro
Interdunas	Área plana com presença de canais, descampada, localizada entre dunas	-----	-----
Dunas móveis	Corpos de areia transversais presentes na costa	Branco	Superfície rugosa com tons claros
Praia de macromaré	Praia na forma reta estirada, localizada na ilha de Apeú Salvador e Ilha do Peru	Branco	-----

Nos últimos anos, o litoral do norte do Brasil vem sendo mapeado com a utilização de dados de imagens de Satélites como o Landsat ETM+7 e TM 5, CBERS, SPOT, RADARSAT-1 e SRTM, passando por processamentos e gerando produtos de boa qualidade. Souza Filho *et al* (1996), Souza Filho (2000, 2001), Souza Filho & Paradella (2002, 2005), Baptista *et al* (2005), Boulhosa (2006), Teixeira (2006) e Rodrigues (2006) mapearam e reconheceram diversos desses ambientes, contribuindo com a correlação destes com o da área em estudo.

Souza Filho *et al* (1996), Souza Filho (2000,2001) e Souza Filho & Paradella (2002, 2005) mapearam a zona Bragantina e destacaram diversos ambientes, além de tratar da evolução e sedimentologia da área, aplicando várias técnicas de sensoriamento remoto como: ortorretificação, correção atmosférica, realce, entre outros, assim como os descritos nesta dissertação. Inserido no contexto da bacia costeira de Bragança-Viseu, observou-se nos seus trabalhos os seguintes ambientes: Planície Costeira de Bragança, cujas características geomorfológicas permitiram sua subdivisão em três compartimentos distintos: (1) planície aluvial, com canal fluvial, diques marginais e planície de inundação; (2) planície estuarina, com um canal estuarino subdividido em funil estuarino, segmento reto, segmento meandrante e canal de curso superior, canal de maré e planície de inundação e; (3) planície costeira, com os ambientes de pântanos salinos (interno e externo), planície de maré (manguezais de supramaré, manguezais de intermaré e planície arenosa com baixios de maré), cheniers, dunas costeiras e praias que contribuíram para o entendimento de muitos dos ambientes deste trabalho.

Baptista *et al* (2005) mapearam parte do litoral amapaense utilizando o sinergismo de Imagens Landsat TM (5R 4G 3B) com o SRTM, obtendo um bom resultado, principalmente em relação à planície de maré lamosa muito freqüente na área, este pôde ser relacionado a fusão da Imagem Landsat -7 composição 4R 5G 3B com o SRTM desta dissertação além de ressaltar o contato planalto costeiro com o Manguezal, muito bem delimitado.

Boulhosa (2006) fez o reconhecimento de ambientes em salinópolis-Pará, percebe-se nesta área em relação as demais a menor extensão da planície de maré lamosa, os produtos obtidos por esta autora, são semelhantes aos desta dissertação, mas devido a área ser menor, a correlação ficou restrita a uns poucos

ambientes como planalto costeiro, planície de maré lamosa, dunas costeiras e planície de inundação.

Rodrigues (2006) mapeou os ambientes ao longo do estuário do Rio Marapanim (Pará) utilizando-se de imagem Landsat-7, Radarsat-1 e SRTM, com isso obteve um produto fusionado do Landsat com o Radarsat-1, gerando uma boa resposta para os ambientes ao longo do estuário, mas que se diferencia do produto SPC/SAR obtido por esta dissertação, pois as imagens do Landsat-7 foram primeiramente classificadas, gerando um produto PC (principal componente) e posteriormente foi fusionado com as imagens do Radarsat-1, fornecendo um produto ainda melhor para interpretação.

Teixeira (2006) mapeando o noroeste do maranhão, obteve bons resultados com o processamento de imagens Landsat TM, CBERS, SPOT e RADARSA-1, pôde-se perceber com as interdunas o bom destaque que a imagem SPOT forneceu em relação as demais imagens, o contraste gerado identificou-as devido a interação com a matéria orgânica presente, mas em compensação este não delimitou muito bem a planície de maré lamosa em relação a imagem do Landsat.

Assim, os ambientes costeiros mapeados nesta dissertação através dos sensores ópticos e microondas ao longo de parte do litoral paraense e maranhense contribuíram com o preenchimento da lacuna que havia entre a Baía do Emboraí a Baía de Maracaçumé, trazendo assim, mais informações para um possível mapeamento total da costa norte e nordeste do Brasil.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A envidação de informações de imagens de sensores ópticos (Landsat -7 ETM+) e microondas (RADARSAT-1), além de dados do modelo digital de elevação (DEM), propiciaram um bom aproveitamento para o monitoramento e reconhecimento dos ambientes costeiros da área em estudo.

Foi possível perceber que tanto a análise das imagens de sensores individualmente, quanto à análise dos produtos híbridos (sinergismo) contribuiu para um melhor reconhecimento e delimitação destes ambientes.

Para as imagens do sensor óptico (Landsat-7 ETM+), pôde-se notar uma evidente distinção das diversas feições dos ambientes costeiros, mas a limitação técnica do sensor para aquisição de imagens em condições atmosféricas adversas dadas a grande cobertura de nuvens na região durante o período chuvoso (dezembro a abril), não permitiu a identificação de algumas poucas feições costeiras no extremo leste da área estudada, sendo este fator solucionado com a integração do sensor de microondas usado posteriormente.

As imagens RADARSAT-1 foram de grande valia em relação à contribuição de informações direcionadas a discrepância da altura da vegetação costeira, geometria dos ambientes estudados e as diferenças nas características relacionadas ao período chuvoso e seco, perceptíveis nas imagens SAR de janeiro/fevereiro de 2003 e de setembro / outubro de 2004. A análise digital possibilitou a exploração dos dados de radar em sua tonalidade, objetivando quantificar os efeitos de técnicas de realce quanto à contribuição na extração de informações. Portanto para este estudo a análise independente e fusionada foi bastante produtiva.

A utilização da técnica de integração de dados multisensores permitiu maximizar a extração de informações, usando do sinergismo obtido com a imagem híbrida gerada, para se obter uma melhor identificação e mapeamento dos ambientes costeiros. A técnica por transformação IHS - RGB forneceu os produtos SRTM/ETM+, SAR/ETM+ e o SAR/SPC, mas os que ajudaram na produção do mapa final foram: o SRTM/ETM que melhor individualizou o contato Planalto costeiro e Manguezal e o SAR/SPC que mostrou bons resultados para o mapeamento da região, permitindo uma melhor variação nos padrões de cores e

texturas, facilitando a interpretação dos ambientes. Dessa forma, este foi o segundo produto que mais forneceu valor agregado para interpretação e mapeamento dos ambientes.

A técnica de classificação automática não supervisionada contribuiu com o bom desempenho para a classificação dos ambientes costeiros devido este ser um método rápido e eficaz. Os produtos desta técnica que apresentaram o índice *kappa* muito bom, foram as imagens Landsat -7 (bandas 1,2,3,4,5 e 7), nas quais foram classificados nove feições/ambientes costeiros (planalto costeiro, planície de inundação, planície de maré lamosa- sem/pouca vegetação, planície de maré lamosa-manguezal, planície de maré arenosa, paleodunas, cordões de dunas frontais, dunas móveis e praia de macro-maré) além de classificar as massas d'água com materiais em suspensão e massas d'água sem materiais em suspensão; e o produto híbrido SAR/SPC, nas quais foram classificados seis feições/ambientes costeiros (planalto costeiro, planície de inundação, planície de maré, manguezal, paleodunas, cordões de dunas frontais e praia de macromaré), além da massa d'água.

Contudo, a interpretação visual contribuiu com o reconhecimento de um maior número de feições dos ambientes costeiros estudados, em que alguns destes não foram diferenciados nas técnicas de classificação automática, em consequência das respostas espectrais semelhantes de ambientes distintos.

Destarte, através de todos os processamentos efetuados nas imagens estudadas dos sensores ópticos, microondas e SRTM foi possível reconhecer vinte feições/ambientes costeiros, sendo quatro feições morfológicas e uma antrópica que foram agrupados em: Planalto Costeiro, paleodunas; Planície Aluvial (planície de inundação); Planície Estuarina (canal estuarino, funil estuarino, barra arenosa de maré, segmento retilíneo, segmento meandrante sinuoso, segmento de curso superior, lagos e delta de maré vazante); Planície Costeira (planície de maré lamosa - sem/pouca vegetação, Planície de maré lamosa - manguezal, planície de maré arenosa, pântanos salinos, pântanos de água doce, cordão de dunas frontais, dunas móveis, praia de macro-maré) e Sistema Antropogênico (área construída).

Assim, o emprego dos dados de sensores remotos orbitais usados permitiram a produção de mapas atualizados na escala de 1:50.000, com maior rapidez, acurácia e menor custo. Além disso, a visão sinóptica obtida com esses sensores possibilitou a análise das relações espaciais integradas, permitindo o reconhecimento dos ambientes em campo e seu mapeamento a partir dos dados de sensores remotos e dados de campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, F.A.M.; VILLAS, R.N.N.; HASUI, Y., 1980. *Esboço estratigráfico do Precambriano da região do Gurupi, Estados do Pará e Maranhão*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camboriú. *Anais*. SBG, v.2., 647-658
- BATISTA, E. M.; SOUZA FILHO, P. W. M. SILVEIRA, O. F. M., 2005. *Fusão de dados SRTM com dados Landsat TM 5 para estudo geomorfológico: Região dos Cabos Orange e Cassiporé, Amapá*. In : XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. *Anais* . São José dos Campos: INPE, p. 1741-1743.
- BOULHOSA, M.B.M. 2006. *Fusão de dados Landsat ETM<sup>+</sup>, RADARSAT-1 e modelos numéricos de terreno para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo na costa de manguezais do nordeste do Pará*. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- BURROUGH, P.A. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, Clarendon Press. 193p.
- CCRS. Canada centre for Remote Sensing, Natural resource Canada. 2001Globe\_Sar. Recursos educacionais para sensoriamento remoto de radar. Windows/98/xp. CD- ROM.
- CHAVEZ JR., J.P., Berlin, G.L., Sowers, L. B. 1982. *Statistical method for selecting Landsat MSS ratios*. Journal of Applied Photographic Engineering, 8: 23-30
- CHAVEZ JR., J. P., Kwarteng, A.Y. 1994 *Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. LV (3): 339-348.
- COSTA, J.L.; ALMEIDA, H.G.G.; RICCI, P.S.F. 1996a. *Metamorfismo e divisão tectono-estratigráfica do Grupo Gurupi no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão*: In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5, Belém, *Boletim de resumos expandidos...* SBG, p. 110-112
- COSTA, J.B.S.; BEMERGUY, R.L.; HASUI, Y.; BORGES, M. S.; FERREIRA JÚNIOR, C.R.P.; BEZERRA, P. E.; COSTA, M.L.; FERNANDES, J.M.G. 1996. *Neotectônica da Região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais*. GEONOMOS, Revista de Geociências, Belo Horizonte, 4(2):23-44.
- CRÓSTA, P. A. 1992. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas: IG/UNICAM, 170p

- CUNHA, E.S.P. 2002. *Integração Digital de Dados de Radar, Geológicos, TM Landsat e Geofísicos Aerogamaespectrométricos no Mapeamento Geológico da Região do Complexo Granítico Estrela (PA)*. Dissertação de Mestrado em SR (INPE), 132p
- 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. 161p (Dissertação de Mestrado).
- ENGESAT - Solução em Imagens de Satélite, pesquisa sobre o sensor Landsat, pesquisado no dia 15 de março de 2006. Disponível no site <http://www.engesat.com.br/satelites/landsat7.htm>
- ENGESAT - Solução em Imagens de Satélite, pesquisa sobre o sensor Landsat pesquisado no dia 15 de março de 2006 disponível no site <http://www.engesat.com.br/satelites/landsat5.htm>
- ENGESAT - Solução em Imagens de Satélite, pesquisa sobre Os tipos de imageamento de RADARSAT-1, pesquisado no dia 15 de março de 2006. Disponível no site: [http://www.engesat.com.br/satelites/rada\\_didatic2.htm](http://www.engesat.com.br/satelites/rada_didatic2.htm)
- FERNANDES, Carlos Marcelo Dias. 2005. *Geologia, geoquímica e geocronologia das vulcânicas do grupo Uatumã, região de São Félix do Xingu (PA), província mineral de Carajás*. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- FERREIRA Jr., C.R.P. 1996. *Neotectônica na Bacia de São Luís*. Belém: CG/UFPA. Dissertação (Dissertação de Mestrado).
- 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.
- HARRIS, J. R. 1991. *Mapping of regional Structure of Eastern Nova Scotia Using Remotely Sensed Imagery: Implications for Regional Tectonics and Gold Exploration*, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 17 (2): 122-135.
- HARRIS, J.R.; BOWIE, C.; RENEZ, A.N.; GRAHAM, D. 1994. *Computer-enhancement techniques for integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for geosciences*. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20: 210-221.
- HESP, P. A., DILLENBURG, S.R., BARBOZA, E. G., TOMAZELLI, L. J., AYUP-ZOUAIN, R. N., ESTEVES, L. S., GRUBER, N. L.S., TOLDO-Jr., E. E., TABAJARA, L. L.C. DE A., CLEROT, L.C.P. 2005. *Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 77(3): 493-508.

- INMET. 2007. *Tábuas de maré*. Disponível em: <http://www.dhn.mar.mil.br/chm/tabuas>> Acesso em: 25 março de 2007.
- 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)
- KJERVE, B.; L. D. 1993. Lacerda; C. E. Rezende & A. R. C. Ovalle. *Hydrological and hydrogeochemical variations in mangroves ecosystems*. In: *Mangrove ecosystems in Tropical America: Structure, function and management*. A. Yáñez-Arancibia & J. W. Day (Eds.). p.36-74. México: EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche.
- KLEIN E.L. 2004. *Evolução crustal pré-cambriana e aspectos da metalogênese do ouro do Cráton São Luis e do Cinturão Gurupi, NE-Pará / NW-Maranhão, Brasil*. Tese de Doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 303 p.
- MENDES, A C. SILVA, M.S. & FARIA Jr.; L.E.C – 1997 – *Diagnóstico Geoambiental da Ilha do Atalaia, Salinópolis-PA*. Congresso da Associação Brasileira de estudos do Quaternário, V. Livro de Resumos Expandidos. Curitiba/PR. P. 135-138.
- MONTES, M. L. (coord).1997. *Zoneamento Geoambiental do Estado do Maranhão*. IBGE, Salvador.
- PCI - *Manual PCI FONSECA, A.L.B Geomatica, PCI Geomatics, Version 9.1*, 50 West , Toronto, 2005 p. 200.
- PARADELLA, W.R.; Santos, A. R.; Veneziani, P.; Morais, M.C. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 538-542, 2000
- PASTANA, J. M. N. (1995) Programa Grande Carajás. Turiaçu/Pinheiro, folhas SA.23-V-D/SA.23-Y-B : Estado do Pará e Maranhão. Brasília, CPRM, 205p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil)
- POHL, C. 1998. Tools and methods used in data fusion. In: GUNDMANDSEN, P. (ed.). *Future trends in Remote Sensing*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. p. 391-399.
- PROST, M.T. et al. 2001 – *Manguezais e estuários da costa paraense: exemplo de estudo multidisciplinar integrado* (Marapanim e São Caetano de Odivelas). In: *Ecossistemas Costeiros: Impactos e Gestão Ambiental*. PROST. M.T. & MENDES, A C (Orgs.). Museu Paraense Emílio Goeldi. 215p.

- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; and BAMLER, R. 2003. *The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4):241-262
- REIS, F. G. Apostila RADAR – *Fundamentos da navegação eletrônica*. Universidade estadual de Campinas-UNICAMP. 2003 (ssp.)
- RODRIGUES, S.W.P 2006. *Análise de imagens a partir do sinergismo e interpretação de dados de sensores remotos orbitais RADARSAT-1 e Landsat TM e ETM+ 7 para mapeamento geomorfológico dos ambientes costeiros a nordeste do Pará*, UFPA, Belém. Monografia (Trabalho de conclusão de curso).
- ROSSETTI, D. F. 2006. *Evolução Sedimentar Miocênica Nos Estados Do Pará E Maranhão*. Geologia USP. Série Científica, São Paulo, v. 6, p. 7-18.
- 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*. *Brazilian Journal of Geophysics*. 19 (2): 113-130.
- ROSSETTI, D.F., 2000. *Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil*. *Sedimentary Geology*, 133:295-324.
- 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).
- 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):
- SOUZA FILHO P. W. M. and EL-ROBRINI M. 1996. *Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfosedimentares da Planície Costeira Bragantina - Nordeste do Pará (Brasil)*. *Geonomos*, 4:1-16.
- 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. Centro de Geociências. 219p. (Tese de Doutorado).
- SOUZA FILHO, P.W.M. 2001. *Estudos da geomorfologia de ambientes costeiros tropicais úmidos a partir de imagens de sensores remotos*. *Revista Pesquisas*, 28(2):359-368

- SOUZA FILHO, P.W.M.; PARADELLA, W.R. 2002. *Recognition of the main geobotanical features in the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM e RADARSAT-1 data*. *Wetlands Ecology and Management*, Netherlands, 10(2):123-132
- 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*, Anorage, Alaska. *Proceedings...* Anorage: 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*. Belém. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências Naturais*. 1 (1) 201 – 207.
- SOUZA FILHO, P.W.M.; PARADELLA, W.R. 2005. *Use of RADARSAT-1 fine mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region*. *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 31, No. 3, pp. 214–224,
- 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.*, UFPA, Belém. (Dissertação de Mestrado).
- 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.
- UMIACS - University of Maryland Institute for Advanced Computer Studies- acesso as imagens landsat Tm e ETM+ em 20 de abril 2006, disponível no site: <http://www.umiacs.umd.edu/>
- USGS - United States Geological Survey – pesquisa sobre o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) em 15 de março de 2005, disponível no site: <http://edc.usgs.gov/products/elevation/srtm/edc.html#description>
- VELOSO, H. P.; Rangel Filho, A. L. & Lima, J. C. A. 1991. *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. IBGE, Rio de Janeiro.
- WALD, L. 1998. *An Overview of concepts in fusion of Earth data*. In: GUNDMANDSEN, P. (ed.). *Future trends in Remote Sensing*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. p. 385-390.

WOODROFFE C. D., CHAPPELL J., THOM B.G., WALLENSKY E. 1989. *Depositional models of a macrotidal estuary and flood plain, South Alligator River, Northern Australia*. *Sedimentology*, 36: 737-756.

ZAITLIN, B.A.; DALRYMPLE, R.W.; BOYD, R.; LECKIE, D. *The Stratigraphic Organization of Incised Valley Systems: Implications to Hydrocarbon Exploration and Production- with Examples from the Western Canada Sedimentary Basin*. Canadian Society of Petroleum Geology, Calgary, 260 p., 1994.