



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**USO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA  
IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DO PALEODELTA DO  
MACARRY, AMAPÁ**

**Dissertação apresentada por:**

**LAYSA DE OLIVEIRA SANTANA**

**Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)**

**Coorientação: Prof.<sup>a</sup> Odete Fátima Machado da Silveira (UFPA)**

---

**BELÉM  
2011**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

S232u Santana, Laysa de Oliveira  
    Uso de sensoriamento remoto para identificação e mapeamento do  
    paleodelta do Macarry, Amapá / Laysa de Oliveira Santana;  
    Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho; Coorientador: Odete  
    Fátima Machado da Silveira – 2011  
    xviii, 78 f. : il.

    Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-  
    Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências,  
    Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

    1. Sensoriamento remoto. 2. Mapeamento morfológico. 3.  
    Feições costeiras - Amapá. I. Souza Filho, Pedro Walfir Martins e,  
    *orient.* II. Silveira, Odete Fátima Machado da, *coorient.* III.  
    Universidade Federal do Pará. IV. Título.

    CDD 22. ed.: 621.3678098116

---



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

**USO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA  
IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DO PALEODELTA  
DO MACARRY, AMAPÁ**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR**

**LAYSA DE OLIVEIRA SANTANA**

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

**Data de Aprovação: 11/05/2011**

**Banca Examinadora:**

**Prof. PEDRO WALFIR MARTINS E SOUZA FILHO**  
**(Orientador-UFPA)**

**Prof. ALBERTO GARCIA DE FIGUEIREDO JÚNIOR**  
**(Membro-UFF)**

**Prof.ª CARMENA FERREIRA DE FRANÇA**  
**(Membro-UFPA)**

*À minha amada Marineude, que mesmo longe me dispôs  
conforto emocional e amor absoluto.*

## AGRADECIMENTOS

A vitória não é só minha. Muitos ajudaram nesta caminhada.

A Deus, nosso Pai, que governa nossos destinos e que me permitiu ter a oportunidade de trilhar o caminho da sabedoria e do aprendizado.

Marineude e Luiz, que tanto amo, obrigada pelo apoio incondicional em minhas decisões, por entender minha ausência devido ao tempo dedicado aos estudos e por somente ouvir quando precisei falar. Por acreditarem em minha capacidade e pela orientação no meu amadurecimento, pelo amor e compreensão, pelo auxílio e carinho dedicados.

Michele e Junior, grata pelos momentos de alegria quando me encontrava angustiada. Vocês acreditaram e torceram por mim. A saudade também me ajudou a evoluir.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará – CG/UFPA pela oportunidade e concessão de sua infra-estrutura.

Pela permissão de dedicação exclusiva ao desenvolvimento da dissertação, gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo consentimento da bolsa.

Pelo financiamento e suporte logístico às etapas de campo, reconhecimento ao Projeto *Integração de dados Geofísicos, Geológicos e Geoquímicos na Reconstituição da Paleogeografia da costa Amazônica do Terciário ao Recente* - AMASIS, ao Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA, ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA/AP, ao Corpo de Bombeiros Militar do Amapá - CBMAP e as fazendas São João e Macarry, de propriedade do Sr. Lúcio Nobre e Sr. Antônio Carlos Cambraia Pontes (Sr. Bronca), respectivamente.

Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho, gratidão pelo desenvolvimento profissional e orientação científica deste trabalho e, por acreditar, apoiar, confiar, investir e paciência para com sua orientanda.

Dr<sup>a</sup>. Odete Fátima Machado da Silveira, a você agradeço pela orientação científica desta dissertação, mas em especial, gratidão pelos anos de amizade que você me consentiu desfrutar. Pela sua energia e força inspiradora que me permitiram vencer muitas batalhas. Agradeço ao seu coração todo carinho outorgado.

A Dr<sup>a</sup>. Carmena Ferreira de França por sugestões preciosas e palavras de incentivo que concederam significativa melhora na versão final deste trabalho.

Wilson, Diogo, Paulo, Glenda Carvalho, Afonso Quaresma, Helenice Silva, Lourival Júnior, Rodrigo, Carlos Beisl e Fernando, amigos do Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido - LAIT, obrigada pela ajuda inumerável no processamento digital das imagens e na manipulação dos *softwares* utilizados como ferramenta na dissertação.

Ao Oceanógrafo César Diniz, do Laboratório de Oceanografia Química do Centro de Geociências da UFPA, agradecimentos pela cooperação no tratamento e interpretação dos dados topográficos que compõem a dissertação.

A Gabi, amiga que mesmo longe nunca perdeu o contato e o orgulho da nossa amizade. As amigas Paulinha e Susane, agradeço a companhia diária na sala de estudos nº 5 do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará – CG/UFPA.

Aline, a você a gratidão por permitir a sua amizade e pelos momentos de tanta alegria e companheirismo. Não desista enquanto você ainda for capaz de fazer um esforço a mais: aqui está a sua vitória.

Priscila Gozzi, Fabíola Mota, Márcio Porfírio, Kelly, Fábio (Japa), Andrey, Wilson, Cintia (Japa), Williams, Deyvison, Yuri, Nara (Oceano 2009), Malandro, Elo, Aderson (Negão), Caio, Cris e Tompson (casal chocolate), Enan, Simão, Igor Charles, Isaac, Laíssa, Leon, Luiza, Paulo Vitor (PV), Rafa, Robert, Ruth, a vocês amigos, obrigada pelos divertidos almoços no R.U., pelas risadas no Vadião e nos encontros das turmas de Oceanografia; descontração, sem vocês tudo teria sido mais difícil.

Aos integrantes do Laboratório Institucional de Oceanografia Geológica - LIOG, Franciely (Fran), Diego (Preto), Diego Sfredrench (Xará), Artur Gustavo, Lidiane, Charlie e Nara pelo apoio na execução e tratamento de dados da dissertação.

Msc. Marcos Abreu (Marcão), Dr<sup>a</sup>. Valdenira Santos (Val), André Braga, Kerly Jardim, Heidi Kelly, Roberto Pantoja (Chicão), Thais Sá e Socorro, funcionários e amigos do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA, obrigada pela ajuda na coleta e tratamento de dados que compõem este trabalho.

Ao técnico Alberto Melo e ao estudante Rodrigo do Centro de Geociências – Faculdade de Geofísica da UFPA, pelo apoio na etapa II de campo.

E por fim, peço desculpas se ocorrer omissão de algum membro importante que ajudou nesta caminhada. Obrigada.

*“Eu poderia suportar, embora não sem dor,  
que tivessem morrido todos os meus amores,  
mas enlouqueceria se morressem todos os meus amigos!  
A alguns deles não procuro, basta-me saber que eles existem.  
Esta mera condição me encoraja a seguir em frente pela vida...  
...mas é delicioso que eu saiba e sinta que os adoro,  
embora não declare e não os procure sempre...”*

Vinícius de Moraes

## RESUMO

O sensoriamento remoto é a ciência ou arte de adquirir informações sobre um objeto ou área sem qualquer contato físico com ele. Aplicações utilizando produtos de sensores remotos têm mostrado que os dados multiespectrais de sensores ópticos e de microondas apresentam grande potencial na discriminação dos padrões de uso e cobertura do solo, na identificação da geomorfologia e detalhamento de ambientes inundáveis, principalmente os costeiros (Pereira *et al.* 2003). A área de estudo foi escolhida por apresentar característica morfológica ímpar de um delta desativado - paleodelta -, e ainda por esta feição estar locada na zona costeira atlântica do Amapá, a qual ainda encontra-se desprovida de estudos morfológicos e cartográficos detalhados se comparado ao restante da costa Amazônica, como a Ilha de Marajó, nordeste do Pará e o noroeste do Maranhão. Neste trabalho o objetivo principal é identificar e mapear a morfologia do paleodelta presente na área de estudo usando como ferramenta a integração digital de dados multisensores, nas microondas (Radarsat) e óptico (Landsat), e avaliar, de forma qualitativa, o emprego de técnicas de processamento digital de imagens de sensores de teledetecção na identificação do paleodelta da área em estudo. Para atingir o objetivo principal, a seguinte abordagem metodológica foi empregada: (a) análise dos produtos sensores remotos (Landsat-7 ETM+, Radarsat-1 e SRTM) com base no processamento digital de imagens; (b) levantamento de dados em campo, relativos a topografia e reconhecimento das feições presentes na área e, (3) a partir do casamento dos produtos sensores remotos e dos dados de campo, foi elaborado do mapa morfológico da área em estudo. O processamento digital das imagens de sensores remotos empregadas no trabalho gerou os produtos a seguir: três cenas SAR com redução do efeito *Speckle* e aplicação do filtro adaptativo do tipo *Enhanced Frost*, três composições coloridas (7R5G3B, 4R3G1B e 5R3G2B) geradas a partir do cálculo do OIF (*Optimum Index Factor*), o produto da melhor tríade OIF (na composição colorida 7R4G3B), o produto da técnica PCA (*Principal Component Analysis*) em seis bandas do ETM+, o produto SPCA (*Selective Principal Component Analysis*), os produtos híbridos SAR em fusão com a melhor tríade OIF e SAR em fusão com a melhor tríade OIF e aplicação do realce por decorrelação, o produto da fusão do SAR com o PCA, o produto da fusão do SAR com o SPCA e o produto da fusão de três cenas SAR. Em consequência do estudo visual destes produtos sete feições, que compõem o paleodelta da área em estudo, foram identificadas. São elas: planície deltáica (subdividida em planície de inundação e planície de maré lamosa), paleocanal, barras de meandro, barra de maré, diques naturais e canal de maré. A interpretação visual e avaliação dos produtos

sensores remotos - quanto a eficácia em discriminar estas feições - levaram em conta os requisitos de cromaticidade e atributos texturais. Vale ressaltar que grande parte destas feições encontra-se desativadas ou preenchidas por sedimentos recentes e pouco consolidados. Dessa forma, constata-se que os produtos gerados a partir do processamento digital de imagens de cada sensor são menos eficazes que os produtos gerados a partir da integração dos sensores quando relacionado à identificação de feições morfológicas na área de estudo, pois estas estão melhor discriminadas nos produtos gerados a partir de fusões, enfatizando assim que a técnica de fusão de imagens ópticas com imagens SAR é eficiente para discriminação de feições morfológicas e mapeamento das mesmas.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, mapeamento morfológico, feições costeiras - Amapá.

## ABSTRACT

Remote sensing is the science or art of acquiring information about an object or area without any physical contact with him. Applications using remote sensing products have shown that multispectral data of optical and microwave sensors have great potential for discrimination of patterns of use and land cover, geomorphology in the identification of wetland environments and details, especially the coastal areas (Pereira *et al.* 2003). The study area was chosen because it presents unique morphological characteristics of a delta off - paleodelta - and still be rented for this feature in the Atlantic coast of Amapá, which is still devoid of morphological studies and detailed mapping as compared to the rest Amazon coast, as the island of Marajo, northeastern and northwestern Pará Maranhão. In this work the main objective is to identify and map the morphology of paleodelta this area of study as a tool using the digital integration of multisensor data, in the microwave (Radarsat) and optical (Landsat), and assess, qualitatively, the use of techniques Digital processing of Images from remote sensing sensors in identifying paleodelta study area. To achieve the main goal, the following methodological approach was employed: (a) analysis of product sensors (Landsat-7 ETM +, Radarsat-1 and SRTM) based on digital image processing, (b) data collection in the field, related to topography and recognition of features present in the area, and (3) from the marriage of the products of remote sensing and field data, was developed morphological map of the study area. The digital processing of remote sensing images used in the study generated the following products: three scenes SAR speckle reduction effect and application of adaptive filter type Enhanced Frost, three colored compositions (7R5G3B, and 4R3G1B 5R3G2B) generated from the calculation the OIF (Optimum Index Factor), the product of the best triad OIF (the colored composition 7R4G3B), the product of technical PCA (Principal Component Analysis) in six bands of ETM +, the product SPCA (Selective Principal Component Analysis), hybrid products SAR fused with the best triad OIF and SAR in fusion with the best triad OIF and application enhancement by decorrelation, the product of fusion of SAR with the PCA, the product of the fusion of SAR with the SPCA and the product of a merger of three scenes SAR. Consequently the study of these visual features seven products, which comprise the paleodelta study area, were identified. They are: delta plain (subdivided into the flood plain and tidal flat muddy bottoms), paleochannel, meander bar, tidal bar, levees and tidal channel. The visual interpretation and evaluation of remote sensing products - about the effectiveness in detecting these features - took into account the requirements of chromaticity and textural. It is noteworthy that most of these features is disabled or filled by sediments and

poorly consolidated. Thus, it appears that products generated from the digital image processing of each sensor are less effective than the products generated from the integration of sensors when related to the identification of morphological features in the study area, because they are better discriminated products generated from mergers, thus emphasizing that the technique of image fusion with optical images, SAR is effective for discrimination of morphological features and mapping them.

**Keywords:** Remote sensing, mapping morphology, coastal features - Amapá.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 2.1</b>	Localização da área de estudo.....	4
<b>Figura 2.2</b>	Feição denominada por Mendes (1994) e Silveira (1998) de <i>paleodelta lobular</i> .....	6
<b>Figura 2.3</b>	Mapa de distribuição de sedimentos do canal do Varadouro de Maracá.....	7
<b>Figura 2.4</b>	Classificação da costa do Amapá quanto a sistemas progradacionais e retrogradacionais.....	9
<b>Figura 2.5</b>	Vegetação observada na área de estudo.....	10
<b>Figura 2.6</b>	Gráficos com os valores de amplitude da maré no canal do Varadouro de Maracá.....	11
<b>Figura 2.7</b>	Processo de circulação de correntes no canal do Varadouro de Maracá.....	12
<b>Figura 3.1</b>	Modos de operação do Radarsat-1.....	18
<b>Figura 3.2</b>	Organograma das etapas de processamento digital da cena SRTM.....	22
<b>Equação 1</b>	Ilustração da fórmula de OIF.....	24
<b>Figura 3.3</b>	Organograma mostrando as etapas de processamento da cena ETM+.....	26
<b>Figura 3.4</b>	Organograma mostrando as etapas de processamento das cenas Radarsat-1.....	28
<b>Figura 3.5</b>	Organograma mostrando as principais etapas de processamento das cenas utilizadas e o processo de fusão do sensor óptico com as cenas SAR.....	33
<b>Figura 3.6</b>	Deslocamento à fazenda São João.....	35
<b>Figura 3.7</b>	Levantamento topográfico na área de estudo.....	37
<b>Figura 4.1</b>	Deltas construtivos dominados por processos fluviais.....	41
<b>Figura 4.2</b>	Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) banda 7, (II) banda 5, (III) banda 3 e (IV) composição colorida 7R5G3B.....	46
<b>Figura 4.3</b>	Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) banda 7, (II) banda 4, (III) banda 3 e (IV) composição colorida do melhor OIF: 7R4G3B.....	48
<b>Figura 4.4</b>	Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. Duas visualmente melhores combinações coloridas a partir dos valores de OIF: (I) combinação 134 e composição 4R3G1B e, (II) combinação 235 e composição 5R3G2B.....	49

<b>Figura 4.5</b>	Dados pluviométricos da estação localizada no município de Calçoene/AP.....	52
<b>Figura 4.6</b>	Recorte das cenas Radarsat-1 da área de estudo com aplicação do filtro <i>Enhanced Frost</i> e realce do tipo linear.....	53
<b>Figura 4.7</b>	Produto da integração das cenas Radarsat-1 em composição colorida nos canais R (imageada em 22 de fevereiro de 2003) G (imageada em 6 de setembro de 2004) B (imageada em 30 de setembro de 2004).....	54
<b>Figura 4.8</b>	Produtos integrados Radarsat-1 e Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) fusão SAR + melhor composição OIF, (II) fusão SAR + melhor composição IOF com aplicação do realce por decorrelação.....	56
<b>Figura 4.9</b>	Produto integrado Radarsat-1 e Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) produto do uso da técnica de fusão SAR + melhor composição OIF, (II) visão em 3D dos perfis L1 e L2 mostrando – em escala exagerada e rotacionado – a morfologia do terreno.....	57
<b>Figura 4.10</b>	Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) Combinação colorida do CP1, CP2 e CP3 calculados a partir da técnica de transformação PCA nas bandas da cena ETM+. (II) Produto do SPCA com a composição das PC's: PC1 (1, 2 e 3) no canal R, banda 4 no canal G e PC1 (5 e 7) no canal B.....	59
<b>Figura 4.11</b>	Produtos integrados Radarsat-1 e Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) PCA nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, fusão 1CP, 2CP e 3CP + SAR, (II) fusão SAR + SPCA.....	61
<b>Figura 4.12</b>	Mapa morfológico do paleodelta do Macarry.....	68

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b>	Especificações técnicas da cena Landsat utilizada neste trabalho.....	17
<b>Tabela 3.2</b>	Especificações técnicas das cenas Radarsat-1 utilizadas.....	19
<b>Tabela 3.3</b>	Especificações técnicas do SRTM utilizado.....	19
<b>Tabela 3.4</b>	Especificações técnicas dos sensores remotos utilizados.....	20
<b>Equação 1</b>	Ilustração da fórmula de OIF.....	24
<b>Tabela 3.5</b>	Estatística das seis bandas do ETM+.....	24
<b>Tabela 3.6</b>	Matriz de correlação entre as bandas Landsat ETM+.....	24
<b>Tabela 3.7</b>	Matriz de covariância entre as bandas Landsat ETM+.....	24
<b>Tabela 3.8</b>	Valores de OIF em vinte possíveis combinações no conjunto de três bandas do ETM+.....	25
<b>Tabela 3.9</b>	Parâmetro estatístico das componentes principais para as bandas do ETM+.....	30
<b>Tabela 3.10</b>	Matriz de autovetores das componentes principais para as bandas da cena ETM+.....	30
<b>Tabela 3.11</b>	Matriz de autovetores e covariância das componentes principais para as bandas do visível do ETM+.....	32
<b>Tabela 3.12</b>	Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas do infravermelho do ETM+.....	32
<b>Tabela 4.1</b>	Composições visualmente melhores identificadas a partir do OIF para as bandas do ETM+.....	47
<b>Tabela 4.2</b>	Avaliação dos produtos sensores remotos quanto à discriminação das feições costeiras da área de estudo.....	65

**LISTA DE ABREVIATURAS**

AMASIS	Integração de dados geofísicos, geológicos e geoquímicos na reconstituição da paleogeografia da costa Amazônica do Terciário ao recente
CNB	Corrente Norte Brasileira
CP	Principal Componente
DECORR	Decorrelation stretch
DEM	Digital Elevation Model
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil
DPI	Processamento Digital de Imagens
ERS-1	European Remote Sensing Satellite
GCP	Ground Control Points
GLCF	Global Land Cover Facility
GPS	Global Positioning System
HCMM	Heat Capacity Mapping Mission
HSV	Componentes Hue, Saturation e Value
IHS	Componentes Intensity, Hue e Saturation
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
LUT	Look up table
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OIF	Optimum Índex Factor
PCA	Principal Component Analysis
REM	Energia ou radiação eletromagnética
RGB	Componentes Red, Green e Blue
RMS	Root Mean Square
RN	Referência de Nível
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SP I	Segmento progradacional I
SP II	Segmento progradacional II
SPCA	Selective Principal Component Analysis
SR I	Segmento retrogradacional I

SR II	Segmento retrogradacional II
SRTM	Space Shuttle Radar Topography
UTM	Universal Transverse Mercator

## SUMÁRIO

	<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
	<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
	<b>EPÍGRAFE</b> .....	vii
	<b>RESUMO</b> .....	viii
	<b>ABSTRACT</b> .....	x
	<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	xii
	<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiv
	<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xv
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
2	<b>ASPECTOS FIOGRÁFICOS DO SETOR COSTEIRO ATLÂNTICO DO AMAPÁ: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	4
2.1	PALEODELTA DO MACARRY.....	12
2.1.1	<b>Agente 1 - tectônica</b> .....	12
2.1.2	<b>Agente 2 - parâmetros oceanográficos físicos e atmosféricos</b> .....	13
3	<b>CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS E DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS</b> .....	15
3.1	SENSORES REMOTOS E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA MAPEAMENTO MORFOLÓGICO.....	15
3.1.1	<b>Sensores remotos</b> .....	16
3.1.1.1	O sensor Landsat 7 ETM+.....	16
3.1.1.1.1	<i>Especificações técnicas da cena ETM+ utilizada</i> .....	16
3.1.1.2	O sistema Radarsat.....	17
3.1.1.2.1	<i>Especificações técnicas das cenas Radarsat utilizadas</i> .....	18
3.1.1.3	SRTM ( <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> ).....	19
3.1.1.3.1	<i>Especificações técnicas do SRTM utilizado</i> .....	19
3.1.2	<b>Processamento Digital de Imagens (DPI)</b> .....	20
3.1.2.1	Processamento digital da cena SRTM.....	21
3.1.2.2	Processamento digital da cena ETM+.....	22
3.1.2.2.1	<i>Correção atmosférica</i> .....	22
3.1.2.2.2	<i>Correção geométrica</i> .....	23

3.1.2.2.3	<i>Aumento linear de contraste</i> .....	23
3.1.2.2.4	<i>Análise estatística e composição colorida da cena ETM+</i> .....	23
3.1.2.3	Processamento digital de imagens SAR.....	26
3.1.2.3.1	<i>Ortorretificação das imagens Radarsat-1</i> .....	26
3.1.2.3.2	<i>Composição colorida no espaço de cores RGB</i> .....	27
3.1.2.3.3	<i>Redução do efeito Speckle</i> .....	28
3.1.2.4	Fusão de dados multisensores.....	29
3.1.2.4.1	<i>Fusão da melhor tríade OIF com Radarsat-1</i> .....	29
3.1.2.4.2	<i>PCA e SPCA em fusão com Radarsat-1</i> .....	30
3.1.2.4.3	<i>Realce por decorrelação</i> .....	33
3.2	COLETA DE DADOS EM CAMPO.....	34
3.3	MAPEAMENTO MORFOLÓGICO.....	37
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	39
4.1	PALEODELTA DO MACARRY: FEIÇÕES IDENTIFICADAS.....	41
4.1.1	<b>Planície deltáica</b> .....	41
4.1.2	<b>Paleocanal</b> .....	42
4.1.3	<b>Barras de meandro</b> .....	42
4.1.4	<b>Diques naturais</b> .....	43
4.1.5	<b>Barra de maré</b> .....	43
4.1.6	<b>Canal de maré</b> .....	43
4.2	INTEGRAÇÃO DE PRODUTOS SENSORES REMOTOS PARA MAPEAMENTO DE FEIÇÕES COSTEIRAS: PRODUTOS.....	44
4.2.1	<b>Landsat ETM+</b> .....	44
4.2.1.1	Melhor tríade OIF ( <i>Optimum Index Factor</i> ).....	45
4.2.2	<b>Radarsat</b> .....	50
4.2.2.1	Composição RGB de três cenas SAR.....	51
4.2.3	<b>Produtos integrados: Radarsat-1 com Landsat 7 ETM+</b> .....	54
4.2.3.1	Fusão do SAR com a melhor tríade OIF ( <i>Optimum Index Factor</i> ) e, aplicação do realce por decorrelação.....	55
4.2.3.2	Principal Component Analysis – PCA.....	58
4.2.3.3	Selective Principal Component Analysis – SPCA.....	58
4.2.3.4	Fusão do SAR com PCA ( <i>Principal Component Analysis</i> ).....	60
4.2.3.5	Fusão do SAR com SPCA ( <i>Selective Principal Component Analysis</i> ).....	60
4.3	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PRODUTOS SENSORES REMOTOS.....	62
4.4	MAPA MORFOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO.....	67
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b> .....	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto é a ciência ou arte de adquirir informações sobre um objeto ou área sem qualquer contato físico com ele. Isto é feito através da detecção e registro de energia emitida ou reflectida e processamento, análise e aplicação desses elementos. Os sensores captam dados resultantes da interação (reflexão, transmissão, absorção, emissão) da energia ou radiação eletromagnética (REM) com os objetos da superfície terrestre, e a partir disso, permitem a derivação de informações sobre as características físicas e químicas dos alvos em estudo (Elachi & Zyl 2006, Schowengerdt 2007).

O advento dos satélites permitiu a aquisição de informações globais e sinóticas detalhadas sobre os planetas (incluindo a Terra) e seus ambientes. A gama de aplicações de sensoriamento remoto inclui arqueologia, agricultura, cartografia, engenharia civil, meteorologia e climatologia, estudos costeiros, silvicultura, geologia, uso e cobertura do solo, desastres naturais, oceanografia, recursos hídricos, e assim por diante. Mais recentemente, com o surgimento da imagem com alta resolução espacial e técnicas aprimoradas, aplicações comerciais do sensoriamento remoto estão ganhando rapidamente o interesse da comunidade (Elachi & Zyl 2006, Wang 2010).

Aplicações utilizando produtos de sensores remotos têm mostrado que os dados multiespectrais de sensores ópticos, observados através de composições coloridas variadas, apresentam grande potencial na discriminação dos padrões de uso e cobertura do solo, assim como os dados de microondas, cujas imagens possuem informações sobre textura do alvo e sobre a umidade local e têm bom potencial para identificação da geomorfologia e detalhamento de ambientes inundáveis, principalmente os costeiros (Pereira *et al.* 2003).

A área de estudo é uma região costeira localizada na porção leste do setor atlântico da costa do Amapá e abrange uma área de aproximadamente 94 km<sup>2</sup> dentro do município de Amapá. Morfologicamente esta porção é uma planície costeira periodicamente inundada pelo regime de macromarés semidiurnas, com fortes correntes atuantes no canal do Varadouro de Maracá, o que acarreta na intensa dinâmica que retrabalha os depósitos argilosos pouco consolidados. Terraços erosivos, diques naturais e ilhas são algumas feições existentes na área. A vegetação de mangue é predominante à margem do continente (Mendes 1994, Sommerfield *et al.* 1994, Kineke & Sternberg 1995, Geyer *et al.* 1996, Nittrouer & DeMaster 1996, Silveira 1998).

A porção interna da planície costeira não apresenta cobertura vegetal densa, o que facilita a nítida identificação da morfologia local em imagens de sensores remotos. Tais fatores atrelados a fisiografia da planície costeira amapaense, especialmente, sua extensão e dificuldade de acesso, tornam o sensoriamento remoto uma importante e valiosa ferramenta para o reconhecimento da morfologia costeira desta região do país.

O uso do sensoriamento remoto como ferramenta para obtenção de resultados eficientes em estudos ambientais na costa do Amapá é demonstrado em publicações que abordam o reconhecimento de ambientes costeiros amazônicos através de imagens de SAR (*Synthetic Aperture Radar*) (Souza Filho & Prost 2002, Souza Filho *et al.* 2003), que estudam a dinâmica morfológica na foz do rio Amazonas através de análise multitemporal por imagens de sensores remotos (Silveira *et al.* 2002), sobre as técnicas de processamento de imagens de sensores de teledetecção aplicadas ao estudo da sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo em sistemas costeiros (Souza Filho *et al.* 2004, Oliveira & Takiyama 2006, Almeida 2009), que tratam da análise de bacia hidrográfica a partir de imagens Landsat e Sistema de Informação Geográfica (SIG) (Santana 2005), sobre modificações ambientais pelo uso e cobertura vegetal em ambientes costeiros através de sensoriamento remoto (Santos 2006, Santos *et al.* 2009), quantificam a linha de costa empregando imagens de sensores microondas e ópticos, a fim de identificar taxas erosão e acresção através de análise multitemporal (Batista 2006, Silva 2010), que caracterizam os processos morfodinâmicos e hidrodinâmicos lacustres através de interpretação multitemporal de imagens de sensores remotos, integrados em ambiente de SIG (Matos 2009), que realizam mapeamento geomorfológico (Jardim *et al.* 2010).

Neste trabalho o objetivo principal é identificar e mapear a morfologia do paleodelta presente na área de estudo usando como ferramenta a integração digital de dados multisensores, nas microondas (Radarsat) e óptico (Landsat), e avaliar, de forma qualitativa, o emprego de técnicas de processamento digital de imagens de sensores de teledetecção na identificação do paleodelta da área em estudo.

O mapeamento da área de estudo foi realizado a partir da interpretação visual de produtos derivados de técnicas de Processamento Digital de Imagens (DPI) de sensores remotos, coleta de informações em campo (dados topográficos e validação dos produtos oriundos do processamento digital das imagens de sensores de teledetecção) e reunião destas informações no SIG para cartografia. A partir desta integração, uma avaliação foi realizada em cada produto apresentado quanto a sua capacidade em discriminar as feições presentes. A escolha do sensoriamento remoto incorporado ao SIG como ferramentas para a geração do mapa

morfológico da área em estudo deve-se ao fato delas apresentarem grande potencial na discriminação da morfologia e detalhamento de ambientes em diversas escalas, em especial os costeiros amazônicos. Estas ferramentas são utilizadas com muita frequência por estudiosos e profissionais que atuam no âmbito da Geociências.

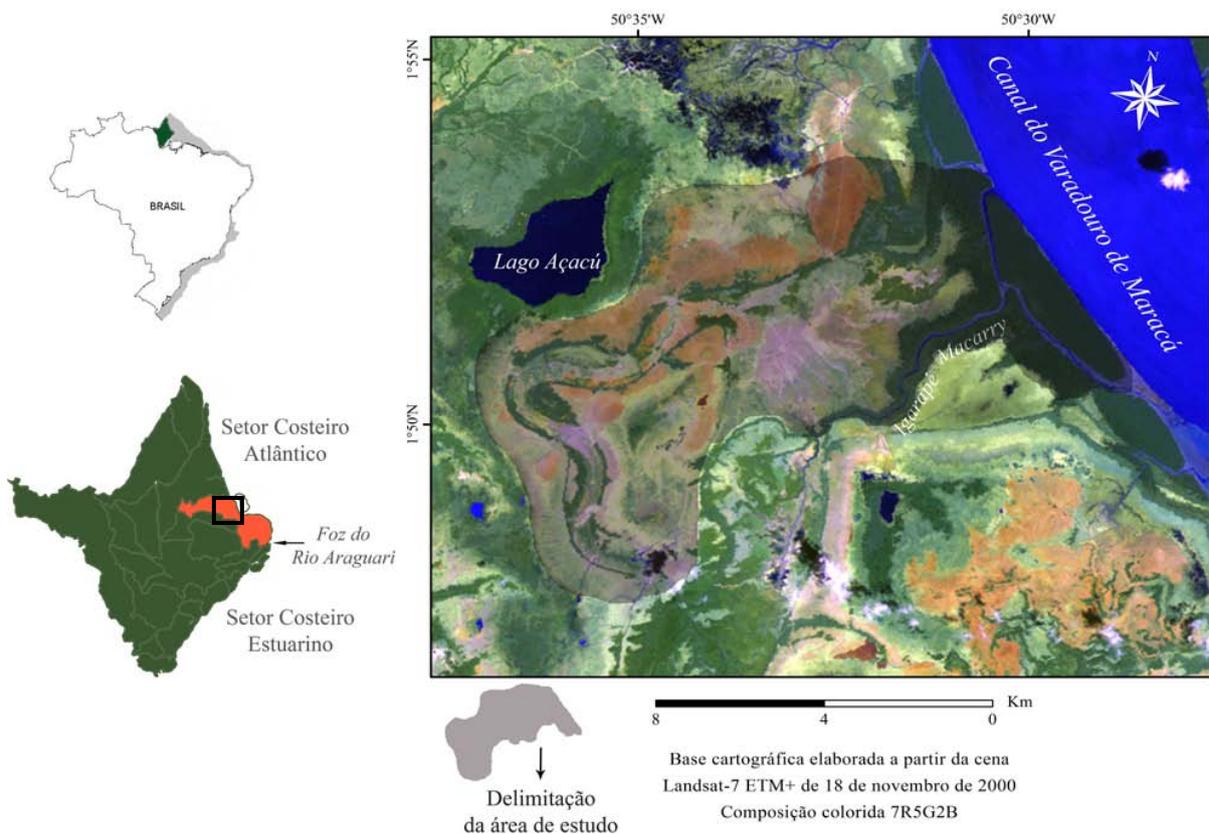
A área de estudo foi escolhida por apresentar característica morfológica ímpar de um delta desativado - paleodelta -, e ainda por esta feição estar locada na zona costeira atlântica do Amapá, a qual ainda encontra-se desprovida de estudos morfológicos e cartográficos detalhados se comparado ao restante da costa Amazônica, como a Ilha de Marajó, nordeste do Pará e o noroeste do Maranhão.

A dissertação está dividida em cinco capítulos: Capítulo 1: *Introdução* – capítulo introdutório, relatando sobre a ferramenta de sensoriamento remoto e suas aplicações em diversos ramos da ciência. Revisa a respeito de publicações que tem como área de estudo a costa do Amapá e empregaram o sensoriamento remoto como ferramenta no auxílio ao método empregado na busca de resultados, relata sobre o objetivo do trabalho e a relevância da área de estudo. Capítulo 2: *Aspectos fisiográficos do setor costeiro atlântico do Amapá: localização da área de estudo* – aborda a respeito da localização da área de estudo, sobre os aspectos de formação da costa do Amapá, bem como uma breve classificação da costa amapaense quanto a morfologia e, sistemas progradacionais e retrogradacionais. Panoramas da vegetação predominante na área e das condições oceanográficas no Canal do Varadouro de Maracá e áreas adjacentes são discorridos neste capítulo. Capítulo 3: *Características dos materiais utilizados e descrição dos métodos* – refere-se a cerca da metodologia empregada no trabalho. Uma breve descrição técnica dos materiais utilizados é feita, assim como os mecanismos e etapas aplicadas no processamento digital das imagens de sensores de teledetecção, procedimentos usados coleta de dados em campo, e a maneira e critérios adotados na confecção do mapa morfológico da área de estudo são pormenorizados. Capítulo 4: *Resultados e discussões* – descreve as feições identificadas no paleodelta da área de estudo através dos produtos oriundos do processamento digital das imagens de sensores remotos, como cada feição é apresentada em cada produto e trata dos critérios adotados para a confecção do mapa morfológico e da contribuição deste nos estudos na costa do Amapá; Capítulo 5: *Considerações finais e conclusões* – aborda sobre os resultados e interpretações da dissertação de forma simplificada e da avaliação feita nos produtos oriundos da aplicação de processamento digital nas imagens de sensores remotos e oferece sugestões de continuidade de estudos na costa do Amapá.

## 2 ASPECTOS FISIOGRAFICOS DO SETOR COSTEIRO ATLÂNTICO DO AMAPÁ: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A zona costeira do Amapá possui em torno de 300 km de extensão, composto principalmente de sedimentos Holocênicos e divide-se em dois setores em relação à foz do rio Araguari: o *Setor Costeiro Amazônico* ou *Estuarino* e *Setor Costeiro Atlântico* ou *Oceânico*. O Setor Costeiro Atlântico abrange parte dos municípios de Oiapoque, Calçoene, Amapá, Pracuúba e Tartarugalzinho. Já o Setor Costeiro Estuarino compreende parte dos municípios de Cutias, Itaubal, Macapá, Santana e Mazagão (Silveira 1998, Brasil 1994, Torres & El Robrini 2006).

A área de estudo deste trabalho está estabelecida no Setor Costeiro Atlântico da zona costeira do Amapá no município de Amapá. A área de trabalho tem em torno de 94 km<sup>2</sup> e está delimitada pelas coordenadas geográficas de 1° 54' a 1° 45' latitude norte e 50° 37' a 50° 27' longitude oeste (**Figura 2.1**).



**Figura 2.1** Localização da área de estudo. Em destaque o município de Amapá (área em vermelho no mapa do Amapá) e a área de estudo (forma indefinida, na cor cinza, na imagem Landsat).

A costa do Amapá, no final do Terciário, recebeu a sedimentação do Grupo Barreiras constituído por sedimentos areno argilosos, arenosos, argilo siltosos e conglomeráticos, em sistemas de leques aluviais e lacustres (Lima *et al.* 1991).

No Holoceno, aconteceu a evolução do litoral com a organização da rede de drenagem atual e as oscilações do nível do mar alteraram as planícies costeiras, formando as planícies de inundações dos rios. Como feições resultantes dessa influência marinha houve o desenvolvimento de planícies alongadas, de largura variável, formadas por extensas áreas aplainadas, de inundação periódica flúviomarinha (Reis 1996, Costa 1997).

A costa amapaense está inserida no sistema de dispersão amazônico, sendo afetada diretamente pela elevada descarga hídrica e sedimentar do rio Amazonas. O Amazonas aporta ao Oceano Atlântico a maior vazão de água doce do planeta e libera aproximadamente 1,2 x 10<sup>9</sup> toneladas de sedimentos em suspensão por ano em sua plataforma (Meade *et al.* 1985).

Grande parte dos sedimentos amazônicos, quando influenciados por correntes de maré, são transportados e depositados por cerca de 1.600 km de extensão, formando na costa do Amapá, Guiana Francesa e Suriname o mais longo e contínuo depósito de lama moderna do mundo. O depósito de lama ao longo da costa é composto, principalmente, por silte e argila, em uma proporção que alcança até 9 vezes o teor de argila, contribuindo com cerca de 95% do material em suspensão (Gibbs 1977, Allison & Lee 2004).

Diversos estudiosos classificaram a costa do Amapá (levando-se em consideração escala de mapeamento) quanto à sua morfologia e sistemas progradacionais e retrogradacionais.

Boaventura & Narita (1974) classificaram morfologicamente a costa do Amapá como *Planície Flúviomarinha Macapá-Oiapoque*. Esta se estende desde a cidade de Macapá até a foz do rio Oiapoque. Constitui-se de sedimentos arenosos, siltosos, argilas e vasas. A sul do rio Flechal a planície está relacionada com o sistema fluvial da foz do Amazonas, caracterizado pelo processo de colmatagem, lagos residuais, paleocanais entulhados por sedimentos fluviais, planícies de diques, meandros abandonados, terraços e ilhas.

Além de Boaventura e Narita (1974), outros autores publicaram a existência de paleocanais na costa amapaense, como Borges (1934), Santos (1977), Palma (1979), Lima *et al.* (1991), Mendes (1994), Silveira (1998 e 2002), Silveira & Santos (2006), Silveira *et al.* (2006), Santos (2006) e Almeida (2009). Os trabalhos de Mendes (1994) e Silveira (1998) fazem referência ao canal meandrante com aproximadamente 1 km de largura, que desemboca na planície do atual canal de maré do Macarry com formato grosseiramente triangular, suspeitando-se tratar de um paleodelta lobular (paleodelta do Macarry) provavelmente

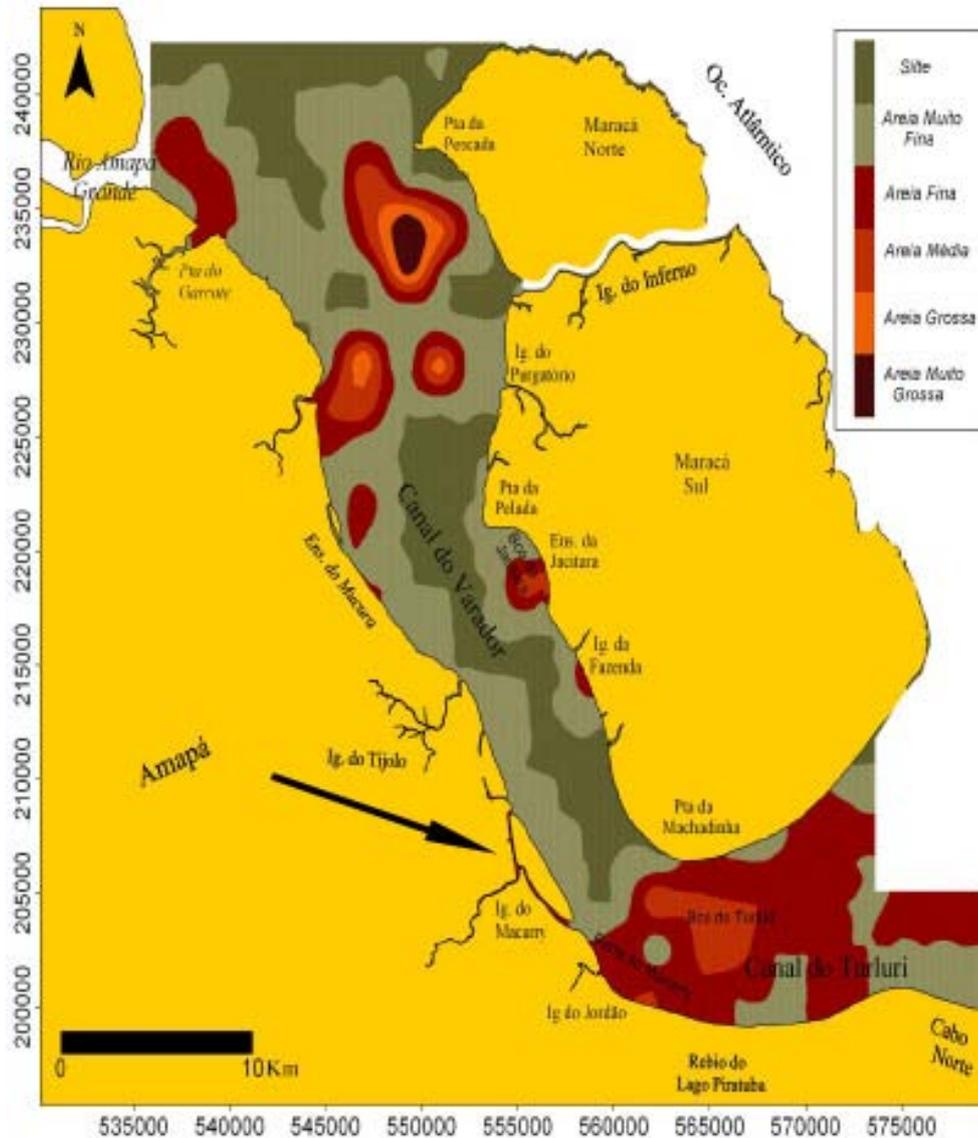
afogado devido o advento da transgressão Flandriana (**Figura 2.2** – feição indicada pelas setas em branco).

Santos (1977) relata que transversalmente a costa do Amapá ocorrem sistemas de canais rasos que recortam o sedimento carbonático e/ou areno-quartzoso grosseiro e são preenchidos por sedimentos com granulometria que varia desde a argila até areia grosseira nos flancos e argila mais pura para a superfície interior. Formam próximo ao *canyon* do Amazonas um sistema de tributários do mesmo. Em direção noroeste terminam em dois maiores vales (em frente a Ilha de Maracá e Cabo Cassiporé) abrindo-se na Plataforma Externa/Talude Superior. A autora afirma ainda que na porção mais interna da Plataforma ocorram simultâneos processos erosionais e deposicionais, onde os sedimentos dominantes são argilosos de coloração cinza oliva a cinza claro.

**Figura 2.2** Feição denominada por Mendes (1994) e Silveira (1998) de *paleodelta lobular*. Recorte da imagem TM, de 29 de setembro de 2008, composição colorida 7R2G3B.

Em publicação recente, Miranda & Silveira (2009) durante trabalho de campo em fevereiro de 2008 encontraram na foz do canal de maré do Macarry areia fina nos sedimentos superficiais de fundo (**Figura 2.3**). Este episódio enfatiza as informações prestadas pelos

autores citados nesta revisão quanto a composição sedimentar existente no canal do Varadouro de Maracá e área adjacentes.



**Figura 2.3** Mapa de distribuição de sedimentos do canal do Varadouro de Maracá. A seta em preto indica o canal de maré do Macarry.

Fonte: Adaptado de Miranda & Silveira (2009)

A classificação da costa do Amapá como *Planície Costeira* foi feita por Lima *et al.* (1991), no qual relata ocorrência de sedimentos quaternários, com influência fluvial, flúviolacustre e flúviomarinha.

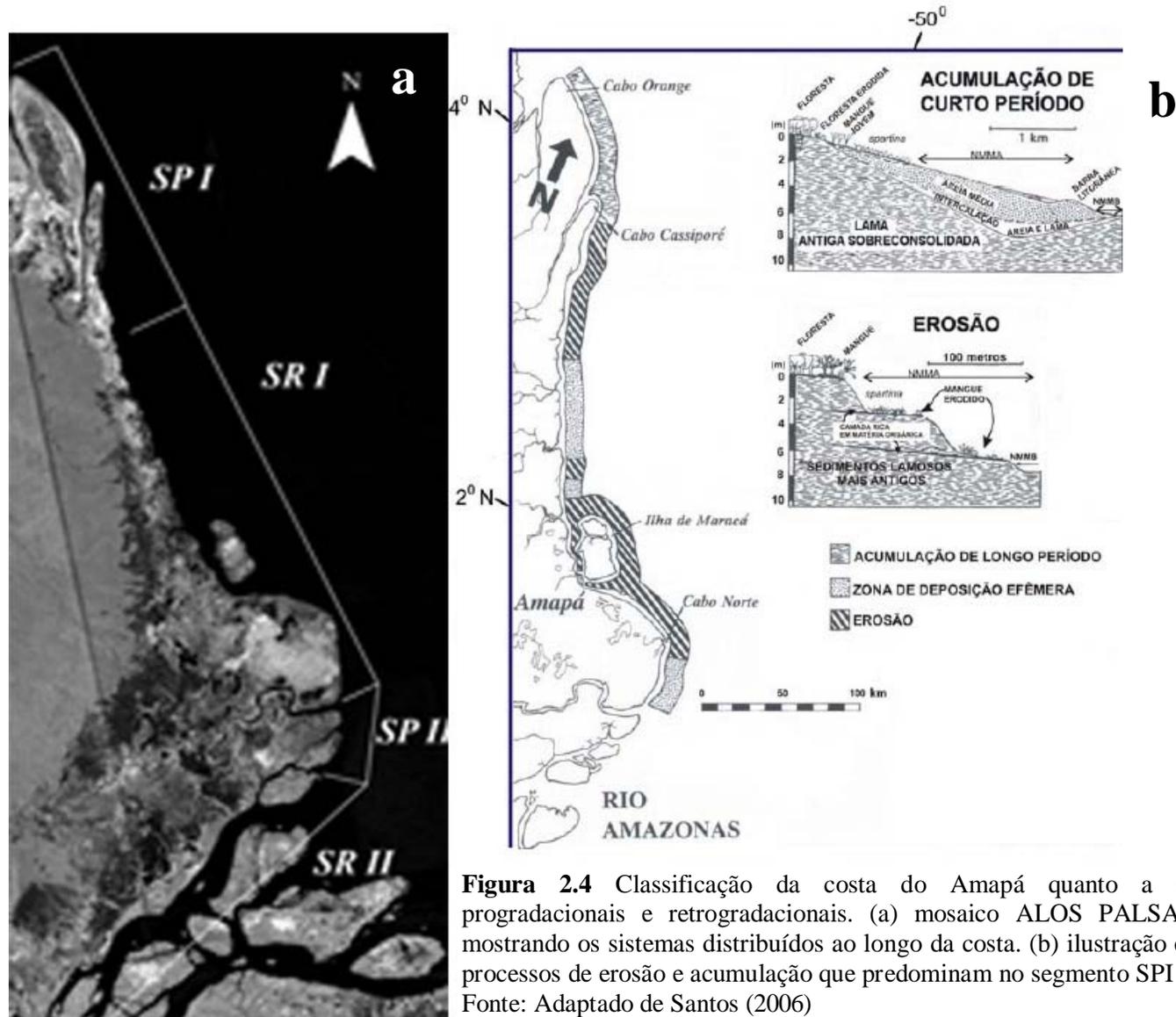
Silveira (2002) classificou morfologicamente a costa amapaense em *Planície Flúviomarinha*, *Planície Flúvioestuarina* e *Planície Fluvial*. A *Planície Flúviomarinha*

compreende a margem atlântica, às proximidades do canal de maré do Maracarry, onde são formadas barras predominantemente arenosas que gradativamente são anexadas ao continente e sofrem influência diária de macromarés. Em sua retaguarda formam-se campos salinos. O trecho referente ao baixo curso do rio Araguari foi classificado pela autora como *Planície Flúvioestuarina*. Esta área está submetida a marés semidiurnas e a processos erosivos relacionados ao fenômeno da pororoca. A *Planície Fluvial* é encontrada no baixo curso do rio Araguari e representa a área rebaixada contígua à margem direita do rio, exibindo terraços e propícia a colmatação.

A classificação da costa do Amapá em *sistemas progradacionais e retrogradacionais* foi realizada por Santos (2006). A autora divide a costa em dois segmentos: *retrogradacionais I e II* (SR I e II) e *progradacionais I e II* (SP I e II) (**Figura 2.4**).

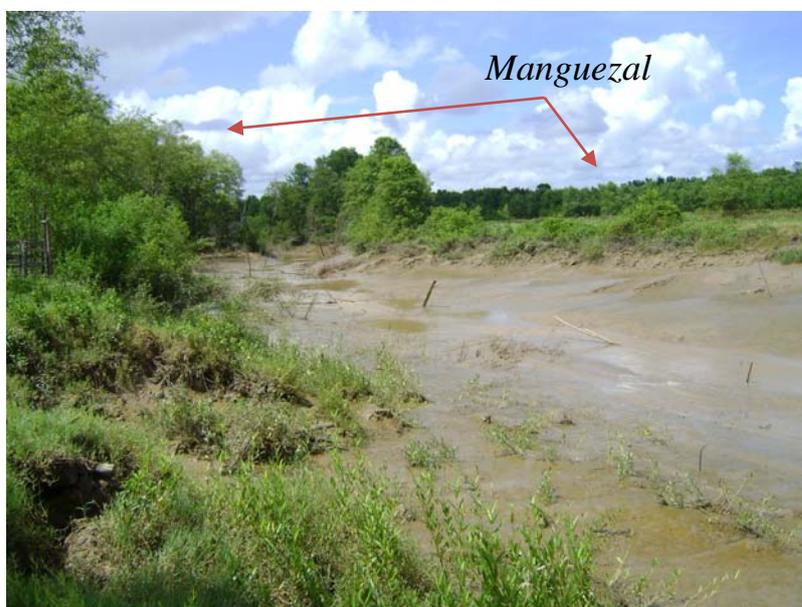
A área de estudo deste trabalho está inserida no trecho referente ao *segmento retrogradacional I* (SR I), portanto, somente este será abordado a fim de conhecimento sobre a morfologia da área de interesse.

Os segmentos retrogradacionais dominam a maior parte da costa amapaense. O *SR I* se localiza entre o sul do Cabo Cassiporé e a porção setentrional do estuário do rio Araguari, onde inicia o *SP II*. É caracterizado por forte erosão de florestas de mangue, estabelecidas sobre depósitos argilosos pouco consolidados, resultando na formação de terraços erosionais. A erosão é descontinuada apenas por depósitos arenosos temporários associados a desembocadura de rios (rios Amapá Grande, Calçoene, Cuñani e Araguari) denominados de *Zonas de Acumulação Efêmera* (Mendes 1994, Allison *et al.* 1995). Mendes (1994) relata que as fontes de sedimentos desses depósitos efêmeros são tipicamente fluviais e a natureza estuarina dos rios que drenam esse setor é confirmada pela presença de águas salobras e de maré dinâmica em áreas situadas alguns quilômetros à montante da desembocadura desses rios (Santos 2006).



**Figura 2.4** Classificação da costa do Amapá quanto a sistemas progradacionais e retrogradacionais. (a) mosaico ALOS PALSAR 2008 mostrando os sistemas distribuídos ao longo da costa. (b) ilustração exibindo processos de erosão e acumulação que predominam no segmento SPI e SRI. Fonte: Adaptado de Santos (2006)

Manguezal com domínio de extensos siriubais (*Avicennia germinans*) compõe a vegetação predominante na área de estudo. Na foz do canal de maré do Macarry, os bosques são mais jovens, com altura média de 10 m, densidade de 1.716 indivíduos por hectare e vegetam antigas e extensas barras longitudinais. A vegetação de mangue está associada *Guadua glomerata*, que se prolonga até o contato com os campos herbáceo-arbustivos periodicamente inundados (composto de plantas como *Gramineae*, *Cyperaceae*, *Lentibulariaceae*, *Alismataceae*, *Nymphaceae*, *Annonaceae*, *Arecaceae* e *Leguminae*, entre outras) utilizados principalmente para a bubalinocultura (Takiyama 2004, Costa Neto *et al.* 2006) (**Figura 2.5**).



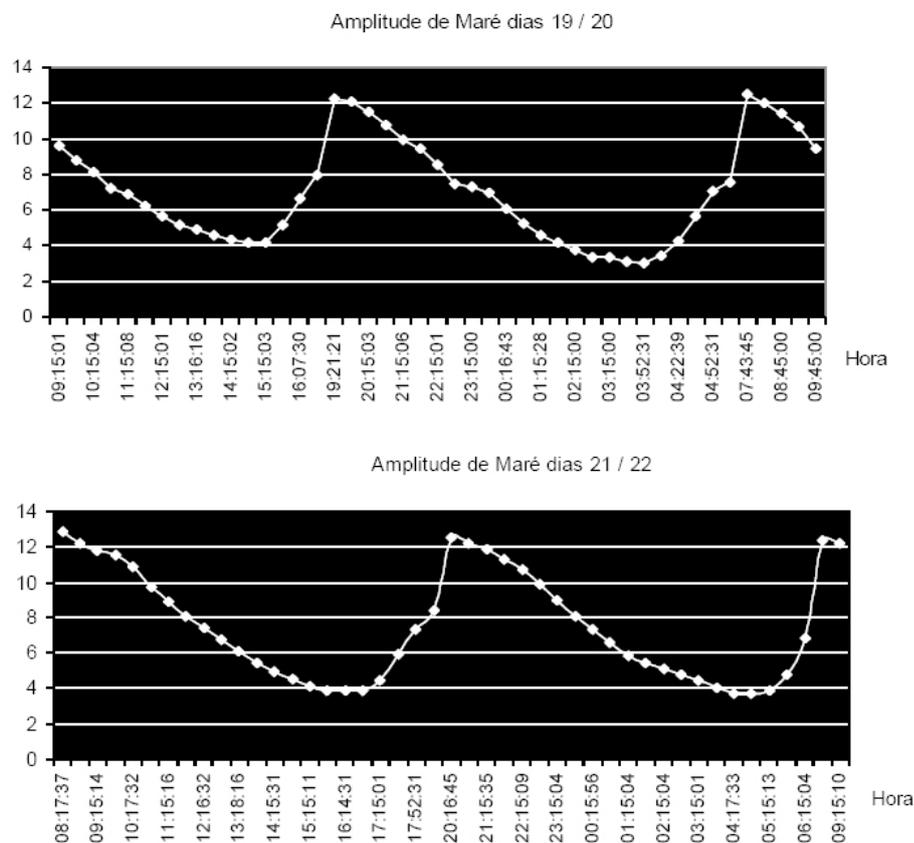
**Figura 2.5** Vegetação observada na área de estudo.

Condições oceanográficas da zona costeira do Amapá são determinadas por regimes de macromarés, com amplitudes variáveis, que decrescem à norte, em direção à costa das Guianas (Guiana Francesa, Suriname e Guiana) que é submetida ao regime de meso e micromarés. Na plataforma, a presença da Corrente Norte Brasileira (CNB) interfere no direcionamento da pluma de sedimentos do rio Amazonas, impedindo a dispersão desses sedimentos para regiões mais profundas do mar e permitindo a sua deposição ao longo da costa ocidental e da plataforma (Batista Neto *et al.* 2004).

Dados da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil) revelam que a altura da maré na zona costeira atlântica do Amapá pode alcançar até 12 m e, que no canal do Varadouro de Maracá a preamar ocorre cerca de 2 a 3 horas após o começo da enchente, e

a diferença de nível entre a preamar e a baixamar é raramente maior que 2,5 m. Entretanto, no igarapé do Inferno (norte da Ilha de Maracá) as preamares são extremamente rápidas e ocorrem em duas etapas marcantes, quando as águas sobem rapidamente até 2/3 do nível a ser atingido e, algum tempo depois, atingem a estofa de maré, para logo em seguida iniciar a vazante até atingir o nível de baixamar, onde permanece durante mais tempo.

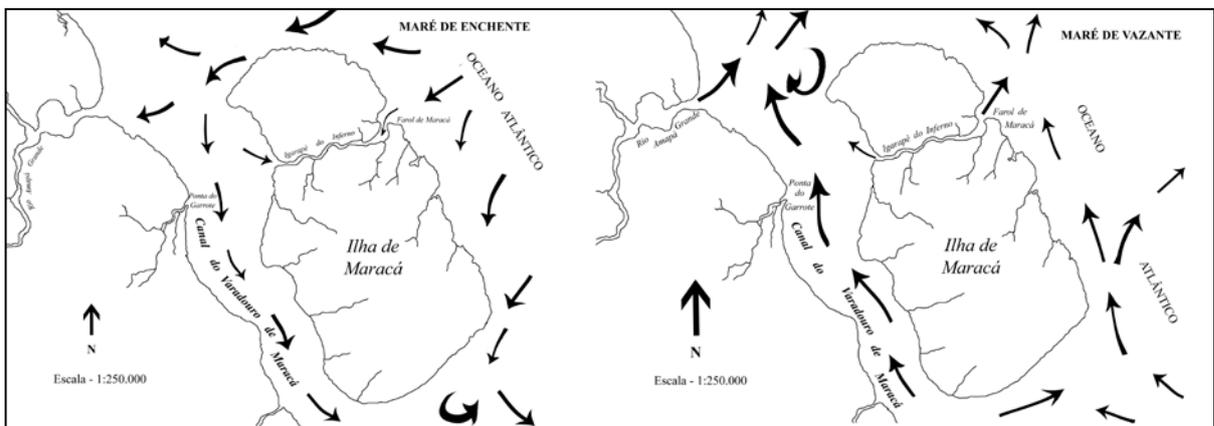
Porém, Miranda & Silveira (2009) em expedição de campo no período de 19 a 28 de fevereiro de 2008 verificaram que a amplitude média de maré no canal do Varadouro de Maracá atinge em torno de 7 m, podendo chegar até 10 m de amplitude durante o período das marés de sizígia (defasagem de 2 m em relação aos dados da DHN). Os autores constataram ainda que no dia 21 de fevereiro – lua cheia pelo calendário lunar do ano de 2008 – a maré atingiu o pico de 13 m e baixa de 3 m no canal do Varadouro de Maracá (**Figura 2.6**). Já nas marés de quadratura, houve a diminuição dos valores da amplitude, onde a máxima altura atingida durante cada fase de subida de maré ficou em torno de 12 m e a altura mínima alcançada durante cada fase de descida da maré variou entre 4 e 6 m.



**Figura 2.6** Gráficos com os valores de amplitude da maré no canal do Varadouro de Maracá nos dias de maior influência da Lua.

Fonte: Adaptado de Miranda & Silveira (2009)

O processo de circulação que ocorre entre as duas entradas do mar aberto para o canal do Varadouro de Maracá, ao norte próximo a foz do rio Amapá Grande e ao sul próximo ao extremo norte do Cabo Norte, controla o processo de caracterização da morfologia e sedimentação do canal do Varadouro de Maracá e do canal do Turluri (sul da Ilha de Maracá) (Miranda & Silveira 2009). Este processo pode ser observado na **Figura 2.7** criada por Bruck *et al.* (s/d).



**Figura 2.7** Processo de circulação de correntes no canal do Varadouro de Maracá, exibindo as direções preferenciais.

Fonte: Adaptado de Bruck *et al.* (s/d).

## 2.1 PALEODELTA DO MACARRY

Dentre os autores que publicaram trabalhos enfatizando a morfologia e os processos atuantes na costa do Amapá, Silveira (1998) identificou e estudou os possíveis agentes de construção e transformação do paleodelta do Macarry. A autora acredita que a tectônica associada com os parâmetros oceanográficos físicos (marés e correntes) e atmosféricos (ventos) são os principais agentes de construção e, posterior obstrução (desativação) e preservação no registro morfológico do paleodelta. A seguir será explanado de que forma estes fatores influenciaram na gênese da morfologia em estudo.

### 2.1.1 Agente 1 - tectônica

Boa Ventura & Narita (1974) dividiram a costa amapaense em dois domínios morfológicos: Domínio Norte, onde há predominância dos ambientes marinhos e, Domínio

Sul, influenciado por ambientes fluviais. A área de estudo desta dissertação localiza-se no Domínio Sul desta divisão.

A tectônica influenciou o Domínio Sul da planície costeira através do adernamento do bloco representado pela região norte do rio Araguari até o rio Amapá Grande, provavelmente como um reflexo do Lineamento Cassiporé (N-S). O adernamento se deu no sentido NW-SE, com caimento para SW, o que provocou a desorganização da rede de drenagem pretérita e a criação de espaço para a instalação dos Cinturões Lacustres na porção oeste do bloco, facilitando a chegada dos aluviões e a progressiva agradação da área. Na porção oriental do bloco, ao contrário, relativamente soerguido, deu-se a obstrução do sistema como um todo, onde é comum a reversão das drenagens que passam a fluir continente adentro (Silveira 1998).

Após cerca de 20 km de curso preservado, o paleodelta identificado mostra uma brusca interrupção, não sendo possível rastrear sua continuidade tanto no sentido leste-oeste quanto no sentido norte-sul. Uma interrupção brusca pode ter tido como causa uma mudança no nível de base da região, o que, no caso, pode ter colocado a área em posição de cotas mais elevadas. Em função dessa preservação e das suas dimensões, admitimos que esta feição tenha sido parte do antigo rio Tartarugal e possivelmente tenha evoluído a partir da combinação dos efeitos da reativação das linhas estruturais que cortam o estado do Amapá (Silveira 1998).

O Grupo Barreiras representa o limite oeste da planície costeira do Amapá. Seu comportamento regional nos mostra que esses sedimentos sofreram um basculamento no sentido NW-SE, tornando as áreas mais próximas a linha de costa relativamente mais elevadas. Isto proporcionou a interrupção do trajeto normal das drenagens, e, criou-se uma área alagada que circundava a parte oeste e sul do bloco basculado. Estando a porção leste do bloco em uma posição relativamente mais elevada, foi possível a preservação da porção remanescente do rio Tartarugal e seu paleodelta (Silveira 1998).

### **2.1.2 Agente 2 - parâmetros oceanográficos físicos e atmosféricos**

A ilha de Maracá serve como um anteparo para a ação devastadora das marés. Essa relativa proteção poderia ter propiciado a construção de um delta através de uma dinâmica menos energética. O paleodelta mostra um espraiamento da frente deltáica voltada para o sul, o que pode significar que ele tenha se formado durante o adernamento do bloco do Domínio Sul (Silveira 1998).

Dentre os processos deposicionais, a acreção e a colmatação são os mais importantes. Na linha de costa amapaense, a acreção tem ampla distribuição, seja ela relacionada aos depósitos lamosos que conformam o Cabo Cassiporé, quanto daqueles depósitos arenosos costeiros, efêmeros ou não, eventualmente incorporados à região costeira. A colmatação ocorre principalmente nas áreas rebaixadas pelo adernamento do bloco correspondente ao Domínio Sul e torna-se gradativamente favorecida pela chegada de águas e sedimentos ricos em sais minerais vindos do Planalto Costeiro. Isso propicia o desenvolvimento de vegetação abundante, fixando os sedimentos, assoreando canais e provocando a agradação do terreno (Silveira 1998).

Todos esses fatores e eventos tratados por Silveira (1998) a cerca do paleodelta do Macarry são valiosos para a interpretação e entendimento dos dados discutidos no capítulo 4 deste trabalho.

### 3 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS E DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS

Este capítulo discorre a cerca da metodologia empregada no trabalho. Uma breve descrição técnica dos materiais utilizados é feita, bem como os mecanismos e etapas aplicadas no processamento digital das imagens de sensores de teledetecção, procedimentos usados na coleta de dados em campo, e a maneira e critérios adotados na confecção do mapa morfológico da área de estudo são pormenorizados.

#### 3.1 SENSORES REMOTOS E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA MAPEAMENTO MORFOLÓGICO

O tipo de dado sensor remoto a ser utilizado pelo usuário depende do tipo de informação que está sendo procurada, bem como do tamanho e da dinâmica do objeto ou fenômeno que se está estudando (Elachi & Zyl 2006).

Sobre a órbita da Terra, sensores imageiam atributos presente sobre a superfície. Há três grupos distintos de satélites que imageiam a Terra. O primeiro grupo registra o terreno no comprimento de onda próximo do visível (também conhecidos como *imagem óptica*). Os cinco satélites da série Landsat são um exemplo clássico desse grupo. O segundo grupo carrega sensores que registram a superfície no comprimento de onda do infravermelho, como o satélite meteorológico HCMM (*Heat Capacity Mapping Mission*) e o terceiro grupo é implantado com sensores que registram em microcomprimentos de onda (microondas). Os satélites SAR, ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*) e Radarsat são exemplos que se encaixam nesta categoria (Reddy 2008).

As imagens produzidas a partir do registro digital dos atributos presentes na superfície terrestre, após processamento digital, originam a *imagem de satélite*.

A fim de elaborar e atualizar mapas com acurácia, a imagem de satélite é manipulada usando técnicas de DPI. A idéia central por trás de processamento digital de imagem é que, a imagem é alimentada em um computador, pixel a pixel. O computador é programado para inserir esses dados através de uma equação ou uma série de equações, e em seguida, armazena os resultados do cálculo para cada pixel. Esses resultados são chamados de *Valores de LUT* (*look up table*) para uma nova imagem que pode ser manipulada para extrair mais informações de interesse do usuário. Virtualmente, todos os procedimentos de processamento podem ser agrupados em um ou mais dos seguintes tipos de operações: pré processamento

(correção geométrica, correção radiométrica, correção atmosférica), registro, melhoramento visual (contraste linear, contraste não-linear, equalização do histograma, *Gaussian stretch*), filtro espacial (filtro passa baixa, filtro médio, filtro passa alta, *edge enhancement*), transformação (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI, *Principal Component Analysis* - PCA, *Selective Principal Component Analysis* - SPCA) e classificação da imagem (supervisionada e não supervisionada) (Reddy 2008).

Neste trabalho as imagens de sensores de teledetecção pertencentes, de acordo com Reddy (2008), ao primeiro (imagem Landsat 7 ETM+) e ao terceiro grupo de satélites (imagens Radarsat-1 e SRTM - *Space Shuttle Radar Topography*) que imageiam a Terra são utilizados e, as técnicas de préprocessamento (correção geométrica e radiométrica), melhoramento visual (contraste linear, *decorrelation stretch*), filtro (passa baixa - *enhanced frost*), transformação (PCA e SPCA) do processamento digital de imagens aplicadas nas imagens acima citadas são empregadas.

### 3.1.1 Sensores remotos

#### 3.1.1.1 O sensor Landsat 7 ETM+

O Landsat 7 ETM+ tem plataforma estabilizada em três eixos, portando um instrumento apontado para o Nadir, o ETM+ (tecnologia de varredura eletrônica). O sensor gera imagens em oito bandas espectrais, com 30 m de resolução espacial (exceto a banda termal, que possui resolução de 60 m). A banda 8 do sensor possui resolução espacial de 15 m e aperfeiçoamento de suas características geométricas e radiométricas, sendo denominada de *banda pancromática*. A banda referente ao infravermelho médio (banda 7) tem aplicação na discriminação de rochas e minerais e, é sensível ao teor de umidade na vegetação. A plataforma imageia numa órbita de 705 km acima da Terra e numa faixa de 185 x 185 km do terreno (Jensen 1996, Luchiari *et al.* 2005).

##### 3.1.1.1.1 Especificações técnicas da cena ETM+ utilizada

A imagem utilizada neste trabalho foi adquirida através de *download* gratuito no portal da University of Maryland, através do endereço eletrônico <http://glcf.umiacs.umd.edu/research/portal/geocover>. A cena foi selecionada a partir do critério de baixa cobertura de nuvens, o que proporcionou boa visibilidade dos atributos

morfológicos da área de estudo e trechos adjacentes. A cena obtida foi imageada em novembro de 2000.

Esta cena foi processada digitalmente pela GLCF (*Global Land Cover Facility/NASA*) com aplicação do mecanismo de ortorretificação, erro posicional inferior a 50 m e disponibilizada em formato GeoTIFF. Analisando o metadado da imagem adquirida, pode-se observar que a classificação adotada é o *level-1T* de correção. Este nível inclui precisa correção radiométrica e geométrica do terreno através do método GCP (*Ground Control Points*), correção do erro de paralaxe (devido a topografia local) por DEM (*Digital Elevation Model*) e SRTM, datum horizontal WGS84 e projeção geográfica UTM (*Universal Transverse Mercator*). Este conjunto de dados agrupados gera um produto livre de distorções geométricas, causadas pelo sensor (como os efeitos do ângulo de visão), pelo satélite e pela Terra (como rotação, curvatura e relevo) (Tucker *et al.* 2004, Reddy 2008, Williams 2009). As especificações técnicas da cena são mostradas na **Tabela 3.1**.

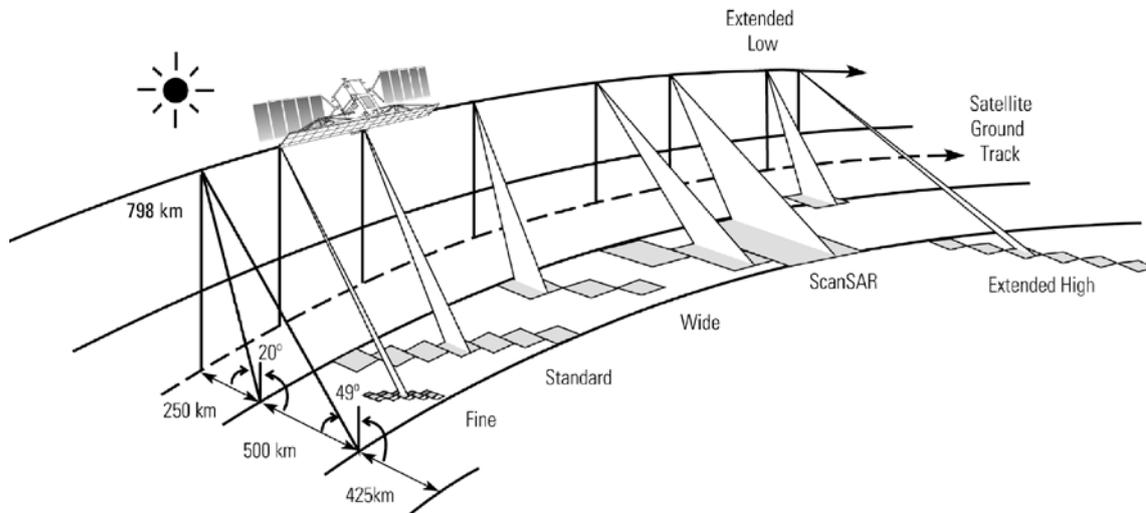
**Tabela 3.1** Especificações técnicas da cena Landsat utilizada neste trabalho

<i>Plataforma/Sensor</i>	<i>Bandas</i>	<i>Órbita/Ponto</i>	<i>Data de imageamento</i>	<i>Ângulo de incidência</i>	<i>Resolução espacial</i>	<i>Swath</i>
Landsat 7 ETM+	1, 2, 3, 4, 5, 7	225/059	18 nov. 2000	Nadir	30 m	185 km

### 3.1.1.2 O sistema Radarsat

O Radarsat tem um sensor de microondas ativo na banda C ( $\bullet$  5.6 cm) que transmite pulsos na frequência de 5.3 GHz, característica que o habilita operar em condições climáticas adversas, ou mesmo durante a noite. Sua polarização é horizontal (HH) e possui sistema SAR (Jensen 1996, Paradella *et al.* 2005).

No SAR há sete tamanhos de imagens denominados *bean mode*. Cada *bean mode* é definido pela sua área de cobertura e resolução espacial. Os modos variam do *Fine*, que cobre uma área de 50 x 50 km e tem resolução espacial de 10 x 10 m, até o *ScanSAR Wide*, que cobre uma área de 500 x 500 km, com resolução espacial de 100 x 100 m (**Figura 3.1**) (Jensen 1996).



**Figura 3.1** Modos de operação do Radarsat-1  
 Fonte: RADARSAT International (2000).

As imagens Radarsat têm sido empregadas, com êxito, em trabalhos desenvolvidos na costa Amazônica. Mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental à derramamento de óleo (Gonçalves 2005, Boulhosa 2006), representação de feições morfológicas utilizando DEM (Costa & Souza Filho 2007), monitoramento da dinâmica costeira (Souza Filho 2000, Souza Filho & Paradella 2001, Proisy *et al.* 2003, Batista 2006, Santos 2006, Souza Filho *et al.* 2006), reconhecimento e mapeamento de feições morfológicas (Souza Filho & Paradella 2002, 2003, 2005, Teixeira 2006, Rodrigues 2008) são alguns exemplos do emprego do sensor SAR em estudos sobre a Plataforma Costeira Amazônica.

#### 3.1.1.2.1 Especificações técnicas das cenas Radarsat utilizadas

Compõe este trabalho três cenas Radarsat, com modo de imageamento *Wide-1* (Radarsat-1) órbita descendente. Tais imagens são dos anos de 2003 e 2004, com projeção cartográfica UTM, disponibilizadas pelo projeto PIATAM mar, Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás). As especificações técnicas das cenas estão descritas na **Tabela 3.2**.

**Tabela 3.2** Especificações técnicas das cenas Radarsat-1 utilizadas

<i>Plataforma</i>	<i>Sensor</i>	<i>Data de imageamento</i>	<i>Projeção</i>	<i>Ângulo de incidência</i>	<i>Resolução espacial</i>	<i>Swath</i>	<i>Órbita</i>
Radarsat	Wide1	22 fev. 2003 06 set. 2004 30 set. 2004	UTM	20° - 31°	33 x 27 m	165 km	Descendente

### 3.1.1.3 SRTM (*Space Shuttle Radar Topography*)

A Missão Topográfica SRTM usou um InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), bandas C e X, com polarizações HH e VV, para adquirir informações topográficas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) da superfície terrestre. Os dados foram disponibilizados na forma de DEM com resolução espacial de 30 m para a banda X e 90 m para a banda C. A acurácia vertical absoluta e relativa do DEM é de aproximadamente 16 m e 6 m, respectivamente.

Os dados SRTM podem ser úteis para regiões onde não há levantamento altimétrico sistemático, áreas estas onde os mapas topográficos, quando existem, são limitados e inexatos. Para regiões de difícil acesso, tais como áreas montanhosas, desertos e florestas tropicais, com baixa e inadequada cobertura de dados altimétricos, principalmente em função das dificuldades de acesso, esses dados podem ser usados com eficácia (Gonçalves 2005).

#### 3.1.1.3.1 *Especificações técnicas do SRTM utilizado*

Para processamento digital das imagens empregadas foram usados os dados da cena SRTM, ponto/órbita 225/059, formato GeoTIFF - 16 bits. As especificações técnicas da cena estão descritas na **Tabela 3.3**.

**Tabela 3.3** Especificações técnicas do SRTM utilizado

<i>SAR</i>	<i>Data de imageamento</i>	<i>Ponto/órbita</i>	<i>Comprimento de onda (•)</i>	<i>Projeção</i>	<i>Datum</i>	<i>Resolução</i>	<i>Tipo de cena</i>	<i>Área imageada</i>
SRTM	11 fev. 2000	225/059	banda C (5.3 cm)	UTM	WGS84	90 m	WRS-2	111 km

Esta imagem foi adquirida por meio de *download* gratuito no portal eletrônico da University of Maryland, através do endereço eletrônico <http://glcf.umiacs.umd.edu/research/portal/geocover>. A cena está processada digitalmente e posicionada na versão denominada *grau*, que tem atributos como projeção geográfica UTM, resolução espacial de 90 m e área imageada de  $1^0 \times 1^0$  (latitude/longitude). Em todas as cenas imageadas pela missão há áreas sem informações (“buracos”), representados por cotas negativas (principalmente sobre a água) e muito elevadas (típico de áreas montanhosas). Estes ‘buracos’ devem ser corrigidos pelos usuários em plataformas que suportem arquivos GeoTIFF (USGS 2004, Building 2006).

### 3.1.2 Processamento digital de imagens (DPI)

O processamento digital de imagens remove erros sistemáticos nos dados imageados pelas plataformas orbitais, aumentando a sua inteligibilidade (seja pela remoção de erros aleatórios ou pela rerepresentação dos dados) como uma representação do objeto a ser detectado e extrai padrões significativos a partir dos dados. A maioria do processamento da imagem é realizado em dados digitais, já que este é o formato em que a maioria dos dados são fornecidos, e uma vez que é muito mais fácil executar as mais simples operações em dados digitais que são mantidos na memória do computador (Rees 2001).

O processamento digital das cenas usadas neste trabalho executou-se em (1) três imagens Radarsat-1, imageadas em fevereiro de 2003 e novembro de 2004, (2) uma cena Landsat 7 ETM+, ponto/órbita 225/059, imageada em novembro de 2000 e, (3) uma cena SRTM, imageada em fevereiro de 2000, ponto/órbita 225/059. Os principais parâmetros técnicos destas imagens estão descritos na **Tabela 3.4**.

**Tabela 3.4** Especificações técnicas dos sensores remotos utilizados

<i>Plataforma</i>	<i>Sensor</i>	<i>Bandas</i>	<i>Ponto/órbita</i>	<i>Data de imageamento</i>	<i>Ângulo de incidência</i>	<i>Resolução espacial</i>	<i>Swath</i>
Radarsat	Wide 1	C	Descendente	22 fev. 2003	20° - 31°	33 x 27 m	165 km
				6 set. 2004			
				30 set. 2004			
Landsat	ETM+	1, 2, 3, 4, 5, 7	225/059	18 nov. 2000	Nadir	30 m	185 km
SRTM	InSAR	C		11 fev. 2000	Off-nadir	90 m	111 km

Para o processamento digital das cenas foram utilizados os seguintes *softwares*: (a) os programas *Focus* e *OrthoEngine* do *software* PCI Geomatics v. 9.1 e, (b) o *software* Global Mapper v. 11. Para cartografar os mapas e manipular espacialmente os dados geográficos, o programa ArcMap do *software* ArcGIS v. 9.2 foi usado (ESRI 2003, PCI Geomatics 2003, Global Mapper LLC 2009).

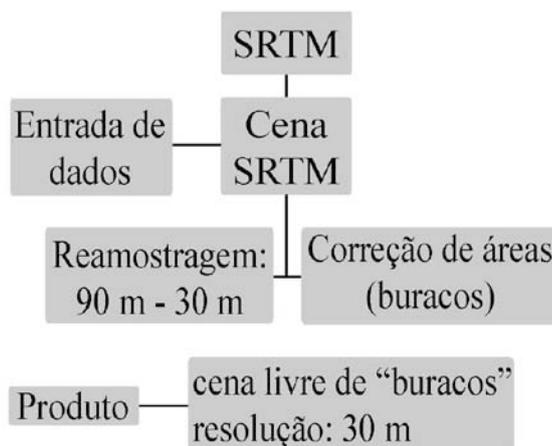
Antes de serem aplicadas as técnicas de processamento digital às imagens manipuladas neste trabalho, foi efetuado o recorte das cenas com o objetivo de restringir os dados à área de interesse.

Este recorte foi feito no programa *Focus* do *software* PCI Geomatics v. 9.1, através da função *clipping/subsetting*. A forma do recorte foi selecionada a partir da delimitação da área de estudo, gerando uma forma indefinida. Esta forma também foi adotada para todas as imagens usadas no trabalho.

### 3.1.2.1 Processamento digital da cena SRTM

Devido a integração das imagens de sensores remotos empregadas neste trabalho e a diferentes resoluções espaciais que eles possuem, houve a necessidade de reamostrar a cena SRTM para compatibilização com as demais. Esta cena, que originalmente possui resolução espacial de 90 m, foi reamostrada para 30 m com o uso do *software* Global Mapper v. 11 (Global Mapper LLC 2009).

A cena SRTM possui falhas nas informações sobre elevação (como valores de -32.767 m a 848.283 m) que necessitam de correções. Essas cotas “irregulares” foram eliminadas através de cálculos matemáticos usando o programa ArcMap do *software* ArcGIS v. 9.2, permanecendo assim somente valores de elevação que representam a real morfologia do terreno (área plana). As etapas deste processamento são representadas na **Figura 3.2**.



**Figura 3.2** Organograma das etapas de processamento digital da cena SRTM.

### 3.1.2.2 Processamento digital da cena ETM+

Para o processamento digital da cena Landsat foram empregadas as operações de pré processamento (correção atmosférica e correção geométrica), melhoramento visual, análise estatística e composição colorida.

#### 3.1.2.2.1 Correção atmosférica

Imagens ópticas sofrem interferência atmosférica devido à interação entre radiação, atmosfera e superfície, os quais provocam ruídos nas cenas comprometendo a interpretação dos alvos imageados por sensores remotos. Métodos de regressão, de subtração, de transformação de radiância para reflectância e de transição radiativa, com base nas propriedades óticas da atmosfera, são técnicas frequentemente usadas pelo observador para a correção desses ruídos (Chen *et al.* 1995).

Neste trabalho as bandas do visível da cena ETM+ foram corrigidas através do emprego da *técnica de subtração do pixel escuro* ou *método de subtração*, aperfeiçoada por Chavez Jr. (1988). Este método ameniza a influência atmosférica através das informações fornecidas por alvos de tonalidade escura em cada banda da cena. Estas informações são extraídas de histogramas das bandas do visível da cena a ser corrigida.

Para a execução desta correção foi utilizada a função *Edit LUT*, para a análise dos histogramas e, a função *ARICONST* para a subtração dos níveis digitais das bandas do visível do programa *Focus* do *software* PCI Geomatics v. 9.1 (PCI Geomatics 2003).

Com a retirada dos valores extras de níveis de cinza através da correção atmosférica desferida à cena ETM+, o contraste das bandas aumentou, possibilitando aprimoramento visual da cena.

#### 3.1.2.2.2 Correção geométrica

A cena do ETM+ foi processada e ortorretificada pela GLCF da University of Maryland e possui o *level-1T* de correção. Este nível inclui precisa correção radiométrica e geométrica do terreno através do método GCP, correção do erro de paralaxe (devido a topografia local) por DEM/SRTM, datum horizontal WGS84 e projeção geográfica UTM. Este conjunto de dados agrupados gera um produto livre de distorções geométricas, causadas pelo sensor (como os efeitos do ângulo de visão), pelo satélite e pela Terra (como rotação, curvatura, relevo) (Reddy 2008, Williams 2009).

#### 3.1.2.2.3 Aumento linear de contraste

Com objetivo de exibir informações omitidas na cena bruta do ETM+ e deixá-la mais visível à interpretação, foi aplicado um aumento linear de contraste. A ferramenta *Enhance – LUT* do programa *Focus* do *software* PCI Geomatics v. 9.1 foi utilizada, fazendo a manipulação dos histogramas de cada banda, onde nota-se que quanto mais espalhado estiverem, maior o contraste da imagem e vice-versa.

#### 3.1.2.2.4 Análise estatística e composição colorida da cena ETM+

Para a investigação e entendimento dos dados estatísticos e, posteriormente, a composição colorida das bandas da cena ETM+ empregada neste trabalho, foram selecionadas as bandas do visível (1, 2 e 3), do infravermelho próximo (4) e do infravermelho médio (5 e 7) do espectro eletromagnético das 8 bandas disponibilizadas pelo sensor Landsat.

Além de outros valores relevantes, os valores de desvio padrão (**Tabela 3.5**), variância (**Tabela 3.7**) e correlação (**Tabela 3.6**) compõem o conjunto de dados estatísticos contidos nas bandas do ETM+. O somatório dos desvios padrões de três combinações de bandas do sensor, dividido pelo somatório do coeficiente de correlação dessas mesmas bandas geram o valor de OIF (*Optimum Index Factor*) (**equação (1)**).

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^3 \text{Desv. Padrão}_i}{\sum_{j=1}^3 |\text{Coef. Correl.}_j|} \quad (1)$$

**Tabela 3.5** Estatística de seis bandas do ETM+

<i>Bandas</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
1	82,905	11,782
2	69,978	13,935
3	67,583	23,652
4	77,121	22,422
5	97,207	40,838
7	56,705	29,200

**Tabela 3.6** Matriz de correlação entre as bandas Landsat ETM+

<i>Bandas</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>7</i>
<i>1</i>	1,000	*	*	*	*	*
<i>2</i>	0,965	1,000	*	*	*	*
<i>3</i>	0,950	0,953	1,000	*	*	*
<i>4</i>	-0,343	-0,267	-0,385	1,000	*	*
<i>5</i>	0,242	0,208	0,272	0,374	1,000	*
<i>7</i>	0,437	0,353	0,458	0,051	0,915	1,000

**Tabela 3.7** Matriz de covariância entre as bandas Landsat ETM+

<i>Bandas</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>7</i>
<i>1</i>	136,67	*	*	*	*	*
<i>2</i>	156,52	192,71	*	*	*	*
<i>3</i>	262,03	311,64	556,07	*	*	*
<i>4</i>	-93,32	-86,13	-208,92	508,78	*	*
<i>5</i>	111,18	111,53	252,31	348,38	1669,32	*
<i>7</i>	146,15	138,51	309,05	36,06	1089,66	848,62

O valor de OIF é derivado da técnica desenvolvida por Chavez Jr. *et al.* (1982), a qual fundamenta-se nos valores de variância e correlação entre as bandas. A combinação de três

bandas que tem o maior valor de OIF geralmente terá a maior parte das informações (quando medida pela variância) com a mínima quantidade de duplicação (quando medida pela correlação), sendo assim selecionada para a composição colorida ideal (Jensen 1996).

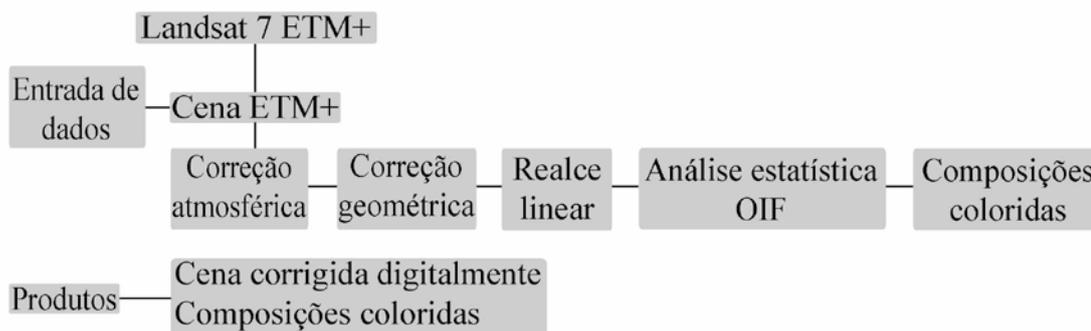
O grupo de informações numéricas das bandas foi adquirido através do relatório produzido pelo processamento digital de transformação da imagem, chamado de PCA.

A partir do agrupamento dos dados estatísticos e dos valores de OIF (**Tabela 3.8**), a tríade 347 é a que apresenta maior quantitativo de informações e menor taxa de redundância entre as bandas para área em estudo. Segundo Jensen (1996), geralmente a melhor combinação entre três bandas inclui uma banda do visível, uma banda do infravermelho médio juntamente com a banda 4. Esta, está presente em cinco das seis primeiras disposições do *ranking* de 20 possíveis combinações sugeridas no trabalho de Chavez Jr. *et al.* (1982) e nas testadas nesta dissertação.

**Tabela 3.8** Valores de OIF em vinte possíveis combinações no conjunto de três bandas do ETM+

<i>Combinação</i>	$\Sigma$ <i>Desvio Padrão</i>	$\Sigma$ <i>/Coef. Correl./</i>	<i>OIF</i>
347	75,274	0,124	607,04
247	65,557	0,137	478,51
147	63,404	0,145	437,26
345	86,912	0,261	332,99
145	75,042	0,273	274,87
134	57,856	0,222	260,61
245	77,195	0,315	245,06
234	60,009	0,301	199,36
124	48,139	0,355	135,60
457	92,460	1,340	69,000
357	93,690	1,645	56,954
257	83,973	1,476	56,892
235	78,425	1,433	54,727
135	76,272	1,464	52,098
157	81,820	1,594	51,329
125	66,555	1,415	47,035
237	66,787	1,764	37,861
137	64,634	1,845	35,031
127	54,917	1,755	31,291
123	49,369	2,868	17,213

As etapas de processamento digital da cena Landsat estão esquematizadas na **Figura 3.3**.



**Figura 3.3** Organograma mostrando as etapas de processamento da cena ETM+

### 3.1.2.3 Processamento digital de imagens SAR

Os procedimentos de ortorretificação (pré processamento), aplicação do filtro adaptativo do tipo *Enhanced Frost*, realce do tipo linear e composição colorida no espaço de cores RGB (*Red, Green, Blue*) foram utilizados para processar digitalmente e atribuir aperfeiçoamento visual as cenas do Radarsat-1 usadas neste trabalho.

#### 3.1.2.3.1 Ortorretificação das imagens Radarsat-1

As cenas do Radarsat-1 utilizadas foram imageadas nos anos de 2003 e 2004, com órbita descendente e adquiridas em formato “bruto”, ou seja, são cenas que têm distorções espaciais provocadas em virtude da posição, velocidade e altitude da plataforma, pelo modo de operação do sensor (azimute de visada e ângulo de incidência), pela curvatura da Terra (elipsóide) e em função da projeção cartográfica. A fim de corrigir estas distorções, a técnica de ortorretificação foi empregada.

A técnica da ortorretificação leva em consideração os dados de efemérides do sensor (*orbit*) e informações de elevação da área imageada, aplicados a um modelo matemático que calcula a posição e orientação do sensor no período em que as imagens foram adquiridas.

Inicialmente os dados de efemérides (*orbit*) foram adicionados as imagens, através da função *Algorithm Librarian – ORBITRD*, do programa *Focus* do *software PCI Geomatics*, V. 9.1. Posteriormente, utilizou-se o programa *OrthoEngine* do *software PCI Geomatics*, V. 9.1. para o processo de ortorretificação, onde criou-se o projeto de trabalho de cada cena. Neste projeto foram definidos (1) o modelo matemático *Satellite Orbital Modelling –*

*ASAR/PALSAR/RADARSAT/TerraSAR-X Specific Model*, (2) o sistema de projeção cartográfica UTM Zona 22 e (3) o elipsóide WGS 84.

A etapa seguinte consistiu da coleta de GCP's. Para as cenas imageadas em 30 de setembro de 2004 e de 22 de fevereiro de 2003 vinte GCP's foram reunidos, apresentando RMS (*Root Mean Square*) igual a 0.56 e 0.47 *pixel*, respectivamente. Já para a imagem de 6 de setembro de 2004 onze GCP's foram coletados, com RMS igual a 0.73 *pixel*. A coleta dos pontos ocorreu por meio do processo *imagem/imagem* com base na cena ortorretificada do ETM+, imageada em 18 de novembro de 2000, usada neste trabalho.

Finalmente é efetuada a ortorretificação, perante a inserção de outros parâmetros relacionados à imagem SAR. As coordenadas dos pontos de controle são transferidas para a imagem bruta, assim como de todos os pixels da imagem através do processo de interpolação. O pacote *Schedule orto generation* do programa *OrthoEngine* do *software* PCI Geomatics, V. 9.1 foi utilizado para a realização dos cálculos matemáticos inerentes ao processo.

#### 3.1.2.3.2 *Composição colorida no espaço de cores RGB*

A composição colorida é uma técnica de realce de imagens onde modifica, através de funções matemáticas, os níveis de cinza ou os valores digitais de uma imagem, de modo a destacar certas informações espectrais e melhorar a qualidade visual da imagem, facilitando a análise do fotointérprete. A composição é produzida na tela do computador, ou em outro dispositivo qualquer, atribuindo-se as cores primárias (vermelho, verde e azul) a três bandas espectrais quaisquer. Este artifício é também conhecido como composição (Figueiredo 2005).

As cores primárias foram atribuídas às imagens Radarsat por meio da ferramenta *transfer layers* do programa *Focus* do *software* PCI Geomatics, V. 9.1, que agrupa, de forma orientada pelo usuário, as cenas através de operações matemáticas e origina um novo arquivo onde cada imagem é empregada em um canal de cores primárias. A composição gerada neste trabalho distribuiu a cena imageada em fevereiro de 2003 ao canal R, a cena imageada em 6 de setembro de 2004 ao canal G e a cena imageada em 30 de setembro de 2004 no canal B, gerando assim uma imagem colorida em RGB a partir das cenas Radarsat usadas no trabalho.

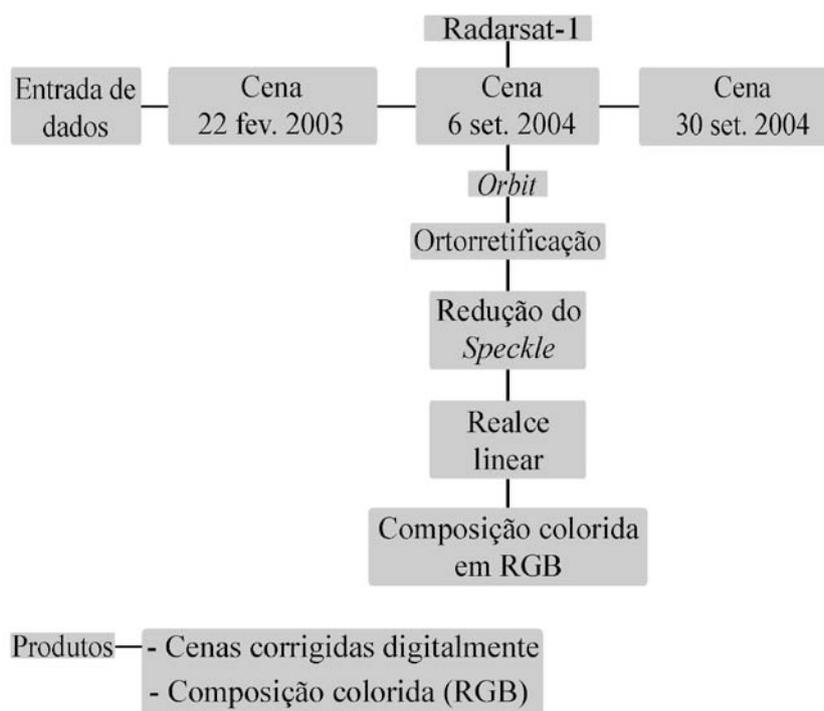
Como os níveis de cinza de cada banda representam a assinatura espectral dos alvos, as colorações que as feições terrestres recebem nas imagens representam valioso meio de reconhecimento e de obtenção de informações, de modo indireto (Figueiredo 2005).

### 3.1.2.3.3 Redução do efeito Speckle

O *Speckle* é um ruído multiplicativo proporcional a intensidade do sinal recebido. O efeito visual deste ruído proporciona uma textura granulosa (efeito ‘sal e pimenta’) que pode dificultar a interpretação das imagens de radar, reduzindo a separabilidade entre os objetos da cena (Spring 2006).

Alguns filtros espaciais foram desenvolvidos para a redução deste ruído e para o aumento da relação sinal-ruído, objetivando melhoria visual de separação entre os alvos da superfície, com a mínima perda de informação. Neste trabalho o filtro adaptativo do tipo *Enhanced Frost*, com janela 3 x 3 (amostragem *Kernel*) foi aplicado nas cenas, minimizando assim a perda de informações radiométricas e texturais e suavizando a imagem sem remover bordas. Além deste filtro também foi aplicado um realce linear as cenas. Para a execução desta tarefa foi utilizada a função *Radar Analysis – SAR Speckle Filtering – FSPEC* do programa *Focus* do software *PCI Geomatics*, V. 9.1.

A **Figura 3.4** mostra as etapas de processamento para as imagens Radarsat-1 utilizadas.



**Figura 3.4** Organograma mostrando as etapas de processamento das cenas Radarsat-1

### 3.1.2.4 Fusão de dados multisensores

Dados de diferentes sensores podem ser mesclados trazendo o conceito de fusão de dados multisensores. Um excelente exemplo desta técnica é a combinação de dados multiespectrais ópticos com imagens de Radar. Estas duas diferentes representações espectrais da superfície pode fornecer informações complementares. Os dados ópticos fornecem informações espectrais detalhadas para discriminar tipos de cobertura da superfície, enquanto as imagens de radar destacam os detalhes estruturais da imagem (CCRS 2007).

Em geral, as técnicas podem ser agrupadas em duas classes: (1) técnicas relacionadas a cores, e (2) estatística/métodos numéricos. O primeiro inclui a composição de cor de três canais da imagem no espaço de cor RGB, assim como transformações de cor mais sofisticadas, como IHS (*Intensity, Hue, Saturation*) e HSV (*Hue, Saturation, Value*). Abordagens numéricas são desenvolvidas com base nas estatísticas do canal, incluindo os de correlação e filtros. Técnicas como PCA e a regressão pertencem a este grupo (Pohl & Van Genderen 1998).

Para aplicação desta técnica as imagens necessitam de pré-processamento. Em imagens ópticas a correção atmosférica e uma boa precisão geométrica são requeridas, o que pode ser alcançado através do processo de ortorretificação ou mesmo, com correção geométrica. Já para as imagens SAR, além de necessitar de ortorretificação, a redução do efeito *Speckle* é necessária para melhor identificação dos objetos na escolha dos GCP's.

Neste trabalho foram empregadas técnicas relacionadas a cores e as estatísticas/métodos numéricos, sendo a transformação PCA a técnica principal para a fusão digital da imagem Landsat 7 com a Radarsat-1 imageada em 6 de setembro de 2004. A fusão da melhor tríade OIF com a Radarsat-1 e a transformação PCA e SPCA em fusão com a Radarsat-1 foram feitas neste trabalho. O realce por decorrelação foi aplicado aos produtos gerados a fim de aprimorar a cromaticidade.

#### 3.1.2.4.1 Fusão da melhor tríade OIF com Radarsat-1

A fusão da Radarsat-1, imageada em 6 de setembro de 2004, com a melhor combinação OIF (de valor de OIF 607,04 - **Tabela 3.8**) foi realizada a partir de operações matemáticas, em que agrega várias bandas, de forma orientada pelo usuário, gerando assim um novo produto. As bandas foram agregadas por meio da ferramenta *transfer layers* do programa *Focus* do software *PCI Geomatics*, V. 9.1.

### 3.1.2.4.2 PCA e SPCA em fusão com Radarsat-1

A transformação PCA é útil para a codificação de imagens, compressão de dados de imagens, realce de imagem, detecção de mudanças digital, dimensionalidade multitemporais e fusão de imagens. É uma técnica estatística que transforma um conjunto de dados multivariados relacionados entre si em um novo conjunto de dados não-correlacionados. Ele gera um novo conjunto de eixos que são ortogonais (Pohl & Van Genderen 1998). A abordagem para o cálculo das componentes principais inclui o cálculo de (1) covariância e de correlação da matriz, (2) autovalores e vetores e (3) CP's (*Principal Component*) (**Tabela 3.9** e **Tabela 3.10**).

**Tabela 3.9** Parâmetro estatístico das componentes principais para as bandas do ETM+

<i>CP</i>	<i>Autovalor</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Variância (%)</i>
1	2572,7634	50,7224	65,76
2	995,5519	31,5524	25,45
3	297,5538	17,2497	7,61
4	30,9530	5,5635	0,79
5	12,1907	3,4915	0,31
6	3,1678	1,7798	0,08

**Tabela 3.10** Matriz de autovetores das componentes principais para as bandas da cena ETM+

<i>Bandas</i>	<i>1 CP</i>	<i>2 CP</i>	<i>3 CP</i>	<i>4 CP</i>	<i>5 CP</i>	<i>6 CP</i>
1	0,09243	0,09713	0,19868	0,11463	0,78982	0,55281
2	-0,30712	-0,35295	-0,63794	0,55482	0,23420	-0,10702
3	0,21598	0,36568	0,38474	0,74496	-0,03756	-0,33945
4	0,22328	0,01125	-0,15976	0,31655	-0,54271	0,72785
5	-0,56008	-0,50527	0,60627	0,15320	-0,14409	0,13863
7	0,69781	-0,69053	0,11155	0,02010	0,06808	-0,13688

De modo geral, esse novo conjunto de imagens terá as seguintes características: a primeira delas, chamada de 1ª CP (CP1) irá conter a informação que é comum a todas as bandas originais e terá a maior variação de brilho e maior número de informações, a 2ª CP (CP2) irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto e assim cada vez menos as CPs de ordem mais alta irão conter atributos espectrais cada vez menos significantes, até a

última CP, que concentrará então a informação que sobrar. As três primeiras componentes reunirão aproximadamente 98% da variância total (Crósta 1992, Rodrigues 2008).

Os valores das matrizes mostram que a CP1 contém 65,76%, a CP2 detém 25,45% e a CP3 possui 7,61% da variância das bandas refletidas do ETM+. Estas três primeiras componentes principais agregam 98,82% da variância total, condensando as informações espectrais de todas as bandas do sensor (**Tabela 3.9**).

O exame da magnitude e sinal dos autovetores gerados é importante para compreender como cada banda contribui para a variância da CP. Assim, uma alta reflectância é expressa por valores positivos de autovetores. De maneira inversa, baixa reflectância é expressa por valores negativos de autovetores (Picchiotti *et al.*, 1997 *apud* Rodrigues 2008).

A matriz de autovetores (**Tabela 3.10**) mostra que na 1CP predomina a contribuição das bandas 7 (0,69781), banda 4 (0,22328) e banda 3 (0,21598). Estes valores, consequente das informações espectrais e de variância destas bandas, indicam a presença de diversas espécies vegetais (sadias ou alteradas) refletidas nos comprimentos de onda do infravermelho médio e próximo e a nítida separação entre solo exposto e vegetação, permitida pela interação dos alvos com a banda no visível. A 1CP mostra claramente uma distinção entre a maior colaboração das bandas do infravermelho, em detrimento da menor colaboração das bandas do visível, de forma que estes dois conjuntos de dados estão inversamente associados.

A 2CP é dominada pela contribuição da banda 3 (0,36568), banda 1 (0,09713) e banda 4 (0,01125), consequência da forte influência das respostas espectrais na distinção entre solo nu, vegetação e morfologia do terreno. Ao contrário da 1CP, onde há predominância de bandas no visível. Já a 3CP é dominada pela contribuição das bandas 5, 3 e 1.

A transformação PCA em fusão de imagens tem duas abordagens: (a) PCA da imagem multicanal - a substituição do primeiro componente principal por meio de diferentes imagens (Substituição de Componentes Principais – CP's) ou (b) PCA dos dados de todos os canais de multi-imagem (Pohl & Van Genderen 1998).

A fusão dos produtos PCA e SPCA com a Radarsat-1 foi realizada neste trabalho através da abordagem que combina PCA/RGB. Esta combinação protege a contribuição de imagens ópticas de serem muito afetadas pelo efeito *Speckler* do SAR. Além disso, a fusão do PCA com o SAR permite a integração de mais de três tipos de dados. Principal componente de imagens SAR apresentam potencial para o mapeamento topográfico. Isso é válido, em particular, para a impressão tridimensional da topografia e detecção de alterações (Zobris *et al.* 1979 *apud* Pohl & Van Genderen 1998).

A transformação SPCA é uma técnica desenvolvida por Chavez Jr. & Kwarteng (1989) para realçar e mapear as diferenças espectrais ou o contraste entre as diferentes regiões do espectro eletromagnético. Esta técnica seleciona subconjuntos ou pares de imagens (SPCA 1: bandas 1, 2 e 3 – faixa do visível e SPCA 1: bandas 5 e 7 – faixa do infravermelho da cena Landsat) altamente correlacionados como entrada para o PCA. Ao agrupar as imagens desta forma o PCA irá mapear a maioria da variância ou informações para o primeiro componente, devido o alto grau de correlação entre as imagens de entrada. Os resultados deste tipo de transformação SPCA são mais fáceis de interpretar visualmente do que os resultados da PCA padrão, onde todas as seis bandas são simultaneamente usadas como entrada. A maioria das composições feitas utilizando o PCA seletivo terá mais de 98% da variação total contida nas seis bandas ETM+.

Neste trabalho os canais escolhidos para a SPCA são as bandas 1, 2 e 3 (SPC1 - **Tabela 3.11**) e as bandas 5 e 7 (SPC1 - **Tabela 3.12**). A fusão é formada pelas SPC1's com a cena imageada em 6 de setembro de 2004 do Radarsat-1.

**Tabela 3.11** Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas do visível do ETM+

<i>Bandas</i>	<i>1CP</i>	<i>2CP</i>	<i>3CP</i>
<i>1</i>	-0,38723	-0,46135	-0,79825
<i>2</i>	0,47166	0,64480	-0,60147
<i>3</i>	-0,79220	0,60941	0,03209
<i>Variância</i>	97,50%	1,86%	0,64%

**Tabela 3.12** Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas do infravermelho do ETM+

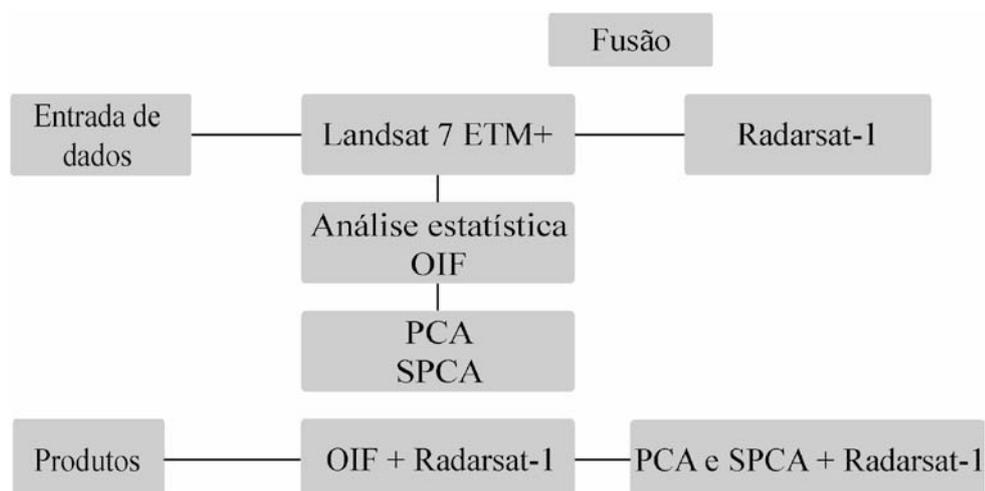
<i>Bandas</i>	<i>1CP</i>	<i>2CP</i>
<i>5</i>	-0,82232	-0,56902
<i>7</i>	0,56902	-0,82232
<i>Variância</i>	96,24%	3,76%

Os valores das matrizes das **Tabelas 11 e 12** mostram que a primeira componente principal seletiva para o subconjunto de bandas do visível (1CP) contém 97,50%, a segunda componente principal seletiva (2CP) detém 1,86% e a terceira componente principal seletiva (3CP) possui 0,64% da variância das bandas refletidas do ETM+. Já a primeira componente principal seletiva para o subconjunto de bandas do infravermelho (1CP) contém 96,24% e a segunda componente principal seletiva (2CP) detém apenas 3,76% da variância das bandas do infravermelho da cena ETM+. Estes resultados demonstram que a primeira componente seletiva sozinha consegue agregar toda a faixa espectral do conjunto selecionado de cenas, reduzindo sua dimensionalidade com pouca perda de informações de interesse.

### 3.1.2.4.3 Realce por decorrelação

O realce por decorrelação visa restaurar as relações de cores originais, para efeito de interpretação das informações contidas na cena, modificadas durante a PCA (Paradella *et al.* 2001). Para aplicação deste realce nas bandas utilizadas, o algoritmo DECORR (*decorrelation stretch*) do programa *Focus* do *software* PCI Geomatics, V. 9.1. foi empregado.

A **Figura 3.5** exhibe as etapas de fusão do sensor óptico com a imagem Radarsat-1 imageada em 6 de setembro de 2004.



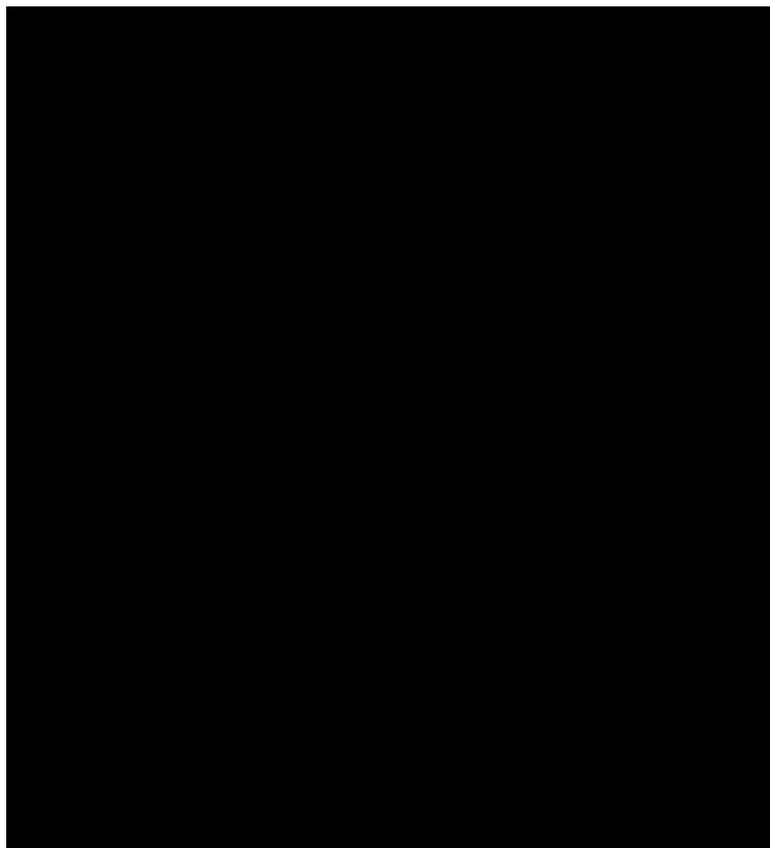
**Figura 3.5** Organograma mostrando as principais etapas de processamento das cenas utilizadas e o processo de fusão do sensor óptico com imagens SAR.

### 3.2 COLETA DE DADOS EM CAMPO

O trabalho de campo possui uma dimensão única, pois sua prática é atuante e de ação compartilhada, na qual o protagonista do assunto estudado não é o livro didático, e sim o espaço que está sendo estudado (visitado). Para eficácia do trabalho de campo uma sistematização é necessária, criando um método que norteará o objetivo do estudo. Num primeiro momento devem ser feitos “trabalhos pré-campo”. Nesta etapa ocorre o planejamento do campo, com um roteiro de viagem e com os pontos de interesse, com a coleção de dados referentes à região em estudo para possibilitar maior entendimento. O segundo momento é o próprio “trabalho de campo”, que consiste de procedimentos técnicos como: registro em caderneta de campo, registro fotográfico, registro de entrevista, referenciais de orientação e localização dos objetos de estudo. O último procedimento será a elaboração do “trabalho pós-campo”. Nesta etapa os dados coletados serão organizados e analisados de forma a se chegar às conclusões pretendidas no início do trabalho. Também serão produzidos mapas e tabelas, e ocorrerá a preparação das amostras coletadas para análises mais detalhadas. Por fim, os resultados do trabalho de campo e de laboratório serão usados na produção de um material escrito para publicação, seja um relatório, uma dissertação, uma monografia ou um artigo, onde serão expostas as conclusões obtidas e a metodologia de pesquisa do objeto de estudo (Latini & Araújo 2009).

A etapa de campo deste trabalho foi dividida em duas fases (I) reconhecimento da área de estudo e coleta de informações para subsidiar a logística para a IV Expedição do projeto AMASIS (Integração de dados geofísicos, geológicos e geoquímicos na reconstituição da paleogeografia da costa Amazônica do Terciário ao recente) e, (II) coleta de dados topográficos e validação dos produtos sensores remotos. No período de 30 de julho à 9 de agosto foi realizado a fase I de campo e no período de 16 de novembro a 4 de dezembro a fase II, no ano de 2009.

O deslocamento à área de estudo foi por via terrestre e fluvial, partindo da cidade de Macapá-AP. Por terra, trafegou-se pela BR-156 até o município de Amapá, distante cerca de 320 km da capital do Estado. Da cidade de Amapá até a área de estudo, o deslocamento foi realizado por via fluvial pelo rio Amapá Grande até o canal do Varadouro de Maracá e, posteriormente acesso ao igarapé Tijolo e fazenda São João (**Figura 3.6**).



**Figura 3.6** Deslocamento à fazenda São João, enfatizando a viagem por via terrestre (representada pela linha preta) e por via fluvial (representado pela linha vermelha).

Na fase I alvos como igarapés, fazendas e retiros foram identificados e georreferenciados, bem como as condições materiais (navegação, hospedagem, segurança, recursos humanos e equipamentos de campo) e naturais (maré, água potável e deslocamento dentro da área) do local foram observados. Estes procedimentos foram adotados a fim de subsidiar o planejamento da fase II de campo.

Após estudo das condições fisiográficas *in loco* a espacialização das informações coletadas foi executada. As coordenadas geográficas adquiridas foram plotadas na cena georreferenciada Landsat 7, usando como ferramenta o *software* ArcMap. A partir dos dados cartografados notou-se que a área em estudo abrange o limite de três fazendas: fazenda São João, Macarry e IZ e, que grande parte da área de estudo está inserida na fazenda São João, a qual possui retiros espalhados pela propriedade, fator este determinante à logística da II fase de campo.

A partir da espacialização dos dados uma carta imagem foi confeccionada com os dados adquiridos na fase I de campo, além de subsidiar a navegação dentro da área e validar os produtos oriundos do processamento digital de imagens.

Na fase II foi executada a IV Expedição do projeto AMASIS, na qual consistiu em adquirir informações de superfície (registro fotográfico, validação das imagens de sensores remotos e levantamento topográfico) com objetivo de subsidiar este trabalho e ao projeto.

O registro fotográfico foi focado em alvos que poderiam ser identificados em uma interpretação visual nos produtos sensores remotos e auxiliar na interpretação dos dados topográficos. Cercas, áreas com vegetação densa, espaçada ou sem vegetação, canais, morfologia do terreno e construções foram informações registradas pela câmera fotográfica. A câmera marca Sony Cyber-shot 7.2 mega pixels foi o equipamento utilizado no registro das fotografias.

Para validação dos produtos sensores remotos usou-se a carta imagem confeccionada para auxiliar na fase II de campo. Através desta carta verificou-se a realidade do terreno e as áreas interpretadas em laboratório como solo sem vegetação condiziam com a realidade do terreno e, que alguns contornos presentes na imagem, no terreno coincidiam com a vegetação acompanhando cercas.

Informações referentes às cotas topográficas foram adquiridas na fase II de campo. O método usado foi o *nivelamento geométrico*, também chamado de *levantamento topográfico*. Este método consiste na determinação dos ângulos verticais ou inclinações das linhas do terreno sobre o plano horizontal, a fim de deduzir as *cotas* ou *altitudes* dos diversos pontos do terreno em relação a um *plano arbitrário* inicial de cota zero, ou ao nível médio do mar (Espartel 1965).

Para execução deste nivelamento, as seguintes ferramentas foram utilizadas: nível topográfico e tripé, mira topográfica de 4 m, trena de 50 m, GPS Garmin CSX, fichas e caderneta de campo e, piquetes de madeira. Para a confecção dos perfis, utilizou-se o *software* Surfer v. 9.8 e Grapher v. 7 (Surfer 2009, Grapher 2007).

O nivelamento geométrico foi executado nos *perfis L1* e *L2* (**Figura 3.8 a**) e as estações de observação foram posicionadas em pontos fixos, espaçados em intervalos médios de 100 m (**Figura 3.8 b**) ou de acordo com as variações topográficas detectadas no perfil a fim de caracterizar em detalhe mudanças na morfologia do terreno. A cada mudança de estação procurou-se sempre repetir a visada no último ponto observado pela estação anterior (ré e vante - **Figura 3.8 b**), visando correções de cotas, amarradas a partir do RN (Referência de Nível).

O perfil L1 foi desferido no sentido SE/NW e o perfil 2 no sentido SW/NE (**Figura 3.8 a** indicados pelas setas em preto). Pelo fato dos perfis se cruzarem, foi determinado o ponto 177 (**Figura 3.8 a** – ponto em vermelho na figura) como zero hidrográfico a fim de modelar a

morfologia. Concomitante aos perfis foi efetuada coletas de pontos de GPS (*Global Positioning System*) para a espacialização dos dados.

**Figura 3.7** Levantamento topográfico na área de estudo. (a) exhibe os perfis L1 e L2 e o ponto central – pt. 177, (b) método de nivelamento geométrico – adaptado de Garcia & Piedade (1983). Recorte da imagem Landsat 7 de 2000, composição colorida 5R4G3B.

### 3.3 MAPEAMENTO MORFOLÓGICO

O sistema de mapeamento adotado neste trabalho é baseado na interpretação visual dos produtos sensores remotos. A partir deste procedimento a identificação e delimitação das feições existentes foi realizada levando-se em consideração elementos básicos de interpretação visual como tom, textura, tamanho e sombras, bem como o uso da terra e a cobertura vegetal.

O elemento tom para a interpretação visual de fotografias aéreas e imagens de satélite refere-se a cor ou brilho refletido e é expresso de forma qualitativa como claro, médio e escuro. Em uma imagem Landsat isso acontece devido objetos da Terra de diferentes cores

refletirem a radiação incidente de maneira diferente dependendo do comprimento de onda incidente e da componente física e química dos objetos. Já a textura é a expressão de rugosidade ou lisura exibida por uma imagem e depende (a) do tom da fotografia/imagem, (b) da forma, (c) do tamanho, (d) do padrão e da escala. Qualquer pequena variação dessas pode mudar a textura. Textura pode qualitativamente ser expressa com grosseira, média ou suave (Reddy 2008).

Para a confecção do mapa morfológico, os produtos do processamento digital de imagens de sensores remotos foram adicionados no ambiente da plataforma ArcMap do *software* ArcGIS. Através desta plataforma foram criadas *shapes* que delimitaram e permitiram reproduzir em âmbito temático as feições detectadas nos produtos sensores remotos.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da interpretação visual de produtos sensores remotos e de dados de campo foi constatado que a área de estudo abriga morfologia típica de um delta, mas algumas das feições que o compõe encontram-se hoje obstruídas (desativadas), provavelmente devido a fatores relatados por Silveira (1998) no capítulo 2 deste trabalho. Ainda no capítulo 2, Silveira (1998) denominou a morfologia em estudo de *Paleodelta do Macarry*. Neste trabalho, porém, a mesma denominação será adotada.

Deltas são "discretas protuberâncias na costa, formadas onde os rios encontram oceanos, mares semi-fechados, lagos ou lagoas e fornecem sedimentos mais rapidamente do que podem ser redistribuídos por processos basinais" (Elliott 1986\* *apud.* Boggs Jr. 2006).

A distribuição e a característica de um delta é controlado por um complexo conjunto de processos inter-fluvial, marinho/lacustre e condições ambientais. Mas, o rio (entrada de sedimentos), o fluxo de energia das ondas e das marés são os processos mais importantes que controlam a evolução da geometria e as características internas do arcabouço progradante dos deltas (Galloway & Hobday 1983\* *apud.* Boggs Jr. 2006).

Indistintamente, todos os deltas compreendem uma porção subaérea e outra subaquosa, subdivididas em planície deltáica, frente deltáica e prodelta. A parte subaérea é controlada por processos fluviais e, eventualmente, lacustres; abrange a planície deltáica que está situada acima da maré baixa. Já a parte subaquosa é dominada pelas propriedades hidrodinâmicas e químicas do mar e representa a porção permanentemente submersa (Einsele 1992, Suguio 2003, Bird 2008, Bridge & Demicco 2008).

Existem vários tipos de deltas e, com eles, diversos critérios foram adotados por alguns autores a fim de classificá-los. Entre eles estão Bates (1953) que reconheceu três tipos de deltas – homopícnais, hiperpícnais e hipopícnais; Scott & Fisher (1969) classificou em deltas construtivos e deltas destrutivos; Galloway (1975) em deltas de domínio fluvial, deltas dominados por ondas e deltas dominados por marés; entre outros (Summerfield 1991, Brattacharya & Walker 1992, Suter 1994). Neste trabalho adotaremos a classificação de Galloway (1975) para a morfologia em estudo: *paleodelta do Macarry*.

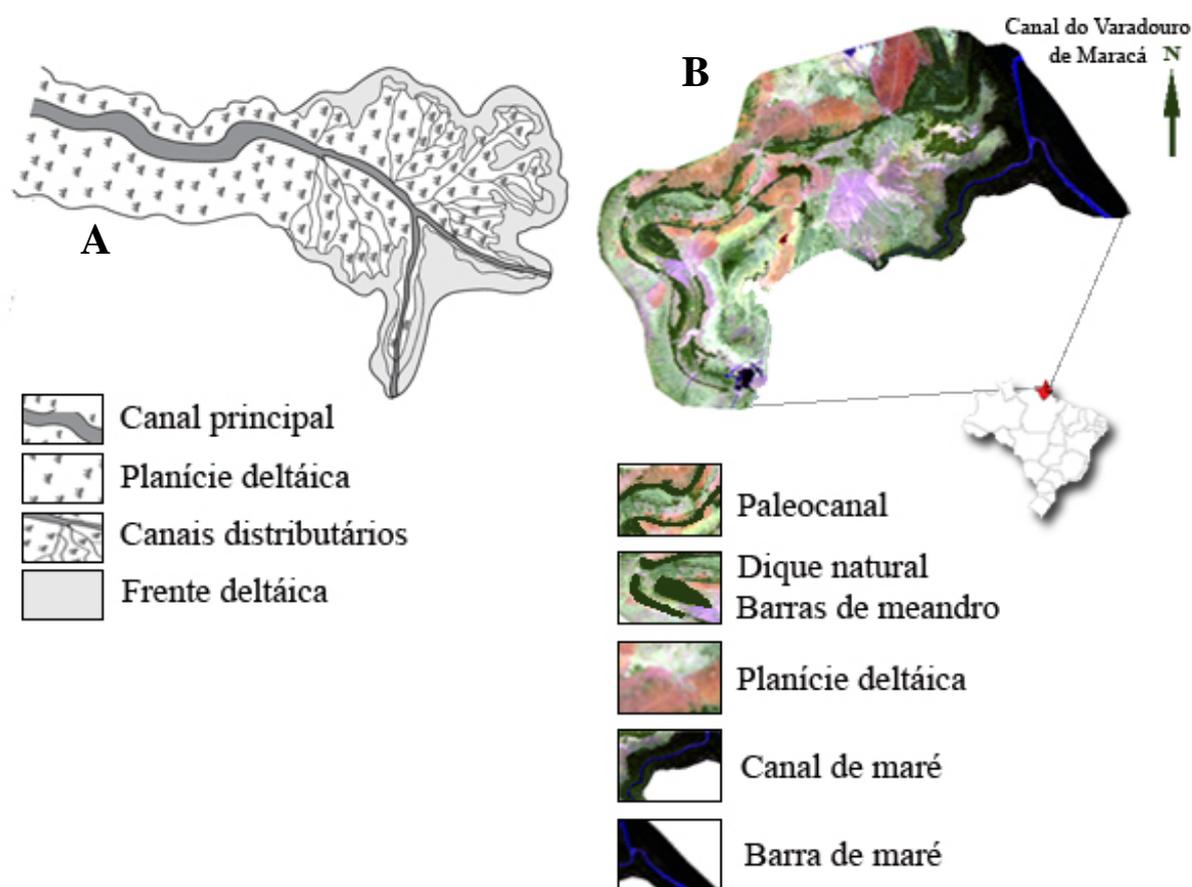
Galloway (1975) montou esta classificação genética dos deltas usando como critérios a ação recíproca dos processos marinhos e o papel desempenhado por esses processos na construção deltáica (Summerfield 1991).

Em deltas de domínio fluvial há predominância de processos fluviais (fluxo unidirecional, transbordamento etc.) sobre as atividades dinâmicas (ondas e maré) do meio receptor. O

grande aporte de sedimentos fluvial prograda para o litoral, formando barras de desembocadura que resultam em um padrão geométrico alongado (padrão *bird's-foot* – pé de pássaro) ou lobular (padrão arqueado) aos deltas. Nos deltas dominados por ondas predominam os processos dinâmicos de ondas e correntes litorâneas. A ação das ondas retrabalha e distribui os sedimentos, provenientes de diversas fontes, na linha de costa ou para águas mais profundas, construindo deltas em forma de “cuspidé”. E em deltas dominados por marés, há a formação de inúmeras barras de maré, que se dispõem longitudinalmente ao fluxo fluvial e constroem deltas “françados”, característico de áreas com influência de macromarés (> 4m) (Einsele 1992, Suter 1994, Suguio 1998, Bridge & Demicco 2008).

Considerando as características fisiográficas de planura topográfica, altas taxas de sedimentos em suspensão, corpo sedimentar formado por areia, silte e argila intensamente retrabalhados pelo regime de maré (sazonal) e vegetação de mangue da área em estudo, o *paleodelta do Macarry* assemelha-se a um delta construtivo (Scott & Fisher 1969), alongado e com padrão *bird's-foot* (pé de pássaro) (Silveira 1998) (**Figura 4.1**). Apesar da área em que se encontra o paleodelta do Macarry ser influenciada pelo regime de macromarés, que adentram (de acordo com a sazonalidade) na planície, ele é considerado um delta do tipo construtivo e influenciado por processos fluviais, pois sua formação foi favorecida pela proteção da linha de costa pela ilha de Maracá, formada na foz deste paleodelta e que serviu de anteparo à ação erosiva das ondas, e pela presença da Corrente Norte Brasileira (CNB), que interfere no direcionamento da pluma de sedimentos impedindo a dispersão desses para regiões mais profundas do mar e permitindo a sua deposição ao longo da costa ocidental e da plataforma (Batista Neto *et al.* 2004). Estes fatores proporcionaram um ambiente “calmo”, favorável a construção de um delta.

As feições identificadas - neste trabalho através de produtos sensores remotos e dados de campo - planície deltáica, paleocanal, barras de meandro, diques naturais, barra de maré e canal de maré (**Figura 4.1B**) expressam o paleodelta do Macarry e serão detalhadas na seção a seguir.



**Figura 4.1** Deltas construtivos dominados por processos fluviais. Em **A**, modelo de delta padrão *bird's-foot*, e em **B**, o paleodelta do Macarry.  
 Fonte: imagem A – adaptado de Nichols (2009).

#### 4.1 PALEODELTA DO MACARRY: FEIÇÕES IDENTIFICADAS

##### 4.1.1 Planície deltáica

Área plana, organizada pela planície de inundação e pela planície de maré lamosa. A planície deltáica exibe vegetação rasteira esparsa, que passa por estágio destrutivo devido a área ser utilizada para a criação de bubalinos e exposta a agentes modificadores, como queimadas. Na planície de inundação há ocorrência de paleocanal, facilmente identificado devido a concentração de vegetação herbácea e arbustiva, que predominam na antiga margem, demarcando com precisão o canal fluvial desativado.

A planície de maré lamosa é influenciada pelo regime de marés que funcionam como agente de deposição de sedimentos pelíticos de origem flúviomarinha. Esta porção é protegida pela ação efetiva das ondas, devido a altas concentrações de lama em suspensão do canal do

Varadouro, à localização da ilha de Maracá, que funciona como uma barreira a ação destrutiva das ondas e, à cobertura vegetal de espécies inerentes ao sistema de manguezal, como a *Avicenia* sp. e a *Rhizophora* sp. associadas a *Guadua glomerata* que bordejam a plataforma. Na foz do canal de maré esses bosques são mais jovens e vegetam uma extensa barra lamosa longitudinal – “barra do Macarry”.

Segundo Bird (2008) e French (2007), os manguezais são estruturalmente e fisiologicamente adaptados para sobreviver em um ambiente marinho influenciado pela maré, e a franja de mangue se torna mais exuberante e densa em substratos lamosos ricos em matéria orgânica e bancos expostos na maré baixa, podendo atingir, no caso de plantas como a *Rhizophora* e *Avicennia*, até 40 m de altura. Estas características são semelhantes as que ocorrem na área em estudo.

Takiyama (2004) em campanha de campo em setembro de 2002 constatou em suas amostras que a concentração de sólidos em suspensão no canal de maré do Macarry e área adjacente são altas, ultrapassando 3500 mg/L e 800 mg/L, respectivamente. Isso confirma o grande aporte de sedimentos e a dinâmica envolvida no que diz respeito ao transporte nesta área da costa amapaense.

#### 4.1.2 Paleocanal

O paleocanal mapeado apresenta curso meandrante de aproximadamente 1 km de largura e 12 km de comprimento, com pequeno trecho retilíneo (orientação SE/NW) próximo a planície deltáica, com barras alongadas que ocupam as “curvas” do canal principal.

Segundo Dalrymple & Choi (2007) quase todos os canais fluviais e de maré são curvados em maior ou menor grau, que tendem a ficar mais sinuosos se a inclinação terrestre muda em direção a áreas de baixo gradiente em zonas costeiras. Não há dados quantitativos existentes sobre essas tendências, mas eles são facilmente observáveis em imagens de satélite e mapas. Tais características se encaixam com perfeição à feição mapeada, exceto pelo fato deste meandro ter sofrido processo de preenchimento e, conseqüentemente, a desativação.

#### 4.1.3 Barras de meandro

As barras de meandro são alongadas, dispostas nas margens internas do paleocanal (principalmente nas curvas) e apresentam marcas de acresção lateral. Provavelmente, estas marcas de acresção foram criadas devido à disposição quase paralela das barras em relação ao

movimento das correntes dominantes (Dalrymple & Choi 2007). Na porção superior das barras de meandro observou-se a presença de vegetação arbórea em contraste com a vegetação presente na porção interna do canal, fator este que auxiliou a distinção da feição.

#### 4.1.4 Diques naturais

Diques foram mapeados margeando o paleocanal, com sua face ligeiramente íngreme voltada para a porção interna do canal e tornando-se mais suave em direção ao litoral. Segundo Suguio (1998) este desnível topográfico deve-se a deposição de sedimentos (como a argila síltica) durante o transbordamento do canal, quando a água perde competência e deposita parte de sua carga.

Diferente das demais espécies vegetais existentes na área, na parcela relativa aos diques há o predomínio de *Guadua glomerata* na cobertura vegetal.

#### 4.1.5 Barra de maré

A barra de maré tem um formato alongado, com aproximadamente 6 km de extensão e 1 km de largura e orientação NW/SE. Esta barra é chamada localmente de *barra do Macarry* devido ao seu posicionamento na desembocadura do canal de maré Macarry. Esta feição é colonizada pelo sistema de manguezal e constituída basicamente de sedimentos lamosos de origem flúviomarinha, retrabalhados pelas fortes correntes de maré que circulam no canal do Varadouro de Maracá e adentram no canal de maré do Macarry. Segundo Silveira & Santos (2006) a *barra do Macarry* é intermitente e durante a estação seca provoca o fechamento da foz do canal de maré do Macarry. Nos períodos de maior descarga, parte desse sedimento é levado pela descarga do canal, porém a região vem sendo assoreada.

#### 4.1.6 Canal de maré

O canal mapeado é conhecido localmente como *igarapé Macarry*. A feição corresponde a um estreito canal meandrante de foz bifurcada, que circunda uma ampla barra lamosa vegetada (chamada de *barra do Macarry*) e deságua no canal do Varadouro de Maracá. Seu curso é desenvolvido sobre planície de maré lamosa, influenciado pelo regime de macromarés, com fluxo de enchente e vazante adentrando em torno de 10 km. É bordejado por associações de cobertura vegetal, como *Avicenia* sp., *Ryzophora* sp. e *Guadua glomerata*.

## 4.2 INTEGRAÇÃO DE PRODUTOS SENSORES REMOTOS PARA MAPEAMENTO DE FEIÇÕES COSTEIRAS: PRODUTOS

De acordo com as interpretações isoladas dos produtos derivados de técnicas de processamento digital de imagens dos sensores SAR e ópticos compreendeu-se a relevância da aplicação de técnicas de integração de dados, uma vez que fica comprometida a identificação e o mapeamento de áreas, utilizando as imagens Radarsat-1 e Landsat 7 ETM+ separadamente. Assim, a fusão de dados visa obter um produto com valor agregado para identificação e extração de feições e atributos, integrando informações de diferentes porções do espectro eletromagnético a fim de facilitar a interpretação do produto final.

Desta forma, a seguir serão apresentadas as descrições e interpretações dos produtos derivados das técnicas de processamento dos sensores de teledetecção e, posteriormente, dos produtos de origem da integração de sensores SAR com a imagem ETM+.

### 4.2.1 Landsat 7 ETM+

O resultado do processamento digital da imagem Landsat 7 adquirida em novembro de 2000 gerou a composição colorida 7R5G3B, a melhor tríade OIF e três visualmente melhores composições coloridas a partir de dados OIF como produtos.

Na composição colorida 7R5G3B da cena (**Figura 4.2 IV**). A planície de inundação (**Figura 4.2 a**) é exibida na composição com coloração alternada entre verde e marrom. As áreas em nuance verde indicam vegetação rasteira e verde, de campo aberto e as porções em tonalidade marrom avermelhado indicam superfícies degradadas pelo uso da atividade agropecuária (bubalinocultura) e agentes modificadores, como a queimada, que eliminam a cobertura vegetal e expõem o domínio superior da camada de solo argiloso a agentes intempéricos. A banda 3 é eficiente no contraste entre a cobertura vegetal e as áreas de solo exposto, atribuindo assim tom marrom avermelhado as áreas de solo exposto.

As áreas da planície de maré lamosa e da barra de maré (**Figura 4.2 b e f**) mostram-se em tonalidade escura em todas as bandas da cena. Isto se deve a resposta espectral de áreas úmidas, com vegetação verde, densa e uniforme, que tem os comprimentos de onda totalmente absorvidos pelo sensor na banda 3.

As porções da área interna do paleocanal (**Figura 4.2 c**) e das barras de meandro e diques marginais (**Figura 4.2 d e e**) estão perfeitamente distintas nesta composição. A vegetação de *Guadua glomerata*, presente na extensão das barras de meandro e diques marginais, é

adensada, enquanto a vegetação das outras porções é espaçada e com muitas áreas de solo exposto, fato este que proporciona coloração em tons de verde a estes trechos. A banda 3 também é a responsável por esta perfeita discriminação entre os tipos de cobertura vegetal.

O canal de maré (**Figura 4.2 g**) apresenta ótima distinção nesta composição, pois a água com concentração elevada de sedimento em suspensão tem boa reflectância nas bandas 5 e 7, dando caráter azul à composição colorida.

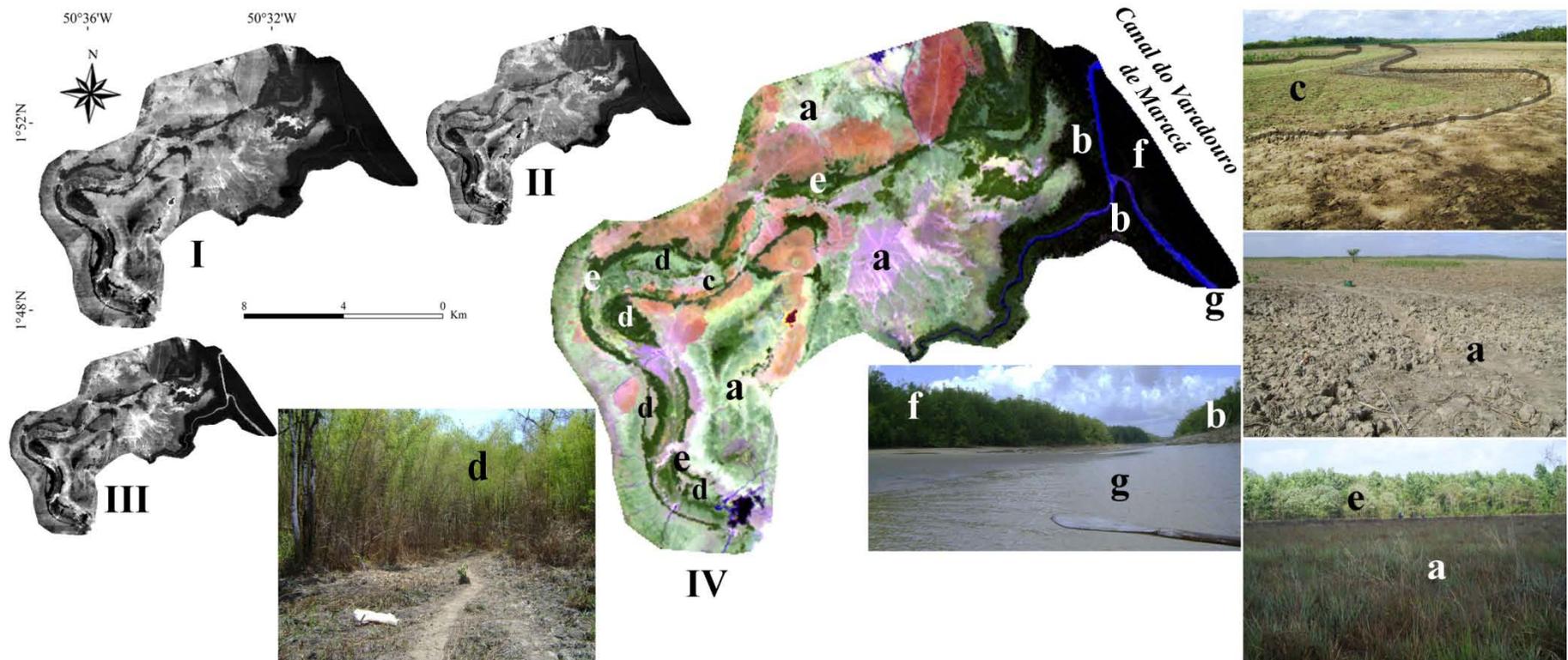
#### 4.2.1.1 Melhor tríade OIF (*Optimum Index Factor*)

A partir do agrupamento dos dados estatísticos e dos valores de OIF (**Tabela 3.8**), a tríade 347 é a que apresenta maior quantitativo de informações e menor taxa de redundância entre as bandas para área em estudo.

Na composição 7R4G3B há perceptível separação entre vegetação e solo (**Figura 4.3 IV**). A morfologia e o uso do terreno (bubalinocultura) são enfatizados pelo *dégradé* do magenta e do verde. Este efeito contorna as feições mapeadas, mas atribui o mesmo tom de cor para morfologias distintas, como os diques naturais, as barras de meandro, a planície de maré lamosa e a barra de maré (**Figura 4.3 e, d, b e f**) que aparecem em variações do verde e, para a planície de inundação e parte do paleocanal (**Figura 4.3 a e c**) mostradas em matizes magenta.

Em razão da interação do sensor com o volume de sedimento em suspensão no corpo d'água do canal de maré a cor azul é apresentada neste produto (**Figura 4.3 g**).

Através dos valores de OIF alcançou-se estatisticamente a melhor combinação para uma composição colorida que enfatiza a morfologia do terreno; mas, as demais composições não apresentaram resposta visual satisfatória. Em função disto, foram selecionadas três visualmente melhores composições coloridas que realçaram as feições mapeadas. As combinações são: 134, 357 e 235; 6<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> colocação no *ranking* OIF, respectivamente (**Tabela 4.1**) (**Figuras 4.2 e 4.4**).



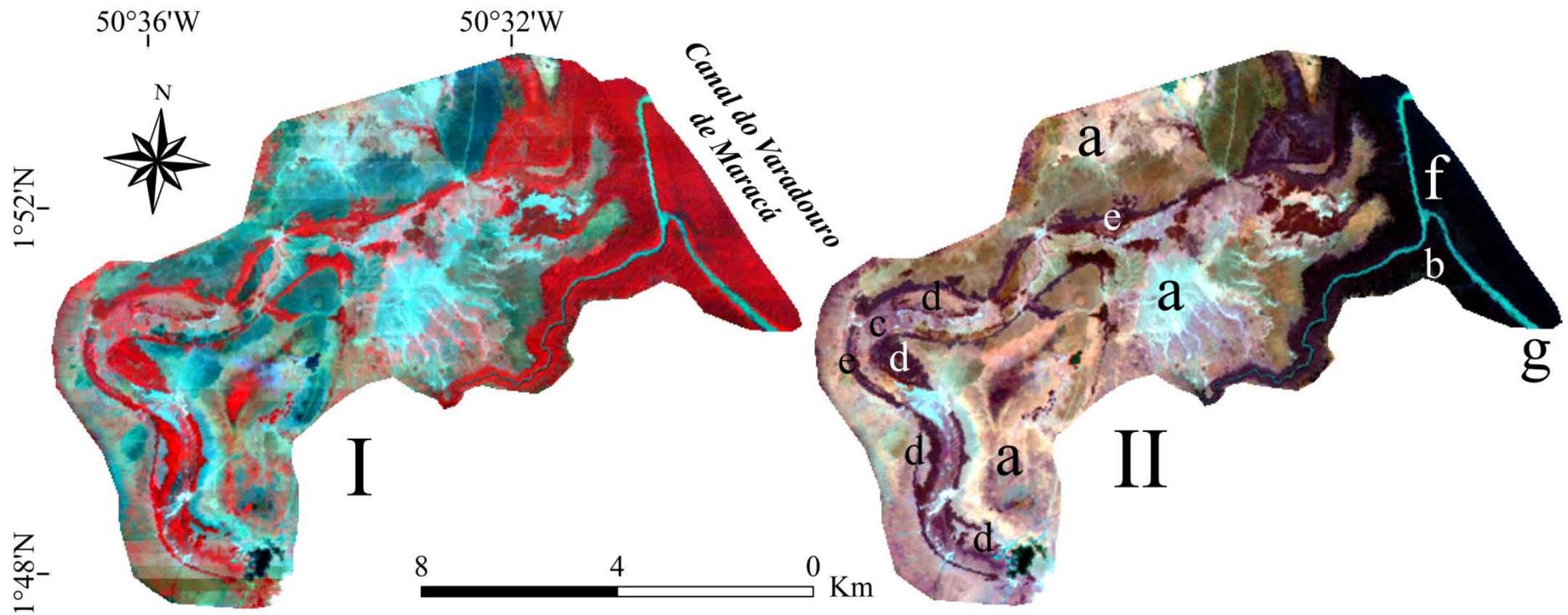
**Figura 4.2** Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) banda 7, (II) banda 5, (III) banda 3 e (IV) composição colorida 7R5G3B. As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação, (b) planície de maré lamosa, (c) paleocanal - contorno na foto enfatizado pela linha escura, (d) barras de meandro, (e) diques naturais, (f) barra de maré, (g) canal de maré.

**Tabela 4.1** Composições visualmente melhores identificadas a partir do OIF para as bandas do ETM+

<i>Combinação</i>	<i>Colocação ranking OIF</i>	<i>Valor OIF</i>	<i>Composição resultante</i>
134	6 <sup>a</sup>	260,61	431
357	11 <sup>a</sup>	56,954	753
235	13 <sup>a</sup>	54,727	532

O efeito de ser atribuído cores iguais à feições diferentes que ocorreu no produto da melhor tríade OIF também acontece nas combinações selecionadas e mostradas na **Tabela 4.1**. Os diques naturais, as barras de meandro, a planície de maré lamosa e a barra de maré aparecem em nuance vermelho e com uma leve rugosidade na **Figura 4.4 I (e, d, b e f, respectivamente)**, devido a interação da vegetação verde e sadia com a banda 4 posicionada no canal R (*Red*) e, a planície de inundação e parte do paleocanal são mostrados em diversos tons em azul (**Figura 4.3 I a e c**). Já na **Figura 4.3 II (c, d e e)** a porção exibida em violeta representa o paleocanal, as barras de meandro e os diques naturais. A superfície onde há combinação das cores azul e marrom indica a lotação da planície de inundação e parte do paleocanal (**Figura 4.3 II a e c**) e, finalmente, a área mais escura do produto indica a planície de maré lamosa e a barra de maré, com destaque para a “linha” em pigmentação azul muito clara que indica o canal de maré (**Figura 4.3 II b, f e g**).

**Figura 4.3** Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) banda 7, (II) banda 4, (III) banda 3 e (IV) composição colorida do melhor OIF: 7R4G3B. As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação - notar vegetação seca, solo escuro devido à queimada e, solo nu em consequência do uso pela bubalinocultura, (b) planície de maré lamosa, (c) paleocanal, (d) barras de meandro, (e) diques naturais, (f) barra de maré, (g) canal de maré.



**Figura 4.4** Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. Duas visualmente melhores combinações coloridas a partir dos valores de OIF: (I) combinação 134 e composição 4R3G1B e, (II) combinação 235 e composição 5R3G2B. As feições mapeadas estão na mesma posição nas figuras 4.4 I e 4.4 II, porém somente devidamente identifica na figura 4.3 II. As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação, (b) planície de maré lamosa, (c) paleocanal, (d) barras de meandro, (e) diques naturais, (f) barra de maré e, (g) canal de maré.

#### 4.2.2 Radarsat

As cenas do sensor Radarsat foram corrigidas digitalmente e aplicado o filtro *Enhanced Frost* e o realce do tipo linear. Estes processamentos originaram produtos com bons atributos visuais à interpretação dos alvos imageados.

As imagens foram adquiridas em momentos alternados: fevereiro de 2003 e, 6 e 30 de setembro de 2004. Portanto, apresentam diferenciação de imageamento da superfície devido a fatores como sazonalidade e uso do solo.

Solos úmidos refletem mais energia do que solos secos, influenciando na profundidade de penetração da energia eletromagnética incidente. Se o solo tem alto conteúdo de umidade superficial, então a energia incidente penetrará apenas poucos centímetros na coluna do solo e será fortemente espalhada pela superfície, produzindo um forte sinal de retorno (Jensen 2009). Desta forma, dados pluviométricos da mesma data ou em períodos próximos a data de imageamento são importantes para auxiliar na interpretação das cenas.

Dados pluviométricos adquiridos pela estação do município de Calçoene/AP, a 3<sup>o</sup>5' N e - 51<sup>o</sup>37' W, plataforma CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), mostram que nos dias 6 e 30 de setembro de 2004 (data de imageamento de duas imagens SAR) não houve precipitação na região e, três dias antes, a precipitação máxima foi de 12 mm (**Figura 4.5**), o que representa baixa quantidade de chuva, bem característica do período seco no estado do Amapá (que acontece nos meses de julho a dezembro).

Para a cena de fevereiro de 2003, não foram encontrados dados pluviométricos disponíveis, mas é conhecido que o período com maior volume de precipitação no Estado se estende de fevereiro a junho, portanto a possibilidade de ter ocorrido precipitação neste mês é grande, fazendo com que a região tenha acumulado água superficial sobre os campos abertos, influenciando assim nos critérios de interpretação da cena analisada.

As imagens foram visualmente interpretadas usando atributos de tonalidade, textura, contexto, forma e tamanho.

Nas cenas de 2004 a planície de inundação e o paleocanal (**Figuras 4.6 II/III a e c**) aparecem bem definidos, com tonalidade cinza claro, exibindo uma superfície levemente rugosa, ocasionada pela interação da radiação com a cobertura vegetal de gramíneas (sem umidade). Nas outras cenas, a planície de inundação confunde-se com o paleocanal, devido a semelhança de tonalidades cinza escuro. Porém, entre as barras de meandro e os diques naturais não há distinção, devido a mesclagem de tons e textura presente. Já na cena de 2003

(**Figura 4.6 I**), todas essas feições são camufladas em função da similaridade dos padrões texturais, concedendo a essa região pequena variância nos tons de cinza (níveis de cinza).

A porção correspondente a planície de maré lamosa e a barra de maré são bem distintas nas cenas de 2003 e 2004 (**Figuras 4.6 II/III b e f**), pois apresentam nuance cinza escuro e densa rugosidade, devido ausência de precipitação registrada para o dia da aquisição da imagem, e baixa precipitação como para os três dias que antecederam, levando à diminuição da constante dielétrica e a reflexão predominante das microondas.

O canal de maré é a feição mapeada visível nas três cenas (**Figura 4.6 I/II/III g**). Tal identificação foi possível devido a reflexão especular nos produtos.

#### 4.2.2.1 Composição RGB de três cenas SAR

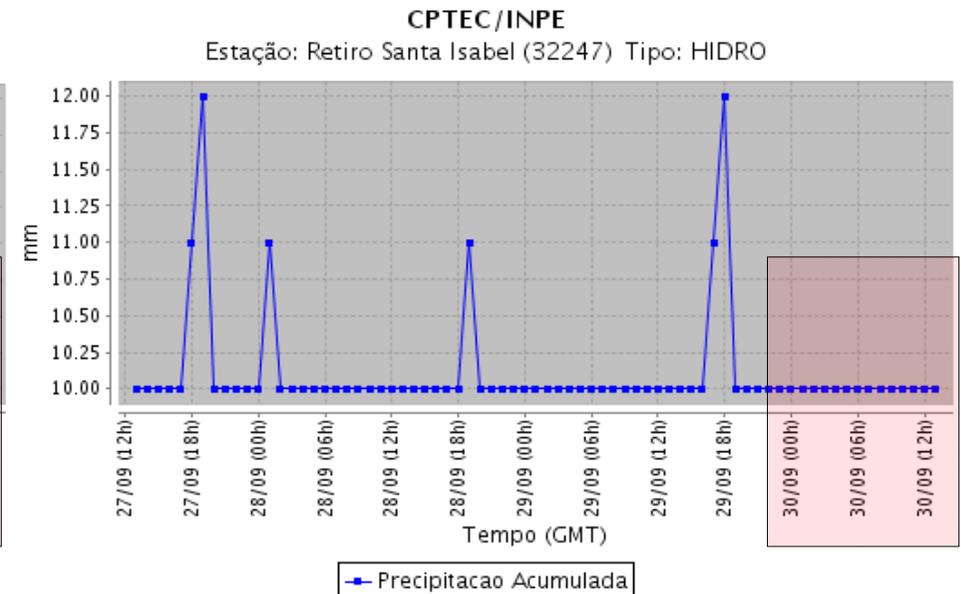
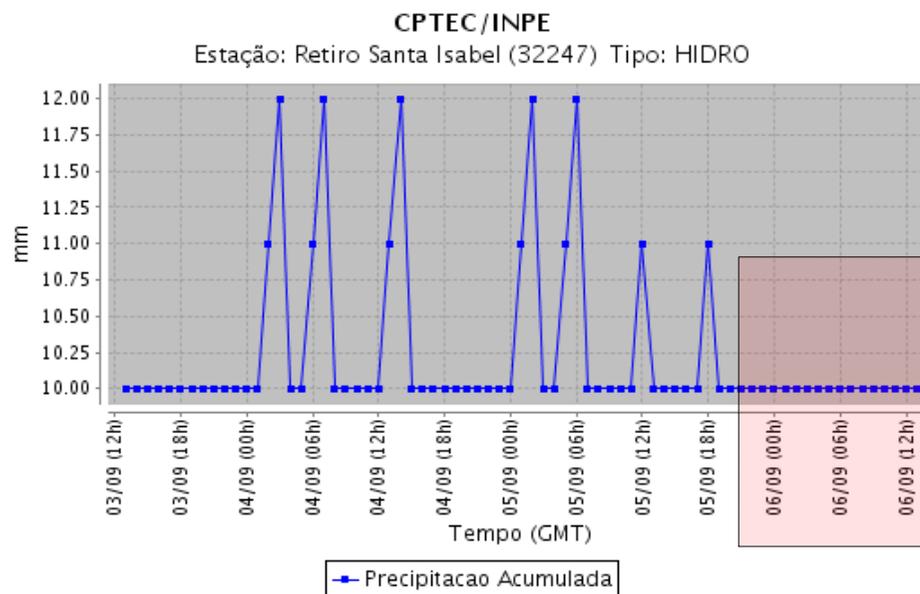
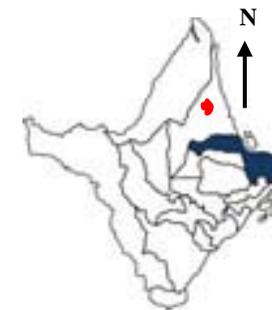
A composição colorida em R (fevereiro de 2003) G (6 de setembro de 2004) B (30 de setembro de 2004) das cenas Radarsat-1 originou um produto que concentra informações de geometria (macro e micro topografia) e propriedades dielétricas (particularmente relacionada ao conteúdo de água) presentes em imagens SAR.

Devido a habilidade do SAR em realçar feições topográficas e distinguir variações de altura da vegetação, feições como a planície deltáica, o paleocanal, a barra de maré e o canal de maré são perfeitamente salientadas neste produto.

A planície de inundação e o paleocanal são destacados por tons avermelhados e azuis, em parcelas onde a cobertura vegetal de campo aberto é esparsa e modificada pelo uso (atividade agropecuária) (**Figura 4.7 a e c**). O sistema de manguezal que ocupa a planície de maré lamosa e a barra de maré aparecem em tom ciano e textura levemente rugosa (**Figura 4.7 b e f**). Essa graduação em tons deve-se a variações na estrutura da vegetação (rugosidade em microescala) e pela presença de quantidades variadas de umidade no mangue. O canal de maré ganha um efeito de profundidade em toda a sua extensão, ocasionada pela ligeira variação topográfica do trecho e pelo fluxo de água do canal (**Figura 4.7 g**).

Os diques naturais e as barras de meandro não são nítidas neste produto, camufladas pela similaridade textural e tonalidade ciano. Apesar do filtro *Enhanced Frost* ter sido aplicado a este produto, o efeito visual de “sal/pimenta” ainda predomina.

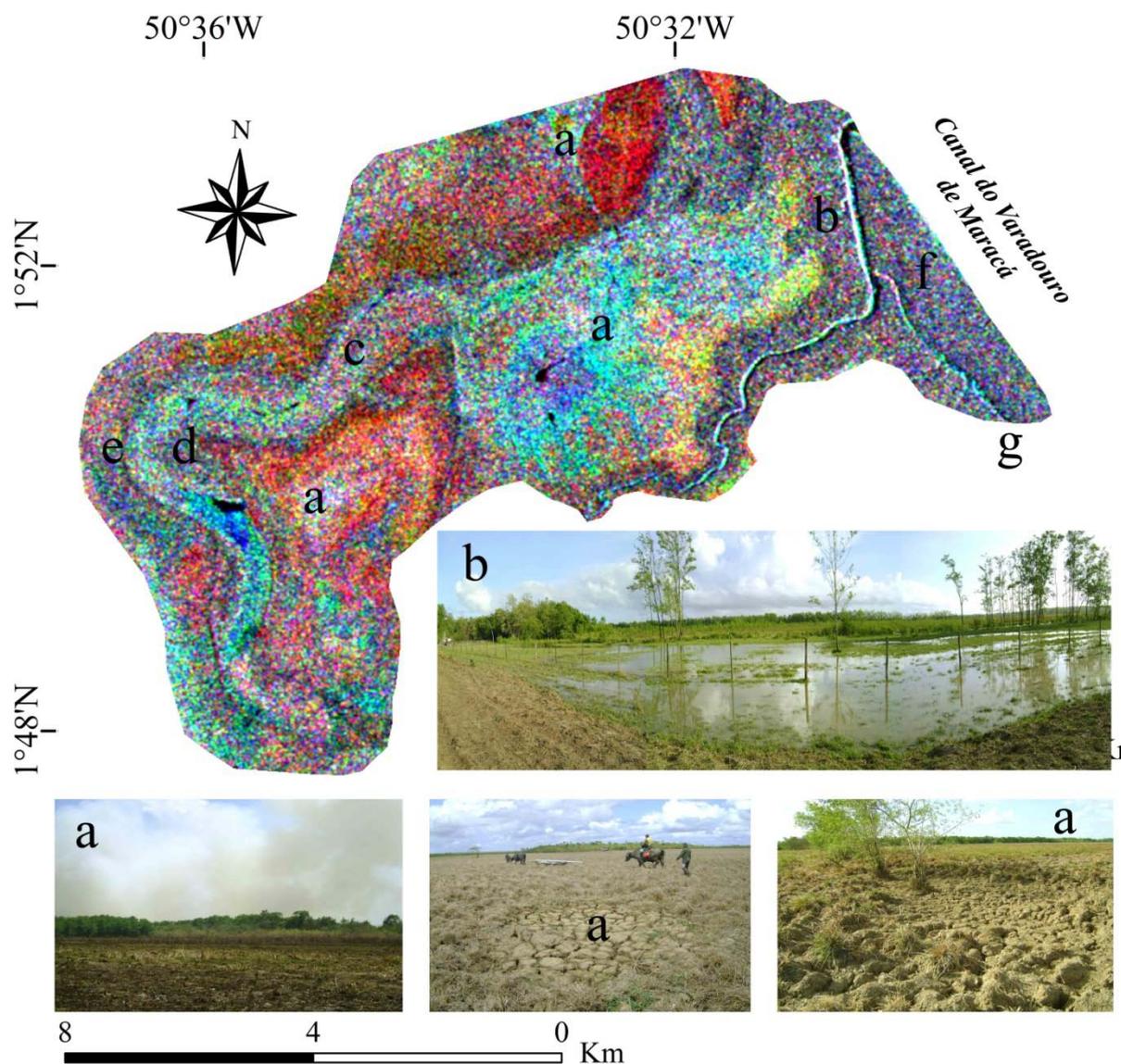
Estação		
Código: 32247	Nome: Retiro Santa Isabel	Usuário: SIVAM
Tipo: HIDRO	Município: Calcoene - AP	Status: Ativa
Altitude: m	Longitude: -51.37°	Latitude: 3.05°



**Figura 4.5** Dados pluviométricos da estação localizada no município de Calçoene/AP mostrando a precipitação de setembro-2004. A área destacada nos gráficos exibe os dias 6 e 30 de setembro, data de aquisição das cenas SAR-2004; e, o ponto vermelho do mapa do Amapá mostra a localização do município de Calçoene.

Fonte: CPTEC/INPE

**Figura 4.6** Recorte das cenas Radarsat-1 da área de estudo com aplicação do filtro *Enhanced Frost* e realce do tipo linear. (I) imageada em 22 de fevereiro de 2003, (II) imageada em 6 de setembro de 2004, (III) imageada em 30 de setembro de 2004. As feições mapeadas estão na mesma posição nas figuras 4.6 I, 4.6 II e 4.6 III, porém somente devidamente identificadas na figura 4.6 II. As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação – notar as setas em vermelho mostrando áreas que sofreram processo de queimada, (b) planície de maré lamosa, (c) paleocanal, (f) barra de maré, (g) canal de maré.



**Figura 4.7** Produto da integração das cenas Radarsat-1 em composição colorida nos canais R (imageada em 22 de fevereiro de 2003) G (imageada em 6 de setembro de 2004) B (imageada em 30 de setembro de 2004). As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação – notar solo com pobre cobertura vegetal e retrabalhado pelo pisoteio de búfalos, além da nuvem de fumaça presente na foto e o solo queimado (b) planície de maré lamosa - maré de sigízia invadindo a planície (c) paleocanal, (d) barras de meandro, (e) diques naturais, (f) barra de maré, (g) canal de maré.

#### 4.2.3 Produtos integrados: Radarsat-1 com Landsat 7 ETM+

A técnica de fusão de imagens SAR com ETM+ originaram os seguintes produtos: (1) fusão do SAR com a melhor tríade OIF, (2) realce por decorrelação da tríade selecionada pelo OIF, seguida da fusão com o SAR, (3) PCA em seis bandas do ETM+, (4) PCA em seis bandas do ETM+ e posterior fusão das três primeiras componentes principais com o SAR, (4) SPCA-SAR, (5) SPCA-SAR, onde as primeiras componentes principais dos conjuntos de

bandas (ETM+ 1, 2, 3) e (ETM+ 5 e 7) são usadas como dados de entrada conjuntamente com a imagem Radarsat-1.

#### 4.2.3.1 Fusão do SAR com a melhor tríade OIF (*Optimum Index Factor*) e, aplicação do realce por decorrelação

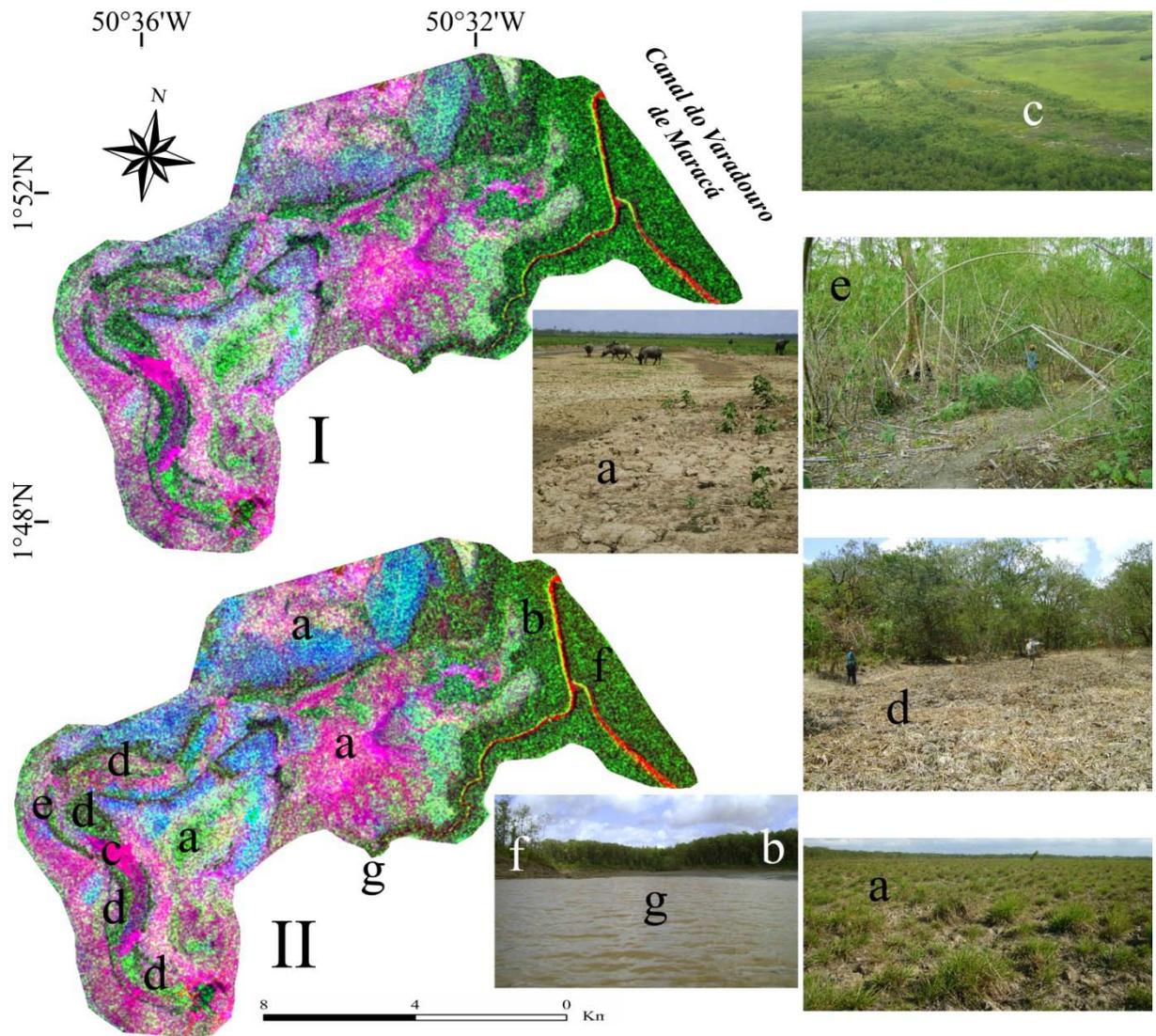
Os produtos resultantes da fusão da melhor tríade Landsat OIF com o SAR (**Figura 4.8 I**) e o produto melhor tríade Landsat OIF com aplicação do realce por decorrelação e posterior fusão com o SAR (**Figura 4.8 II**) apresentaram ótimos resultados na discriminação das feições mapeadas, pois agregam a habilidade do SAR em realçar feições topográficas e de ser sensível a conteúdos de umidade, com a interação de propriedades físico-químicas dos alvos, obtidas por sensores ópticos.

O contraste entre as diversas tonalidades escuras e claras evidenciou a planície de maré lamosa e barra de maré, ostentada pela cor verde (referente a vegetação presente) de superfície áspera em oposição a aparência vermelha e lisa do canal de maré (**Figura 4.8 I/II b, f e g**). Os efeitos “liso e áspero” e a cor vermelha atribuída a água estão ligados ao retrospalhamento de micro-ondas para o sensor e ao posicionamento da banda 7 no canal R (*Red*).

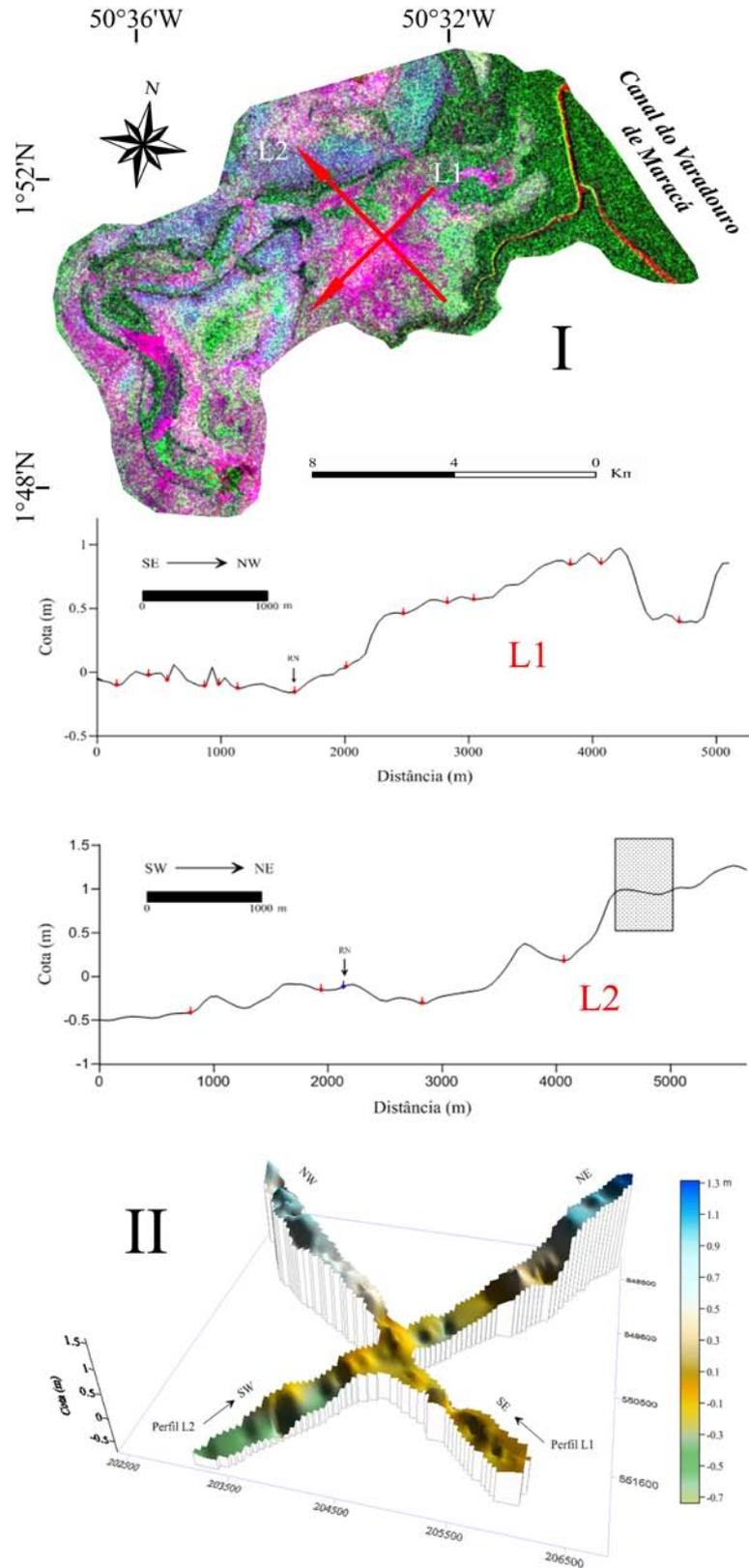
O produto permitiu ainda o perfeito contorno do paleocanal, das barras de meandro e dos diques naturais, através da coloração verde e textura rugosa das plantas locadas nos diques e barras e pelo cruzamento das matizes magenta e azul na parte interna do paleocanal (**Figura 4.8 I/II c, d e e**). A planície deltáica é marcada por forte predominância da nuance magenta quase sem rugosidade, diferente da gradação em azul evidente na planície costeira.

A partir da interpretação visual ver-se uma melhora na tonalidade e contraste entre as cores no produto em que foi aplicado o *realce por decorrelação*, o que possibilitou um poder de aperfeiçoamento interpretativo ao produto.

Este produto permite ainda distinguir pequenas variações topográficas na área. A partir da interpretação destes produtos e de dados de nivelamento topográfico coletados em campo, percebeu-se que a variação topográfica na área é de aproximadamente 1,5 m, confirmando assim a planura da região costeira amapaense.



**Figura 4.8** Produtos integrados Radarsat-1 e Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) fusão SAR + melhor composição OIF, (II) fusão SAR + melhor composição IOF com aplicação do realce por decorrelação. As feições mapeadas estão na mesma posição nas figuras 4.8 I e 4.8 II, porém somente devidamente identificadas na figura 4.8 II. As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação - notar uso da superfície pela atividade agropecuária, (b) planície de maré lamosa, (c) paleocanal - fotografia aérea, (d) barras de meandro - notar a vegetação presente, (e) diques naturais, (f) barra de maré, (g) canal de maré – nesta foto a porção mostrada refere-se a foz do igarapé Macarry.



**Figura 4.9** Produto integrado Radarsat-1 e Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) produto do uso da técnica de fusão SAR + melhor composição OIF, (II) visão em 3D dos perfis L1 e L2 mostrando – em escala exagerada e rotacionado – a morfologia do terreno. Nos perfis L1 e L2 os pontos em vermelho indicam canais abertos pelo uso do solo na atividade pecuária, as setas indicam a direção de perfilagem e o retângulo mostrado no perfil L2 indica a área onde não ocorreu perfilagem, mas que devido ao transporte do RN, acompanhou a morfologia do terreno.

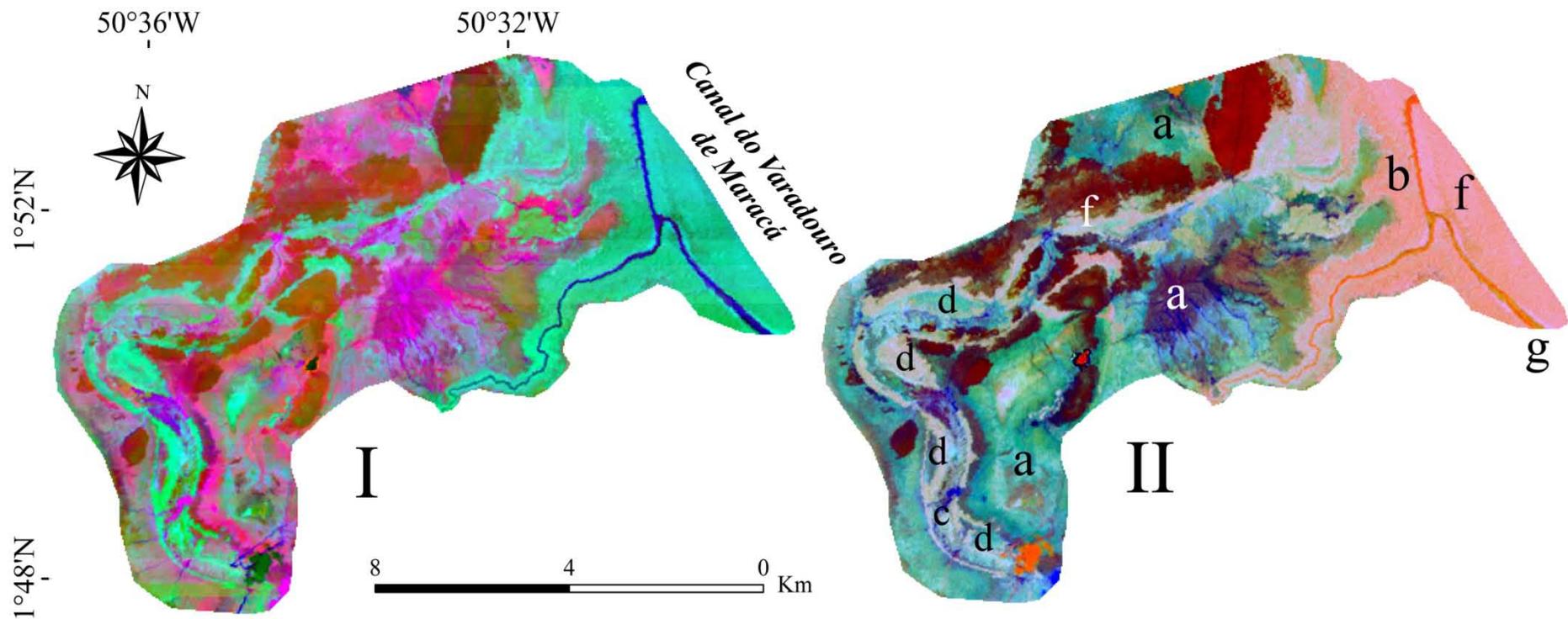
A **Figura 4.9** mostra os perfis topográficos da área de estudo. Foi realizado 11 km de perfilagem, divididos em 2 perfis: L1 e L2. Estes exibem a área referente à planície deltáica, que aparece mais baixa nos perfis, principalmente na área central (pt. 177) e um leve aclive no sentido SW/NE (L2). Outra porção onde se identificou aclive foi no sentido SE/NW onde está localizada a planície de inundação. Importante destacar que o aclive foi sempre perceptível nas porções onde são encontrados os diques naturais, declinando em direção oposta.

#### 4.2.3.2 Principal Component Analysis – PCA

Neste produto as variações em magenta e verde predominam sobre a superfície, mostram-se saturadas (**Figura 4.10 I**). Semelhante ao produto de melhor tríade OIF, aqui também ocorre o processo de atribuição da mesma de cor à morfologias distintas, exceto para o canal de maré (**Figura 4.10 I g**) que é exibido em cor azul, possibilitando a separação deste da planície de maré lamosa e da barra de maré (**Figura 4.10 b e f**).

#### 4.2.3.3 Selective Principal Component Analysis – SPCA

Neste produto é possível a identificação de três porções distintas: manchas em tom marrom escuro na planície costeira (**Figura 4.10 II a**), um segmento em tom cor de rosa na planície de maré lamosa, canal de maré e barra de maré (**Figura 4.10 II b, g e f**) e, o restante da superfície exhibe variações no tom azul. Em consequência disto, a interpretação visual do produto foi prejudicada e impossibilitou o mapeamento das feições que compõem do paleodelta do Macarry



**Figura 4.10** Recorte da cena Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) Combinação colorida do CP1, CP2 e CP3 calculados a partir da técnica de transformação PCA nas bandas da cena ETM+. (II) Produto do SPCA com a composição das PC's: PC1 (1, 2 e 3) no canal R, banda 4 no canal G e PC1 (5 e 7) no canal B. As feições mapeadas estão na mesma posição nas figuras 4.10 I e 4.10 II, porém somente devidamente identifica na figura 4.10 II. As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação, (b) planície de maré lamosa, (c) paleocanal, (d) barras de meandro, (e) diques naturais, (f) barra de maré, (g) canal de maré.

#### 4.2.3.4 Fusão do SAR com PCA (*Principal Component Analysis*)

Este produto apresentou resultados satisfatórios no realce das feições mapeadas em virtude do casamento de texturas e matizes. O canal de maré, que teve absorção ao interagir com o sensor óptico e superfície lisa em função da penetração das microondas no corpo d'água, contrasta com a planície de maré lamosa e a barra de maré em tom ciano e textura uniforme (**Figura 4.11 I g, b e f**).

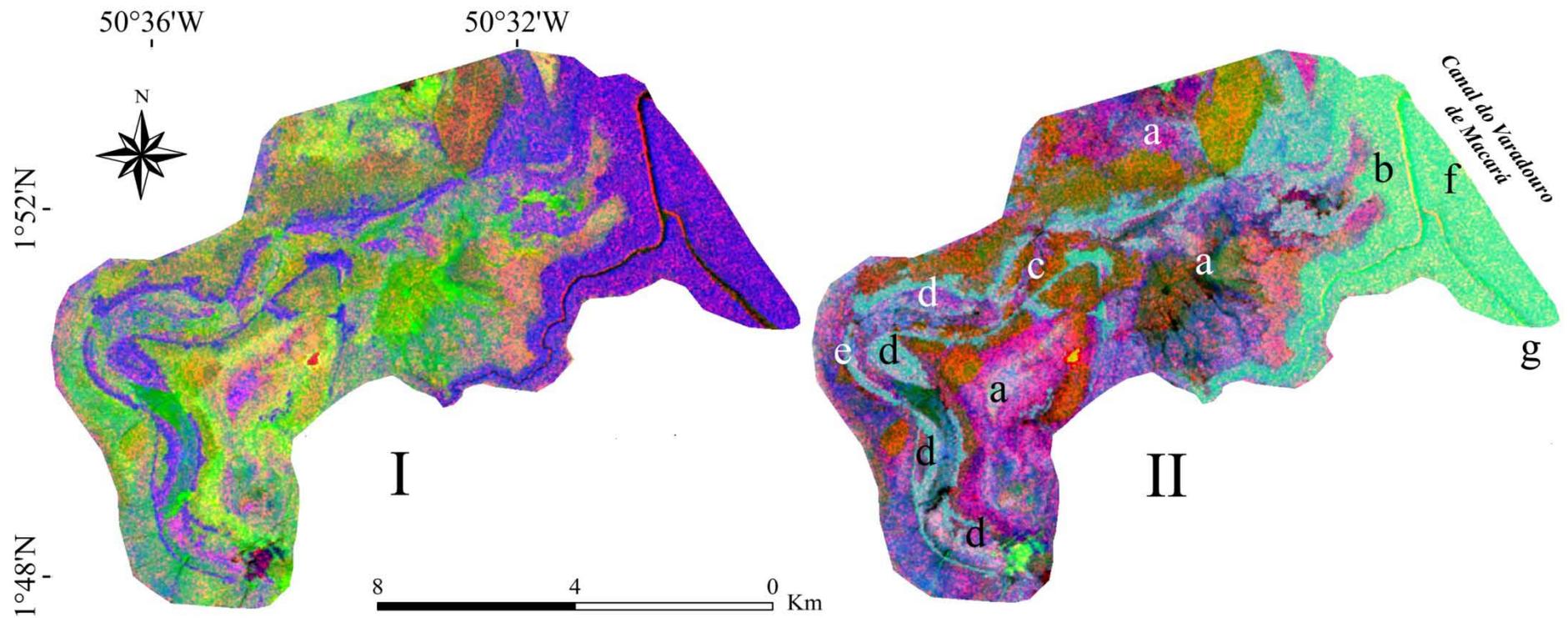
Alguns trechos da planície deltáica e da face interna do paleocanal mostram-se com suave textura e predominância de pigmentação verde encarquilhada, ocasionado pela preponderância da vegetação rasteira e, segmentos esverdeados sem aspereza causados pelo solo nu (**Figura 4.11 I a e c**). Os diques naturais e barras de meandro são expostos por perfeito “desenho” em ciano, fazendo oposição a cor verde texturada (**Figura 4.11 I e e d**).

#### 4.2.3.5 Fusão do SAR com SPCA (*Selective Principal Component Analysis*)

Diferente do produto originado pela fusão do SAR com a técnica PCA, o produto SAR + SPCA não mostrou elementos satisfatórios para auxiliar na identificação das feições mapeadas através de interpretação visual, em razão da saturação das cores refletidas pelo alvo da vegetação e solo exposto ao sensor.

O local referente a planície de maré lamosa, canal de maré e barra de maré aparece como um limite na cor verde saturada onde não é possível fazer a separação destas feições (**Figura 4.11 II b, g e f**). O mesmo efeito sucede no domínio dos diques naturais e barras de meandro, mas em nuance azul esverdeado de suave rugosidade (**Figura 4.11 II e e d**).

Tons em vermelho e magenta texturados são vistos na extensão da planície costeira (**Figura 4.11 II a**); esta, mostrando pequenas drenagens em tom azul escuro.



**Figura 4.11** Produtos integrados Radarsat-1 e Landsat 7 ETM+ da área de estudo. (I) PCA nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, fusão 1CP, 2CP e 3CP + SAR, (II) fusão SAR + SPCA. As feições mapeadas estão na mesma posição nas figuras 4.11 I e 4.11 II, porém somente devidamente identificadas na figura 4.11 II. As letras são discutidas no texto: (a) planície de inundação, (b) planície de maré lamosa, (c) paleocanal, (d) barras de meandro, (e) diques naturais, (f) barra de maré, (g) canal de maré.

### 4.3 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PRODUTOS DE SENSORES REMOTOS

Os produtos sensores remotos apresentados neste trabalho foram avaliados quanto ao seu potencial em discernir as feições que formam o paleodelta do Macarry. Esta apreciação baseou-se na interpretação visual de cada produto, tendo em conta a cor e os atributos texturais. Vale ressaltar que grande parte destas feições encontram-se por sedimentos recentes e pouco consolidados.

As cenas SAR com redução do efeito *Speckle* e aplicação do filtro adaptativo do tipo *Enhanced Frost*, as composições coloridas (7R5G3B, 4R3G1B e 5R3G2B), o produto melhor tríade OIF (na composição colorida 7R4G3B), os produtos da técnica PCA e SPCA, os produtos híbridos SAR x melhor tríade OIF e SAR x melhor tríade OIF + aplicação do realce por decorrelação, o produto PCA, o produto PCA fundido com o SAR, o produto SPCA, o produto SPCA fundido com o SAR e o produto da fusão de três cenas SAR são a produção de imagens desta dissertação e devidamente avaliados na **Tabela 4.2**, que mostra o *ranking* de desempenho dos produtos em discernir as feições do paleodelta do Macarry, com base nos critérios considerados no trabalho.

No contexto geral, as cenas SAR são produtos que não apresentaram eficácia na distinção das feições mapeadas, principalmente naquelas de pequenas áreas, como as barras de meandro e os diques naturais, que foram omitidos devido a padrões texturais e tons em cinza. Este produto fornece, principalmente, informações relacionadas a macro e micro topografia (rugosidade superficial), e conteúdo de água na planície de maré lamosa e barra de maré.

A interpretação visual foi favorecida nos produtos das composições coloridas ETM+. Na composição 7R5G3B todas as feições mapeadas são perfeitamente nítidas, destacando principalmente as “marcas” no terreno devido ao uso pela atividade agropecuária, tornando-o assim, uma criação de alto valor no mapeamento de feições, em especial, as feições identificadas neste trabalho. Nas composições 4R3G1B, 5R3G2B e no produto melhor tríade OIF (na composição colorida 7R4G3B) ocorreu a saturação e atribuição de cores iguais a feições distintas. Em superfícies onde há predominância da vegetação, principalmente a de mangue, a produção foi de uma área em tons vermelho – no caso da composição 4R3G1B –, em tons violeta escuro – no caso da composição 5R3G2B – e, em nuances verde saturado – produção OIF. Já nas porções onde o solo encontra-se nu ou com vegetação rasteira e esparsa, houve a adição de nuances na cor azul, marrom e magenta saturada para as composições 4R3G1B, 5R3G2B e melhor tríade OIF, respectivamente. O canal de maré foi a feição de destaque nestes três produtos, pois exibiu coloração azul claro na produção, marcando o canal

principal e fazendo separação das demais feições. Desta forma, as composições 4R3G1B, 5R3G2B e o resultado da melhor tríade OIF não apresentaram atributos satisfatórios para uma boa interpretação visual das feições mapeadas.

Os produtos da técnica PCA (*Principal Component Analysis*) e SPCA (*Selective Principal Component Analysis*) são favorecidos pela cromaticidade em detrimento da interação alvo/sensor. Na prancha PCA há predomínio do magenta e do verde nas superfícies mapeadas, porém mostrando saturação destas cores. O fenômeno de conceder cores iguais à morfologias diferentes também é visto no produto de melhor tríade OIF, exceto para o canal de maré que é exibido em cor azul, possibilitando a separação dele da planície de maré lamosa e da barra de maré. No derivado SPCA, máculas marrom escuro, cor de rosa e nuances em azul são conferidas a superfície da área de estudo, não havendo assim revelação das feições mapeadas. Portanto, estes dois produtos processados digitalmente não são eficientes para distinção e mapeamento das feições aqui estudadas.

Os produtos híbridos, na sua maioria, mostraram-se ferramentas poderosas se aplicadas ao mapeamento das feições costeiras, devido a sensibilidade do SAR em mostrar áreas úmidas e enfatizar a micro e macro topografia da superfície e, a interação alvo/sensor inerente ao Landsat, concedendo variações de cor aos produtos compostos por três bandas. Assim, a produção híbrida exhibe textura e cor num só contexto. Os produtos SAR x melhor tríade OIF e SAR x melhor tríade OIF + aplicação do realce por decorrelação são, depois da composição colorida 7R5G3B, os produtos mais eficientes, apresentados nesta dissertação, para fácil identificação das feições presentes na área de estudo. A barra de maré e a planície de maré lamosa (exibido na cor verde com superfície rugosa) ficaram evidentes nestas produções e, opondo-se a lisa e chamativa porção em vermelho dado ao canal de maré. As feições de pequenas extensões – diques naturais, barras de meandro e paleocanal – aparecem perfeitamente contornadas e com textura rugosa. Já as feições maiores – planície deltáica – exibem predomínio do magenta com leve rugosidade, ocasionada pelo espaçamento da vegetação.

Outra produção satisfatória ao mapeamento das feições foi o produto PCA fundido com o SAR. Uma suave textura e predominância de pigmentação verde encarquilhada aparecem em alguns trechos da planície deltáica e da face interna do paleocanal. Os tons ciano e uniformidade textural aparecem na planície de maré lamosa e na barra de maré. Bem marcados e de fácil visualização estão os diques marginais e barras de meandro neste produto. Já no derivado SPCA fundido com o SAR a eficácia não prevalece. Este produto não mostrou elementos satisfatórios para auxiliar na identificação das feições mapeadas através de

interpretação visual, em razão da saturação das cores refletidas pelos alvos e pela agregação cromática das feições existentes.

Um produto onde informações de geometria (macro e micro topografia) e propriedades dielétricas (particularmente relacionada ao conteúdo de água) estão concentrados é a composição colorida em R (fevereiro de 2003) G (6 de setembro de 2004) B (30 de setembro de 2004) das cenas Radarsat. A planície de maré lamosa e a barra de maré (cobertas pela vegetação de mangue - micro topografia) estão perfeitamente evidentes, bem como a planície costeira e o paleocanal que exibem além de padrões texturais, coloração em vermelho e azul. Duas feições não foram identificadas neste produto: os diques naturais e as barras de meandro. Estes foram disfarçadas pela similaridade textural e tonalidade ciano. Desta forma, este produto tem eficiência moderada no destaque das feições mapeadas na área de estudo.

**Tabela 4.2** Avaliação dos produtos sensores remotos quanto à discriminação das feições costeiras da área de estudo

Feições	Avaliação da eficiência dos produtos da dissertação quanto ao reconhecimento das feições que compõem o paleodelta do Macarry														Nível de reconhecimento		
	SAR			ETM+						SAR x ETM+					SAR	ETM+	SAR x ETM+
	fev. 2003	6 set. 2004	30 set. 2004	Composição 7R5G3B	Composição 4R3G1B	Composição 5R3G2B	OIF (7R4G3B)	PCA	SPCA	SAR + OIF	SAR + OIF + Realce por decorrelação	SAR + PCA	SAR + SPCA	Composição SAR RGB			
<i>Planície de inundação</i>	***	Superfície levemente rugosa, com tom cinza claro; cobertura vegetal de gramíneas	***	Coloração alternada entre verde e marrom. Nuance verde: vegetação rasteira e verde de campo aberto. Tonalidade marrom avermelhado: superfícies degradadas pelo uso.	Aparece em tons na cor azul	Combinação das cores azul e marrom	Matiz magenta (saturada)		Manchas em tom marrom escuro		Gradação na cor azul	Suave textura e predominância de pigmentação verde encarquilhada, com segmentos esverdeados sem aspereza.	Tons em vermelho e magenta texturados	Destacada por tons avermelhados	I	M	B
<i>Planície de maré lamosa</i>	Tonalidade cinza escuro e muita rugosidade			Tonalidade muito escura, próximo a cor preto	Nuance vermelho, com leve rugosidade	Superfície muito escura, próximo da cor preto	Degradé na cor verde (saturado)		Variações em tom cor de rosa		Cor verde de superfície áspera	Tom ciano e textura uniforme	Limite na cor verde saturada, onde não é possível fazer a separação das feições	Aparece em tom ciano e textura levemente rugosa	B	B	B

Continuação da Tabela 4.2

<i>Paleocanal</i>	***	Forma meandrante marcada e tonalidade cinza claro	Tons esverdeados	Misura das nuances na cor vermelho e azul	Porção exibida na cor violeta	Mistura do dégradé na cor verde com o magenta	Diversos tons na cor azul	Perfeito contorno, através da coloração verde e textura rugosa	Suave textura e predominância de pigmentação verde encarquilhada, com segmentos esverdeados sem aspereza	Mistura da cor vermelha e azul, onde em algumas porções há textura, em outras a ausência dela.	Variedade de nuances em azul	M	M	B
<i>Barras de meandro</i>	***												Perfeito “desenho” em ciano, fazendo oposição a cor verde texturada adjacente	***
<i>Barra de maré</i>		Tonalidade cinza escuro e muita rugosidade	Tonalidade muito escura, próximo a cor preto	Nuance vermelho, com leve rugosidade	Superfície muito escura, próximo da cor preto	Dégradé na cor verde (saturado)	Variações em tom cor de rosa	Cor verde de superfície áspera	Tom ciano e textura uniforme	Limite na cor verde saturada, onde não é possível fazer a separação das feições	Aparece em tom ciano e textura levemente rugosa	B	M	B
<i>Diques naturais</i>	***		Tons esverdeados		Porção exibida na cor violeta			Diversos tons na cor azul	Perfeito contorno, através da coloração verde e textura rugosa		Perfeito “desenho” em ciano, fazendo oposição a cor verde texturada adjacente	***	I	I
<i>Canal de maré</i>		Feição bem marcada com superfície lisa e muito escura	Cor azul claro, devido a concentração de sedimentos em suspensão				Variações em tom cor de rosa	Aparência vermelha e lisa	Superfície lisa em cor escura, próximo a cor preto		Efeito de profundidade em toda a sua extensão, de cor preto ao fundo.	B	B	B

B = Bom

M = Moderado

I = Insuficiente

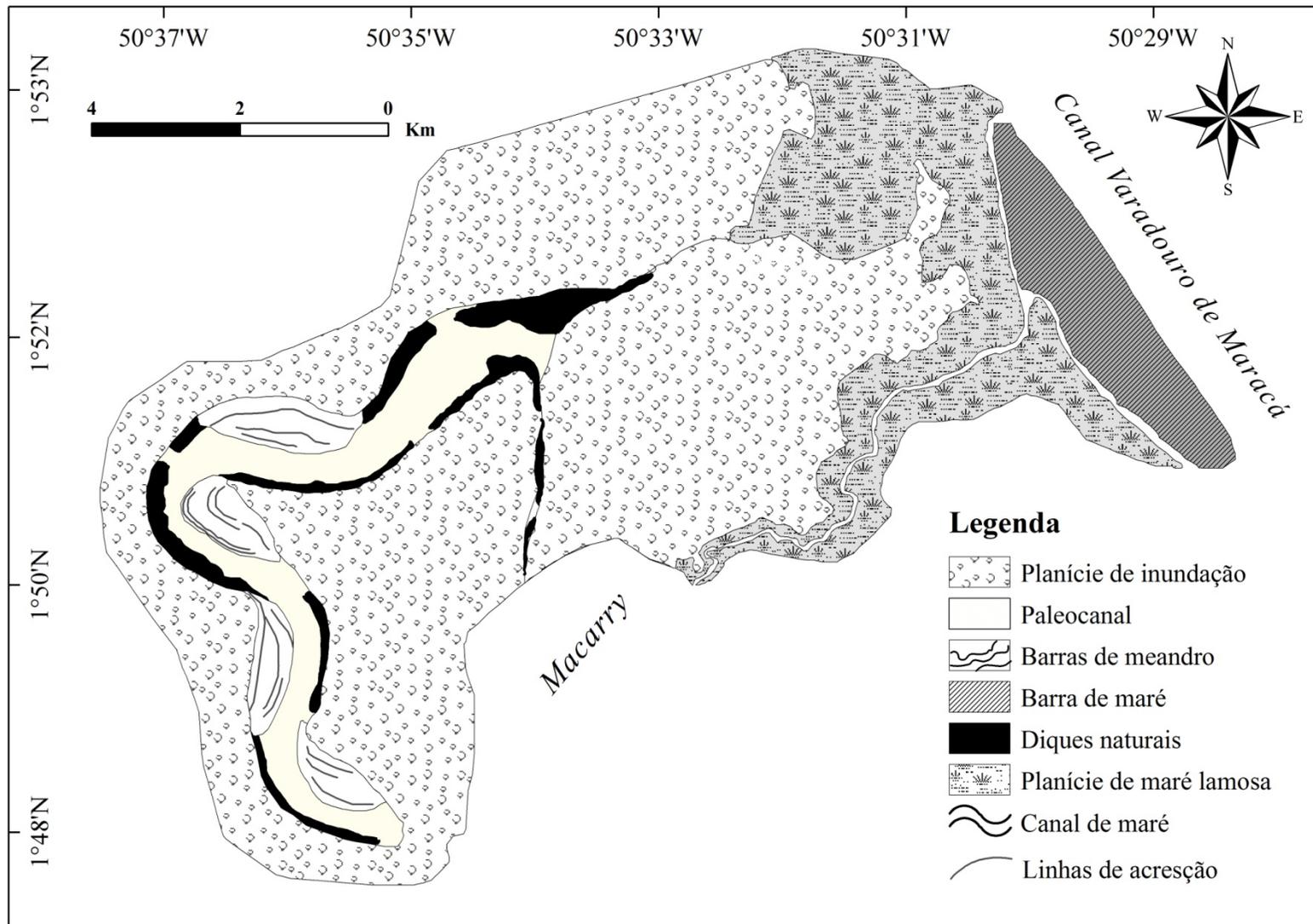
Fonte: Adaptado de Souza Filho (2000)

#### 4.4 MAPA MORFOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

A partir do estudo visual de todos os produtos gerados pelo processamento digital de imagens de sensores remotos, sejam eles eficazes ou não à distinção das feições presentes, e das informações obtidas em campo, o mapa morfológico do paleodelta do Macarry foi confeccionado, a fim de representar cartograficamente esta superfície costeira.

Os produtos desta dissertação foram agrupados em uma base de dados georreferenciados no *software* ArcMap e feitos polígonos referentes as feições identificadas. Estes polígonos foram espacializados e casados, gerando um novo polígono, na escala de 1:65.000, originando assim o mapa da **Figura 4.12**.

Este mapa contribui de forma valiosa ao reconhecimento de feições existentes no litoral norte do Setor Atlântico do Estado do Amapá e, também soma aos esforços de um possível mapeamento morfológico e, posteriormente geomorfológico, de toda a costa Amapaense.



**Figura 4.12** Mapa morfológico do paleodelta do Macarry, identificando as feições mapeadas com base na interpretação visual dos produtos sensores remotos apresentados e informações colhidas em campo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O emprego de informações de sensores ópticos (Landsat) e microondas (Radarsat) propiciaram um bom aproveitamento para o reconhecimento de feições costeiras na área de estudo.

Foi possível perceber que na análise de sensores remotos individuais, os produtos contribuíram de forma distinta para o reconhecimento das feições mapeadas neste trabalho.

A maior parte dos produtos derivados da manipulação digital da cena ETM+ não produziram características suficientes para uma perfeita distinção das feições identificadas, pois em alguns deles ocorreu atribuição de cores iguais a feições diferentes, gerando incerteza à interpretação visual. Em outros produtos, o efeito da cromaticidade fornecido pela interação alvo/sensor, inerente aos sensores ópticos, foi descomposto pela saturação das cores.

Na produção do sensor em microondas (W1) a eficácia em distinguir as feições presentes na área de estudo foi reduzida ainda mais. Nas três cenas utilizadas somente as feições de maior extensão (planície deltáica etc) estavam perfeitamente visíveis, pois apresentaram tons em cinza claro que fez contraste com as pequenas feições (diques naturais, barras de meandro etc), que foram mescladas devido similaridade no padrão textural e proximidade da forma. Mas, informações direcionadas a discrepância da altura da vegetação costeira, geometria de algumas feições e sensibilidade a umidade são perceptíveis nestes produtos e, portanto, valiosas.

Os produtos híbridos contribuíram de forma excelente ao mapeamento das feições do paleodelta do Macarry, pois permitiu maximizar a extração de informações, usando do sinergismo obtido com a imagem gerada, obtendo assim melhor interpretação visual. Em grande parte desta produção houve variação nos padrões de cores, texturas, macro e micro topografia, fator este que ao casar-se com os dados topográficos adquiridos em campo, forneceram acurácia a produção.

Assim, em posterior reunião e estudo de toda produção de sensores remotos apresentados nesta dissertação e, interpretação das informações extraídas em campo, sete feições reconhecidas dentro do paleodelta do Macarry, sendo que algumas destas feições hoje encontram desativadas devido a processos naturais, como tectônica, parâmetros oceanográficos físicos e atmosféricos.

Em consequência destas interpretações, o mapa morfológico do paleodelta do Macarry foi confeccionado, em escala de 1:65 000, onde a morfologia superficial está representada cartograficamente e com acurácia.

Este trabalho realizou o mapeamento de um pequeno trecho dos 600 km de costa pertencentes ao Estado do Amapá e, visa somar a já existentes e futuros trabalhos que possuam como tema o mapeamento morfológico.

## REFERÊNCIAS

- Allison, M. A. & Lee, M. T. 2004. Sediment exchange between Amazon mudbanks and shorefringing mangroves in French Guiana. *Marine Geology*, **208**:169-190.
- Almeida, E. F. 2009. Uso de dados multisensor para geração de Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo, nos ecossistemas costeiros da região do Cabo Norte, Amapá. *In: SBSR, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14. INPE, Anais*, p. 4543-4551.
- Batista Neto, J. A., Ponzi, V. R. A., Sichel, S. E. (Org.). 2004. *Introdução à geologia marinha*. Rio de Janeiro, Interciência, 218 p.
- Batista, E. M. 2006. Avaliação de dados de sensores remotos no reconhecimento e monitoramento de ambientes costeiros tropicais: cabos Cassiporé e Orange, Amapá. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 115 p.
- Bird, E. C. F. 2008. *Coastal geomorphology: an introduction*. 2 nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. 411 p.
- Boaventura, F. M. C. & Narita, C. 1974. Geomorfologia da Folha NA/NB 22 – Macapá. *In: Projeto RADAM Folha NA/NB 22 – Macapá, 6, Rio de Janeiro, IV-I-IV/84 p.*
- Boggs Jr., S. 2006. *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Pearson: United States of America, 4th ed. 676 p.
- Borges, J. 1934. *Lagos Duas Bocas e Novo – Amapá*. Rio de Janeiro, DNPM, Boletim 87, 23 p.
- Boulhosa, M. B. M. 2006. Fusão de dados Landsat ETM+, 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. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 219 p.
- Brasil 1994. Lei 0188, de 19 de dezembro de 1994. Regulamenta o art. 5<sup>o</sup> da Lei Federal n.º 7.661/88 e no Título V da Lei Complementar Estadual n.º 005/94, institui o Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro do Amapá - PEGC dá outras providências. *Diário Oficial do Estado – n<sup>o</sup> 0974*. Macapá, 19 de dezembro de 1994.
- Brattacharya, J. P. & Walker, R. G. 1992. Deltas. *In: Walker, R. G. & James, N. P. (eds.). Facies models: response to sea level change*. Geological Association of Canada: Canada. pp.: 157-177.
- Bridge, J. & Demicco, R. 2008. *Earth surface processes, landforms and sediment deposits*. Cambridge University: Massachusetts. 835 p.
- Bruck, E. C., Ono, H. Y., Araújo, J. L., Simões, N. S., Fernandez, R. A. N. (s/d). Estudos iniciais de implantação da Estação Ecológica de Maracá-Jipioca – AP. Brasília, FBCN (Relatório técnico), 36 p.
- Building, W. 2006. *Shuttle Radar Topography Mission: description*. Global Land Cover Facility – GLCF, University of Maryland: College Park. Disponível em: <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/srtm/description.shtml>
- CCRS, 2007. *Fundamentals of Remote Sensing*. Canada Centre for Remote Sensing, tutorial. 258p. Disponível em: [www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor)

- Chavez Jr., P. S. & Kwarteng, A. Y. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **55**:339-348.
- Chavez Jr., P. S. 1988. An improved dark-Object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, **24**:459-479.
- Chavez Jr., P. S., Berlin, G. L., Sowers, L. B. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, **8**:23-31.
- Chen, S. C., Godoy Jr. M., Herz, R. 1995. Correção atmosférica de dados Landsat através do método de subtração na região Amazônica. In: Simpósio Latinoamericano de Percepção Remota, 7, *Resumo*, 81-87 p.
- Costa Neto, S. V., Sena, C. S. F., Coutinho, R. S. 2006. Vegetação das áreas Sucuriju e região dos Lagos, no Amapá. In: Costa Neto, S. V. (ed.) Inventário biológico das áreas do Sucuriju e região dos Lagos, no Amapá. IEPA: PROBIO. 218 p.
- Costa, F. R. & Souza Filho, P. W. M. 2007. Utilização de Modelos Digitais de Elevação na representação do relevo submerso e emerso na Zona Costeira Amazônica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, *Anais*, p. 2485-2492.
- Costa, W. J. P. 1997. Sedimentação recente e condições físico-químicas das águas do Lago Novo – Cabo Norte/AP. Dissertação do Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 74 p.
- Crósta, A. P. 1992. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Instituto de Geociências, UNICAMP, São Paulo. 170 pp.
- Dalrymple, R. W., Choi, K. 2007. Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems: a schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews*, **81**:135–174.
- Einsele, G. 1992. *Sedimentary basins: evolution, facies and sediment budget*. Springer-Verlag: Germany. 632 p.
- Elachi, C. & Zyl, J. 2006. *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. John Wiley & Sons, Inc.: New Jersey. 559 pp.
- Espartel, L. 1965. *Curso de topografia*. Editora Globo: Rio de Janeiro. 655 pp.
- ESRI. 2003. *Using ArcView GIS*, New York, 350 p.
- Figueiredo, D. 2005. *Conceitos básicos de sensoriamento remoto*. Apostila. 32p. Disponível em: [www.conab.gov.br/conabweb/download/.../conceitos\\_sm.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/.../conceitos_sm.pdf)
- French, P. 2007. Deltaic and estuarine environments. In: Perry, C. & Taylor, K. (eds.) *Environmental sedimentology*. Blackwell Publishing: USA. 441 p.
- Garcia, G. J. & Piedade, G. C. R. 1983. *Topografia aplicada às ciências agrárias*. Nobel, São Paulo, 256 pp.
- Geyer, W. R., Beardsley, R. C., Lentz, S. J., Candela, J., Limeburner, R., Johns, W. E., Castro, B. M., Soares, I. D. 1996. Physical oceanography of the Amazon shelf. *Continental Shelf Research*, **16**:575-616.

- Gibbs, R. J. 1977. Clay mineral segregation in the marine environment. *Journal of Sedimentary Petrology*. **47**:237-243.
- Global Mapper LLC, 2009. *Global Mapper user's manual*. Colorado, 53 pp.
- Gonçalves, F. D. 2005. Utilização de dados de sensores remotos para o mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental à derramamento de óleo na baía de Guajará, Belém-PA. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 152 p.
- Grapher, 2007. *Graphing system v. 7*. Golden software, Inc.
- Jardim, K. A., Santos, V. F., Silveira, O. F. M. 2010. Mapeamento geomorfológico do Cabo Norte utilizando imagens SAR, costa amazônica, Amapá. IEPA. (relatório de pesquisa). 35 p.
- Jensen, J. R. 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Prentice Hall: New Jersey, 318 pp.
- Kineke, G. C. & Sternberg, R. W. 1995. Distribution of fluid muds on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*. **125**:193-233.
- Latini, K. M. & Araújo, A. F. 2009. A importância do trabalho do campo no planejamento curricular da geografia para educação básica: um exemplo das escolas do município de Nova Friburgo. In: ENPEG, Encontro Nacional de Prática de Ensino em Geografia, 10, *Anais*.
- Lima, M. I. C., Bezerra, P. E. L., Araújo, H. J. T. 1991. Sistematização da geologia do estado do Amapá. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 3, *Anais*, p. 322-335.
- Luchiari, A., Kawakubo, F. S., Morato, R. G. 2005. Aplicações do sensoriamento remoto na geografia. In: Venturi, L. A. B. (ed.) *Praticando geografia: técnicas de campo e laboratório*. Oficina de Textos: São Paulo. p.: 33-53.
- Matos, M. F. A. 2009. Caracterização de processos morfodinâmicos e hidrodinâmicos do Cinturão Lacustre Meridional da Reserva Biológica do Lago Piratuba, Amapá. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 142 p.
- Meade, R. H., Dunne, T., Richey, J. E., Santos, U. M., Salati, E. 1985. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. *Science*. **228**:488-490.
- Mendes, A. C. 1994. Estudo sedimentológico e estratigráfico dos sedimentos holocênicos da costa do Amapá - setor entre a Ilha de Maracá e o Cabo Orange. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 271 p.
- Miranda, A. G. O. & Silveira, O. F. M. 2009. Morfodinâmica no canal do Varador de Maracá, região costeira do Estado do Amapá. UFPA: AMASSIS (relatório de pesquisa). 84 p.
- Nichols, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. 2 nd ed. John Wiley & Sons: United Kingdom. 419 p.

- Nittrouer, C. A. & DeMaster, D. J. 1996. The Amazon shelf setting: tropical, energetic and influenced by a larger river. *Continental Shelf Research*. **16**:553-573.
- Oliveira, A. F. L. & Takiyama, L. R. 2006. Confecção das Cartas de Sensibilidade Ambiental a derrames de óleo e seus derivados (cartas SAO) na costa nordeste do estado do Amapá. *In: Seminário de Iniciação Científica, 3, Livro de resumos*.
- Palma, J. J. C. 1979. Geomorfologia da plataforma continental norte brasileira. *In: Projeto REMAC, 7, Rio de Janeiro*, p. 29-51.
- Paradella, W. R., Santos, A. R., Veneziani, P., Cunha, E. S. P. 2005. Radares imageadores nas geociências: estado da arte e perspectivas. *Revista Brasileira de Cartografia*, **57**:56-62.
- Paradella, W. R., Santos, A. R., Veneziani, P., Morais, M. C. 2001. O sinergismo de imagens Standart descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do Landsat-5 em aplicação geológica na Amazônia. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Anais*, p. 315-322.
- PCI Geomatics, 2003. *Geomatica Prime Help*. PCI Geomatics, Version 9.1, Canadá.
- Pereira, I. C. B., Rodrigues, T. E., Gama, J. R. N. F., Souza Filho, P. W. M. 2003. Reconhecimento da cobertura vegetal da várzea do rio Guamá (Pará) a partir de imagens de sensores remotos. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais*, **1**:59-69.
- Pohl, C. & Van Genderen, J. L. 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*. **19**:823-854.
- Proisy, C., Souza Filho, P. W. M., Fromard, F., Prost, M. T., Mendes, A. C., Coligny, F. 2003. Monitoring the dynamic of the Amazon coast (Pará, Brazil and French Guiana) using a common methodology based on a spatial analysis coupled to a simulation tool. *In: Proceeding of the Mangrove. Bahia. Conference*.
- RADARSAT International, 2000. *RADARSAT: data products specifications*. Columbia: CA. Disponível em: [www.rsi.ca](http://www.rsi.ca)
- Reddy, M. A. 2008. *Textbook of remote sensing and Geographical Information Systems*. BSP: BS Publications, India, 476 pp.
- Rees, W. G. 2001. *Physical principles of remote sensing*. Cambridge University Press. Massachusetts, 369 pp.
- Reis, A. V. G. 1996. Aplicação de sensoriamento remoto no mapeamento de parte da região costeira do estado do Amapá (Folha NA-22-Z-A-I). Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Geociências Universidade Federal do Pará, 106 p.
- Rodrigues, S. W. P. 2008. Reconhecimento e mapeamento de ambientes sedimentares através de imagens Landsat 7 ETM+, RADARSAT-1 Wide e SRTM da baía do Caeté (PA) a Maracaçumé (MA). Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 114 p.
- Santana, L. O. 2005. Análise Hidrográfica da microbacia dos rios Gurijuba e Pírim, AP. Trabalho de Conclusão de Curso, Colegiado de Geografia. Universidade Federal do Amapá. 82 p.

- Santos, M. E. C. M. 1977. Paleogeografia do Quaternário Superior na plataforma Continental Norte Brasileira. *In: Projeto REMAC*, 1, Rio de Janeiro, p. 147-168.
- Santos, V. F. 2006. Ambientes Costeiros Amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense. 306 p.
- Santos, V. F., Polidori, L., Silveira, O. F. M., Figueiredo Jr., A. G. 2009. Aplicação de dados multisensor (SAR e ETM+) no reconhecimento de padrões de uso e ocupação do solo em Costas Tropicais - Costa Amazônica, Amapá, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*. **27**:39-55.
- Schowengerdt, R. A. 2007. *Remote sensing: models and methods for image processing*. Elsevier: California, 558 p.
- Silva, M. V. 2010. Análise multitemporal quantitativa da linha de costa amapaense aplicando dados de sensores remotos óticos e radar (1972 - 2000). Trabalho de Conclusão de Curso, Colegiado de Geografia, Universidade Federal do Amapá. 122 p.
- Silveira, O. F. M. & Santos, V. F. 2006. Aspectos geológico-geomorfológico da região costeira entre o rio Amapá Grande e a região dos Lagos do Amapá. *In: Costa Neto, S. V. (ed.). Inventário biológico das áreas do Sucuriju e região dos Lagos, no Amapá*. IEPA: PROBIO. 218 p.
- Silveira, O. F. M. 1998. A planície costeira do Amapá: dinâmica de ambiente costeiro influenciado por grandes fontes fluviais quaternárias. Tese de Doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 215 p.
- Silveira, O. F. M. 2002. Geomorfologia da área de entorno da Reserva Biológica do Lago Piratuba, Macapá. IBAMA/AP. Relatório de pesquisa. [S.n.] 10 p.
- Silveira, O. F. M., Martins, M. H. A., Matos, M. F. A., Santana, L. O., Pantoja, J. R. S., Takiyama, L. R. 2006. Contribuições ao Plano de Manejo da REBIO PIRATUBA-AP. IEPA: Macapá. 35 p.
- Silveira, O. F. M., Santos, V. F., Martins, M. H. A., Monteiro, C. J. 2002. Dinâmica morfológica na foz do rio Amazonas através de análise multitemporal de imagens de satélite. *In: Workshop ECOLAB, Ecossistemas Costeiros Amazônicos*, 6, *Anais*.
- Sommerfield, C. K., Nittrouer, C. A., Figueiredo, A. G. 1994. Stratigraphic evidence of changes in Amazon shelf sedimentation during of late Holocene. *Marine Geology*. **125**:351-371.
- Souza Filho, P. W. M. & Paradella, W. R. 2001. Synthetic aperture radar for coastal erosion mapping and land-use assessment in the moits tropics: Bragança coastal plain case study. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 10, *Anais*, p. 339-347.
- Souza Filho, P. W. M. & Paradella, W. R. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, **10**:123-132.
- Souza Filho, P. W. M. & Paradella, W. R. 2003. Use of synthetic aperture radar images for recognition of coastal geomorphological features, land use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **75**:341-356.

- Souza Filho, P. W. M. & Paradella, W. R. 2005. Use of RADARSAT-1 fine mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **31**:214-224.
- Souza Filho, P. W. M. & Prost, M. T. R. C. 2002. Different geomorphological setting of the Amazon coastal plain from RADAR eyes. *In: Workshop ECOLAB, Ecossistemas Costeiros Amazônicos*, 6, *Anais*.
- Souza Filho, P. W. M. 2000. Avaliação e aplicação de dados sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, Bragança, Norte do Brasil. Tese de doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 219 p.
- Souza Filho, P. W. M., Martins, E. S. F., Costa, F. R. 2006. Using mangroves as a geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian Amazon: a remote sensing data approach. *Ocean & Coastal Management*, **49**:462-475.
- 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: IGARSS, International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1, *Anais*, p. 1-6.
- Souza Filho, P. W. M., Paradella, W. R., Silveira, O. F. M. 2003. Synthetic Aperture Radar for Recognition of Coastal Features in the Wet Tropics: applications in the Brazilian Amazon Coast. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. **1**:149-154.
- Spring, 2006. *Tutorial de Geoprocessamento: sistemas de radar*. DPI/INPE. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/radar.html>
- Suguio, K. 1998. *Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins*. Bertrand Brasil: Rio de Janeiro. 1222 p.
- Suguio, K. 2003. *Geologia Sedimentar*. 1ª ed. Edgard Blücher: São Paulo. 400 p.
- Surfer, 2009. *Surface mapping system v. 9.8*. Golden Software, Inc.
- Summerfield, M. A. 1991. *Global geomorphology: an introduction to the study of landforms*. Harlow: Longman - New York. 537 p.
- Suter, J. R. 1994. Deltaic coasts. *In: Carter, R. W. G. & Woodroffe, C. D. (eds.) 1994. Coastal evolution: late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University: Massachusetts. pp.: 87-120.
- Takiyama, L. R. 2004. Diagnóstico Ambiental do Litoral Atlântico, com vistas a elaboração da Carta de Sensibilidade Ambiental dentro de um SIG. *Relatório técnico*. IEPA: 52 p.
- 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. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 171 p.
- Torres, A. M. & El-Robrini, M. 2006. Amapá. *In: Muehe, D. (Org.) Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente – MMA, p.: 11-40.
- Tucker, C. J., Grant, D. M., Dykstra, J. D. 2004. NASA's global orthorectified LANDSAT data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **3**:313-322.

- USGS. 2004. *Shuttle Radar Topography Mission*. Global Land Cover Facilit (GLCF). College Park: University of Maryland. Disponível em: <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/srtm>
- Wang, Y. 2010. *Remote sensing of coastal environments*. CRC: Taylor & Francis Group, USA. 460 p.
- Williams, D. 2009. *Landsat 7: science data users handbook*. Landsat Project Science Office. Disponível em: [http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook\\_toc.html](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_toc.html)