



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA
CP: 1.639 CEP: 59.072-970 NATAL-RN TEL(FAX): 215-3831

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MONITORAMENTO GEOAMBIENTAL DO
ESTUÁRIO DO RIO PARAÍBA DO NORTE – PB
POR MEIO DA CARTOGRAFIA TEMÁTICA DIGITAL
E DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Autor:

LUCIANO DA SILVA GUEDES

Orientador:

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro (DG/PPGG-UFRN)

Co-orientadora:

Profa. Dra. Helenice Vital (DG/PPGG-UFRN)

Natal – RN, julho de 2002



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA
CP: 1.639 CEP: 59.072-970 NATAL-RN TEL(FAX): 215-3831

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MONITORAMENTO GEOAMBIENTAL DO
ESTUÁRIO DO RIO PARAÍBA DO NORTE – PB
POR MEIO DA CARTOGRAFIA TEMÁTICA DIGITAL
E DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Autor:

LUCIANO DA SILVA GUEDES

*Dissertação de Mestrado
apresentada em 5 de julho de
2002, para obtenção do título de
Mestre em Geodinâmica pelo
Programa de Pós-Graduação em
Geodinâmica e Geofísica da
UFRN.*

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro (Orientador)

Profa. Dra. Helenice Vital (Co-orientadora)

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima (DGEOC/UFPB)

Natal – RN, julho de 2002

Aos meus pais (*in memoriam*)
Fernando Guedes e Lucília Guedes,
que infelizmente não puderam
compartilhar em vida desta realização
pessoal.

AGRADECIMENTOS

Em especial aos meus irmãos Aldaci, Ana Amélia, Alcino, Isabel, Lucinha, Rosinha, Nanda e Fernanda; aos cunhados Juá, Marcelo, Edimilson, Doriedson, Ueine e Ermina; aos sobrinhos Adefran, Márcia, Thaise, Thaiane, Milena, Vanessa, Mércia, Marla, Fernando Júlio, Edimilson Jr., Lícia, Doriedson Jr., Marcela, João Fernando e Bruno, a minha namorada Margarete e a minha filha Karol, pessoas mais importantes na minha vida e principais incentivadores nesta longa jornada estudantil.

Ao Prof. Venerando Eustáquio não só pela orientação, mas também pela compreensão da minha ausência em alguns momentos e pelo incentivo nas horas difíceis, meus sinceros agradecimentos.

A Prof. Helenice Vital pela orientação em momentos cruciais do trabalho, meu muito obrigado.

Aos Profs. Antônio Galindo e Fernando César pelo apoio, incentivo e compreensão, meu obrigado.

A Nilda, secretária do PPGG, pessoa maravilhosa a quem eu tenho muito carinho e respeito, meu obrigado pelos cafezinhos, biscoitos, chocolates, presentes e, acima de tudo, pela amizade e companheirismo.

Aos amigos Williams, Adriano, Alfredo, Eugênio, Marcelo José, Flavo Helano, Valdir, Vladimir, Wellington Mafra, Wellington Rodrigues, Márcio Teódulo, Pinto, Josibel, Werner, Michael, Armando, Franklin, Prof^a. Fátima, Adriana, Angélica, Fátima Maria, Zuleide, Flávia Taone e Cristina pelo incentivo e ajuda no decorrer destes anos, sendo de fundamental importância para a concretização deste trabalho, mas acima de tudo gostaria de agradecer pela amizade nos momentos alegres e tristes por que passei durante estes dois anos.

Aos Profs. Emília de Rodat, José Bezerra, Eduardo Viana e José Pacheco, todos do Departamento de Geociências da UFPB, pela disponibilização de material bibliográfico e cartográfico imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao Sr. Tarcísio Valério da Costa, em nome Prefeitura de Bayeux, pela contribuição nas campanhas de campo disponibilizando a lancha da Companhia Florestal da Paraíba.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) por ter-me aceito no seu quadro discente e pela disponibilização do espaço físico e equipamentos imprescindíveis na realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que por meio da bolsa de estudo financiou minhas despesas pessoal e profissional.

A Deus que me permitiu chegar até aqui.

RESUMO

O Estuário do Rio Paraíba do Norte, localizado na porção oriental do Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 34°50'00''S a 34°57'30''S e 6°55'00''W e 7°7'30''W, constitui uma planície flúvio-marinha formada pelo rio Paraíba do Norte e seus afluentes Sanhauá, Paroeira, Mandacaru, Tiriri, Tambiá, Ribeira e Guia, envolvendo uma área de aproximadamente 260 Km². A crescente pressão populacional sobre o estuário vem gerando conflitos e um manejo inadequado deste ambiente. O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a evolução geodinâmica do Estuário do Rio Paraíba do Norte, no período de 1969 a 2001, por meio do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, da cartografia temática digital e da integração de dados georreferenciados multitemporais, combinados a uma base geológica-geofísica obtida em levantamentos de campo. A partir das cartas da SUDENE foram obtidos os mapas digitais de uso e ocupação do solo de 1969 e o topográfico, sendo este último utilizado na geração do MDT. O processamento digital das imagens dos satélites Landsat 7 ETM+ e Spot HRVIR-PAN possibilitou a geração de produtos imagens utilizados como base na identificação e caracterização geoambiental do estuário no período atual (composições coloridas das bandas 5-4-3, 5-3-1, 5-2-NDWI e das razões das bandas 7/4-5/3-4/2, 5/7-3/1-5/4 combinadas em RGB). A técnica de fusão de imagens RGBI foi utilizada com a inclusão da banda pancromática do Spot HRVIR e do Landsat 7 ETM+ na camada I nos trios de bandas em RGB 5-4-3, 5-3-1 e 5/7-3/1-5/4. A integração do MDT com as imagens digitais possibilitou a identificação de sete unidades geomorfológicas no estuário (tabuleiro costeiro, vertente, planície de maré, terraço fluvial, dunas subaquosas, planície praial e praia). O Sonar de Varredura Lateral (*Side Scan Sonar*) e o Ecobatímetro, associados às coletas de sedimentos de fundo forneceram informações sobre as condições atuais da superfície de fundo do canal estuarino, revelando o predomínio de areias (areia fina a muito fina) e feições dunares 2D com largura de 5m e altura de 0.5 m, em média, caracterizando o estuário como um ambiente dominado por regime de fluxo médio. A profundidade varia de 1 m a 11 m, sendo esta última cota alcançada nas proximidades do Porto de Cabedelo. De maneira geral o estuário é relativamente raso, com evidências de assoreamento principalmente na sua porção superior, comprovado pela presença de dunas subaquosas expostas durante a maré

baixa. Por meio de técnicas de Geoprocessamento foi possível integrar os dados de 1969 com os de 2001, resultando na geração dos mapas digitais multitemporais uso e ocupação do solo, MDT, geomorfológico e batimétrico, representativos da evolução geodinâmica do estuário.

ABSTRACT

The North Paraíba River Estuary, located in the eastern portion of the Paraíba State, Northeast Brazil, on coordinates 34°50'00"-34°57'30"S and 6°55'00"-7°7'30"W, constitutes a fluvio-marine plain formed by the North Paraíba River and its tributaries Sanhauá, Paroeira, Mandacaru, Tiriri, Tambiá, Ribeira and Guia. This estuary comprises an area of about 260 km². Increasing human demands on the estuary area and inadequate environment managing have generated conflicts. The present work main purpose is to evaluate the geodynamic evolution of the North Paraíba River Estuary in the period from 1969 to 2001, using digital image processing techniques, thematic digital cartography and multitemporal data integration, combined to geological-geophysical field surveys. The SUDENE cartographic database, converted to digital format were, used to obtain occupation and topographic maps from 1969 and to generate a Digital Elevation Model (DEM). Digital Landsat 7 ETM+ and Spot HRVIR-PAN satellite images interpretation allowed the environmental characterization of the estuary. The most important digital processing results were achieved color composites RGB 5-4-3, 5-3-1, 5-2-NDWI and band ratio 7/4-5/3-4/2, 5/7-3/1-5/4). In addition the fusion image technique RGBI was used by the inclusion of the Spot HRVRI and Landsat 7 ETM+ panchromatic band on I layer with RGB triplets 5-4-3, 5-3-1 and 5/7-3/1-5/4. The DEM and digital images integration allowed the identification of seven geomorphological units: coastal tableland, flowing tray, tide plain, fluvial terrace, submerged dune, beach plain and beach). Both Side Scan Sonar and Echosound were used to analyse underwater surface and bedforms of the estuarine channel, sand predominance (fine to very fine) and 2D dune features 5 m wide and 0.5 m height. This investigation characterized the estuary as an environment dominated by regimen of average flow. The channel depth varies between 1 m and 11 m, being this last quota reached in the area of Porto de Cabedelo. The chanel estuary is relatively shallow, with erosion evidences mainly on its superior portion, attested by sand banks exposed during the low tide. Multitemporal digital maps from 1969 and 2001 integration were obtained through geoprocessing techniques, resulting the geodynamic evolution of the estuary based on landuse, DEM geomorphology and bathymetric maps.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo..... | 6 |
| Figura 1.2 - Localização da Bacia Pernambuco-Paraíba..... | 7 |
| Figura 1.3 - Mapa geológico simplificado da área de estudo..... | 8 |
| Figura 1.4 - Coluna lito-estratigráfica da porção superior da Bacia Pernambuco/Paraíba..... | 9 |
| Figura 1.5 - Mapa pedológico simplificado da área de estudo..... | 14 |
| Figura 2.1 - Fluxograma da metodologia adotada..... | 17 |
| Figura 2.2 - Modelo esquemático da seqüência metodológica da etapa de geoprocessamento dos dados cartográficos | 19 |
| Figura 2.3 - Esquema simplificado das funções de PDI utilizadas..... | 21 |
| Figura 2.4 - Gráfico ilustrativo de correção de maré..... | 25 |
| Figura 2.5 - Fluxo seqüencial na elaboração do MDT..... | 27 |
| Figura 2.6 - Disposição dos pontos amostrais no arquivo de saída XYZ..... | 28 |
| Figura 3.1 - Imagem da composição colorida das bandas 5-4-3 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB..... | 34 |
| Figura 3.2 - Imagem da composição colorida das bandas 5-4-3-Pan do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGBI adicionada a banda pancromática do SPOT HRVIR na camada I..... | 35 |
| Figura 3.3 - Imagem da composição colorida das bandas 5-3-1 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB..... | 36 |
| Figura 3.4 - Imagem da composição colorida das bandas 5-3-1-I do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGBI..... | 37 |
| Figura 3.5 - Imagem da composição colorida das bandas 5-2-NDWI do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB..... | 38 |
| Figura 3.6 - Imagem da composição colorida das razões das bandas 7/4-5/3-4/2 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB..... | 41 |
| Figura 3.7 - Imagem da composição colorida das razões das bandas 5/7-3/1-5/4 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB..... | 42 |
| Figura 3.8 - Imagem da composição colorida das razões das bandas 5/7-3/1-5/4-Pan do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGBI realçando as unidades geambientais do ERP..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.9 - Imagem da composição colorida das bandas 5-2-NDWI do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB. Foto A – vegetação verde sadia de cana-de-açúcar; Foto B – cana-de-açúcar em estágios diferentes de Crescimento..... | 46 |
| Figura 3.10 - Fotos A e B mostrando o avanço da cana-de-açúcar sobre a vegetação de mata no tabuleiro costeiro..... | 47 |
| Figura 3.11 - Figura 3.11 – Imagem da composição colorida das razões das bandas 7/4-5/3-4/2 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB. Foto A – vegetação de mangue (primeiro plano) e vegetação de mata ou floresta (segundo plano), Foto B – vegetação de mangue..... | 50 |
| Figura 3.12 - Viveiro de camarão em construção..... | 51 |
| Figura 3.13 - Imagem da composição colorida das bandas 5-3-1 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB. Foto A – lagoas que se formaram em áreas deprimidas correspondentes às reentrâncias existentes entre os cordões litorâneos. Foto B – atividade de carcinicultura reaproveitando áreas de antigas salinas..... | 52 |
| Figura 3.14 - Áreas onde ocorreram as modificações mas relevantes na morfologia do ERPN entre os anos de 1969 a 2001..... | 55 |
| Figura 3.15 - Visão parcial da Planície Praial, mostrando o município de Cabedelo e evidenciando os processos geodinâmicos atuantes na foz do ERPN..... | 56 |
| Figura 3.16 - Construção de gabiões como medida de contenção da erosão costeira..... | 57 |
| Figura 4.1 - Modelo Digital de Terreno do Estuário do Rio Paraíba do Norte incluindo a batimetria do canal principal..... | 61 |
| Figura 4.2 - Modelo Digital de Terreno do Estuário do Rio Paraíba do Norte observado de forma tridimensional (3D)..... | 62 |
| Figura 4.3 - Composição colorida das razões das bandas 5/7-3/1-5/4-PAN do Landsat 7 ETM+, combinadas em RGBI e sobreposta ao MDT..... | 63 |
| Figura 4.4 - Visão panorâmica do Tabuleiro Costeiro..... | 64 |
| Figura 4.5 - Trecho da praia entre Manaíra e Bessa..... | 66 |
| Figura 4.6 - Dunas subaquosas que afloram no meio do rio principal durante a maré baixa..... | 68 |
| Figura 4.7 - Detalhe do terraço da Ilha da Restinga..... | 69 |
| Figura 4.8 - Coqueiros cultivados entre o sopé do Tabuleiro Costeiro e a Planície de Maré..... | 69 |
| Figura 4.9 - Sonograma mostrando sedimento arenoso..... | 71 |
| Figura 4.10 - Sonograma mostrando sedimento areno-argiloso..... | 72 |
| Figura 4.11 - Sonograma mostrando a morfologia do fundo..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.12 - Perfil longitudinal da porção do Rio Paraíba do Norte entre os Rios Mandacaru e Tambiá..... | 74 |
| Figura 4.13 - Perfil transversal do Rio Paraíba do Norte entre a foz do Rio da Guia e o Porto de Cabedelo..... | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1.1 - Resumo da estratigrafia do quaternário na área que envolve o Estuário do Rio Paraíba do Norte..... | 12 |
| Tabela 3.1 - Classes do mapa de uso e ocupação do solo do Estuário do Rio Paraíba do Norte em 1969..... | 45 |
| Tabela 3.2 - Classes do mapa de uso e ocupação do solo do Estuário do Rio Paraíba do Norte em 2001..... | 45 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | v |
| CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| 1.1. Introdução | 1 |
| 1.2. Apresentação | 4 |
| 1.3. Localização e Vias de Acesso | 5 |
| 1.4. Objetivos | 5 |
| 1.4.1. Geral..... | 5 |
| 1.4.2. Específicos..... | 5 |
| 1.5. Contexto Geológico e Geomorfológico | 6 |
| 1.5.1. Contexto Geológico..... | 6 |
| 1.5.2. Contexto Geomorfológico..... | 10 |
| 1.6. Caracterização Fisiográfica | 12 |
| 1.6.1. Clima..... | 12 |
| 1.6.2. Vegetação..... | 12 |
| 1.6.3. Solos..... | 14 |
| CAPÍTULO 2 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 16 |
| 2.1. Introdução | 16 |
| 2.2. Delimitação da Área de Estudo | 16 |
| 2.3. Levantamento Bibliográfico/Cartográfico | 16 |
| 2.4. Geoprocessamento dos Dados Cartográficos | 17 |
| 2.5. Processamento Digital das Imagens de Satélite | 20 |
| 2.5.1. Composições Coloridas em RGB..... | 20 |
| 2.5.2. Composições Coloridas em IHS..... | 20 |
| 2.5.3. Análise por Principais Componentes..... | 21 |
| 2.5.4. Razão de Bandas..... | 22 |
| 2.5.5. Fusão por RGBI..... | 22 |
| 2.5.6. Filtragens..... | 24 |
| 2.5.7. Pseudo-Color..... | 24 |
| 2.6. Etapas de Levantamento de Campo | 24 |
| 2.7. Integração de Dados Cartográficos | 26 |
| 2.7.1. Geração do MDT e Superposição com Imagens de Satélites..... | 26 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 3 – PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT 7 ETM+ E SPOT HRVIR PANCROMÁTICA E INTEGRAÇÃO DOS PRODUTOS IMAGENS DIGITAIS..... | 29 |
| 3.1. Introdução..... | 29 |
| 3.2. Análise Descritiva das Composições Coloridas em RGB e RGBI..... | 30 |
| 3.2.1. Composição 5-4-3..... | 31 |
| 3.2.2. Composição 5-3-1..... | 31 |
| 3.2.3. Composição 5-2-NDWI..... | 33 |
| 3.3. Composições Coloridas de Razões de Bandas em RGB | 39 |
| 3.3.1. Combinação 7/4-5/3-4/2..... | 39 |
| 3.3.2. Combinação 5/7-3/1-5/4..... | 39 |
| 3.4. Integração Temporal dos Dados Vetoriais e Produtos Imagens como Suporte ao Monitoramento Geoambiental do Estuário do Rio Paraíba do Norte..... | 44 |
| 3.5. Mudanças na Morfologia do Estuário do Rio Paraíba do Norte..... | 53 |
| CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO ESTUÁRIO DO RIO PARAÍBA DO NORTE POR MEIO DE PRODUTOS DIGITAIS DE SENSORES REMOTOS E MODELO DIGITAL DE TERRENO..... | 58 |
| 4.1. Caracterização Geomorfológica do Estuário do Rio Paraíba do Norte a partir da Integração de um Modelo Digital de Terreno e da Imagem Landsat 7 ETM+..... | 58 |
| 4.2. Caracterização da Morfologia de Fundo do Rio Paraíba do Norte por meio do Sonar de Varredura Lateral e do Ecobatímetro..... | 70 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 75 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 78 |
| ANEXO – 01..... | 87 |
| ANEXO – 02..... | 88 |
| ANEXO – 03..... | 89 |
| ANEXO – 04..... | 90 |
| ANEXO – 05..... | 91 |

Capítulo 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 - Introdução

A IGPB (*International Geosphere Biosphere Program*) através do programa LOICZ (*Land Ocean Interactions in the Coastal Zone*) define como zona costeira toda a região compreendida entre 200 m da linha de costa mar adentro e 200 m da linha de costa continente adentro. Nesta definição de zona costeira estão incluídos todos os estuários.

Conforme Cracknell (1999) a zona costeira é uma faixa de grande importância econômica e social, devido aos fatos seguintes:

1. Ocupa 18% da superfície do globo;
2. Ao seu redor ocorre um quarto (1/4) da produtividade primária global;
3. Em seu entorno vive 60% da população humana;
4. Estão localizados dois terços (2/3) das cidades com populações acima de 2,6 milhões de habitantes;
5. Supre 90% da pesca do mundo.

Além disso, as mudanças antropogênicas são mais intensas em regiões costeiras do que em qualquer outra parte, devido aos seguintes fatores (Pernetta & Milliman 1995):

1. Alta densidade populacional;
2. As taxas de crescimento populacional são maiores que as taxas de crescimento em áreas mais interiores;
3. Maior turismo internacional na costa;
4. 90% da poluição do solo incluindo água de esgoto e materiais tóxicos ocorrem na costa oceânica;

5. Muitos dos solos férteis para a agricultura em países tropicais ocorrem na costa; conseqüentemente, mudanças na cobertura e uso do solo são mais intensas em zonas marginais;
6. Neste século, o fluxo de sedimentos de origem antropogênica excedeu a razão natural do fluxo oceânico;
7. Em escala continental a razão do fluxo sedimentar é ainda considerado reduzido, conseqüentemente pela construção de represas e esquemas de irrigação em larga escala (uma reversão da tendência anterior);

Os problemas de uso do solo de áreas costeiras são decorrentes dos conflitos entre meio ambiente e metas de desenvolvimento e/ou da ocupação desordenada dos centros urbanos. Este cenário implica na revisão dos fatores que influenciam a tomada de decisão em relação à utilização dos recursos. O'Regan (1996) ressalta que na era moderna de manejo de recursos sustentáveis, é necessário haver um balanço entre proteção e conservação ambiental em função da pressão crescente de atividades de desenvolvimento humano.

O estudo das regiões estuarinas torna-se cada vez mais importante para a exploração racional dos recursos naturais e para um adequado controle ambiental. Os estuários constituem regiões de alta produtividade biológica e grande concentração de recursos alimentares. Por outro lado, estão entre as regiões mais afetadas por variações naturais e pressões causadas pelo homem, como grandes concentrações populacionais que aceleram a exploração de recursos e contribuem para descarga de poluentes diversos na água, com sérios problemas ao ambiente (NEPREMAR – *Núcleo de Estudos e Pesquisas dos Recursos do Mar* 1980).

A resposta do meio estuarino a uma intervenção humana se manifesta sobre a forma de um encadeamento complexo de reações cujos elos entre os processos físicos, químicos e biológicos, são pouco conhecidos (Cunha 1982).

As unidades geoambientais possuem suas características e dinamismo próprios. Entretanto, a influência humana afeta este dinamismo enormemente no tempo e no espaço. A crescente pressão populacional sobre os recursos naturais vem gerando conflitos e um uso inadequado destes. Uma abordagem integrada sobre o meio ambiente

e seus recursos se faz necessário na medida em que esta abordagem otimiza o processo de planejamento para uma melhor conscientização do uso racional do solo (Simões 1997).

As unidades geoambientais estão enquadradas nos contornos da organização social como um conjunto de fatores naturais e construídos. Estes são sempre percebidos e avaliados segundo os parâmetros, necessidades, possibilidades e limitações da sociedade. Todos esses fatores podem, em determinado momento, ser sintetizados num mapa de uso do solo ou de zoneamento geoambiental. Tal mapa temático é a expressão das características físicas, econômicas, políticas e sociais, resultantes da integração entre os processos de transformação econômico-produtiva e os processos de organização física do território, em escala local, regional ou nacional (Pereira Leite 1994).

A Agenda 21 sugere que informações sócio-econômicas devem ser utilizadas juntamente com as informações geoambientais para garantir a inclusão das características sociais no contexto do planejamento ambiental (FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* 1995).

O Estuário do Rio Paraíba do Norte (ERPN), por estar localizado numa área urbana em crescente expansão, enquadra-se perfeitamente na problemática geral desses ambientes. Os impactos ambientais decorrentes desse processo podem ser estudados com base na análise temporal-comparativa do uso e ocupação do solo por meio de imagens de satélites, levando-se em consideração as características geológicas e geomorfológicas do terreno, dos aspectos da vegetação natural e dos limites urbanos das cidades. O procedimento empregado neste trabalho permite a identificação e a caracterização geoambiental das alterações ambientais decorrentes de formas predatórias e desordenadas de uso e ocupação.

Diversos estudos sobre o ERPN já foram realizados abordando temáticas variadas. Ottmann e Coutinho (1962), Mabessone e Coutinho (1970) e Assis (1977) abordaram temáticas sedimentológicas em áreas interiores e nas proximidades da foz do rio, no Porto de Cabedelo. Rathbum (1900), Richardson (1900), Coelho (1971) e Farias (1978) fizeram trabalhos taxômicos sobre crustáceos. Sassi e Watanabe (1980), NEPREMAR (1980), Grotta e Luneta (1980), Rosa (1980), Sassi e Melo (1982), Nishida (1987), Sassi (1991), Moura (1992) realizaram trabalhos relacionados ao microfitoplancton e as condições hidrológicas. Marcelino (2000) trabalhou o estuário

com ênfase ao estudo sócio-ambiental enfatizando as interferências antrópicas na sua área de influência.

1.2 - Apresentação

A Bacia do Rio Paraíba do Norte drena uma área de 14.397,35 km² e intercepta 37 municípios do Estado da Paraíba. Apresenta um comprimento de 380 km de extensão, dividindo-se na Bacia do Alto Paraíba com 114,5 km, Bacia do Médio Paraíba com 155,5 km e Bacia do Baixo Paraíba com 110,0 km (Gualberto 1977 *apud* NEPREMAR 1980).

Na Bacia do Baixo Paraíba, feições tipicamente estuarinas são observadas desde a região de Bayeux até a foz do rio, em Cabedelo, numa distância aproximada de 20 km. Esta porção estuarina é margeada por uma vegetação de mangue em quase toda a sua extensão e possui sete tributários, quatro pela margem esquerda (Rios Paroeira, Tiriri, Ribeira e da Guia) e três pela margem direita (Rios Sanhauá, Tambiá e Mandacaru), os quais contribuem com aporte de água superficial de baixa salinidade, que carrega materiais erodidos, detritos domésticos e/ou industriais (Sassi & Watanabe 1980).

A área objeto de estudo abrange uma superfície de aproximadamente 260 km² e envolve 5 (cinco) municípios, quais sejam: João Pessoa, Bayeux, Santa Rita, Cabedelo e Lucena, que constituem a Região Submetropolitana de João Pessoa e pertencem à Mesorregião da Mata Paraibana (Richa 1980).

O uso e ocupação do ERPN são antigos, datando do processo inicial de colonização. A posição estratégica, na entrada da mais importante via de penetração fluvial em direção ao interior, foi fundamental para a ocupação inicial do espaço paraibano, tendo se constituído, inclusive, no primeiro território submetido ao processo de colonização estadual (Moreira & Targino 1997). Sua proximidade à capital do Estado e ao Porto de Cabedelo, principal porto do Estado, foram fatores decisivos para o avanço sobre este das cidades que compõem a malha submetropolitana de João Pessoa, e do outro, a cana-de-açúcar, base de assentamento do processo de colonização, desde os primórdios da instalação dos primeiros engenhos no Município de Santa Rita. Diante disto está sofrendo os impactos de uma urbanização desordenada e das mudanças que tiveram lugar no campo decorrentes do processo ora de expansão, ora de contração da

atividade canavieira que, durante longo tempo, comandou a economia estadual (Moreira 1988).

1.3 - Localização e Vias de Acesso

O ERPN localiza-se na porção oriental do Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 34°50'00" a 34°57'30" de longitude oeste e 6°55'00" e 7°7'30" de latitude sul (Figura 1.1). Do ponto de vista geomorfológico, o estuário constitui uma planície flúvio-marinha formada pelos rios Paraíba do Norte (canal principal), Sanhauá, Paroeira, Mandacaru, Tiriri, Tambiá, Ribeira e Guia.

As principais vias de acesso ao estuário são a BR 230, que integra o Município de Cabedelo a João Pessoa, e a PB 025 entre os Municípios de Santa Rita e Lucena.

1.4 - Objetivos

1.4.1 - Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a evolução geodinâmica do Estuário do Rio Paraíba do Norte nas últimas três décadas (1969 – 2001), abordando de uma maneira geral e indireta o quadro sócio-econômico-ambiental no contexto histórico temporal, por meio do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, da cartografia temática digital e da integração de dados georreferenciados multitemporais, combinados a uma base geológica-geofísica obtida em levantamentos de campo.

1.4.2 - Específicos

1. Elaboração de cartas temáticas multitemporais (últimas três décadas) demonstrativas da evolução da dinâmica estuarina;
2. Análise dos processos sedimentares atuantes no sistema estuarino a partir de registros sonográficos (*Side Scan Sonar*);
3. Confecção da carta batimétrica da área estuarina;

4. Elaboração de um banco de dados geoambientais georreferenciados obtidos nos levantamentos temáticos e geológico-geofísicos.

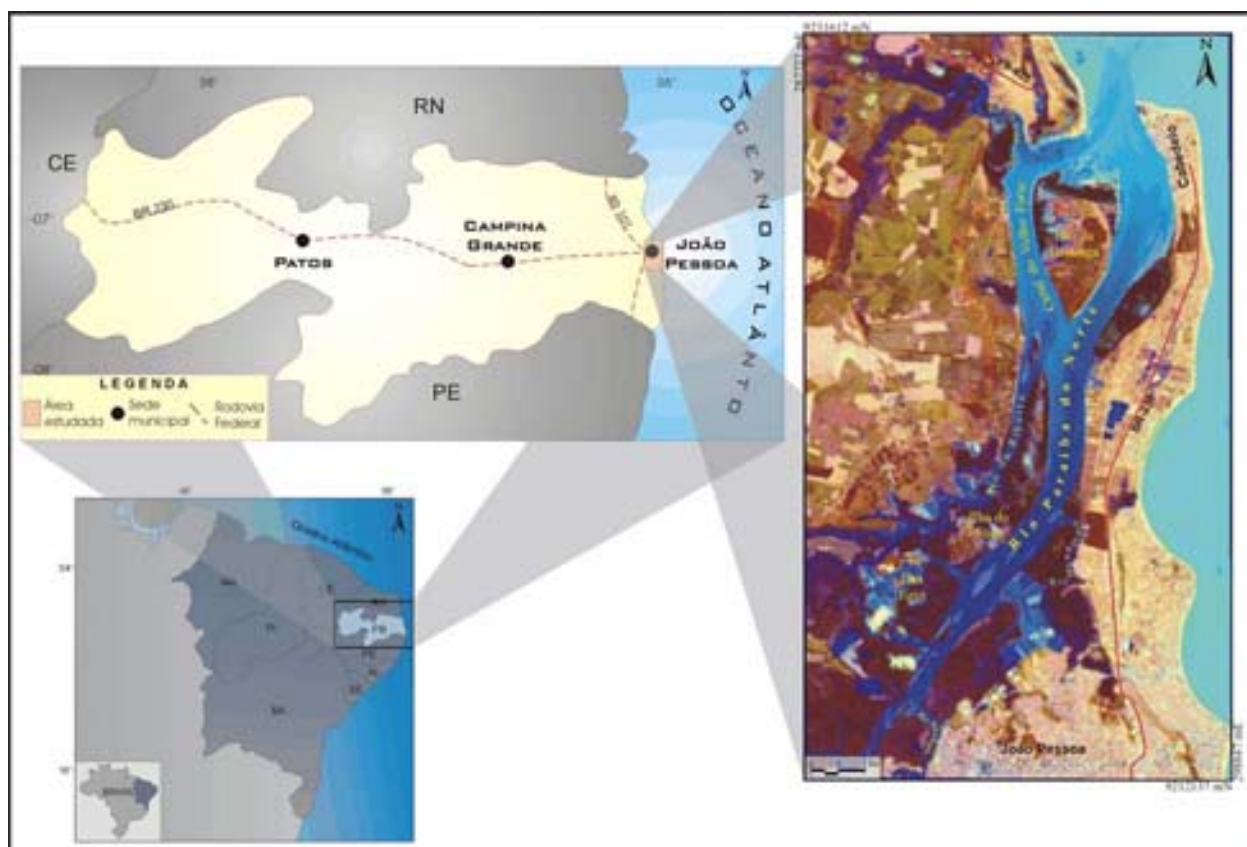


Figura 1.1 – Mapa de localização do Estuário do Rio Paraíba do Norte.

1.5 - Contexto geológico e geomorfológico

1.5.1 - Contexto geológico

A área em estudo está inserida no contexto geológico da Bacia Pernambuco-Paraíba que, em sua área emersa, ocupa uma faixa estreita de cerca de 9.000 km² ao longo do litoral dos estados de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte (Figura 1.2), estendendo-se por 24.000 km² pela plataforma continental. É a bacia sedimentar mais setentrional da costa brasileira, situando-se entre os paralelos 6° e 9° sul. Limita-se a norte pelo Alto de Touros com a Bacia Potiguar, e a sul pelo Alto de Maragogi com a Bacia de Alagoas (Mabessone & Alheiros 1988).

Do ponto de vista geológico predominam na área de estudo os terrenos sedimentares terciários e quaternários (Figura 1.3). As rochas sedimentares encontradas

são representadas pelas formações do Grupo Paraíba e do Grupo Barreiras e pelas formações recentes.

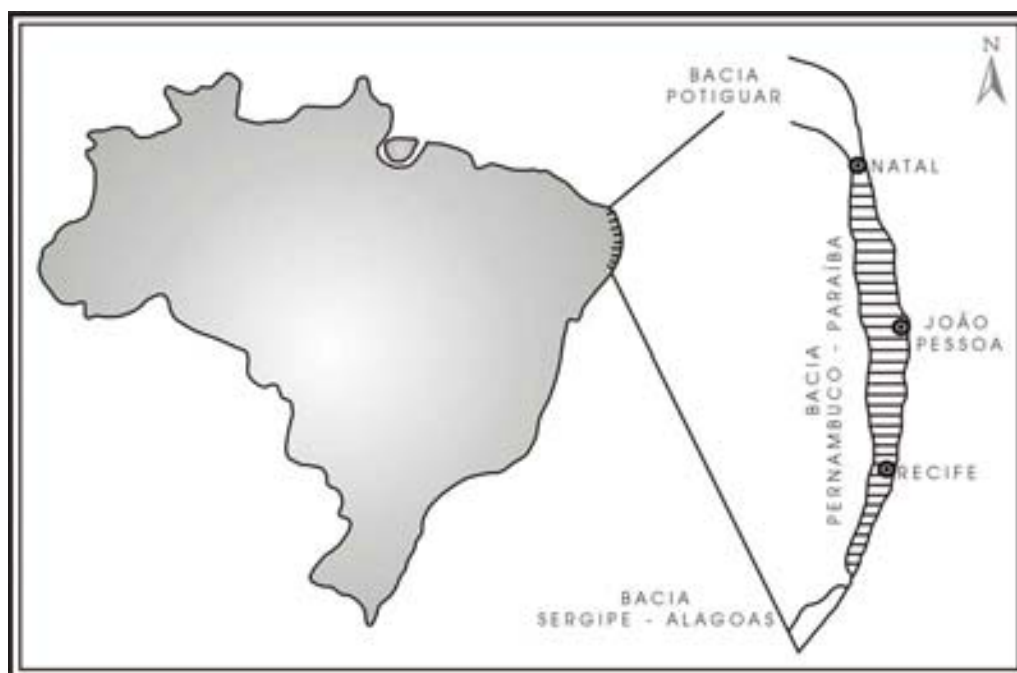


Figura 1.2 – Localização da Bacia Pernambuco-Paraíba no contexto regional (Fonte: Mabessoone & Alheiros 1988).

Do Grupo Paraíba ocorre a Formação Gramame (Figura 1.4) constituída de calcários quase puros, calcários argilosos, margas e calcarenitos. Na base desta formação é encontrada uma camada irregular de fosforita. Esta formação recebeu a denominação de Oliveira *et al.* (1940) para uma melhor definição das ocorrências de calcários margosos no vale do Rio Gramame. A mesma repousa concordantemente sobre os clásticos da Formação Beberibe, interdigitando-se, inclusive, com as fácies mais distais desta última. Esta Formação atinge uma espessura de cerca de 55 metros, dos quais mais de dois terços são representados por calcários cinzentos. Na base, os calcários são dolomíticos tornando-se gradualmente cálcicos e puros à medida que se aproximam do topo da seqüência. Beurlen (1967), afirma que sua associação fóssil indica um ambiente de sedimentação marinho de águas quentes, calmo, pouco profundo, inferior a 200 metros.

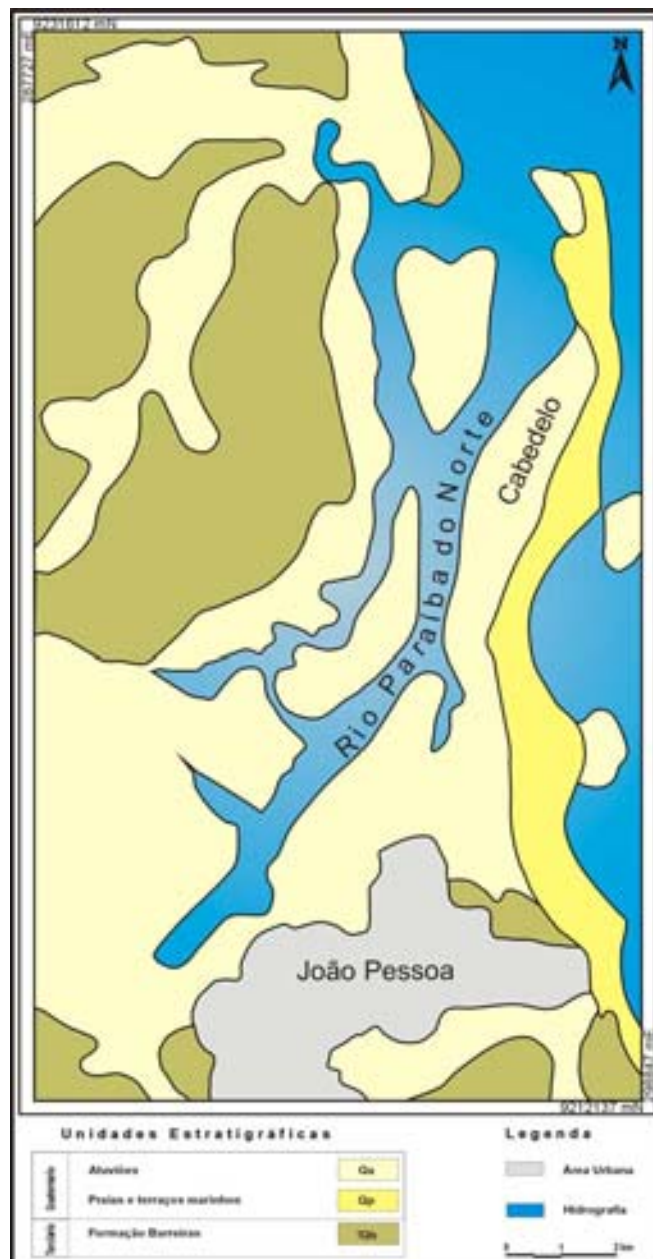


Figura 1.3 – Mapa geológico simplificado da área de estudo (Modificado do Mapa Geológico do Estado da Paraíba, Escala 1:500.000, 1982).

Sobre os terrenos da Formação Gramame, repousam, em discordância erosiva, os clásticos continentais constituintes do Grupo Barreiras, com predominância da Formação Guararapes que forma a superfície dos tabuleiros e que em algumas partes aparece dissecada.

Os sedimentos do Grupo Barreiras apresentam-se em forma de capeamento sobre o Grupo Paraíba (Cretáceo). Eles são representados pela Formação Guararapes, de idade

plio-pleistocênica, composta de arenitos, argilas variegadas e cascalhos. Os arenitos apresentam coloração diversificada que varia do branco ao amarelo e vermelho.

O Grupo Barreiras estende-se por toda a faixa costeira com predominância à altura de João Pessoa e em direção ao norte onde avança sobre o litoral norte-rio-grandense. As formações quaternárias do litoral paraibano são representadas por sedimentos inconsolidados sendo representadas por aluviões, areias de praias, mangues, terraços fluviais e ainda por coberturas arenosas que se sobrepõem às camadas inferiores.

De acordo com Cavalcante e Monteiro (1991), o termo Barreiras foi utilizado primeiramente por Branner (1902), para designar camadas variegadas de sedimentos que constituem as falésias ao longo da costa.

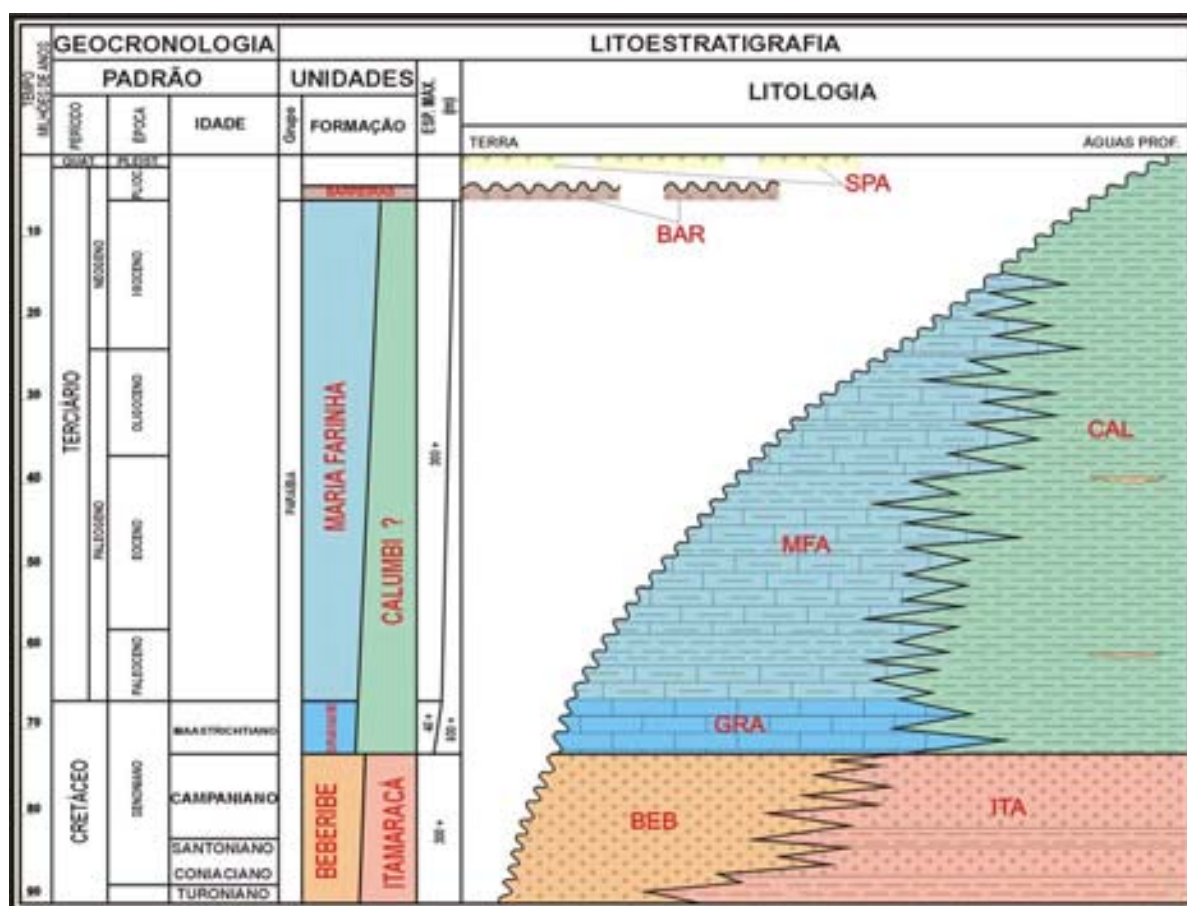


Figura 1.4 – Coluna lito-estratigráfica da porção superior da Bacia Pernambuco/Paraíba (Modificado de Araripe e Feijó 1994).

Bigarella (1964) e Alheiros e Lima Filho (1991), reconheceram duas unidades litoestratigráficas fundamentais separadas por uma desconformidade, as quais denominaram de Formação Guararapes (inferior) e Formação Riacho Morno (superior),

propondo, com isso, a denominação de Grupo Barreiras. Alheiros *et al.* (1998) caracterizam os sedimentos terciário-quadernários ocorrentes na faixa costeira dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, como uma única unidade litoestratigráfica, denominando-a de Formação Barreiras, pois possuem as mesmas características litológicas, diferenciando, apenas na faciologia, isto devido aos diferentes sistemas deposicionais fluviais de grande extensão geográfica, que deram origem a essa unidade.

1.5.2 - Contexto Geomorfológico

No trecho da Bacia Pernambuco-Paraíba compreendido entre Recife/PE e João Pessoa/PB, observam-se as seguintes ocorrências de depósitos quadernários: terraços marinhos pleistocênicos, terraços marinhos holocênicos, depósitos de mangues e depósitos aluvionais (Leal e Sá 1998).

Os terraços marinhos pleistocênicos são caracterizados morfologicamente como áreas planas com cotas entre 7 e 8 metros (Tabela 1.1) formados por areias quartzosas de granulometria média a grossa, com grãos subarredondados a arredondados e seleção regular. Com o aumento da profundidade, estes sedimentos variam a cor branca para cinza, passando na base para um arenito compacto cor de café, em decorrência da ação do ácido húmico (Alheiros & Ferreira 1991).

Os terraços marinhos holocênicos são conhecidos como alinhamento de cordões litorâneos e tidos como testemunhos de antigas linhas de costa dispostas estreitamente próximas e paralelas entre si, conseqüência da descida do nível do mar durante a regressão subseqüente à última transgressão. Os sedimentos desta unidade constituem-se de areias quartzosas de cores claras, com granulometria média a grossa e grãos arredondados a subarredondados, semelhantes as do Terraço Pleistocênico, distinguindo-se do mesmo apenas pela presença de conchas, preservadas em função da ausência da ação do ácido húmico, ocorrente nos Terraços pleistocênicos (Leal e Sá 1998). Estes terraços representam a faixa de praia atual que foi instalada a cerca de 5.100 anos, mostrando cotas entre 3 e 5 metros. Dominguez *et al.* (1990), ressaltam que há 5.100 anos atrás o nível do mar estaria a cerca de 50 metros acima do nível atual.

Os depósitos de mangue são constituídos basicamente por sedimentos pelíticos misturados a restos vegetais e matéria orgânica em decomposição, com cotas altimétricas baixas sob influência dos ciclos de maré. Possuem vegetação típica adaptadas às condições de água salgada ou salobra. Esta unidade geomorfológica é também denominada áreas alagadas e/ou alagáveis, por estar sujeitas às oscilações diárias do nível do mar, mostra-se representada ao longo de toda área estudada.

Tabela 1.1 - Resumo da estratigrafia do quaternário na área que envolve o Estuário do Rio Paraíba do Norte. (Modificado de NEPREMAR 1980).

| IDADE ANOS AP | PERÍODO | NÍVEL DO MAR | LITOLOGIA | MORFOLOGIA |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 4.000 HOLOCENO | Atual | 0m | Areias de praia, dunas, mangues | Praias, dunas, mangues |
| | | Em regressão | | Terraço de 1-2 m |
| | Dunkerquiano | +2m | Sedimentos flúvio-marinhos | |
| | | | Areias de mar raso | Terraço de 3-6m |
| | | | | Mar raso |
| 10.000 | Início do Flandriano | Em ascensão | | |
| 100.000 | Wurm | -50m | | |
| 200.000 PLEISTOCENO | | | Sedimentos flúvio-marinhos | Terraço 7-8m |
| | Interglacião Riss/Wurm | 6 – 8m | | |
| | Riss | -80 – 90m | Formação Macaíba | |
| | Gunz/Nindel/ Riss | | | |
| 500.000 | Gunz | | Formação Guararapes | Superfície dos Tabuleiros |

As variações do nível do mar relacionadas na tabela acima condicionaram o posicionamento dos blocos de maneira semelhante a como se encontra, ocasionando a formação da drenagem do Rio Paraíba.

1.6 - Caracterização Fisiográfica

1.6.1 - Clima

De acordo com a classificação de Köppen, a Paraíba subdivide-se em duas zonas climáticas. A zona de climas do tipo A, caracterizada por climas quentes e úmidos, com médias mensais superiores a 22° C, e do tipo BS de clima quente e seco. A área trabalhada se insere na primeira zona. A zona de climas do tipo A apresenta duas variações no Estado: a leste, do Litoral ao Brejo, ocorre o tipo As' que corresponde a um clima quente e úmido com média das temperaturas máximas de 28° C entre fevereiro e março e média das temperaturas mínimas de 23° C entre julho e agosto, chuvas de outono-inverno e precipitações médias anuais entre 1200 e 1800 mm (Atlas Geográfico do Estado da Paraíba 1985).

As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano devido à proximidade do mar e da ação da massa de Ar Equatorial Atlântica, da frente polar e dos ventos alíseos de Sudeste (Atlas Geográfico do Estado da Paraíba 1985).

1.6.2 - Vegetação

De acordo com a SUDENE (1969) os tipos de vegetação que aparecerem na área de estudo são: florestas (Mata Atlântica), mangue, mata de restinga e cerrado. Por se tratar de uma área estuarina com um bom nível de conservação a vegetação de mangue é a predominante na área.

As espécies de mangue que ocorrem na área são: *Rizophora mangle* L. (mangue vermelho), *Avicenia tomentosa* (mangue siriuba), *Conocarpus erectus* L. (mangue de botão) e a *Laguncularia racemosa* (mangue branco).

No estuário do Paraíba muitos mangues têm sido destruídos, com vistas à exploração do calcáreo que ocorre sob eles. Outras áreas foram modificadas para loteamentos como ocorre na parte leste da Ilha da Restinga, no Município de Cabedelo.

A construção de viveiros de camarão em algumas áreas do estuário podem trazer sérios problemas ao seu ecossistema, desequilibrando o conjunto de processos de formação desse ambiente.

A Mata Atlântica, outra formação vegetal encontrada na área, é nome genérico de uma variedade de matas tropicais úmidas que ocorrem nas regiões costeiras do Brasil, acompanhando a umidade trazida pelos ventos aliseos de sudeste. Caracteriza-se por apresentar uma cobertura vegetal com densa vegetação arbórea, sinúsias subarbóreas e arbustiva relativamente densas, herbáceas e rasteiras. Esta formação tem sofrido intensa devastação com a retirada da madeira para os mais diversos fins, com a intensificação do processo de urbanização e de industrialização e com o turismo predatório. Vêm sendo substituída desde o início da colonização por culturas como cana-de-açúcar, café, abacaxi e outras. No entorno do estuário ainda são observadas algumas manchas de Mata Atlântica.

Nas áreas de solos mais pobres, coincidindo em geral com os topos mais elevados dos tabuleiros, ocorre a vegetação de cerrado, conhecida regionalmente como “tabuleiro”. Os cerrados ou “tabuleiros”, correspondem a uma formação herbáceo-arbustiva onde são encontradas gramíneas dos gêneros *Echinolsena*, *Eragratis* e *Panicum* (Carvalho & Carvalho 1985). Os arbustos distribuem-se de modo esparsos entre gramíneas e apresentam porte baixo, troncos e galhos retorcidos, casca espessa e protegida por uma camada de cortiça. As folhas são duras e ásperas. As gramíneas ocorrem de forma descontínua, apresentando-se em tufo que recobrem irregularmente o solo. Essa cobertura pode alcançar, em alguns casos, mais de um metro de altura, mas em geral é de cerca de 50 centímetros.

Imediatamente acima do limite das preamares, inicia-se a colonização das praias por vegetação típica dessas áreas arenosas. É a formação pantropical de praia. À retaguarda desta área, desenvolvem-se os campos e mata de restinga. Os primeiros correspondem a uma cobertura vegetal de arbustos, de densidade variável, onde são comuns as espécies do tipo *Byrsonima gardneriana* Juss (murici-de-praia), *Avrus precatorius* L. (olho de pombo) e *Heliconia angustitifolia* Hook (paquevira), etc.

A Mata de Restinga é baixa e, sobretudo, esclerófila. Suas árvores possuem porte e caules médios (10-15 metros de altura), copas largas e irregulares. Dentre as espécies características dessa mata pode-se citar o *Anacardium occidentale* L. (cajueiro), uma das mais comuns; o *Schimus therebenthiifolios* R. (aroeira de praia) além da *Moquilea tomentosa* Benth (oiti de praia) e *Manilkara salzmanni* (ADC) H. J. Lam. (maçaranduba)

(Carvalho & Carvalho 1985). A vegetação denominada Mata de Restinga é uma especificidade da mata Atlântica que por ações polinizadoras, migraram sementes de espécies desta flora para o solo de restinga, que se conformaram, adaptando-se às condições da área, formando tais matas. Exemplos dessa formação são a Mata do Estado e a Mata do Amém, ambas localizadas no Município de Cabedelo (Gomes 1999).

1.6.3 - Solos

No que se refere aos aspectos edáficos, os solos arenosos caracterizam as praias e as restingas; nas áreas de mangue os solos são argilosos, encharcados e salinos, submetidos permanentemente a ação das marés (Figura 1.5).

Os solos da restinga foram desenvolvidos sobre sedimentos predominantemente areno-quartzosos não consolidados recentes, de origem marinha e flúvio-marinha holocênica. Possuem características gerais que se resumem em solos de aporte bruto marinho e flúvio-marinho, muito profundos, ácidos e com pouca ou quase nenhuma vocação agrícola. As variações no quadro pedogenético em geral são promovidas sobretudo pela presença de microrelevos, pela proximidade do mar, pelo nível do lençol freático e pela influência flúvio-marinha (Gomes *op cit.*). Para Rocha (1996), dentre as principais limitações destes solos podem ser citadas a baixa fertilidade natural, a drenagem excessiva e a capacidade muito baixa de retenção de água.

Nos tabuleiros costeiros os solos são comumente pobres e ácidos. Sobre os sedimentos terciários (Formação Barreiras), onde as camadas rochosas são argilosas, predominam os solos ferralíticos ou lateríticos (latossolos) e os podzólicos; quando as camadas rochosas são arenosas predominam os solos tipo podzol. Como regra geral esses, solos são inaptos para a prática agrícola ou de aptidão restrita para as culturas de curto e longo ciclo, quando submetidos ao sistema de exploração primitivo.

Capítulo 2

PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

2.1 - Introdução

Nos procedimentos e técnicas de pesquisa adotados para a análise temporal das alterações geoambientais ocorridas na área de estudo no período de 1969 a 2001, procurou-se definir os métodos mais eficientes no auxílio à identificação e delimitação das unidades geoambientais do ERPN a partir dos dados cartográficos utilizados como base (cartas da SUDENE 1969 e imagens digitais do Landsat 7 ETM+ e Spot HRVIR-PAN). A metodologia adotada é apresentada na Figura 2.1.

2.2. Delimitação da Área de Estudo

Para este trabalho, delimitou-se uma área que envolveu a porção inferior do Rio Paraíba do Norte (da desembocadura do rio Sanhauá até a foz do rio principal), correspondendo uma área de aproximadamente 260 km².

2.3. Levantamento Bibliográfico/Cartográfico

O levantamento preliminar da documentação histórico-cartográfica acerca da área e do tema proposto foi realizado com intuito de se obter bibliografias com a aplicação da temática utilizada e de trabalhos realizados na área de estudo.

Os documentos cartográficos utilizados neste trabalho foram os seguintes: Cartas Topográficas da SUDENE (1969) em escala 1:25.000, Mapa Batimétrico do Estuário do Rio Paraíba do Norte (1980) em escala 1:25.000, Mapa Geológico do Estado da Paraíba (1982) em escala 1:500.000, Mapa Pedológico do Estado da Paraíba (1995) em escala 1:500.000, Imagens de Satélites Spot HRVIR-PAN (ponto 364 órbita 732 de 29/03/1999) e Landsat 7 ETM+ (ponto 214 órbita 065 de 04/08/2001)

As cartas topográficas da SUDENE compiladas foram as seguintes:

SB-25-Y-A-VI-3-SE-CABEDELO

SB-25-Y-C-III-1-NE-JOÃO PESSOA

SB-15-Y-A-VI-3-SO-RIO SOÉ

SB-25-Y-C-IV-1-NO-MATA DA ALDEIA

SB-25-Y-C-III-1-SE-N.S. DA PENHA

SB-25-Y-C-III-1-SO-SANTA RITA

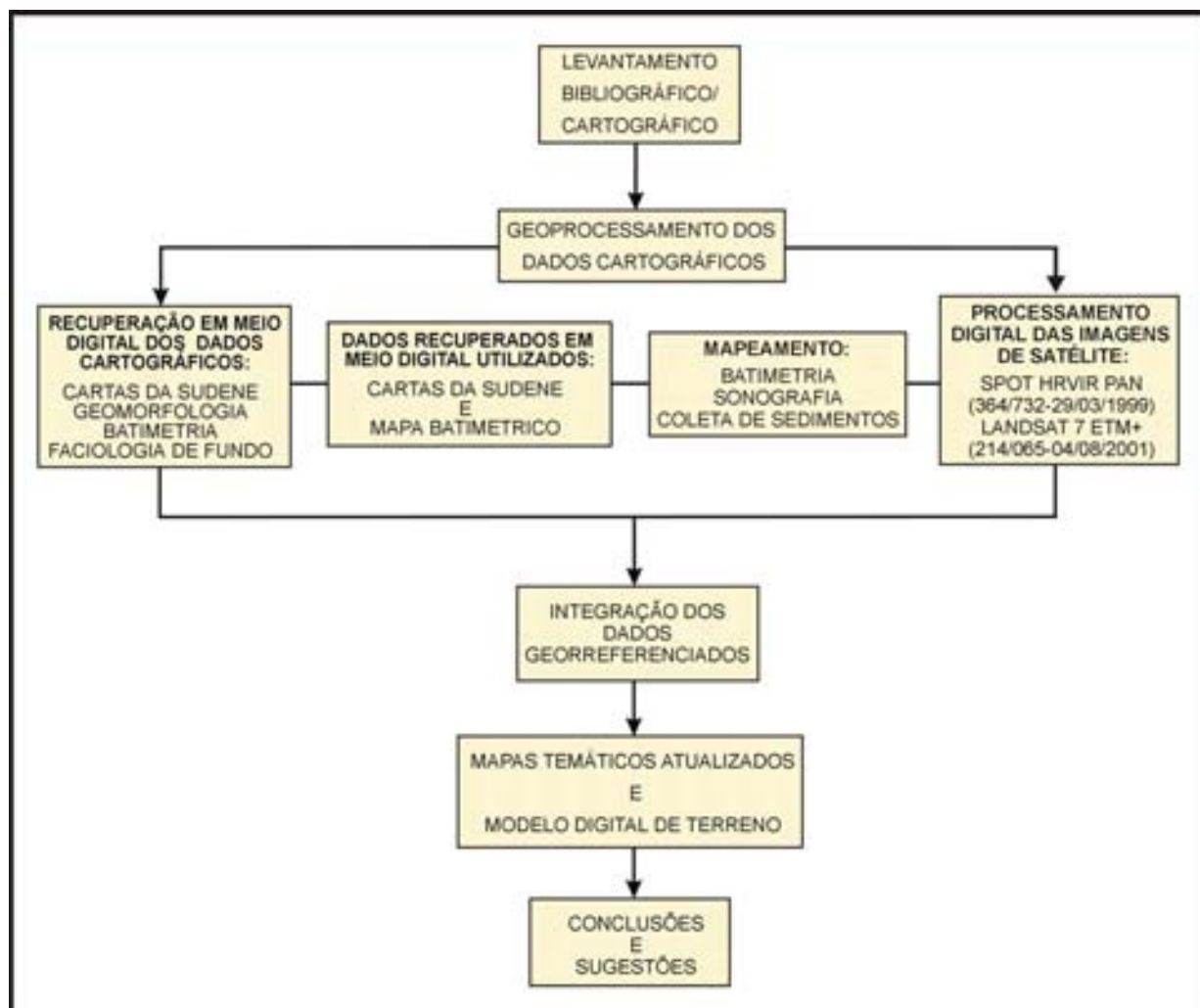


Figura 2.1 - Fluxograma da metodologia adotada, enfatizando as etapas de trabalho na elaboração dos mapas temáticos representativos da evolução geodinâmica do Estuário do Rio Paraíba do Norte - PB.

2.4. Geoprocessamento dos Dados Cartográficos

Essa etapa do trabalho incluiu a pré-análise dos documentos cartográficos existentes a cerca da área e do tema proposto, digitalização, vetorização via-tela (*heads-*

up digitizing) e semi-automática, georreferenciamento e edição (modelagem dos dados no ambiente SIG) desses documentos. A Figura 2.2 resume estas etapas.

Como a proposta do trabalho é fazer uma análise temporal (últimos 30 anos) da geodinâmica do estuário do rio Paraíba, foi adotada a base cartográfica descritas nas cartas topográficas da SUDENE (confeccionadas a partir das fotografias aéreas verticais, em escala 1:30.000 do ano de 1969), escala 1:25.000, para extração dos dados de uso e ocupação do solo e topográfico e, o mapa batimétrico do canal principal do estuário do rio Paraíba, de mesma escala das cartas topográficas, elaborado na década de 1980 pelo NEPREMAR, no âmbito do projeto “Estudos Ecológicos no Estuário do Rio Paraíba do Norte – Paraíba – Brasil”. Como fonte cartográfica atual foram utilizadas as imagens de satélite Spot HRVIR-PAN e Landsat 7 ETM+, que serviram de sobreposição a vetores na elaboração dos mapas temáticos atualizados.

Posterior a seleção do material, fez-se a digitalização destes materiais por meio de um scanner A0. Em seguida, realizou-se a vetorização dos documentos cartográficos, via tela (*heads-up digitizing*), a fim de se obter uma base vetorial digital dos dados.

Os softwares usados no processo de vetorização foram: o R2V (vetorização semi-automática) para os mapas topográfico e batimétrico e o AutoCAD Map 2000 (via tela “*heads-up digitizing*”) para os demais mapas. Essa etapa foi a que demandou mais tempo para sua execução, pois além de um considerável número de mapas a serem vetorizados, o processo de vetorização (seja ele via tela, automática, semi-automática ou via mesa digitalizadora) exige um bom nível de domínio dessa técnica por parte do executor e necessita de muita atenção para não cometer erros que possam comprometer os trabalhos subseqüentes

Em seguida, realizou-se o georreferenciamento dos produtos cartográficos digitais, que se deu em duas etapas devido os sistemas computacionais tratarem diferentemente informações vetoriais de informações matriciais (raster). O georreferenciamento dos arquivos raster (imagens de satélites) será visto mais adiante no item seguinte correspondente ao processamento digital de imagens.

O trabalho de georreferenciamento dos dados vetoriais obtidos a partir dos mapas-base (cartas topográficas da SUDENE e o mapa batimétrico) foi realizado com o software AutoCAD Map 2000, utilizando-se as cartas da SUDENE como fonte de coleta

dos pontos de controle. Adotou-se, então, o Datum Córrego Alegre e a Projeção UTM Zona 25 S.

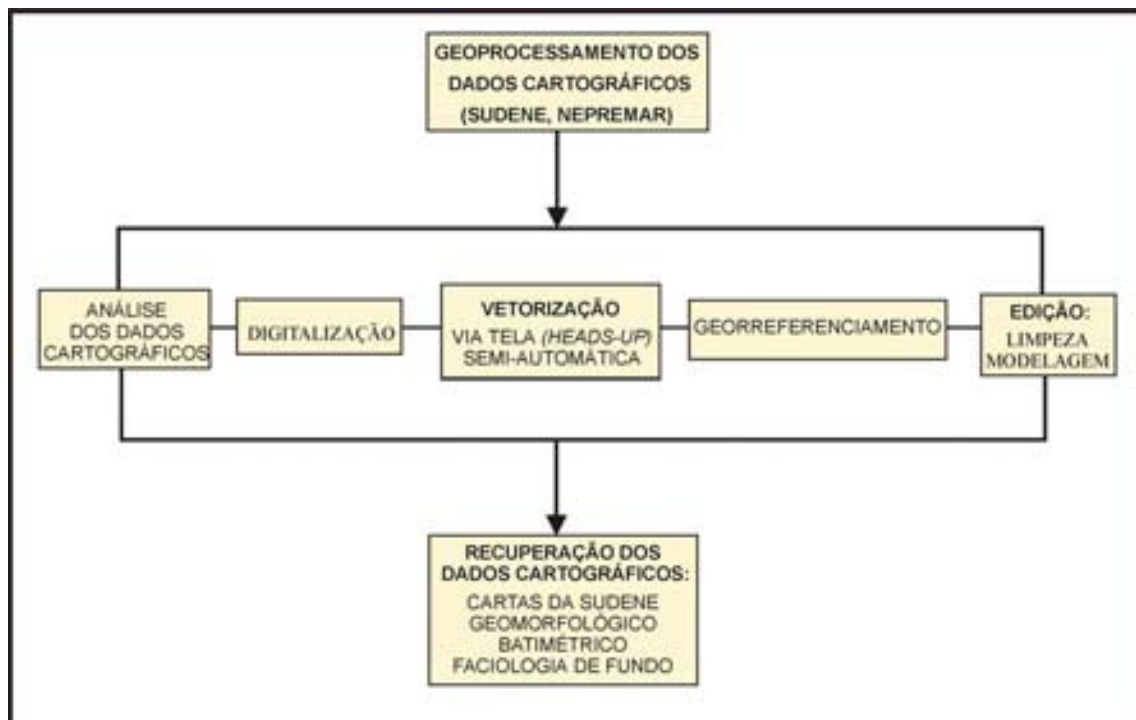


Figura 2.2 - Modelo esquemático da seqüência metodológica da etapa de geoprocessamento dos dados cartográficos.

Após a obtenção dos arquivos digitais vetoriais georreferenciados dos documentos cartográficos, estes passaram por um trabalho de edição para correção de pequenos erros cometidos no processo de vetorização (duplicação de linhas, excesso de vértices, etc) com recursos do AutoCAD Map. Em seguida estes mapas foram exportados para o ambiente SIG, especificamente para o software ArcView 3.2, que foi explorado para a montagem do banco de dados do estuário e edição final dos mapas, ou seja, a modelagem dos mapas temáticos.

O mapa de uso e ocupação foi associado a um banco de dados contento principalmente as informações da área de todas as machas (polígonos) dos temas abordados. A extração das áreas de cada tema foi obtida para uma posterior comparação com o mapa de uso e ocupação gerado a partir das imagens de satélite Spot HRVIR-PAN e Landsat 7 ETM+.

Os mapas temáticos confeccionados foram os seguintes: Uso e Ocupação do Solo, Topográfico e Batimétrico.

O mapa de uso e ocupação foi o que demandou mais tempo nas etapas de vetorização e edição final (modelagem), isto devido ao grande número de polígonos a serem trabalhados.

2.5. Processamento Digital das Imagens de Satélite

Processamento digital de imagens (PDI) de sensoriamento remoto consiste, de uma maneira simplificada, na aplicação de técnicas, por meio de sistemas computacionais específicos, que resultem num melhor realce das informações contidas nestas imagens. Esta etapa, portanto, consistiu na aplicação dessas técnicas nas imagens Spot HRVIR-PAN e LANDSAT 7 ETM+, que serviram como fonte atual de informações para uma análise do quadro geoambiental do Estuário do Rio Paraíba do Norte.

A Figura 2.3 mostra, de modo esquemático, as técnicas de PDI usadas no referido trabalho.

2.5.1. Composições Coloridas em RGB

O trabalho de interpretação de produtos digitais é uma tarefa que depende principalmente dos atributos de textura e cor para diferenciar alvos, como tipos de vegetação, padrões específicos de uso e ocupação do solo e elementos pedo-morfológicos.

Uma das maneiras mais tradicionais de se realizar tal tarefa é a combinação de três bandas espectrais no sistema de cores RGB (*red, green, blue*). Várias composições coloridas em RGB foram testadas para a imagem Landsat 7 ETM+. As imagens foram submetidas às modificações de contraste de histograma, de forma a melhorar a distinção visual de diferentes aspectos na imagem resultante. As técnicas empregadas envolveram transformações lineares (Aumento Linear de Contraste) e não-lineares (Gaussiana, Logarítmica. Equalização) correntes no ER-Mapper v6.2, aplicadas para o realce da dinâmica visual de cada banda individualmente.

2.5.2. Composições Coloridas em IHS

As imagens de satélite são normalmente visualizadas usando-se composições coloridas de três cores primárias aditivas: red, green e blue (RGB). Uma outra alternativa é a transformação dos componentes RGB nos componentes IHS (*I-Intensity; H-Hue; S-Saturation*), a fim de se obter composições coloridas com reduzida correlação interbanda, conseqüentemente com melhor utilização do espaço de cores. Rigol e Chica-Olmo (1998) ressaltam que outro importante recurso da técnica do IHS é que nesse sistema é permitido combinar diferentes tipos de imagens, até mesmo de diferentes sensores por meio da técnica de fusão.

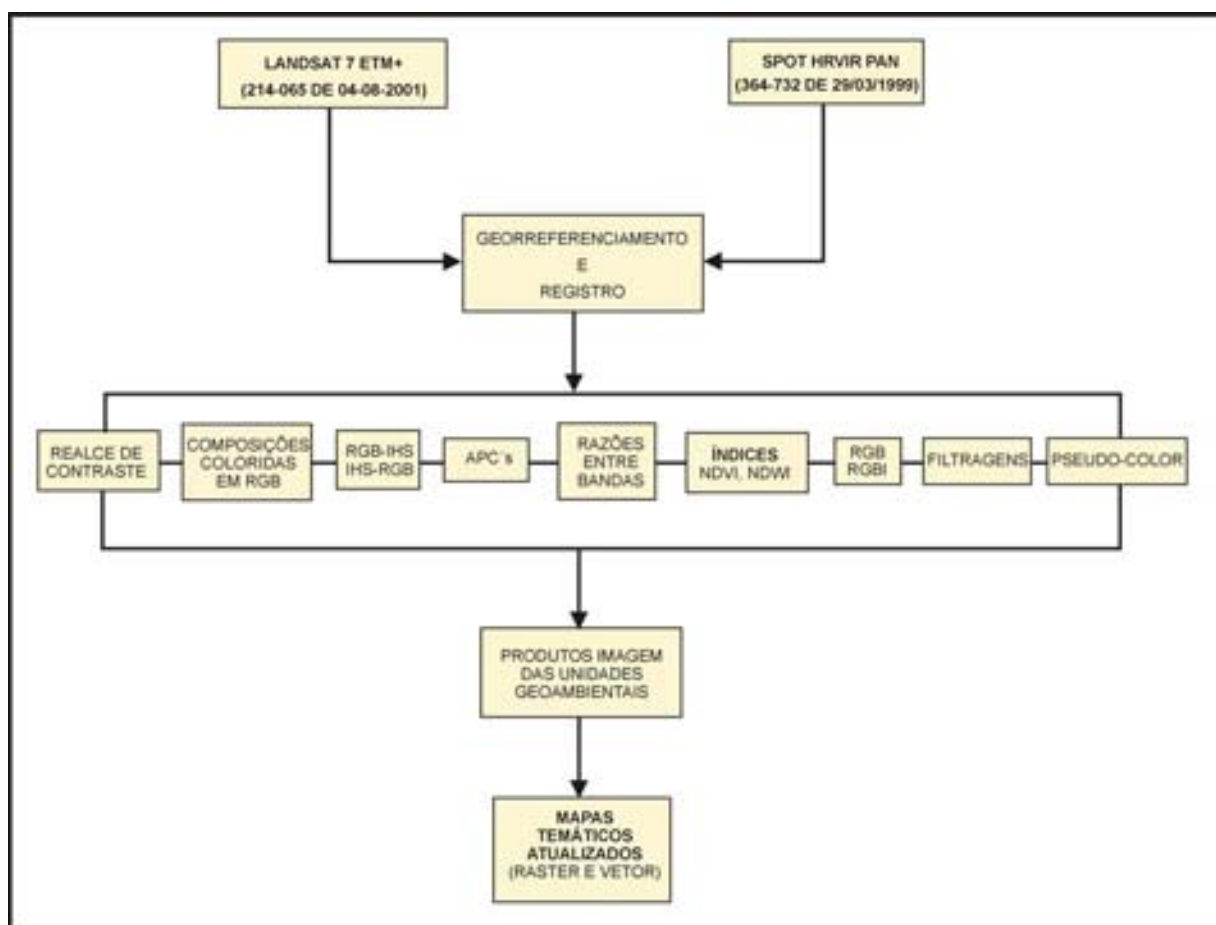


Figura 2.3 - Esquema simplificado das funções de PDI utilizadas.

2.5.3. Análise por Principais Componentes (APC's)

A análise por principais componentes (APC's) é uma das funções de processamento de imagens mais poderosas na manipulação de dados multiespectrais. A geração de componentes principais, como também pode ser chamada, tem a vantagem de

reduzir a dimensionalidade do conjunto dos dados, ou seja, gera um conjunto de imagens cujas bandas individuais contêm informações não disponíveis em outras bandas, além de isolar componentes de ruído gerados pelos satélites. Chavez *et al.* (1991) recordam que durante o processo de cálculo das principais componentes a maioria das informações comuns a todas as bandas multiespectrais são destinadas a primeira componente principal (PC1), sendo assim esta componente pode assimilar a informação pancromática, enquanto que a informação espectral exclusiva a cada banda é destinada às outras componentes principais.

2.5.4. Razão de Bandas

A razão de bandas é uma das operações aritméticas mais comuns em processamento de imagens. É uma operação bastante utilizada na determinação dos índices de biomassa ou de vegetação e na identificação de zonas de alteração hidrotermal relacionadas à concentração de minerais. Esta operação tem como característica principal dar um grande realce a determinadas feições da curva de assinatura espectral de alguns elementos naturais, podendo ser combinadas em pares de razões para acentuar aspectos das assinaturas espectrais desses elementos.

Neste trabalho foi aplicada a combinação de pares de razões $7/4-5/3-4/2$, no sistema RGB, obtendo-se um bom resultado na diferenciação de fitofisionomia. Utilizou-se também o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*). O NDVI $(B4-B3/B4+B3)$ serviu no auxílio da diferenciação do mangue dos demais tipos de vegetação e o NDWI $(B2-B4/B2+B4)$, que aumentou o contraste entre água e terra, na delimitação dos canais fluviais e da linha de costa.

2.5.5. Fusão por RGBI

O processo de fusão consiste na combinação de múltiplos dados (dados do mesmo satélite ou de satélites diferentes) em uma única imagem. A imagem resultante, caracteriza-se por reunir em uma única imagem as feições texturais (detalhamento geométrico) da imagem de melhor resolução espacial (banda pancromática) e as informações espectrais das outras bandas, o que possibilita uma melhor discriminação de

alvos. Várias técnicas de fusão de imagens já foram realizadas, estendendo-se da mais simples, como a substituição direta de bandas na visualização (Chica-Olmo & Rigol 1997) ou operações aritméticas através da transformação de Intensity – Hue – Saturation (Carper *et al.* 1990, Chavez *et al.* 1991, Ehlers 1991, Shettigara 1992, Grasso 1993, Pellemans *et al.* 1993), Análise de Principais Componentes (Chavez *et al.* 1991, Ehlers 1991); Spherical Coordinates (Pellemans *et al.* 1993); High Pass Filters (Chavez *et al.* 1991); CN - *Colour Normalized transform* (Hallanda & Cox 1993, Vrabel 1996); o método Estatístico (Press *et al.* 1989, Pellemans *et al.* 1993) até os mais recentes e sofisticados, como o método Radiométrico (Pellemans *et al.* 1993) e a Análise de Multiresolução e Wavelet transform (Garguet-Duport *et al.* 1996, Yocky 1996).

O RGBI consiste no meio mais prático de se fazer a fusão tanto com dados do mesmo satélite (ex. Landsat 7 ETM+) como dados de multisensores [(ex. Landsat 7 ETM+) + (Spot HRVIR PAN)], realçando a textura das imagens e, muitas vezes, proporcionando melhores resultados do que aqueles obtidos pela transformação de IHS convencional. A técnica consiste em acrescentar uma quarta camada, a Intensity, do sistema IHS, ao RGB tradicional. Na camada intensity coloca-se a banda pancromática e salva-se o arquivo de saída no modo RGB.

Essa técnica foi utilizada pela disponibilidade de uma imagem Spot HRVIR-PAN (resolução de 10 m) e de uma imagem multiespectral Landsat 7 ETM+ com sua respectiva banda pancromática de resolução espacial de 15 m. Com isso, a técnica do RGBI foi empregada com o intuito de se obter uma imagem colorida de resolução espacial capaz de permitir o maior detalhamento possível das unidades de investigação.

A técnica do RGBI pode ser expressa da seguinte maneira:

$$(Input1/(Input2 + Input3 + Input4)) * Input5$$

Para exemplificar melhor adotaremos a composição 543 em RGB acrescida da banda pancromática do Landsat 7 ETM+ utilizada nesse trabalho.

Camada Red (vermelha)

$$(B5/(B5+B4+B3)) * PAN$$

Camada Green (verde)

$(B4/(B5+B4+B3)) * PAN$

Camada Blue (azul)

$(B3/(B5+B4+B3)) * PAN$

Tanto a banda pancromática do Landsat 7 ETM+ como a do Spot HRVIR-PAN foi utilizada para composições em RGBI, obtendo-se, com isso, uma variedade de imagens utilizadas como fonte de extração de informações que permitiram a diferenciação das unidades geoambientais que caracterizam a área do estuário do rio Paraíba do Norte.

2.5.6. Filtragens

Quanto às técnicas de filtragem, após vários testes, optou-se pela utilização dos filtros espaciais de convolução passa-baixa (*low-pass*) 3x3 e passa-alta (*high-pass*) 5x5.

2.5.7. Pseudo-Color

A técnica da Pseudo-cor consiste em aplicar cores numa imagem monocromática, ou seja, transformar os tons de cinza em tons coloridos. Essa técnica é utilizada por meio da manipulação das Lut's ou "*look-up tables*", ferramenta disponível nos softwares voltados para o processamento digital de imagens de sensores remotos. Aplicou-se essa técnica na imagem Spot HRVIR-PAN.

2.6. Etapas de Levantamento de Campo

As etapas de campo foram realizadas em várias fases e com objetivos distintos.

Num primeiro momento fez-se um reconhecimento preliminar das principais feições geodinâmicas, geomorfológicas e geológicas e levantamento dos pontos de controle no terreno por meio de GPS como suporte a confecção das cartas temáticas.

Numa segunda etapa foi feito um levantamento batimétrico do canal principal do estuário, o rio Paraíba. Este levantamento consistiu num total de 32 perfis batimétricos. Um perfil no sentido longitudinal, de aproximadamente 20 km, da foz do estuário à desembocadura do rio Sanhauá, nas proximidades do município de Bayeux, e 31 perfis

transversais, distribuídos ao longo do canal, perfazendo um total de 24 km. Os dados de profundidade foram posteriormente corrigidos, aproximadamente, ao nível da maré mais baixa correspondente aos dias do levantamento. A Figura 08 ilustra o gráfico de correção da maré.

A terceira etapa consistiu no levantamento de dados sonográficos (*Sonar de Varredura Lateral*) em áreas selecionadas do estuário, recobrimdo uma área de aproximadamente 15,5 km do rio Paraíba do Norte. O desenvolvimento das formas de fundo esta relacionada ao transporte e granulometria dos sedimentos, podendo ocorrer em várias escalas, desde ondulações a dunas e barras. A extensão, tamanho e características das formas de fundo aluviais são produto direto do balanço entre erosão e deposição em diferentes partes do leito. Desta forma a sonografia nos fornece informações sobre a natureza do fundo, como por exemplo, textura, composição e orientação das feições. Os sonogramas obtidos no Rio Paraíba mostram formas de fundo do tipo dunas, segundo a classificação de Ashley (1990) que associados à análise das amostras coletadas permitiram delimitar áreas de fundo arenoso e fundo lamoso

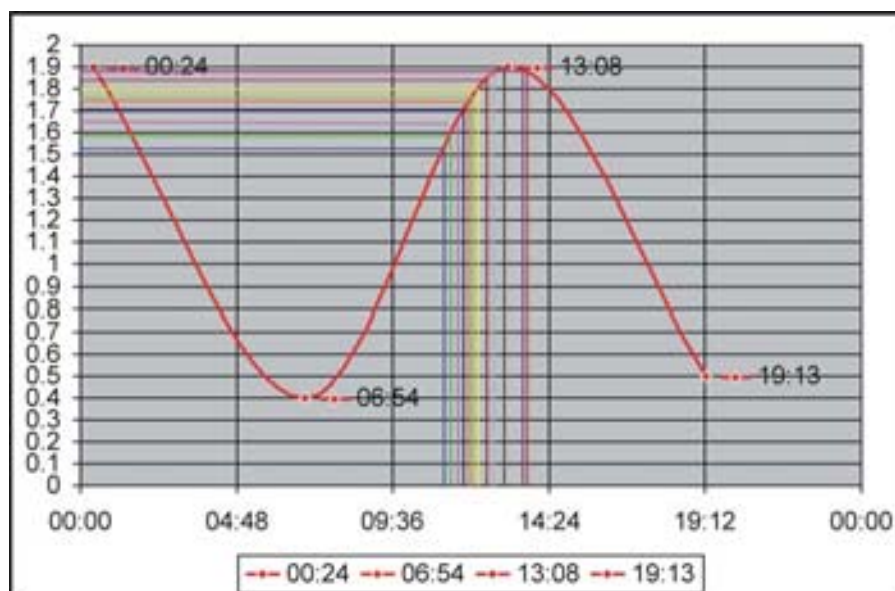


Figura 2.4 - Gráfico ilustrativo de correção de maré. No eixo Y está plotada a variação da altura da maré e no eixo X a hora.

Paralelo aos trabalhos de batimetria e sonografia foram realizadas coletas de amostras de sedimentos de fundo. A análise desses sedimentos indica os processos de sedimentação envolvidos em pontos específicos da área, revelando variações espaciais

nas condições geológicas ao longo do estuário; estes aspectos propiciam o entendimento da distribuição regional e das características do ambiente sedimentar.

Das 20 amostras coletadas foram separadas frações de 100g, sendo o restante arquivado para eventual necessidade ou trabalhos posteriores. Em cada fração de 100g foi efetuado o peneiramento úmido na peneira de malha de 0,062 mm e a fração retida secada em estufa a temperatura de 60° C e peneirada a seco. Note que esse método não retém a fração argila (0,062 mm) e silte (<0.062 mm) o que não compromete a qualidade do resultado, pois estes são inferidos pela diferença entre o peso acumulado no ensaio (peneiramento a seco) e o peso total da amostra (100 g).

As etapas de trabalho de campo foram realizadas em uma lancha de fibra, com calado de 1,0 m, pertencente ao IBAMA. O equipamento sísmico utilizado foi uma ecosonda hidrográfica marca Odom, modelo Hydrotec de resolução 0,01m e frequência 200Hz, com porta para Side-Scan Sonar (de varredura lateral 15 e 20m) e receptor GPS da Odom Hydrographic System acoplado. O gerador utilizado para o funcionamento do Hydrotac foi o ABACUS H65 MH (1 fase e 6,0 Kva). Amostras de sedimentos de fundo foram coletadas com amostrador pontual do tipo “van-veen”. Tanto o sistema geofísico quanto o amostrador pertencem ao Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA) do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

2.7. Integração de Dados Cartográficos

Concluídas as etapas de trabalho de geoprocessamento dos produtos vetoriais (mapas temáticos prévios) e dos produtos de sensores remotos (imagem de satélites e sonogramas), fez-se a integração destes dados cartográficos, resultando na geração dos mapas temáticos (1969 – 2001) e um Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir dos dados batimétricos e topográficos. Este último serviu como base para uma proposta de compartimentação geomorfológica do estuário.

2.7.1. Geração do MDT e Superposição com Imagens de Satélites

Os MDT's geram informações espaciais de grande importância na análise de dados tridimensionais, modelando e analisando uma superfície. Uma das aplicações mais frequentes destes modelos é aquela que envolve dados topográficos. Além da representação do terreno, a partir dos modelos digitais, outras informações espaciais a eles relacionadas são extraídas, manipuladas e integradas aos SIG's. (Simões 1993)

A metodologia adotada na geração do MDT (Figura 2.5) será trabalhada à parte por envolver outras técnicas não abordadas até então.

Simões (*op cit.*) define pontos amostrais como sendo valores coletados na superfície real ou em outras fontes, constituídos por triplas formadas por um par de coordenadas (x,y) (representativo da posição da amostragem na superfície) associado a uma variável z, todos referenciados a um sistema de eixos cartesianos triortogonais. Para a construção do MDT da área de estudo, utilizou-se como fonte dos dados amostrais as Cartas Topográficas da SUDENE, mencionadas no capítulo anterior, e a carta batimétrica atualizada do canal principal do estuário.

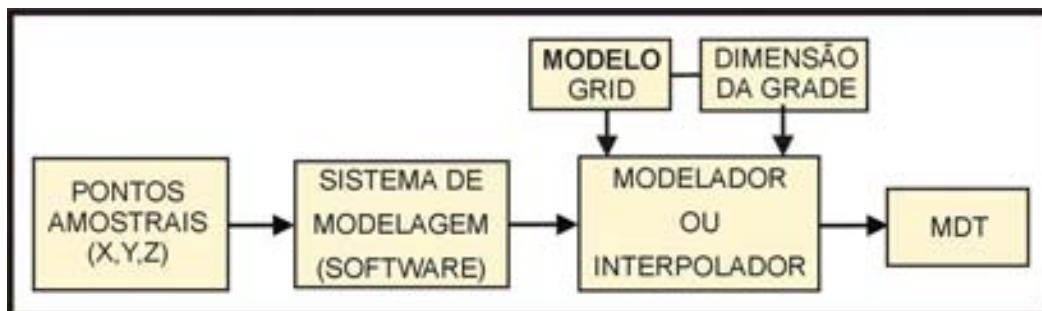


Figura 2.5 - Fluxo seqüencial na elaboração do MDT.

O processo de aquisição destes pontos incluiu a digitalização da articulação das cartas topográficas que cobrem a área de interesse e do mapa batimétrico e a vetorização das curvas de nível e batimétricas. Na digitalização usou-se um scanner de rolo tamanho A0, o que diminui consideravelmente as distorções causadas por esse processo. A etapa de vetorização foi realizada com o software R2V que gerou dois arquivos de saída no formato DXF (curvas de nível e batimétricas). A opção pela escolha da vetorização semi-automática se justifica pelo considerável ganho de tempo na realização desse processo em comparação com a vetorização manual via tela (*heads-up*). Em seguida, exportou-se esses arquivos para o AutoCAD Map onde passaram pelo processo de edição (limpeza),

inclusão da variável “Z” (valor da cota de altitude correspondente a cada curva de nível e batimétrica) e georreferenciamento.

Estando os dois arquivos georreferenciados, gerou-se um único mapa com as informações topográficas da superfície e do fundo. Este novo mapa foi exportado para o software dxf2xyz, um conversor de domínio público. Este software transformou o arquivo dxf num arquivo de saída xyz, onde todos os nós gerados no processo de vetorização foram dispostos numa tabela com 3 colunas (x=longitude, y=latitude e z=altitude) e n linhas (o número de linhas vai depender da quantidade de nós gerados na vetorização). No caso da coluna z, esta contém números positivos, curvas de nível, e negativos, batimetria (Figura 2.6).

O passo seguinte foi a escolha do software e do tipo de interpolador ou modelador para a representação do modelo digital de terreno. No primeiro caso, optou-se pelo ERMapper 6.2 que possui boas ferramentas para tal. Após vários testes com tipos de interpoladores, adotou-se o modelo grade também conhecido como grid ou matriz de altitude, sendo utilizado o método de gridagem “mínima curvatura”. As dimensões da grade usadas foram 15x15 (linhas x colunas).

Neste trabalho, foram efetuadas várias sobreposições de combinações coloridas em RGB da imagem Landsat 7 ETM+ ao MDT gerado, obtendo-se resultados satisfatórios na extração de informações. Este assunto será abordado no Capítulo 4.

| | A | B | C | | | | |
|----|--------|---------|--------|--------|-----------|-----------|----|
| 1 | 296707 | 9228798 | -11.36 | 27.887 | 290390.30 | 9222471.7 | 90 |
| 2 | 296498 | 9229152 | -11.06 | 27.888 | 290387.96 | 9222490.7 | 90 |
| 3 | 296733 | 9228718 | -10.91 | 27.889 | 290389.91 | 9222503.4 | 90 |
| 4 | 296550 | 9229072 | -10.43 | 27.890 | 290396.19 | 9222507.7 | 90 |
| 5 | 296593 | 9228936 | -10.26 | 27.891 | 290417.30 | 9222508.0 | 90 |
| 6 | 295982 | 9230302 | -10.02 | 27.892 | 290457.73 | 9222483.1 | 90 |
| 7 | 296612 | 9229094 | -9.95 | 27.893 | 290471.96 | 9222473.9 | 90 |
| 8 | 296270 | 9230316 | -9.91 | 27.894 | 290499.78 | 9222434.8 | 90 |
| 9 | 296271 | 9230270 | -9.46 | 27.895 | 290511.91 | 9222418.6 | 90 |
| 10 | 296425 | 9229318 | -9.34 | 27.896 | 290537.22 | 9222372.2 | 90 |
| 11 | 296329 | 9229588 | -9.31 | 27.897 | 290556.53 | 9222347.1 | 90 |
| 12 | 296219 | 9230114 | -9.29 | 27.898 | 290558.69 | 9222342.9 | 90 |

Figura 2.6 – Disposição dos pontos amostrais no arquivo de saída XYZ.

Capítulo 3

PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT 7 ETM+ E SPOT HRVIR PANCRÔMÁTICA E INTEGRAÇÃO DOS PRODUTOS IMAGENS DIGITAIS

3.1 - Introdução

Uma entre as muitas aplicabilidades das imagens de sensoriamento remoto orbital, devido principalmente à visão sinóptica dos dados da superfície terrestre que estas proporcionam, é o trabalho de monitoramento geoambiental de áreas costeiras por meio de estudo multitemporal das transformações ocorridas nesses ambientes, resultantes de processos naturais e/ou antrópicos. O resultado dessas transformações pode ser apresentado em forma de cartas temáticas, representativas de informações qualitativas e/ou quantitativas. Grades (1999), ressalta que comparada à cartografia mais tradicional, como a fotointerpretação aérea básica, o uso de imagem de satélite para o mapeamento de uso do solo tem quatro vantagens:

- Primeiro: os tipos de uso do solo podem ser reconhecidos a partir da imagem de satélite digital de forma mais rápida e frequentemente com custos mais baixos;
- Segundo: a atualização desses mapas é mais rápida e barata devido serem capturadas imagens de satélite para a mesma área geográfica a uma alta taxa de revisita;
- Terceiro: os dados capturados pela imagem de satélite são em formatos digitais, podendo ser facilmente integrados com outros tipos de informação de uso do solo por técnicas de geoprocessamento;
- Quarto: imagens de satélite cobrem áreas geográficas de grandes dimensões, resultando numa economia na geração de mapas de uso e ocupação em áreas de relativa dimensão territorial.

Diversos trabalhos já foram publicados enfatizando técnicas de processamento digital de imagem de sensoriamento remoto aplicáveis em estudos geoambientais com objetivo de identificar as diferentes unidades (vegetação, solo, geologia, etc) presentes nas imagens. Rigol e Chica-Olmo (1998) e Shoshany (2000) sugerem a fusão de multisensores (Landsat TM e SPOT), razão de bandas e Análise de Principais Componentes (APCs) para se obter um melhor resultado na classificação das tipologias vegetais. Grignetti *et al.* (1997) informam que as bandas 3, 4, 5 e 7 do Landsat TM se mostram mais eficientes na diferenciação entre os diferentes tipos de vegetação devido nesses canais haver uma maior absorção de clorofila e reflectância dos mesófilos. Marchetti *et al.* (1995), Green *et al.* (1996) e Shoshany (2000) obtiveram resultados satisfatórios aplicando o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para caracterização das comunidades vegetais em suas respectivas áreas.

Alves (2001) fez um levantamento de trabalhos realizados por autores nacionais e internacionais onde são sugeridas técnicas de processamento digital de imagens orbitais relevantes a caracterização de unidades geambientais (vegetação, solo, geologia, etc). Alguns dos procedimentos aplicados por esses autores, e os mencionados no parágrafo anterior, foram testados neste trabalho, obtendo-se uma variedade de produtos imagens, onde os melhores foram utilizados como base cartográfica, apoiando a sobreposição de vetores e resultando na produção de cartas temáticas a partir da identificação e discriminação das diferentes unidades geoambientais.

3.2 - Análise Descritiva das Composições Coloridas em RGB e RGBI

Conforme mencionado no capítulo anterior, foram testadas várias composições coloridas na imagem Landsat 7 ETM+. Os melhores resultados foram obtidos nas combinações simples de tripletes de bandas (5-4-3, 5-3-1 e 5-2-NDWI, em RGB) e de razões de duas bandas (7/4-5/3-4/2 e 5/7-3/1-5/4, em RGB), sendo que o RGBI, com a banda pancromática do Landsat 7 ETM+ e Spot HRVIR-PAN na quarta camada (*Intensity*) também proporcionou bons resultados em ambos os casos.

A seguir será feita a análise das principais composições em RGB e RGBI obtidas a partir das imagens Landsat 7 ETM+ e da Spot HRVIR-PAN.

3.2.1 - Composição 5-4-3

A Figura 3.1 representa a composição 543 em RGB. Esta composição realçou muito bem a distribuição da cobertura vegetal, que aparece na cor verde (do claro ao tom mais escuro), ao longo da área delimitada. A predominância da cor verde está relacionada a inclusão da banda 4 no G, já que esta banda, que trabalha na faixa espectral de 0,76 – 0,90 μm , tem como aplicação principal o levantamento da biomassa.

Na porção NW, representada pelo tabuleiro costeiro, aparecem manchas na cor magenta, que representam áreas reservadas para o plantio de cana-de-açúcar, cultura predominante nesta área. A área urbanizada aparece também na cor magenta. A restrição dessa composição é que ela não apresenta uma boa diferenciação das espécies vegetais presentes na área (mangue, mata atlântica, áreas cultivadas) o que limita sua aplicação no trabalho de discriminação de espécies vegetais. Portanto esta composição foi utilizada apenas com objetivo de se ter uma visão geral da distribuição da cobertura vegetal na área pesquisada.

Na Figura 3.2, tem-se a mesma composição da Figura 3.1 (RGB 5-4-3), sendo que acrescida à banda pancromática do Spot HRVIR na camada *intensity* e aplicado sobre esta um filtro passa alta 2x2. Desta forma, obteve-se uma nova imagem colorida com resolução espacial de 10 m e com textura realçada, diferenciando a vegetação de mangue e mata, que se apresentam na cor verde escuro, dos demais tipos de vegetação, que se mostram na cor verde claro. Esta imagem destaca também áreas sem cobertura vegetal que apresentam cores que variam do rosa claro ao magenta. Nesta imagem destacam-se, ainda, dunas subaquosas de areia dispostos paralelamente ao longo do curso do Rio Paraíba do Norte, que mostram cores variando do rosa claro ao azul violeta .

3.2.2 - Composição 5-3-1

A composição 5-3-1 (Figura 3.3) ofereceu um bom grau de detalhamento da vegetação em relação à imagem anterior. A inclusão da banda 3, que trabalha na faixa espectral 0,63-0,69 μm , produziu maior contraste no matiz e na saturação das cores, permitindo a diferenciação de espécies vegetais a partir do grau de intensidade de

absorção da clorofila. Com isso foi possível distinguir três grupos de vegetação: mangue, mata atlântica e áreas cultivadas

A vegetação de mangue aparece em tom marrom escuro, provavelmente, devido a maior absorção da energia eletromagnética pela matéria orgânica e água presentes no solo sobre o qual essa vegetação se desenvolve.

A cor marron claro representa a vegetação de Mata ou Floresta. Esta aparece na planície praial, onde se localiza o município de Cabedelo e parte de João Pessoa, sendo as principais manchas realçadas representadas pela Mata do Estado, mais ao norte, e a Mata do Amém, mais ao sul, e no tabuleiro costeiro, na porção NW da área, em forma de pequenas manchas. O fato desta vegetação aparecer na tonalidade mais clara, com relação ao mangue, deve-se, possivelmente, ao tipo de terreno em que ela se desenvolve (sedimentos areno-quartzosos) associado às diferentes características espectrais da própria vegetação.

No tabuleiro costeiro é possível perceber variedades sutis de cor, que vai desde um rosa claro, passando pelo castanho claro até um castanho escuro, representando, respectivamente, áreas preparadas para plantio e áreas de cultura da cana-de-açúcar em vários estágios de substrato. A banda 3, possivelmente, contribuiu para a observação de tais variações devido à possibilidade de registro de diferentes estágios de crescimento da cana-de-açúcar em função das diferentes concentrações de clorofila em cada um desses estágios.

Outro fator a ser destacado diz respeito aos viveiros de camarão presentes na área, que ficaram bastante realçados em relação à composição anterior. Estes viveiros, localizados na porção centro-sul da área, nas proximidades da Ilha dos Stuart, aparecem na cor esverdeada, possivelmente devido à presença de fitoplâncton, utilizado na alimentação de camarões.

Na Figura 3.4, tem-se a mesma composição, sendo que em RGBI com a adição da banda pancromática do Landsat 7 no I (*intensity*). Nota-se que as cores ficaram em tons mais suaves, deixando principalmente a vegetação de mangue e mata com tons bem próximos, com exceção na porção NW, onde estas se diferenciam muito bem. O realce da textura proporcionada pela inclusão da banda Pan no *intensity* propiciou um melhor destaque do contato entre o tabuleiro costeiro e a vertente, reforçado pelo alinhamento da

vegetação de mata que se apresenta em tons de róseo claro neste trecho, servindo de limite entre as duas unidades.

3.2.3 - Composição 5-2-NDWI

A composição 5-2-NDWI, apresentada na Figura 3.5, destaca os mesmos elementos da composição anterior, sendo que o NDWI produziu um maior realce nas áreas submersas, em função do aumento nos contrastes da baixa reflectância da água, o que favoreceu uma melhor definição dos corpos d'água e dos canais de maré que recortam o estuário. A substituição da banda 3 pela 2 (0,52 – 0,60 μm) favoreceu um melhor destaque da vegetação sadia, como no caso da vegetação de cana-de-açúcar que se apresenta em tons de verde.



Figura 3.1 - Imagem da composição colorida das bandas 5-4-3 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB destacando as áreas cobertas por vegetação.

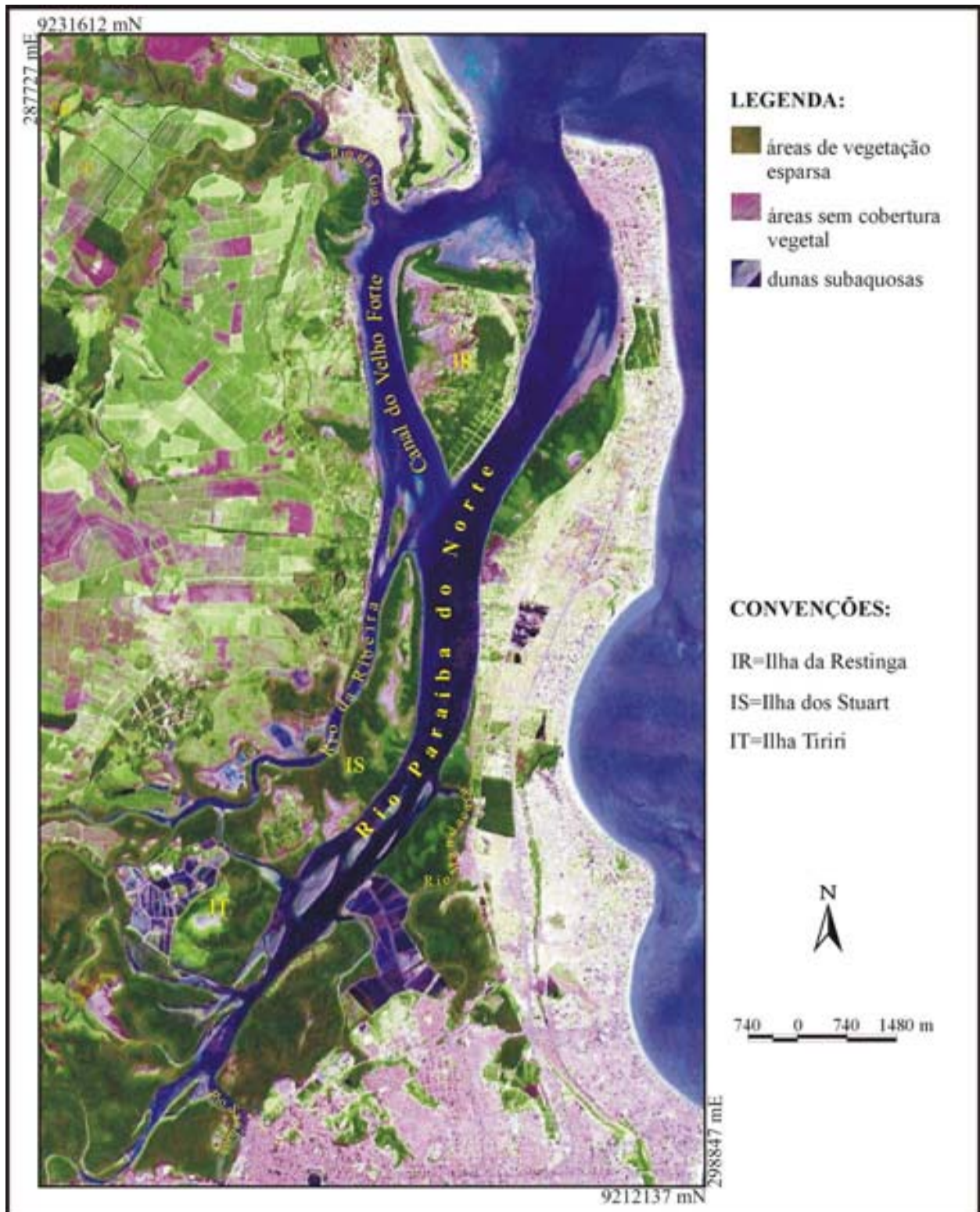


Figura 3.2 - Imagem da composição colorida das bandas 5-4-3-Pan do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGBI adicionada a banda pancromática do Spot HRVIR na camada I (*Intensity*), com textura realçada e resolução espacial de 10 m.

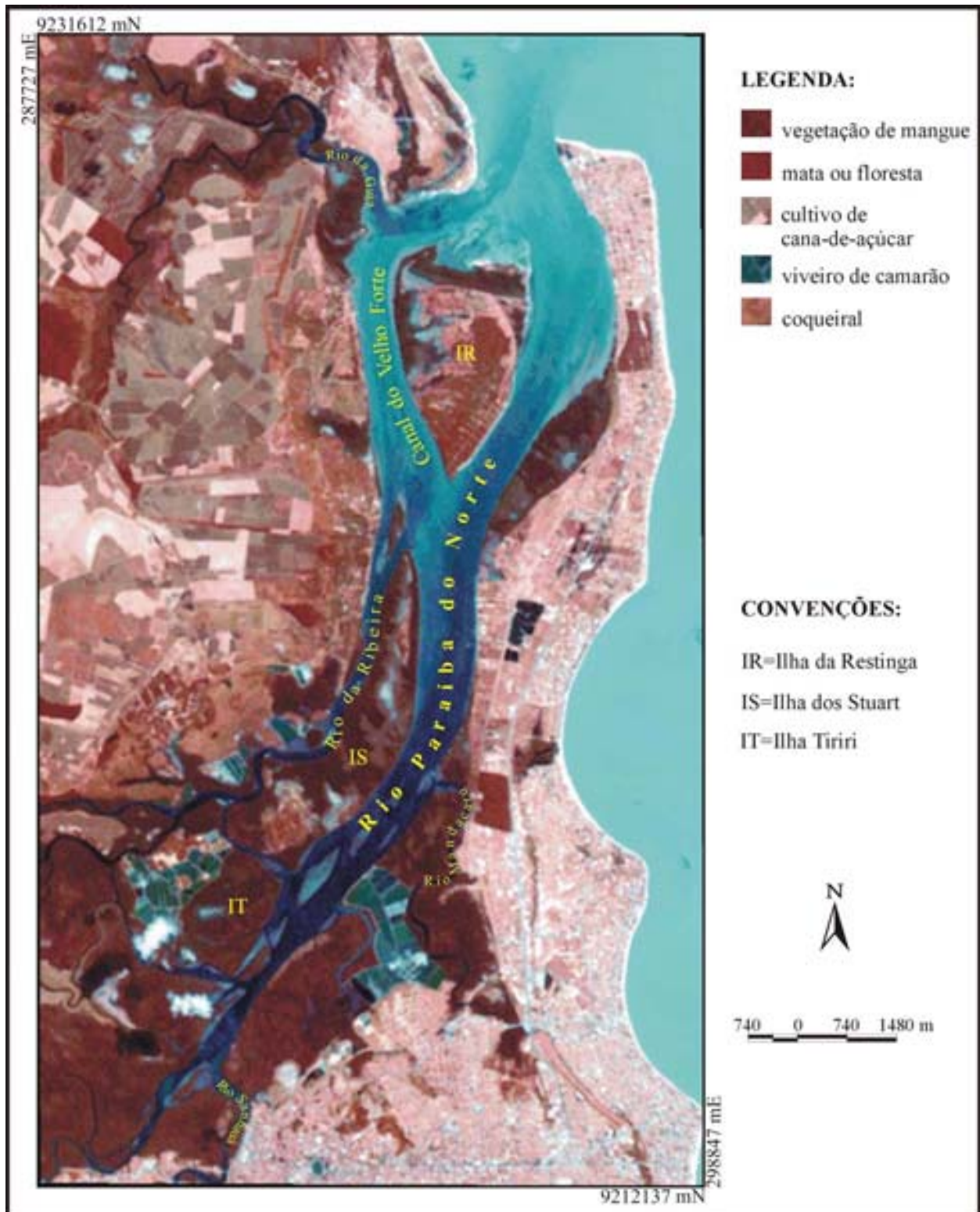


Figura 3.3 - Imagem da composição colorida das bandas 5-3-1 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB realçando as unidades geambientais presentes no ERP.

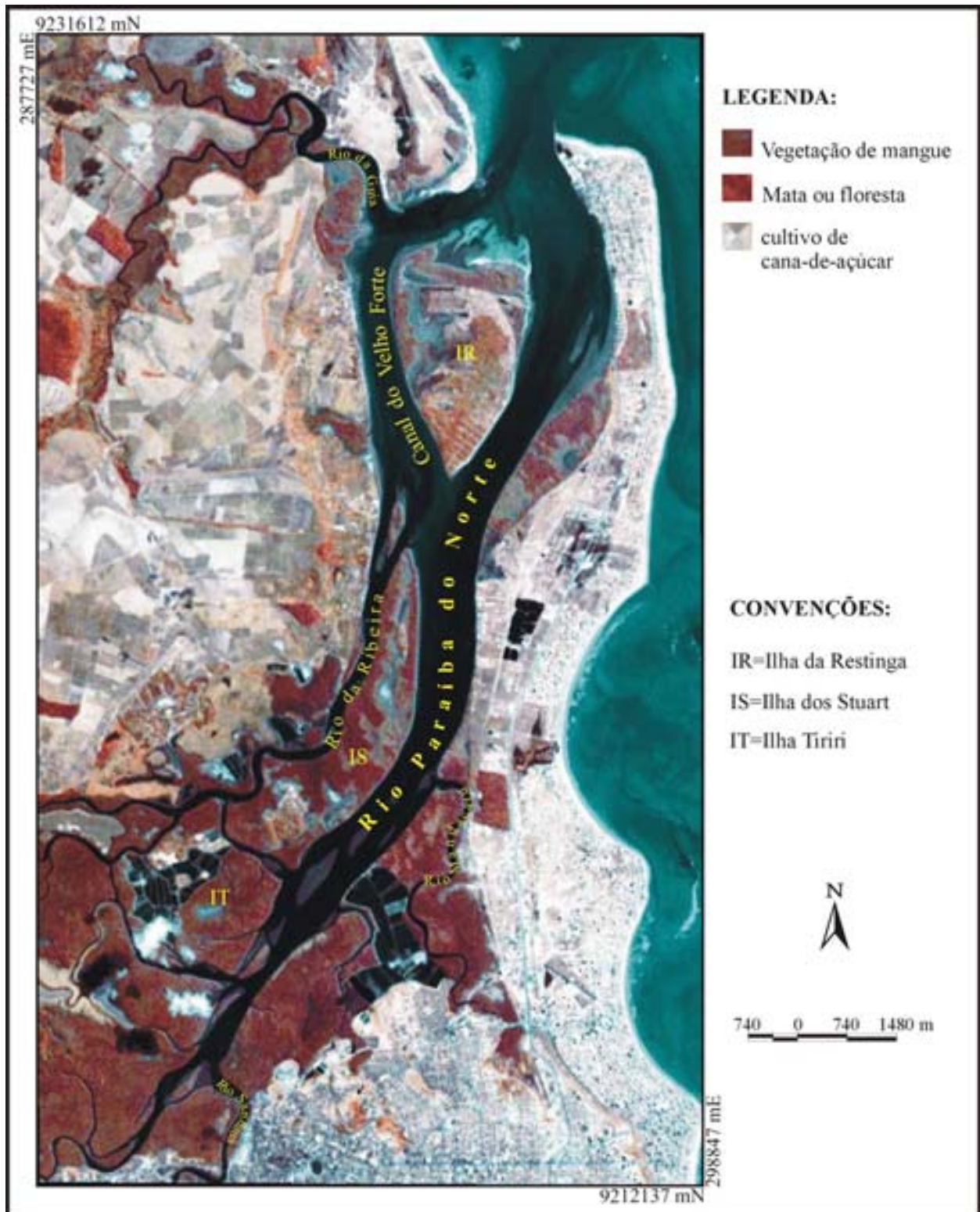


Figura 3.4 - Imagem da composição colorida das bandas 5-3-1-Pan do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGBI resultando numa imagem com tonalidades mais suaves e resolução espacial aumentada para 15 m.



Figura 3.5. - Imagem da composição colorida das bandas 5-2-NDWI do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB realçando as unidades geoambientais presentes no ERP.

3.3 - Composições Coloridas de Razões de Bandas em RGB e RGBI

Amaro (1998) ressalta que as razões de bandas são tipicamente empregadas na supressão das variações de brilho relacionadas à topografia, reduzindo os efeitos do ângulo do zênite solar e enfatizando as tênues diferenças espectrais entre as superfícies. As bandas do numerador e denominador são em regra geral escolhidas para expressar diferenças de radiâncias nas bandas relacionadas às feições espectrais específicas. Ainda segundo esse autor, quanto maior a diferença entre os índices percentuais numa razão de bandas, maior a propensão da razão de bandas na distinção entre os materiais. Desta forma várias combinações de razões de bandas da imagem Landsat 7 ETM+ foram testadas no sistema de cores RGB, sendo as razões 7/4-5/3-4/2 e 5/7-3/1-5/4 as que visualmente apresentaram os melhores resultados. A combinação 5/7-3/1-5/4 foi também testada em RGBI, com a banda pancromática do Landsat 7 ETM+ na camada I, resultando numa imagem que ofereceu um ótimo realce das unidades geambientais do ERP.

3.3.1 - Combinação 7/4-5/3-4/2

A composição colorida em RGB das razões de bandas 7/4-5/3-4/2 proporcionou uma ótima diferenciação entre vegetação de mangue e as demais espécies vegetais presentes na área estudada (Figura 3.6) A vegetação de mangue, que ocorre ao longo do Rio Paraíba do Norte e nos canais de maré associados, mostra-se em cor azul escuro devido, possivelmente, a menor reflectância da vegetação de mangue na razão 4/2 e a maior absorção da argila e matéria orgânica nas razões 7/4 e 5/3. As demais espécies apresentam-se em tons claros de azul devido, possivelmente, a uma maior reflectância na razão 4/2 proporcionada pela própria vegetação.

Outro destaque nesta composição foi a delimitação das ruas na área urbana, sendo possível observar com clareza a BR-230, que percorre longitudinalmente todo o município de Cabedelo e parte de João Pessoa.

3.3.2 - Combinação 5/7-3/1-5/4

Na Figura 3.7, tem-se a composição 5/7-3/1-5/4 em RGB. A razão 3/1 tem como uma das aplicações o realce de áreas com cobertura vegetal, mas não permitiu a diferenciação entre espécies. A vegetação de mangue aparece no mesmo tom da vegetação de mata, não permitindo diferenciá-las entre si. Apenas a área ocupada pela cana-de-açúcar, porção W, aparece na cor alaranjada. A principal característica dessa composição foi o realce, na porção submersa, de áreas com sedimentos em suspensão, que se apresentam em tom verde claro. Destaca-se também um canal secundário na desembocadura do Rio da Guia, na parte norte da imagem, entre a Ilha da Restinga e a praia de Lucena.

A Figura 3.8 representa a mesma composição, sendo que em RBGI. O acréscimo da banda pancromática do Landsat 7 na camada I, resultou numa imagem qualitativamente superior a RGB, sendo a imagem que melhor realçou as diferentes unidades geoambientais presentes na área de estudo.

A vegetação de mangue se diferenciou muito bem da vegetação de mata. A primeira apresenta-se no tom marrom escuro e a segunda no tom vermelho. As áreas de mangue degradado destacam-se em tons escuros, devido, possivelmente, a interferência da água e matéria orgânica presentes no solo.

Esta composição realçou também as áreas de coqueiral que aparecem margeando o tabuleiro costeiro da porção oeste e leste da planície praial de Lucena, ao norte da área de estudo, apresentando-se em tons suaves de róseo.

Na Ilha da Restinga pode-se observar com clareza o destaque de quatro unidades geambientais. O mangue, a mata, área sujeita a inundação (que se mostra em tons escuros devido a baixa refletância da água presente nesta unidade) e área sem cobertura (que se apresenta em tons claros devido a alta refletância do solo arenoso desta unidade). Desta forma foi possível diferenciar as principais unidades geoambientais presentes na área de estudo, acompanhada de campanhas de campo.

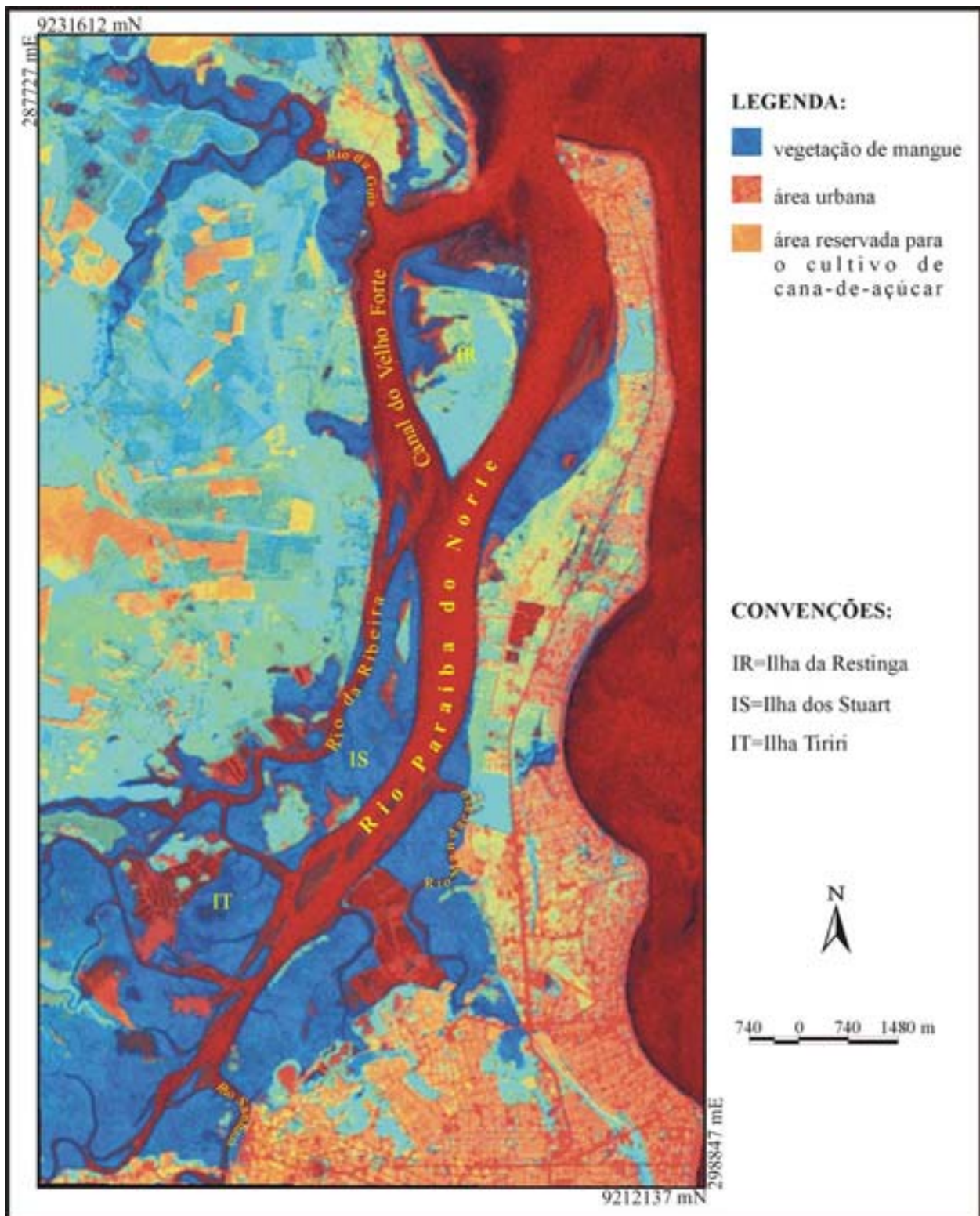


Figura 3.6 - Imagem da composição colorida das razões das bandas 7/4-5/3-4/2 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB destacando a vegetação de mangue.

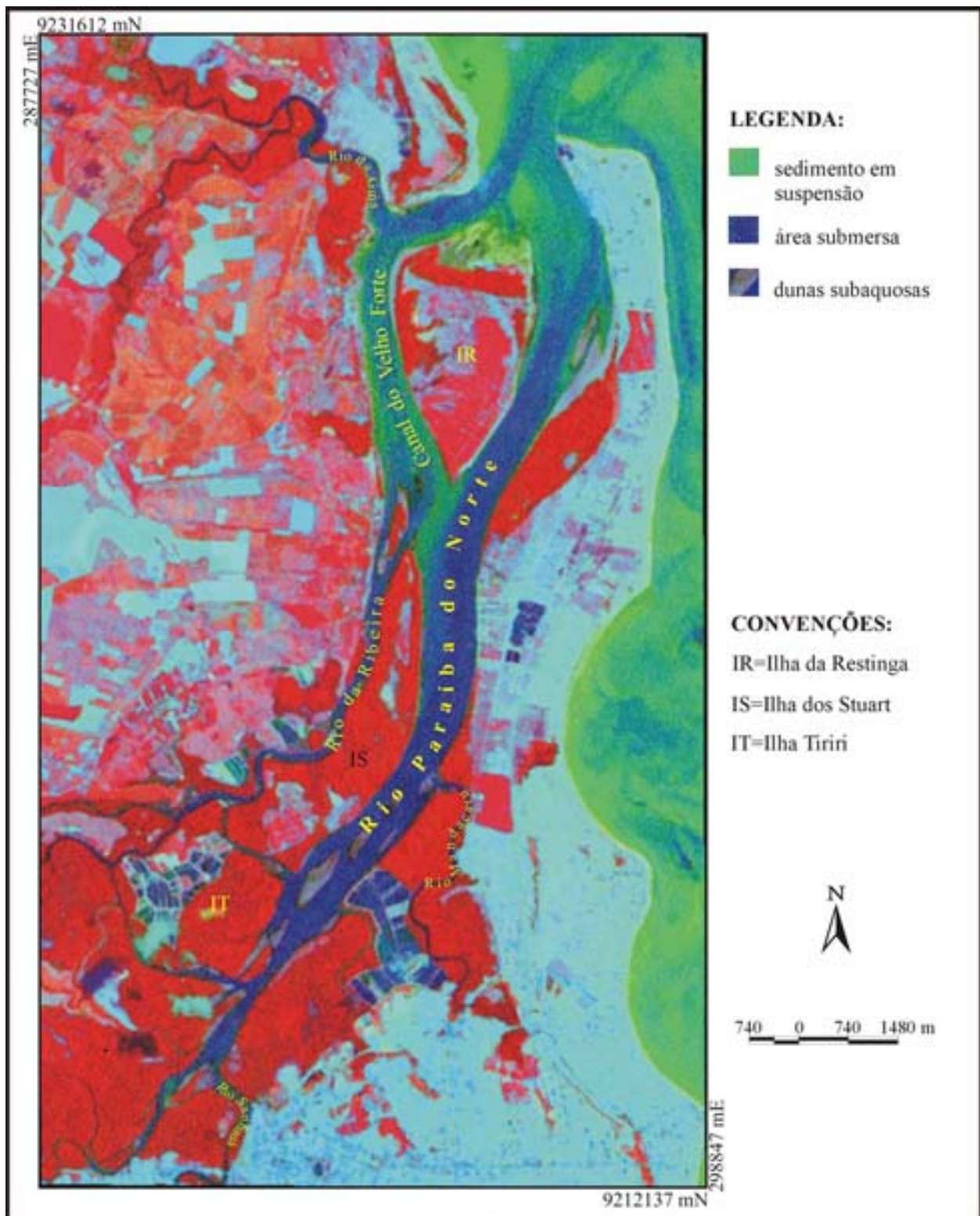


Figura 3.7 - Imagem da composição colorida das razões das bandas 5/7-3/1-5/4 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB destacando as áreas com sedimentos em suspensão.

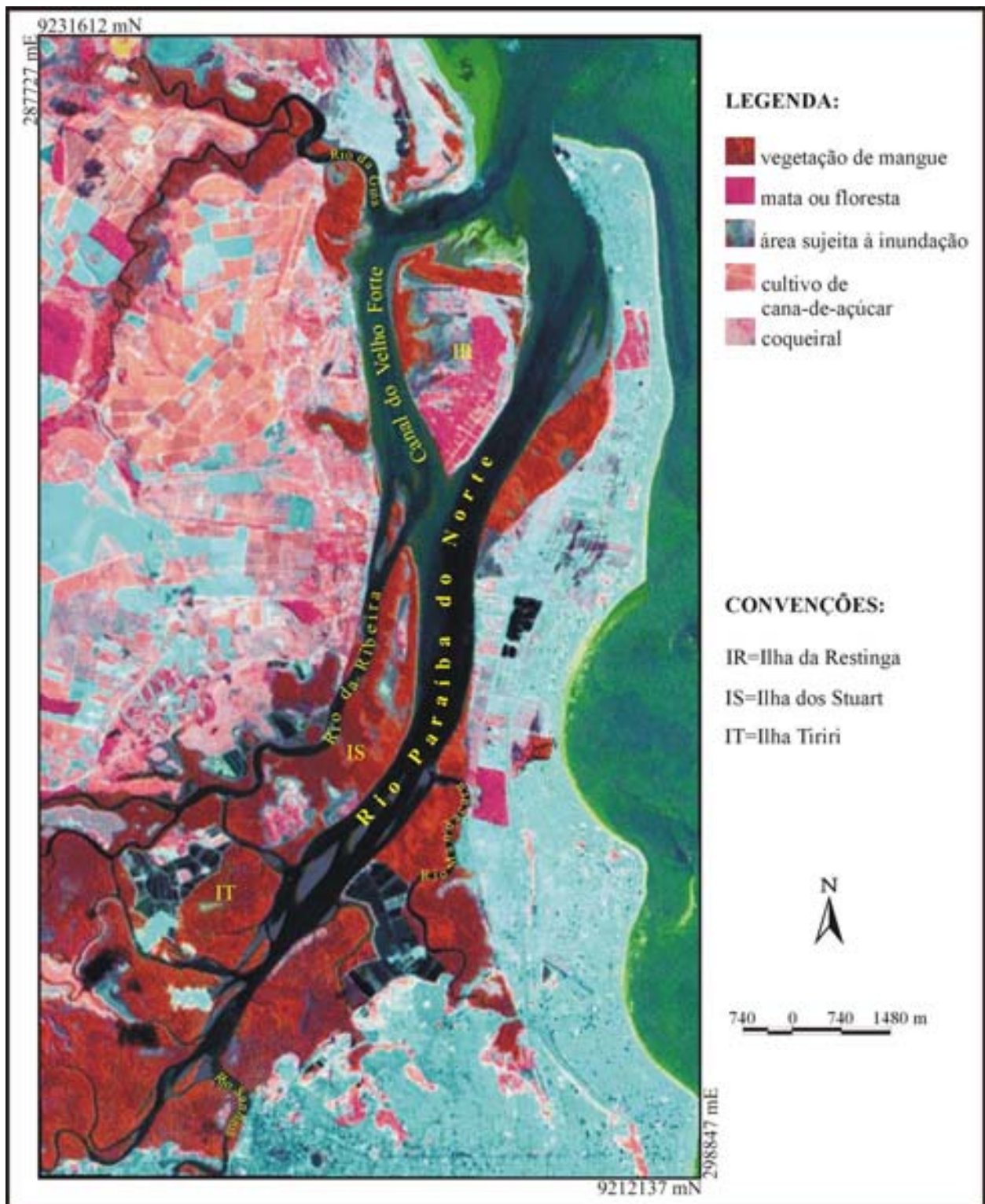


Figura 3.8 - Imagem da composição colorida das razões das bandas 5/7-3/1-5/4-Pan do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGBI realçando as unidades geoambientais do ERP.

3.4 - Integração Temporal dos Dados Vetoriais e Produtos Imagens como Suporte à Avaliação das Alterações do Uso do Solo no Estuário do Rio Paraíba do Norte

O monitoramento de mudanças de uso e ocupação do solo em uma região é um trabalho complexo e que requer muito cuidado. Tipicamente, tal tarefa é realizada usando-se dados multitemporais de um único sensor ou de multisensores, explorando-se a variedade das resoluções espaciais e espectrais dos sensores remotos orbitais. Contudo neste trabalho foram utilizados dois dados cartográficos distintos, o mapa vetorial digital obtido a partir das cartas da SUDENE (elaborados a partir da interpretação das fotografias aéreas verticais, escala 1:30.000, do ano de 1969) em escala 1:25.000 e imagens de satélite multisensor e multidata (Spot HRVIR-PAN – 1999 e Landsat 7 ETM+ - 20001). Notoriamente, estes dois jogos de dados estão em formatos, fontes, escalas e datas diferentes. Por conseguinte, a integração entre estes três conjuntos de dados não é uma aproximação direta, mas sim resultado de um trabalho de investigação e avaliação dos dados multidata correspondente a cada produto cartográfico, resultando na identificação das mudanças de uso e ocupação do solo no Estuário do Rio Paraíba do Norte do período de 1969 a 2001.

Neste item serão apresentadas as modificações ocorridas no quadro natural do estuário nas últimas três décadas, a partir da análise dos mapas de uso e ocupação do solo dos anos de 1969 (Anexo 1) e 2001 (Anexo 2).

As classes utilizadas nos dois mapas e a somatória das áreas dessas classes estão dispostas nas Tabelas 3.1 e 3.2. Comparando-se as duas tabelas, verificam-se mudanças significativas no quadro natural do Estuário do Rio Paraíba do Norte no decorrer dos últimos trinta anos. As principais mudanças serão analisadas a seguir.

a) Área cultivada

Uma das principais alterações ocorreu na região do tabuleiro costeiro. Nesta área havia um predomínio da cultura de subsistência e da vegetação de mata, associadas a expressivas “manchas” de vegetação do tipo cerrado de tabuleiro. Trinta anos depois a cana-de-açúcar é a cultura predominante (Figura 3.9). Observando as Tabelas 3.1 e 3.2,

nota-se que a cultura de cana chegava a ocupar pouco mais de 111 ha da área pesquisada. Hoje, ocupa uma área de aproximadamente 3.941 ha, um crescimento de 3.550%. Esse crescimento é resultado dos estímulos financeiros e creditícios fornecidos pelo Governo Federal através do PROALCOOL a partir de 1975, permitindo, assim, a expansão da cana-de-açúcar sobre os tabuleiros costeiros, área antes considerada inapta a tal cultura devido à baixa fertilidade dos seus solos (Targino & Moreira 1992).

Este avanço da cana-de-açúcar implicou não só na quase extinção das áreas de culturas de subsistência que antes se espalhavam por uma área de 1900 ha, e no momento ocupam uma área próxima a 250 ha, como também da vegetação de mata, que se resume a algumas pequenas manchas isoladas (Figura 3.10), e do cerrado de tabuleiro.

De acordo com Moreira e Targino (1997) *“o processo de modernização da agricultura, levado a efeito na Paraíba a partir de 1970, foi responsável por profundas alterações na dinâmica da organização da produção. Isso porque ele promoveu a substituição tanto de culturas alimentares e de matérias primas destinadas ao abastecimento do mercado interno, quanto da vegetação natural de mata, cerrado e caatinga, seja pela cana-de-açúcar, seja pelo pasto plantado”*.

Tabela 3.1 - Classes do mapa de uso e ocupação do solo do Estuário do Rio Paraíba do Norte em 1969.

| CLASSES | AREA (ha) |
|---------------------------|-----------|
| Agreste | 592,58 |
| Área não classificada | 934,41 |
| Área urbana | 1.703,89 |
| Coqueiro | 1.352,47 |
| Cerrado | 605,5611 |
| Culturas diversas | 1.898,49 |
| Cultura de cana-de-açúcar | 111,16 |
| Floresta | 2.528,55 |
| Vegetação de mangue | 4.125,06 |
| Mata de restinga | 1.190,12 |
| Salina | 154,39 |
| Viveiro de peixe | 26,68 |

Tabela 3.2 - Classes do mapa de uso e ocupação do solo do Estuário do Rio Paraíba do Norte em 2001.

| CLASSES | ÁREA (ha) |
|---------------------------|-----------|
| Área não classificada | 10,05 |
| Área sem cobertura | 506,56 |
| Área urbana | 4.424 |
| Coqueiro | 1.292,74 |
| Culturas diversas | 248,31 |
| Cultura de cana-de-açúcar | 3.941,77 |
| Lagoas | 58,41 |
| Vegetação de mangue | 3.870,93 |
| Mata ou floresta | 873,71 |
| Salina desativada | 25,07 |
| Área sujeita a inundação | 116,92 |
| Mangue degradado | 230,33 |
| Dunas subaquosas | 310,39 |
| Praia | 149,87 |
| Viveiro de camarão | 381,30 |

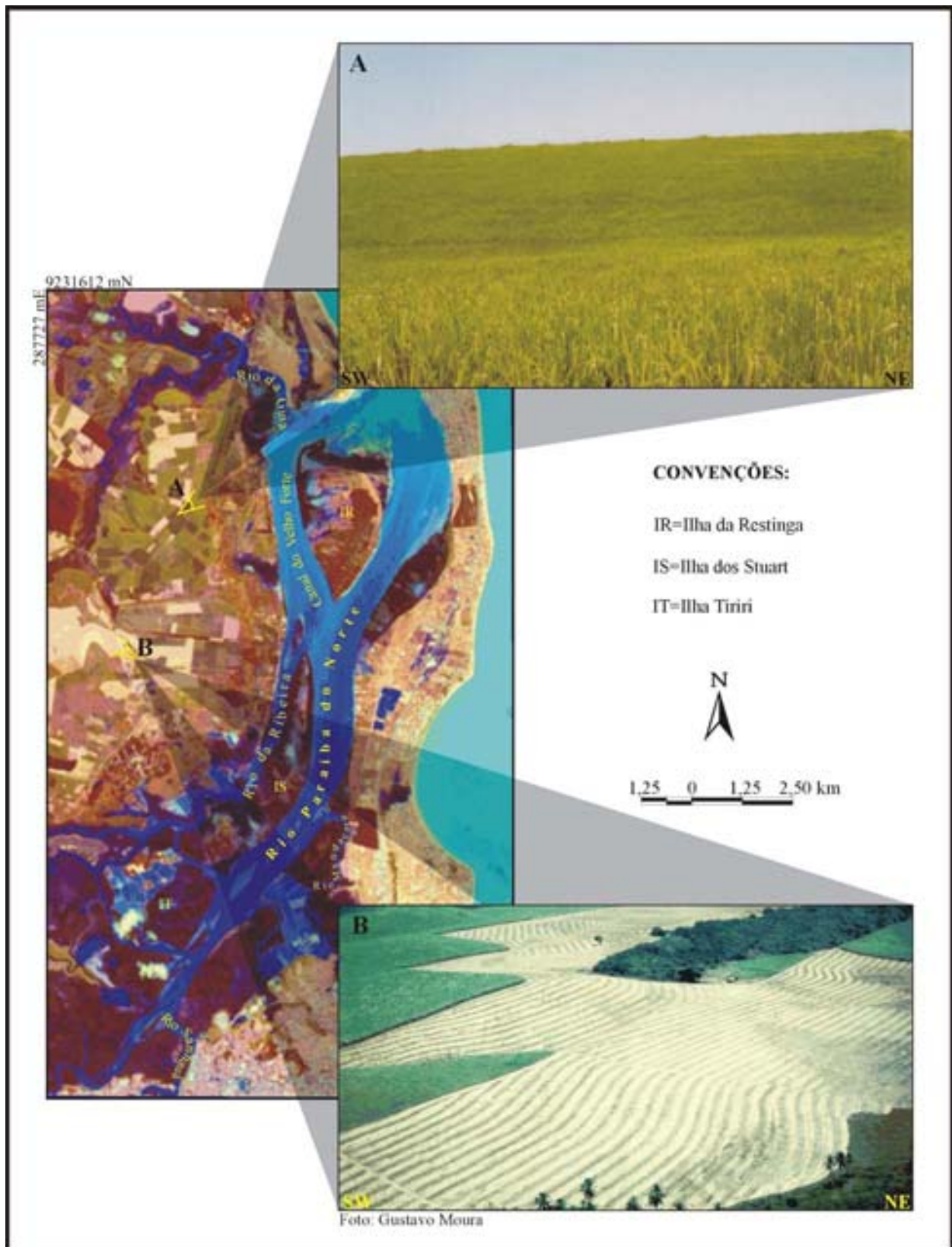


Figura 3.9 – Imagem da composição colorida das bandas 5-2-NDWI do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB. **Foto A** – vegetação sadia de cana-de-açúcar; **Foto B** – cana-de-açúcar em estágios diferentes de crescimento.

b) Área urbana

Uma mudança importante observada na paisagem local foi o crescimento da área urbana, representada pelos municípios de João Pessoa, Cabedelo e Bayeux, pois as áreas urbanas das cidades de Santa Rita e Lucena ficam fora dos limites da área pesquisada. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 1970, estes três municípios possuíam juntos uma população de aproximadamente 273.000 habitantes, em 2000, segundo esse mesmo órgão, a população aumentou para cerca 1.000.000 de habitantes, um crescimento de 366%. Este acelerado crescimento da população implicou também no crescimento da mancha urbana destes municípios, que juntos, conforme as Tabelas 3.1 e 3.2, tiveram um aumento de 260% nesta área entre 1969 e 2001.

Comparando-se os dois mapas de uso e ocupação do solo (Anexos 1 e 2) é possível perceber claramente esse crescimento, principalmente na porção leste da área estudada, compreendida pelos municípios de João Pessoa e Cabedelo, onde a vegetação foi praticamente substituída por edificações.

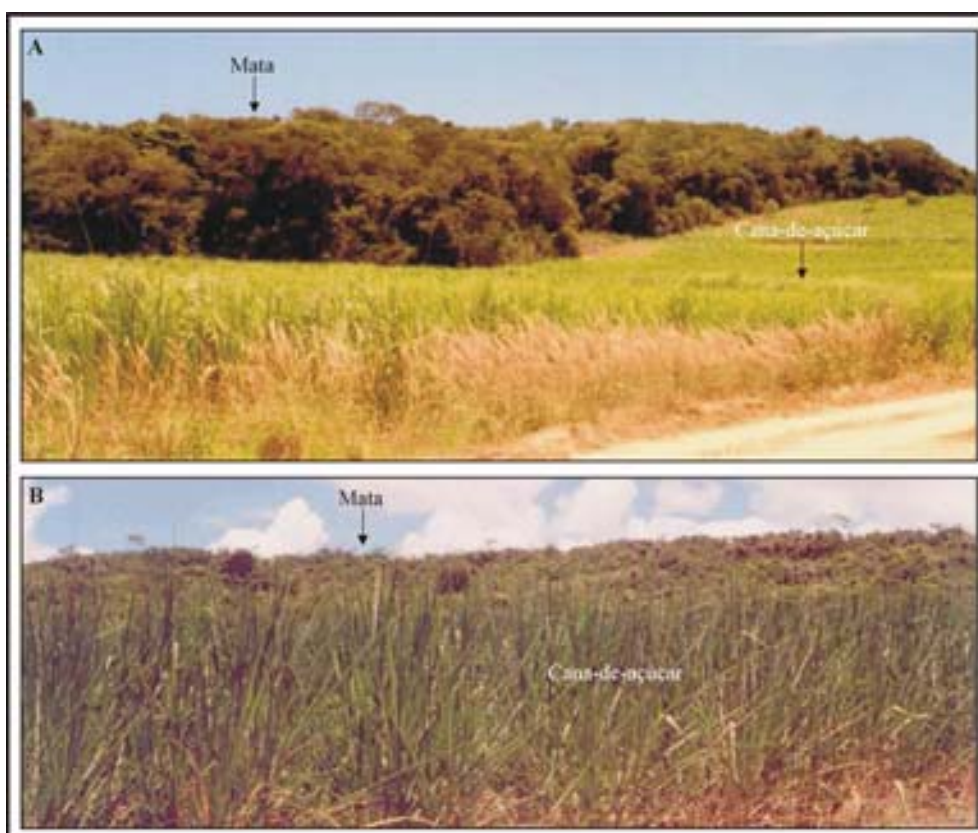


Figura 3.10. Fotos A e B mostrando o avanço da cana-de-açúcar sobre a vegetação de mata no tabuleiro costeiro, restando ainda algumas manchas isoladas.

c) Vegetação natural

Os dois fatores acima mencionados, avanço da cana-de-açúcar e crescimento da área urbana, foram os principais responsáveis pela diminuição drástica das áreas de vegetação natural (mata atlântica, mata de restinga e cerrado de tabuleiro). Esses três tipos de classes vegetais ocupavam juntas uma área de aproximadamente 4.324 ha distribuídas ao longo de toda área estudada. Atualmente a área vegetada por Mata ou Floresta (aqui, mata de restinga e mata atlântica são entendidas como uma mesma classe vegetal denominada Mata ou Floresta) abrange uma área de cerca de 645 ha, uma redução de 80% nas últimas três décadas.

O acelerado crescimento urbano implicou no desmatamento da vegetação que servia de limite natural entre João Pessoa e Cabedelo, restringindo a algumas pequenas áreas, como a Mata do Estado e Mata do Amém, ambas reservas florestais localizadas no Município de Cabedelo.

A vegetação de mangue (Figura 3.11) merece uma atenção especial, pois como parte integrante do complexo ecossistema de manguezal, sua alteração vai depender de inúmeros fatores atuantes direta ou indiretamente no ecossistema. Alterações no curso dos rios, canalizações, drenagem, lançamento de esgotos, deposição de lixo, aterros ou outros fatores que interfiram no fluxo normal da água podem provocar modificações na sedimentação ou no nível da água, alterando estruturalmente a vegetação ou causando até a morte das árvores.

Embora os manguezais estejam bem adaptados para se desenvolverem sob condições de altas temperaturas, substratos anaeróbicos e flutuações na salinidade, há certas situações, tanto naturais, quanto induzidas pelo homem, a que são extremamente vulneráveis (Odum & Heald 1975).

Na área estudada, o mangue em 1970 ocupava uma área com cerca de 4.200 ha, hoje esta área se encontra com 3.870 ha, uma redução aproximada de 7,8%. Essa redução na sua área pode ser considerada tolerável, levando-se em consideração que no mundo todo as áreas de manguezais vêm declinando significativamente devido principalmente ao crescimento desordenado das áreas urbanas e atualmente pelo crescimento da carcinicultura (French 1997), além de serem convertidas em áreas agrícolas e utilizadas para produção de carvão vegetal. Esta redução pode ser conseqüência de inúmeros fatores

antrópicos que isoladamente ou integrados atuam de forma negativa sobre o ambiente estuarino, conseqüentemente sobre a vegetação de mangue. Num ambiente estuarino, conforme Marcelino (2000), as formas antrópicas de apropriação do espaço representam as atividades realizadas dentro da sua área de influência, e que, muitas vezes, são incompatíveis com as funções do ecossistema, gerando distúrbios nos compartimentos ambientais.

Estudos realizados por Barbosa (2001) no Município de Bayeux, revelaram que a sua área de vegetação de mangue teve uma redução de 21,7% entre 1974 e 1998, resultado do crescimento desordenado da urbanização, bem como da substituição da vegetação do mangue por coqueirais e da retirada de madeira para construção civil e combustível doméstico.

Um trabalho realizado no estuário pelo NEPREMAR em 1985, abordando características químicas e físicas da água, tais como temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, transparência da água e nutrientes inorgânicos (NO_2 , NO_3 e PO_4), revelou que o ambiente estuarino do Rio Paraíba do Norte apresentava um alto grau de poluição orgânica (esgoto doméstico) e, em menor escala, poluição industrial (efluentes de indústrias de açúcar, álcool ou bebidas alcoólicas).

O Estuário do Rio Paraíba do Norte recebe uma descarga de poluentes, oriundos dos esgotos domésticos, principalmente de João Pessoa, Bayeux e Santa Rita, na parte superior do canal principal nas proximidades da desembocadura dos rios Paroeira e Sanhauá, o que pode levar tal ambiente há uma possível eutrofização (Sassi & Watanabe 1980). Nesta porção do estuário ocorre um fato curioso e contraditório ao que foi exposto anteriormente. A vegetação de mangue, peculiar como tal, está se desenvolvendo com maior intensidade exatamente nesta área onde se concentra a maior descarga de esgotos domésticos. Antigas dunas foram colonizadas por este tipo vegetal, o que contribui para essa relativa estabilidade da área ocupada por vegetação de mangue ao longo desses trinta anos.

O fato do mangue está se beneficiando dos nutrientes provenientes dos esgotos, não leva a conclusão de que esgoto seja algo benéfico ao ecossistema estuarino, até mesmo porque esse mangue que se desenvolve diante de tal fato, pode estar submetido a condições de estresse ambiental. Além disso, o ecossistema estuarino não se limita apenas à vegetação de mangue; as espécies vegetais e animais que vivem nesse ambiente sofrem

conseqüências negativas incalculáveis com uma possível eutrofização do ambiente estuarino, conseqüente desse despejo *in natura* de poluentes. Conforme Grisi (2000), os estuários como interface entre o continente e a zona costeira recebem nutrientes, contaminantes e matéria orgânica, resultantes da atividade humana, em concentrações que têm vindo a aumentar, com reflexos sobre os ciclos biogeoquímicos e a eutrofização das águas, afetando diretamente o ecossistema.

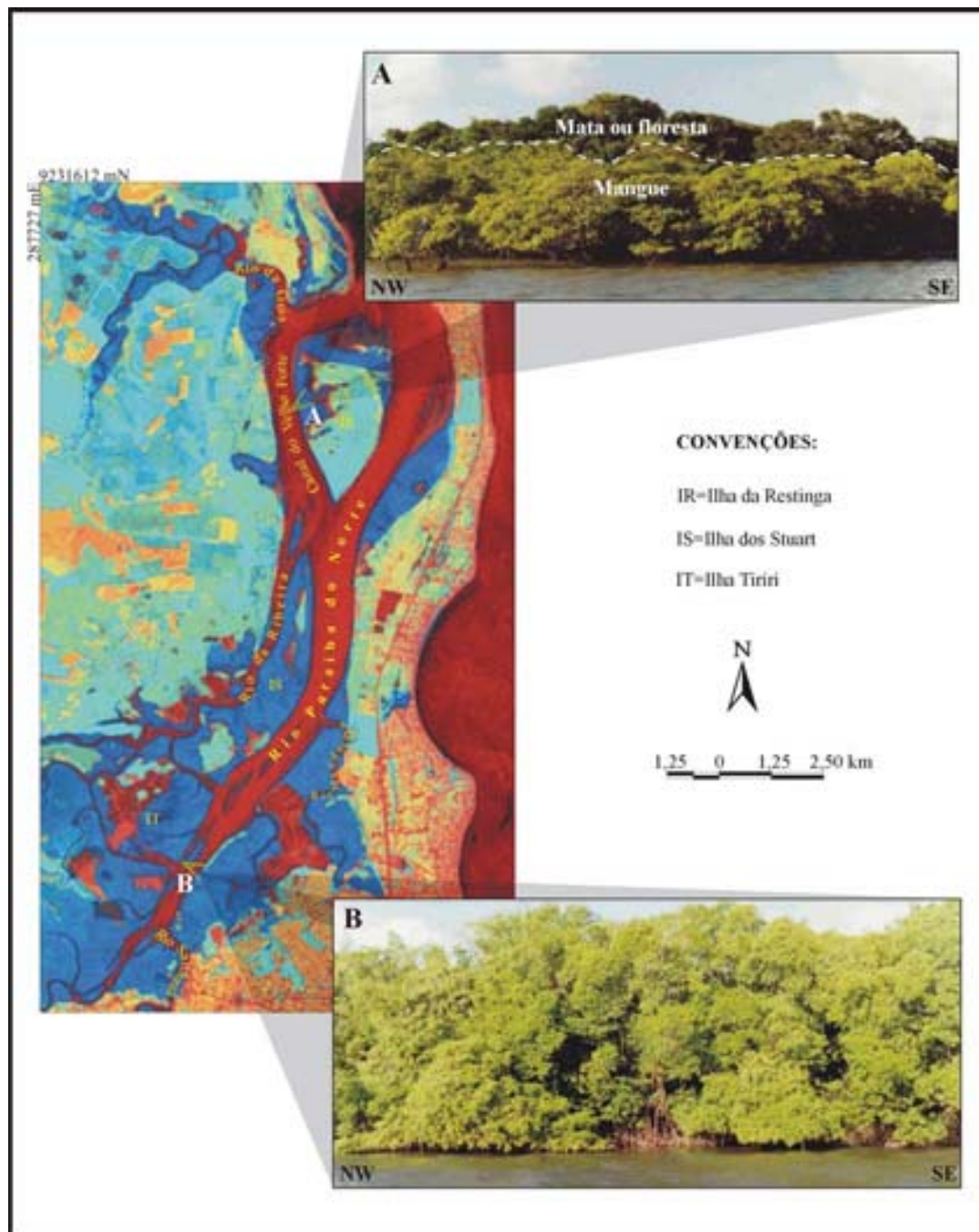


Figura 3.11 – Imagem da composição colorida das razões das bandas 7/4-5/3-4/2 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB. **Foto A** – porção da IR onde é possível observar o mangue (primeiro plano), que se desenvolve em áreas mais baixas, e a vegetação de mata ou floresta (segundo plano), que se desenvolve nas área mais altas, onde não há interferência da maré; **Foto B** – vegetação exuberante de mangue margeando o canal do Rio Paraíba do Norte.

d) Viveiros de camarão

A rápida expansão da indústria da carcinicultura é atualmente a maior ameaça aos mangues restantes do mundo. Literalmente milhares de hectares de mangue têm sido destruídos para dar lugar aos criatórios artificiais de camarão. Estes empreendimentos estão crescendo exponencialmente nos últimos 15 anos, causando danos irreparáveis aos manguezais. A quantidade de mangue destruído é alarmante. A Tailândia perdeu mais da metade do seu manguezal a partir de 1960. Nas Filipinas, os mangues diminuíram de uma estimativa de 448.000 hectares em 1920 para somente 110.000 hectares em 1990. No Equador, estimativas da perda de mangue variam de 20% até perto de 50% dos 362.000 hectares que habitaram um dia seu litoral. Globalmente, cerca de 50% da destruição dos mangues nos anos recentes tem sido devido ao corte para implantação de fazendas de camarão.

Atualmente no Estuário do Rio Paraíba do Norte existem quatro viveiros de camarão localizados na porção centro-sul, e um terceiro está sendo construído nas proximidades do Rio da Guia (Figura 3.12). Destes quatro, dois se destacam pela suas dimensões ocupando juntos uma área de 328 ha.. Os viveiros foram construídos em áreas de salinas desativadas, o que minimizou o desmatamento da vegetação de mangue (Figura 3.13).



Figura 3.12 - Viveiro de camarão em construção, evidenciando o crescimento da atividade de carcinicultura no ERPN.

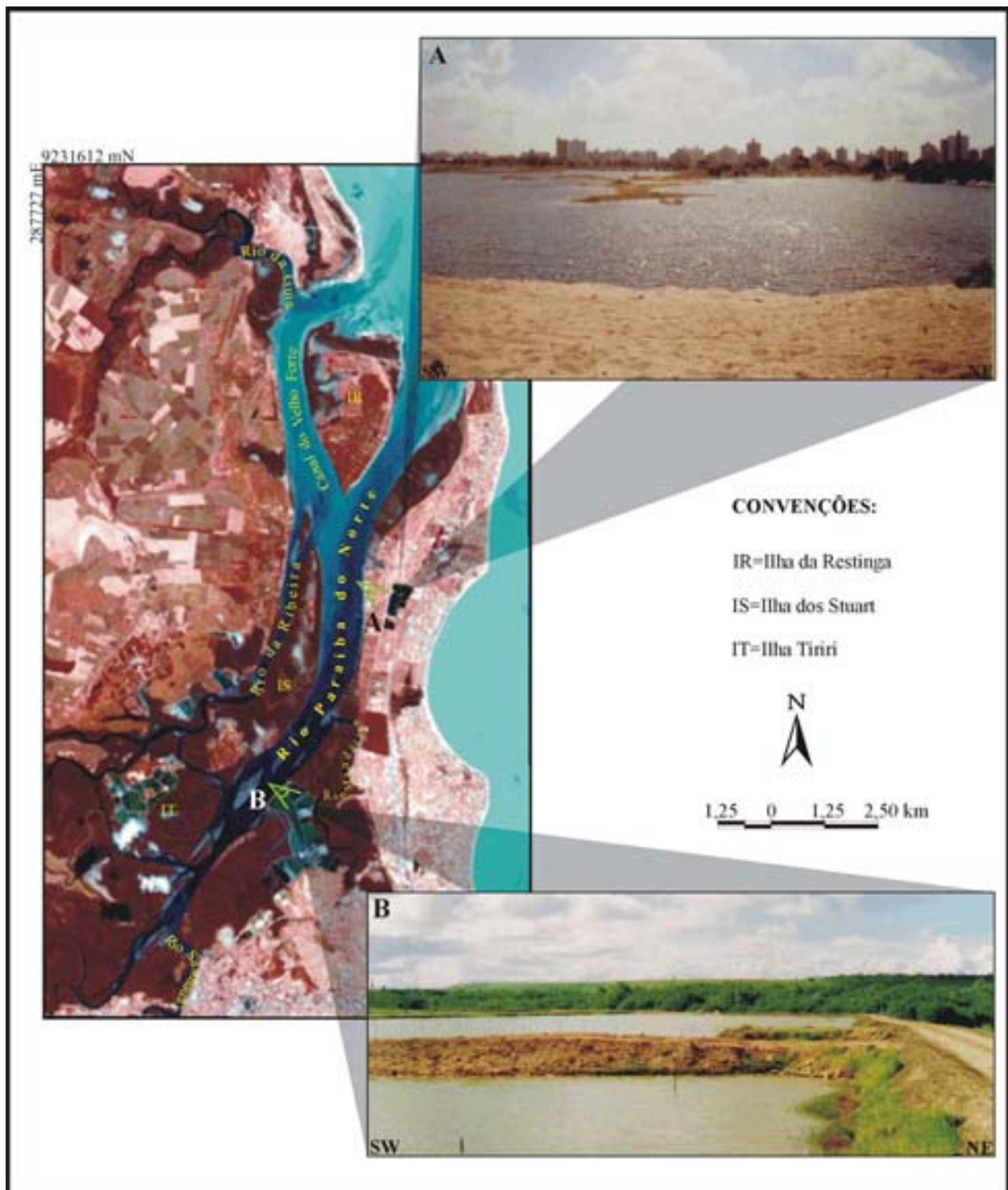


Figura 3.13 - Imagem da composição colorida das bandas 5-3-1 do Landsat 7 ETM+ combinadas em RGB. **Foto A** – lagoas que se formaram em áreas deprimidas correspondentes às reentrâncias existentes entre os cordões litorâneos, que deram origem a Planície Praial. Estas lagoas em épocas de chuvas intensas perduram por muito tempo, permitindo o desenvolvimento de peixes e crustáceos; **Foto B** – atividade de carcinicultura reaproveitando áreas de antigas salinas, o que minimizou o desmatamento da vegetação mangue.

3.5. Mudanças na Morfologia do Estuário do Rio Paraíba do Norte

Este item aponta as mudanças mais expressivas na morfologia da linha de costa e do ERPN observada a partir da comparação das cartas da SUDENE (1969) e das imagens de satélite Spot HRVIR-PAN (1999) e Landsat 7 ETM+ (2001).

Os processos de erosão costeira, deposição e transporte de sedimentos, inundações e variações do nível do mar modificam continuamente a linha de costa. Dependendo da interação dos processos atuantes, estas mudanças morfológicas podem acarretar problemas para o desenvolvimento das atividades antrópicas. Desta forma, o estudo da espacialidade e temporalidade das alterações da morfologia costeira é de fundamental importância para compreender os processos erosivos atuantes em uma determinada área.

Diversos trabalhos realizados na costa brasileira mostram que os principais casos de erosão reportados podem ser entendidos e explicados como (i) variação do nível do mar, (ii) resultado intrínseco dos padrões de dispersão e transporte de sedimentos na zona costeira e (iii) resultado de intervenções humanas na zona costeira, seja através da construção de obras de engenharia, seja através de usos do solo inadequados.

Ulbricht e Heckendorff (1998) ressaltam que os processos que atuam no ERPN, agindo na evolução morfodinâmica, são controlados por ondas, ventos, marés e correntes marítimas (que se movem na direção de sul para norte) juntamente com a geologia da área.

No ERPN a alteração mais significativa foi observada no extremo norte da planície praial, área onde se localiza o Porto de Cabedelo. Nesta porção foi observada a deposição de um grande volume de sedimentos no período entre 1969 e 2001. Comparando-se este trecho neste período, observou-se que houve um crescimento em direção ao mar (progradação) de aproximadamente 300 m (Figura 3.14 e 3.15). Provavelmente a construção do Porto de Cabedelo e posteriormente um molhe (com 1200 m de extensão) perpendicular à deriva litorânea dos sedimentos (Figura 3.15) interferiram na morfodinâmica local. Este último contribuindo no volume dos sedimentos armazenados, provocando um engordamento contínuo desta faixa de praia. Para que o material depositado não exceda a capacidade de retenção desse molhe, o que provocaria o assoreamento do canal de entrada do porto, foram construídos gabiões em alguns trechos

da costa do município de Cabedelo com intuito de barrar a chegada desses sedimentos e ao mesmo tempo servir como agente de engorda da praia (Figura 3.16).

O contrário ocorreu na porção NW, zona posterior ao molhe, com erosão (reco da linha de costa) na praia de Costinha, Município de Lucena. A construção do molhe na foz do Rio Paraíba do Norte provavelmente induziu a erosão nesta praia, devido a este reter o material que poderia alimentar a praia neste trecho. Como medida de conter este processo e ao mesmo tempo provocar o engordamento contínuo desta praia, também foram construídos gabiões (Figura 3.16).

A interação destas obras de engenharia provavelmente gerou uma dinâmica litorânea peculiar, carreando sedimentos para dentro do canal do ERP, proporcionando, com isso, a formação das dunas presentes no mesmo. Também deve ser levado em consideração a própria deriva estuarina como fonte reguladora do balanço sedimentar. Essas dunas foram observadas nas imagens de satélites em frente a Ilha da Restinga, na entrada do estuário, e na porção superior, onde são mais concentrados. Nesta última, as dunas se formaram paralelas às ilhas e em alguns casos foram fixadas pela vegetação de mangue, contribuindo para a ampliação e evolução do ecossistema estuarino.

Os processos morfodinâmicos gerados a partir da ação dos ventos, incidência das ondas, variações de marés, bem como o transporte de areias ao longo do prisma de praia, estão associados com as obras de engenharia. A construção do molhe no extremo norte da Planície Praial, onde está localizado o Porto de Cabedelo, está provocando o engordamento contínuo deste trecho da praia. O crescimento do Porto foi orientado de acordo com o desenvolvimento desta zona, com o constante aporte de sedimentos provenientes de sul.

Com o preenchimento do molhe, a tendência geral é iniciar um novo ciclo na dinâmica sedimentar. Desta forma, a área pode passar de acumuladora de areia para de trânsito sedimentar, podendo, com isso, realimentar a praia de Lucena, o que contribuiria para minimizar a erosão atualmente instalada nesta praia, mas por outro lado, poderia vir a assorear a desembocadura do estuário, o que provocaria o assoreamento do canal de entrada do Porto de Cabedelo. Portanto somente um estudo adequado da dinâmica da deriva litorânea no entorno do estuário, poderá gerar um modelo adequado de interação entre equipamentos urbanos e meio natural.

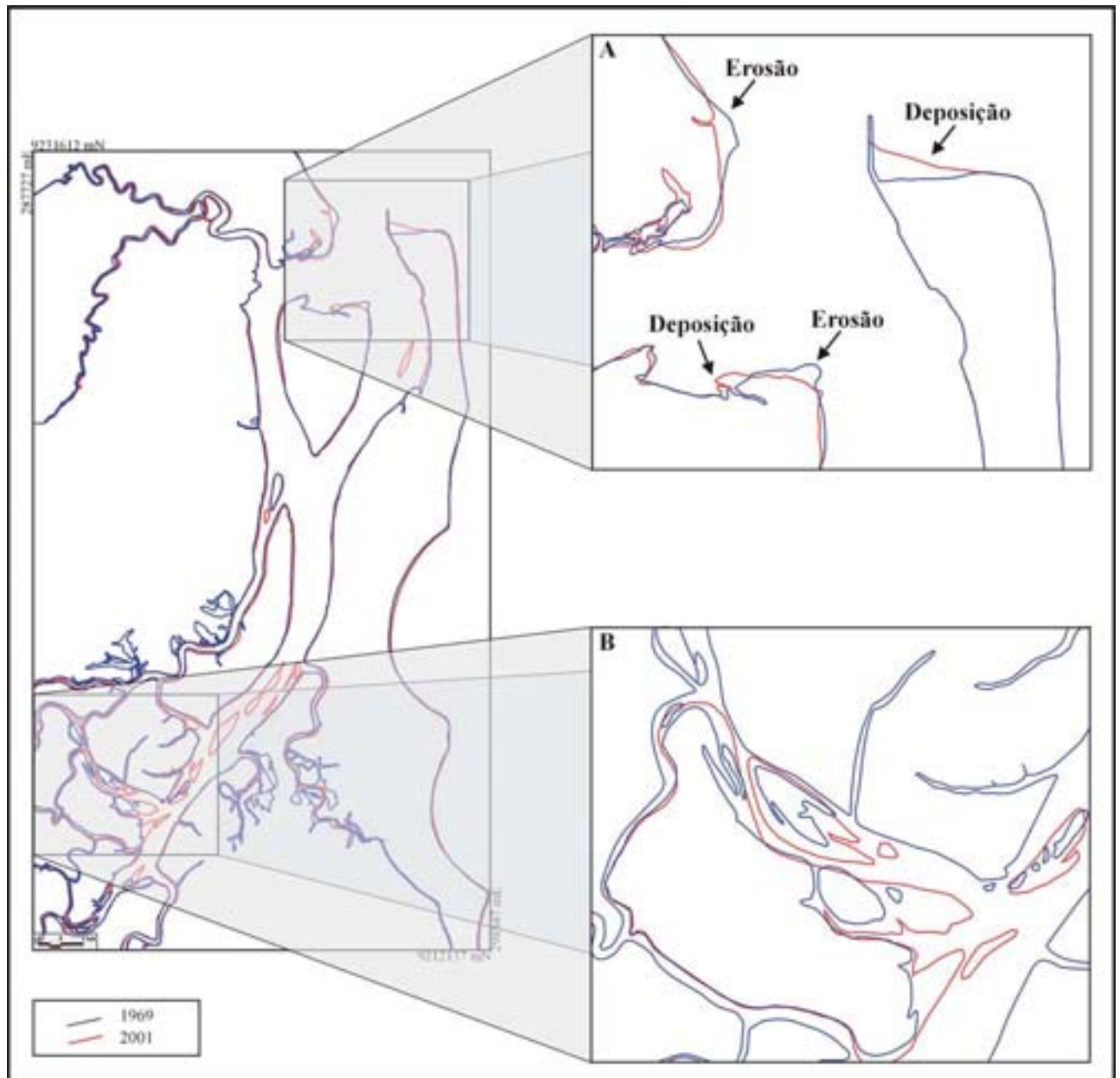


Figura 3.14 – Áreas onde ocorreram as modificações mais relevantes na morfologia do ERP entre os anos de 1969 (linha azul) a 2001 (linha vermelha). No detalhe A tem-se as áreas onde ocorreram deposição e erosão; o detalhe B mostra o crescimento de antigas dunas, resultando, em alguns locais, no estreitamento dos canais e na expansão da área das ilhas mais próximas, sendo também colonizadas pela vegetação de mangue.



Figura 3.15 – Visão parcial da Planície Praial, mostrando o município de Cabedelo e evidenciando os processos geodinâmicos atuantes na foz do ERP. Ao fundo, vê-se a reserva florestal Mata do Estado; dentro do canal observa-se as dunas areno-lamosas e o Porto de Cabedelo; na extremidade tem-se o molhe, que serve de guia corrente e como barreira para os sedimentos carreados de S para N pelas correntes marinhas, minimizando processo de assoreamento do canal de entrada do estuário.



Figura 3.16 – Construção de gabiões como medida de contenção da erosão costeira. **Foto A** – costa de Cabedelo e **Foto B** – costa de Lucena.

Capítulo 4

CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO ESTUÁRIO DO RIO PARAÍBA DO NORTE POR MEIO DE PRODUTOS DIGITAIS DE SENSORES REMOTOS E MODELO DIGITAL DE TERRENO

Neste capítulo serão abordados dois itens. O primeiro corresponde à caracterização geomorfológica do ERPN a partir da integração do Modelo Digital de Terreno (MDT) e da imagem Landsat 7 ETM+ e o segundo a caracterização da morfologia de fundo do canal principal (Rio Paraíba do Norte) por meio do sonar de varredura lateral e do ecobatímetro.

4.1. Caracterização Geomorfológica do Estuário do Rio Paraíba do Norte a partir da Integração de um Modelo Digital de Terreno e da Imagem Landsat 7 ETM+

Yang *et al.* (1999) definem mapeamento geomorfológico como sendo a representação da superfície da Terra mostrando a formação, forma, distribuição espacial, materiais constituintes, idade e outros detalhes planialtimétricos de formas terrestres e indicativos dos processos que induzem o seu desenvolvimento. A precisão e a compreensiva representação das formas terrestres nos mapas é uma parte essencial de pesquisas geomorfológicas (Verstappen 1983, Cooke & Doornkamp 1990).

O mapeamento geomorfológico de ambientes estuarinos é um tanto complexo, pois são áreas que apresentam uma variação topográfica normalmente baixa e as informações de relevo são freqüentemente escassas. Estes ambientes sofrem mudanças rápidas devido a sua posição geográfica, limite entre terra e mar, o que dificulta delinear com clareza os limites das formas de relevo.

Na classificação geomorfológica do ERPN foi utilizado um MDT da área e a imagem de satélite Landsat 7 ETM+ juntamente com campanhas de campo. Os dados foram processados, integrados, analisados e interpretados por meio do SIG.

O MDT foi utilizado pela primeira vez no início dos anos 50 para projetos de estradas (Charif 1992). Desde então, os MDT's vêm sendo objeto de um número significativo de estudos para o desenvolvimento de vários campos de aplicação (Speight 1968, 1973, 1976, Richards 1981, Dikau 1989, Unwin 1989, Goudie 1990, Petrie & Kennie 1990, Weibel & Heller 1991, Pike 1993, Wilkinson *et al.* 1995). Estudos mais recentes discutem como o MDT pode ser atribuído a uma fácil integração dentro de um ambiente de SIG (Weibel & Heller 1990, 1991, Schimidit & Dikau 1999).

De acordo com Xavier-da-Silva (2000), o crescimento dos conhecimentos geomorfológicos é decorrente de investigações de processos atuantes ou de suas evidências de atuação anterior, e pode também se originar de estudos ideográficos, matriz de muitos avanços da ciência geomorfológica. Não deve ser ignorado, entretanto, o fato de que o progresso da geomorfologia pode também decorrer de investigações projetadas com o uso de modelos sistêmicos traduzíveis em modelos digitais do ambiente, resultantes do geoprocessamento. Um desses modelos digitais é indubitavelmente o MDT.

O MDT além de ser utilizado para calcular os valores que descrevem a altimetria de uma localização geográfica específica ou de seus arredores, também é capaz de fornecer ou representar informações geomorfológicas que traduzem as características do terreno (Simões 1993).

Os MDT's são capazes de representar digitalmente um conjunto de dados e a partir daí extrair informações, seja por meio de consultas diretas ou de análises e manipulações, gerando informações adicionais. Felgueiras (1987) ressalta que uma maneira de se extrair informações novas é a sobreposição das imagens de satélites com o MDT. As imagens de satélite por meio da medida de reflectância dos objetos fornecem informações sobre as características e condições do terreno. A superposição destas informações com os valores altimétricos fornecidos pelo MDT permite uma visualização tridimensional do conjunto dos dados de uma área juntamente com suas características, sendo uma boa fonte de informação para diversos estudos, entre os quais os geomorfológicos.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam o MDT gerado a partir das cotas topográficas extraídas das cartas da SUDENE, com escala horizontal de 1:25.000 e eqüidistância entre

as curvas de nível de 10 metros, e do mapa batimétrico atual da porção estuarina do Rio Paraíba do Norte, conforme descrito no Capítulo 2. A inclusão das cotas batimétricas no MDT possibilitou o refinamento e conseqüentemente uma melhor aproximação do real quanto à conformação do canal fluvial, revelando feições de fundo resultantes da dinâmica estuarina. A resolução de 15 m do MDT foi outro fator determinante na qualidade da representação da morfologia do terreno, sendo compatível com resolução espacial do produto imagem utilizado.

O produto imagem resultante do processamento digital aplicado na imagem Ladsat 7 ETM+, razões das bandas 5/7-3/1-5/4-Pan, combinadas em RGBI (Figura 3.8) com a banda pancromática na camada I, foi a que apresentou melhor resultado na identificação das unidades geomorfológicas. Além de resultar numa imagem qualitativamente superior as demais composições testadas, apresenta uma resolução espacial que permite uma maior confiabilidade na identificação e delimitação do contato das feições geomorfológicas.

A sobreposição da imagem resultante do processamento digital ao MDT (Figura 4.3) proporcionou a identificação das unidades geomorfológicas presentes no ERP, bem como o contato dos seus limites naturais, mesmo que por extrapolação, pois os elementos naturais presentes na imagem (vegetação, solo, geologia, geomorfologia) estão intrinsecamente correlacionados com os dados de topografia gerados pelo MDT. Com isso, foi possível identificar na área do estuário do rio Paraíba duas grandes unidades geomorfológicas: Tabuleiro Costeiro e Planície Litorânea, esta última subdividida em seis subunidades: praia, planície de maré, planície praial, dunas subaquosas de areia submersos, terraço fluvial e vertente. O Anexo 3 representa o mapa das unidades geomorfológicas do ERP.

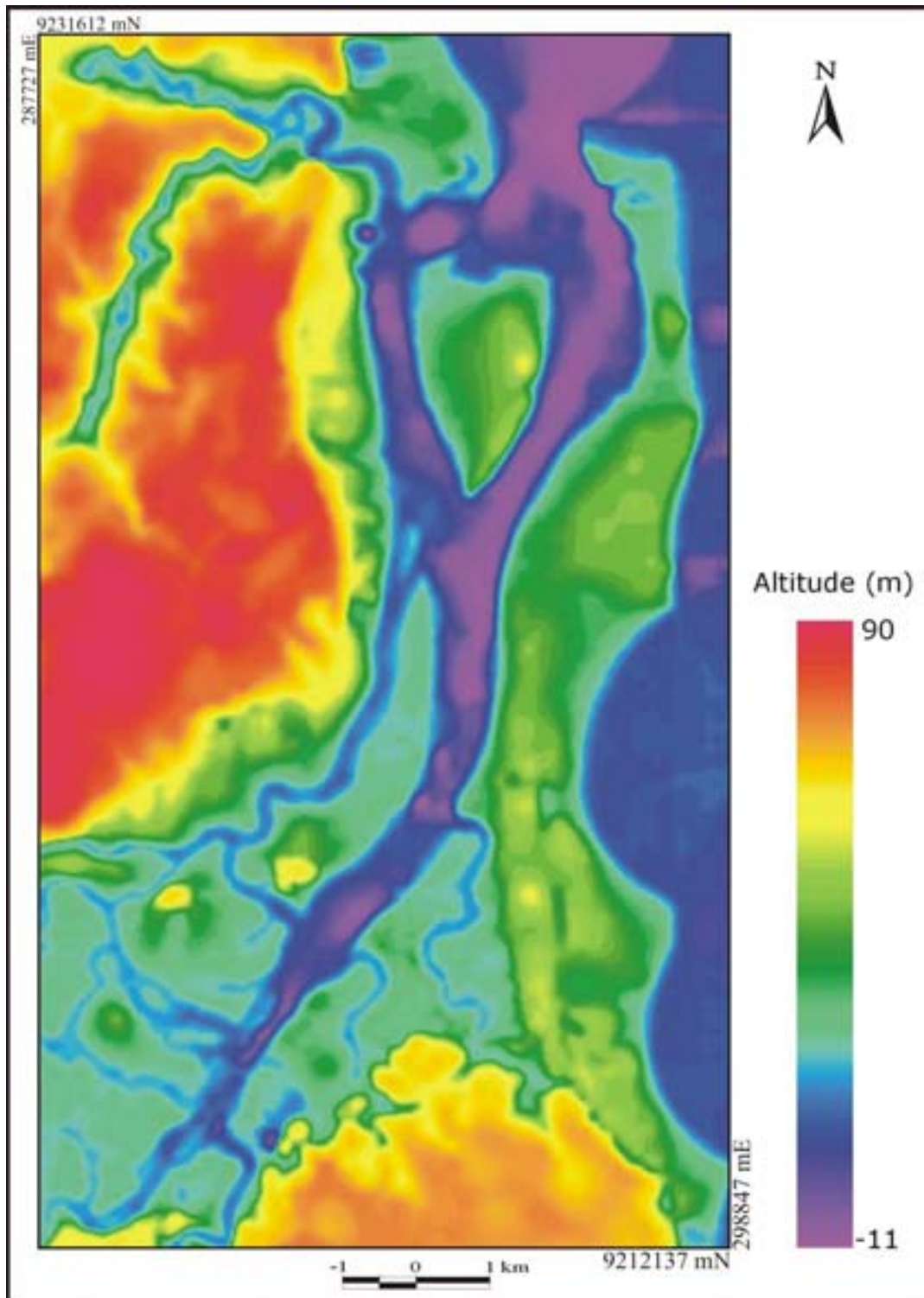


Figura 4.1 – Modelo Digital de Terreno do Estuário do Rio Paraíba do Norte incluindo a batimetria do canal principal.

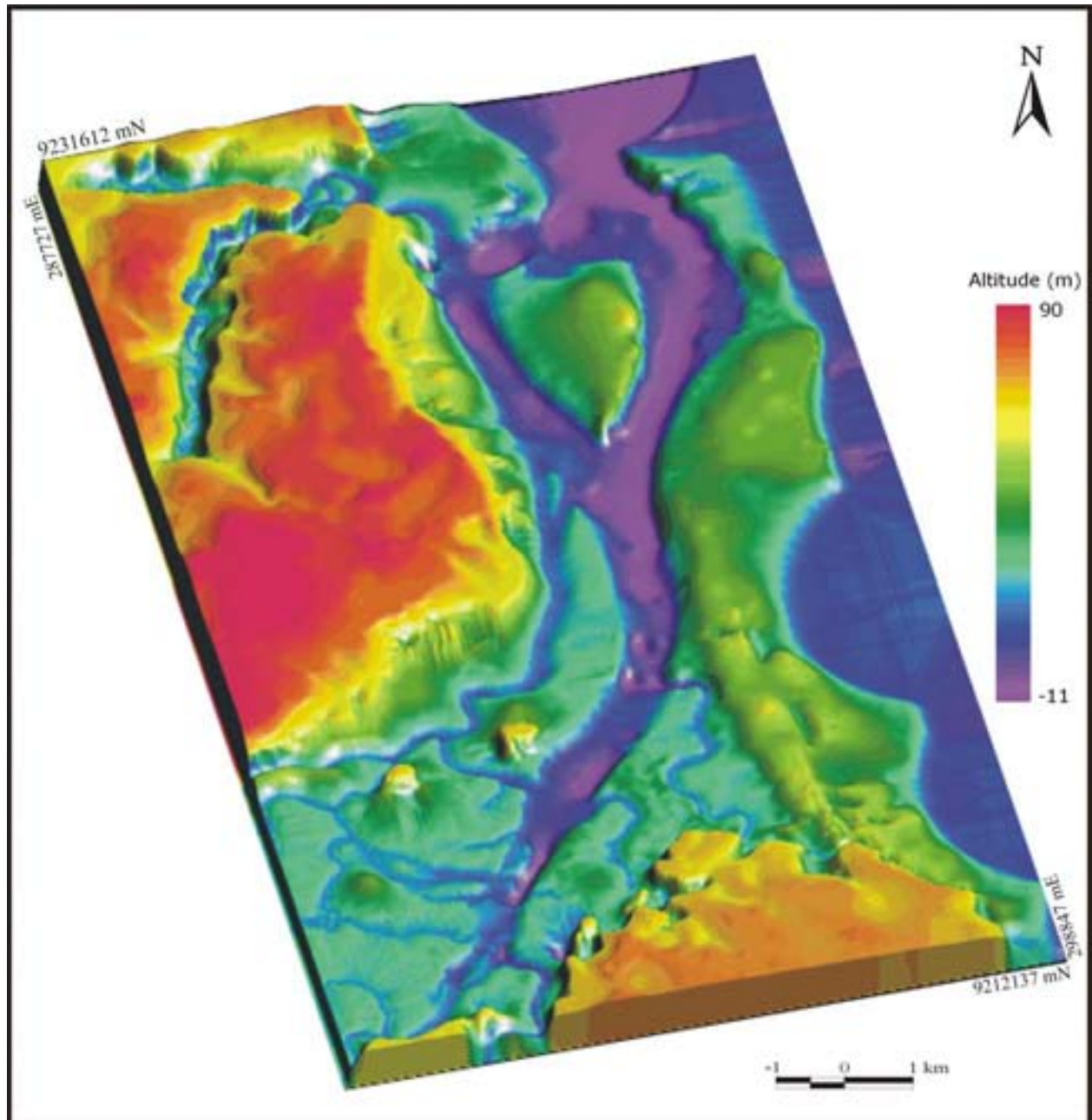


Figura 4.2 – Modelo Digital de Terreno do Estuário do Rio Paraíba do Norte observado de forma tridimensional (3D), com exagero vertical, realçando as grandes unidades geomorfológicas.

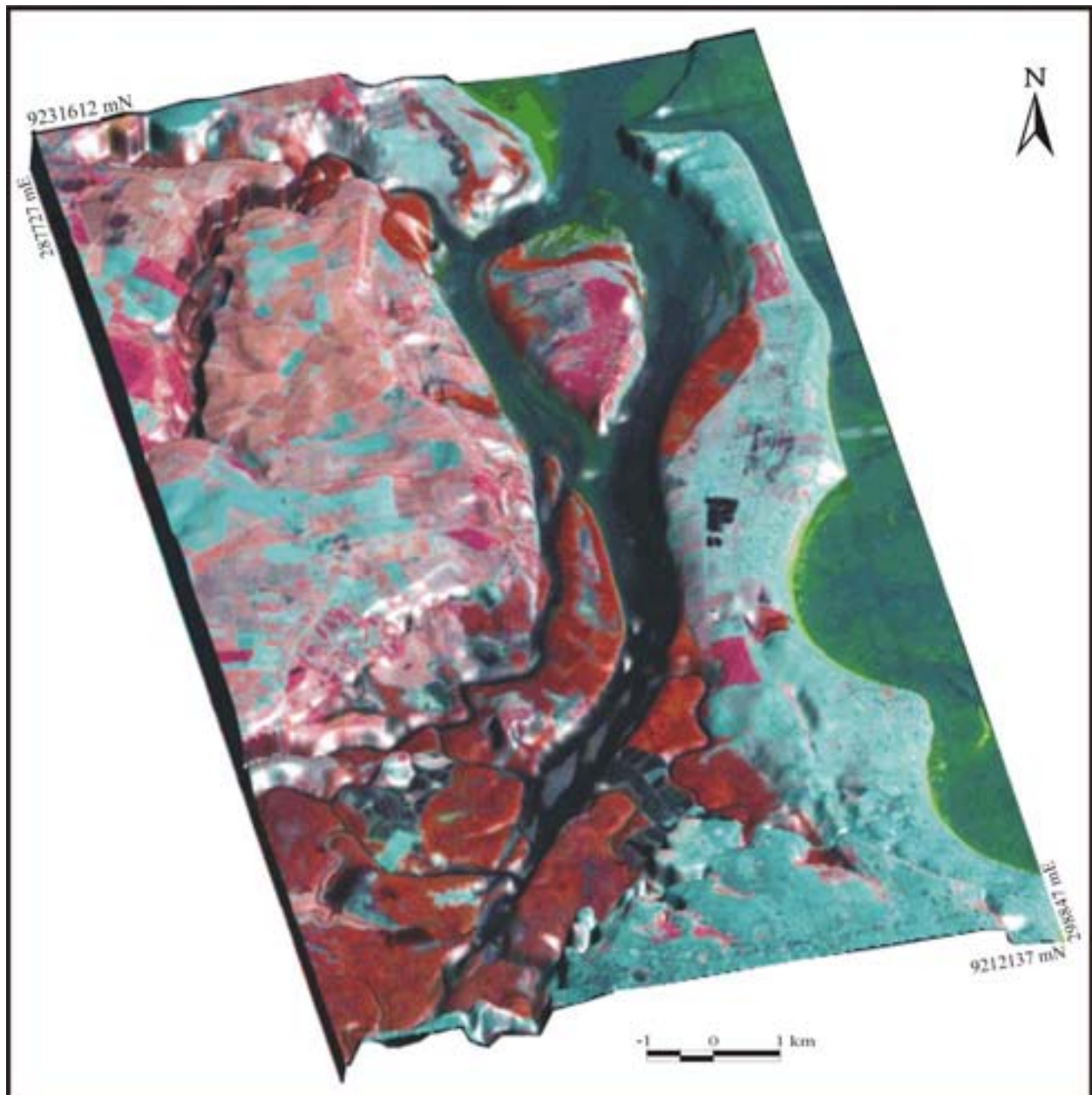


Figura 4.3 – Composição colorida das razões das bandas 5/7-3/1-5/4-PAN do Landsat 7 ETM+, combinadas em RGBI e sobreposta ao MDT, com exagero vertical, relacionando as unidades geoambientais presentes na área de estudo, realçadas na imagem de satélite, com os dados topográficos.

a) Tabuleiro Costeiro

Os tabuleiros costeiros fazem parte do grande conjunto morfo-estrutural que se estende por toda faixa litorânea do Nordeste Oriental e são representados por baixos planaltos sedimentares, formados pela acumulação de depósitos de origem continental, a partir da erosão do material desagregado da Borborema, em fases repetidas de resistasia. Constitui-se de terrenos sedimentares de idade terciária, pouco consolidados, de estratificação predominantemente horizontal, do tipo areno-siltico-argilosos, argilo-

arenosos, argilas de coloração variegada, intercaladas algumas vezes por camadas de seixos rolados e concreções lateríticas que repousam em discordância sobre rochas pré-cambrianas ou cretáceas, constituindo o chamado Grupo Barreiras (Carvalho 1982).

Esta unidade geomorfológica, que às vezes avança até o mar, dando origem a falésias, que recuam muito rapidamente em virtude da inconsistência do material argilo-arenoso da Formação Barreiras, encontra-se limitada a E pela baixada litorânea e a W pelo relevo colinoso (Leal e Sá 1998), que corresponde ao embasamento cristalino (Superfície das Chãs) conhecido também como Depressão Sub-litorânea (Carvalho 1982).

No ERP, os tabuleiros costeiros aparecem a W e S. Nestas áreas predominam os solos ferralíticos ou lateríticos (latossolos) originados a partir dos sedimentos argilosos terciários (Formação Barreiras). Apresentam uma superfície plana a suavemente ondulada (Figura 4.4), com altitudes que variam de 10 a 90 metros.

Originalmente sobre esta unidade geomorfológica desenvolveu-se a vegetação do tipo mata atlântica e o cerrado de tabuleiro, mas atualmente, na porção W, a cultura da cana-de-açúcar domina a paisagem local e na porção sul, trecho mais rebaixado, a vegetação natural foi substituída pela ocupação humana.



Figura 4.4. Visão panorâmica do Tabuleiro Costeiro (ao fundo) apresentando uma superfície plana a suavemente ondulada, constituindo-se hoje numa das principais áreas de cultivo de cana-de-açúcar. No primeiro plano tem-se a vegetação de mangue, que caracteriza a Planície de maré.

b) Planície Litorânea

Planícies litorâneas são superfícies relativamente planas, baixas, localizadas entre o mar e a escarpa dos depósitos sedimentares do Grupo Barreiras, e cuja formação

resultou da deposição de sedimentos marinhos e fluviais, apresentam uma largura variada, dependendo da sua localização regional (Guerra 1985).

Na área estuda, esta unidade geomorfológica é formada por terrenos sedimentares geralmente quaternários de baixa altitude (entre 0 e 10 metros), formados a partir de processos marinhos, flúvio-marinhos e eólicos (Carvalho 1982). Em alguns trechos, ela cede lugar ao baixo planalto costeiro que avança até o mar ou é interrompida pelos estuários, como o do Rio Paraíba do Norte.

Esta unidade foi dividida em seis subunidades: praia, planície de maré, planície praiial, dunas subaquosas, terraço fluvial e vertente.

b1) Praia

Segundo Guerra (1985), o termo praia designa *“depósitos de areias acumuladas pelos agentes de transporte fluviais ou marinho (...) que apresentam largura maior ou menor em função da maré”*. Para Suguio (1998) praia é a *“zona perimetral de um corpo aquoso, composta de material incolidado, em geral arenoso, que se estende desde o nível de baixa mar média para cima, até a linha de vegetação permanente, ou há mudanças na fisiografia, como as zonas de dunas ou falésias marinhas”*.

A Paraíba possui praias que são mais estreitas ao sul em função do avanço dos baixos planaltos costeiros e mais largas ao norte, onde os baixos planaltos costeiros estão mais afastados da linha de costa, caso das praias presentes na área pesquisada (Figura. 4.5). Esta unidade abrange toda a extremidade leste da área de estudo formando em alguns pontos pequenas enseadas em virtude da presença de arrecifes que impedem que as ondas incidam diretamente sobre a praia. A topografia é suavemente ondulada e é composta por areias quartzosas marinhas.



Figura 4.5 – Trecho da praia entre Manaíra e Bessa, local onde estão localizadas as praias mais largas do Estado.

b2) Planície de Maré

Denomina-se planície de maré superfícies planas ou suavemente onduladas que ocorrem nas desembocaduras de rios, margens de lagoas e partes baixas da orla marítima, sob influência das marés, onde a diminuição da corrente de água favorece a deposição de sedimentos. É composta por sedimentos finos de natureza argilo-siltosa e argilosa, em mistura com detritos orgânicos, ocorrendo também material mineral de natureza arenosa. Suguio (1998) define planície de maré como sendo uma área pantanosa ou lamacenta de baixo gradiente, coberta pelas águas das marés enchentes e descoberta durante as marés vazantes.

No Estado da Paraíba, as planícies de maré constituem os trechos terminais dos baixos vales dos rios que provêm do interior e que são talhados nas acumulações das rochas da Formação Barreiras. As mais expressivas correspondem às desembocaduras dos Rios Paraíba do Norte e Mamanguape (CEGET/CNRS/UFPB 1980)

Na área estudada, essa unidade geomorfológica está presente desde a desembocadura do Rio Paraíba do Norte até onde se faz presente a ação das marés salinas, cerca de 25 Km da foz, sendo caracterizada por solos predominantemente halomórficos com presença de vegetação de mangue e recortada por canais de maré suavemente curvalíneos. Apresenta uma topografia em torno de 1 a 2 metros de altitude.

b3) Planície Praial.

Planície praial é uma superfície formada pela acreção lateral de esporões arenosos sucessivos, depositados pelas correntes longitudinais ou correntes de deriva litorânea, ou por cristas de praias ou cristas arenosas formadas pela ação das ondas (Suguio 1998).

Na área estudada, estas planícies são resultantes da coalescência de cordões litorâneos, cuja origem está vinculada aos processos erosivos na Formação Barreiras e aos sedimentos derivados da plataforma associada às variações relativas do nível do mar durante o quaternário. Estas áreas apresentam superfícies irregulares com saliências (que correspondem às cristas dos cordões) e depressões ora alongadas, ora semicirculares, correspondentes às reentrâncias existentes entre os cordões litorâneos (Carvalho 1982). Nestas áreas predominam os sedimentos quaternários que se depositaram sobre as rochas cretáceas do Grupo Paraíba (calcários da Formação Gramame e arenitos da Formação Beberibe). Essa unidade geomorfológica foi identificada na porção oriental e norte. A primeira é a mais extensa, estendendo-se por cerca de 15 km desde Cabedelo até João Pessoa.

A altitude dessas planícies fica, em média, entre 3 e 8 metros, com áreas de depressões em níveis, no geral, de 2-3 metros. Algumas dessas depressões constituem lagoas com água armazenada na época de chuva que perdura por muito tempo, permitindo o desenvolvimento de peixes e crustáceos, como as encontradas nas planícies de Manaíra e Bessa, na porção oriental (Figura 3.14).

b4) Dunas Subaquosas

Segundo Ashley (1990) o termo duna subaquosa deve ser modificado de acordo com o tamanho, com base no espaçamento, em duna pequena (0.6-5m), média (5-10 m), grande (10-100 m) ou muito grande (> 100 m); ou de acordo com a descrição primária da forma em dunas bi-dimensionais (dunas 2D) e dunas tri-dimensionais (dunas 3D)

As dunas observadas nas imagens de satélite no estuário são de natureza arenosa e lamosa, com tamanho variando de médias a grandes e formas 3D. Estas ficam totalmente expostas no período de baixamar (Figura 4.6). As dunas arenosas se

apresentam em forma de ilhotas no meio do rio; já as de composição lamosa surgem na frente de algumas áreas de vegetação de mangue. Na porção sul do estuário, algumas dunas foram totalmente colonizadas pela vegetação de mangue, conforme relatado no Capítulo 3



Figura 4.6 – Dunas que afloram no meio do rio principal durante a maré baixa, evidenciando o processo de assoreamento do Rio Paraíba do Norte na sua porção estuarina.

b5) Terraço fluvial

Esta unidade corresponde a superfícies planas horizontais constituídas por depósito sedimentar. Sua altitude varia de 5 a 20 metros, chegando em alguns pontos, como na Ilha Tiriri, a alcançar 24 m. São constituídos por solos do tipo podzol hidromórfico, podendo desenvolver-se sobre este floresta perenifólia adaptada a tal ambiente. Na Ilha da Restinga, é possível observar uma vegetação desse tipo que se desenvolveu na porção mais alta (Figuras 4.7 e 3.13).

b6) Vertente

Chistofolletti (1980) define vertente, em seu sentido mais amplo, como superfície inclinada, não horizontal, sem apresentar qualquer conotação genética ou locacional.

Esta denominação foi dada as áreas de declive que se limitam, na porção superior com o tabuleiro costeiro, e na inferior com a planície de maré. Apresentam

relevo suavemente ondulado e solos do tipo podzólico vermelho amarelo distrófico, textura argilosa, fase concrecionária (Mapa Pedológico do Estado da Paraíba 1995). Na porção W, esta unidade geomorfológica é caracterizada pela presença de coqueiros em toda a sua extensão (Figura 4.8)



Figura 4.7 – Detalhe do terraço da Ilha da Restinga, mostrando a topografia elevada desta unidade, o que faz que esta não sofra ação direta das marés, permitindo, com isso, o desenvolvimento de espécies vegetais semelhantes a Mata Atlântica.

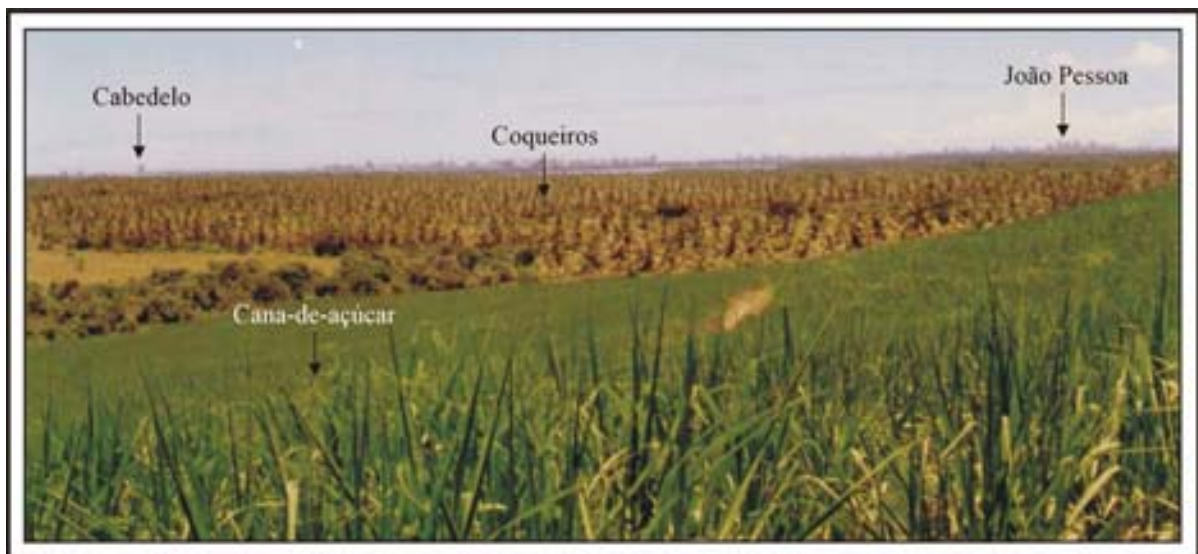


Figura 4.8 – Coqueiros cultivados entre o sopé do Tabuleiro Costeiro e a Planície de Maré, estendendo-se por toda a Vertente da porção W da área estudada. Ao fundo observam-se as cidades de Cabedelo e João Pessoa. No primeiro plano tem-se a cana-de-açúcar.

4.2. Caracterização da Morfologia de Fundo do Canal do Rio Paraíba do Norte por meio do Sonar de Varredura Lateral e do Ecobatímetro.

A caracterização da morfologia de fundo do canal do Rio Paraíba do Norte, na sua porção estuarina, foi realizada com o Sonar de Varredura Lateral e Ecobatímetro, sendo utilizadas também as imagens de satélites Landsat 7 ETM+ e Spot HRVIR-PAN como base para efeito de localização e destaque de algumas feições de fundo, realçadas após o tratamento destas por meio de técnicas de processamento digital de imagens.

O Sonar de Varredura Lateral tem sido muito utilizado no mapeamento da morfologia de fundo bem como na identificação dos vários tipos de sedimentos, a partir da intensidade da tonalidade do registro do sonograma. De acordo com Wewetzer *et al.* (1999), por meio da mudança no padrão da resposta do sonograma, pode se inferir tanto uma mudança no tipo de sedimento como no relevo. As várias intensidades de tonalidades do registro do sonograma resultam da força de reflectância do sinal e do ângulo de incidência das ondas acústicas, que dependem da densidade, porosidade e do tamanho dos grãos dos sedimentos presentes no fundo do rio. Em termos gerais, rochas aparecem escuras, seguido por cascalhos, sedimentos de grão fino a lamosos; a areia aparece na tonalidade mais clara.

Uma interpretação preliminar dos dados sonográficos, revelou uma variação na distribuição espacial dos sedimentos de fundo do rio Paraíba do Norte. Esta variação é observada nos registros do sonograma a partir das suaves diferenças de tonalidade. Dessa forma, foram coletadas vinte amostras de material de fundo, nos locais correspondentes as principais diferenças de tonalidades registradas. A partir da classificação textural das amostras, foi possível definir a correlação entre os dados do registro do sonar e o resultado da análise das amostras.

Na área estudada, a análise dos sonogramas e das amostras de fundo revela uma marcante ação da drenagem na distribuição dos sedimentos, sendo que, de uma maneira geral, observou-se um predomínio de areias (areia fina a muito fina) ao longo do rio (Figura 4.9), cuja deposição resultou da ação de correntes bidirecionais controladas pelas marés e vazões fluviais.

No canal do Velho Forte (à esquerda da Ilha da Restinga), identificou-se um fundo lamoso, conforme mostra o registro do sonograma (Figura 4.10). Na desembocadura do Rio Paraíba e a sudeste da Ilha do Stuart, as areias são mais grossas (areias médias a grossas); as principais formas de fundo observadas foram as dunas 2D pequenas a médias, predominando aquelas com largura de 5 m e altura de 0.5 m (Figura 4.11), características de ambiente dominado por regime de fluxo médio conforme a classificação de Ashley (1990). Sendo assim, a ampla variedade de formas de fundo reflete as várias condições hidrodinâmicas bem como os tipos de sedimentos.

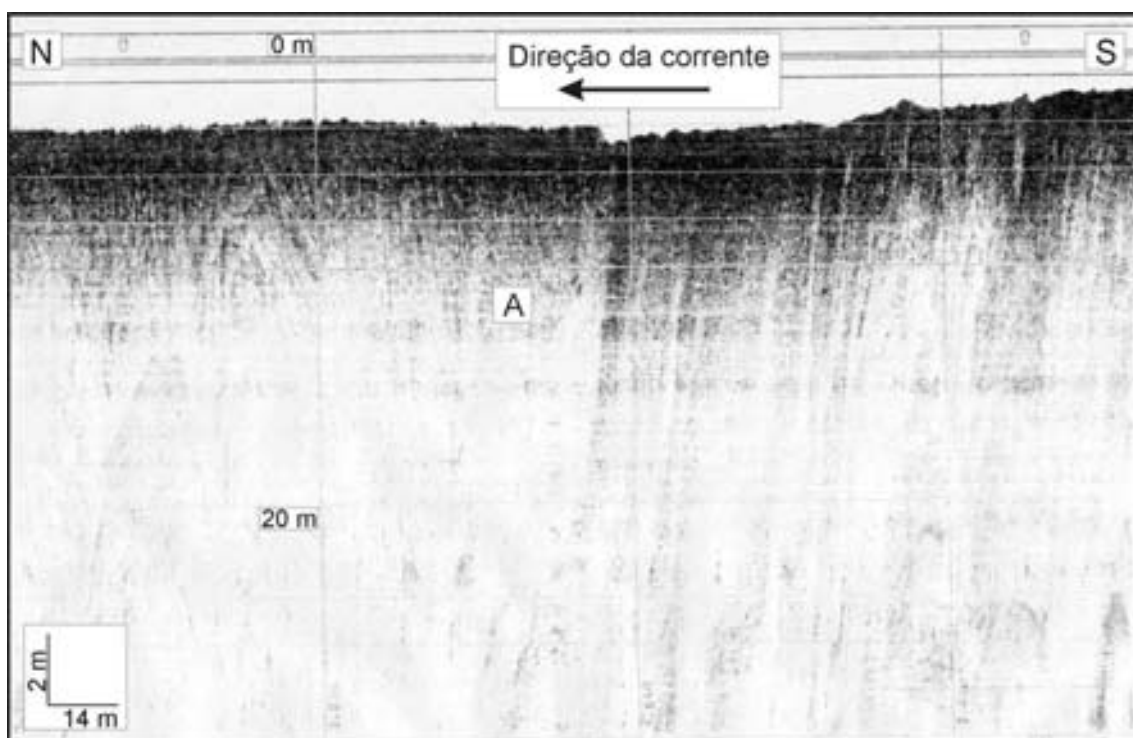


Figura 4.9 - Sonograma mostrando o tipo de sedimento. A – sedimentos arenosos de textura fina a muito fina.

Os dados de profundidade foram obtidos por meio do ecobatímetro em malha apropriada para a elaboração do mapa batimétrico do rio Paraíba do Norte na sua porção estuarina. Para tanto foram realizados perfis longitudinais (Figura 4.12) e transversais (Figura 4.13) ao longo de todo o canal. A partir dos perfis (Anexo 4) e do mapa batimétrico (Anexo 5), observou-se a existência de um canal preferencial, que se estende desde a desembocadura do Rio Sanhauá até as proximidades do Porto de Cabedelo, seguindo a margem direita do leito do Rio Paraíba. Este canal encontra-se obstruído em alguns locais pela presença de dunas subaquosas; as maiores profundidades são

observadas nas desembocaduras dos Rios Mandacaru e Tambiá, com 5 metros em média, e nas proximidades do Porto de Cabedelo, alcançando, em alguns pontos 11 m. Neste último, essa profundidade é alcançada devido as constantes dragagens realizadas na desembocadura do Rio Paraíba para tráfego de embarcações de grande porte. Na desembocadura do Rio da Guia foi observado um canal secundário, que pode ser visto na imagem de satélite Landsat 7 ETM+, apresentando profundidades em torno de 8 m.

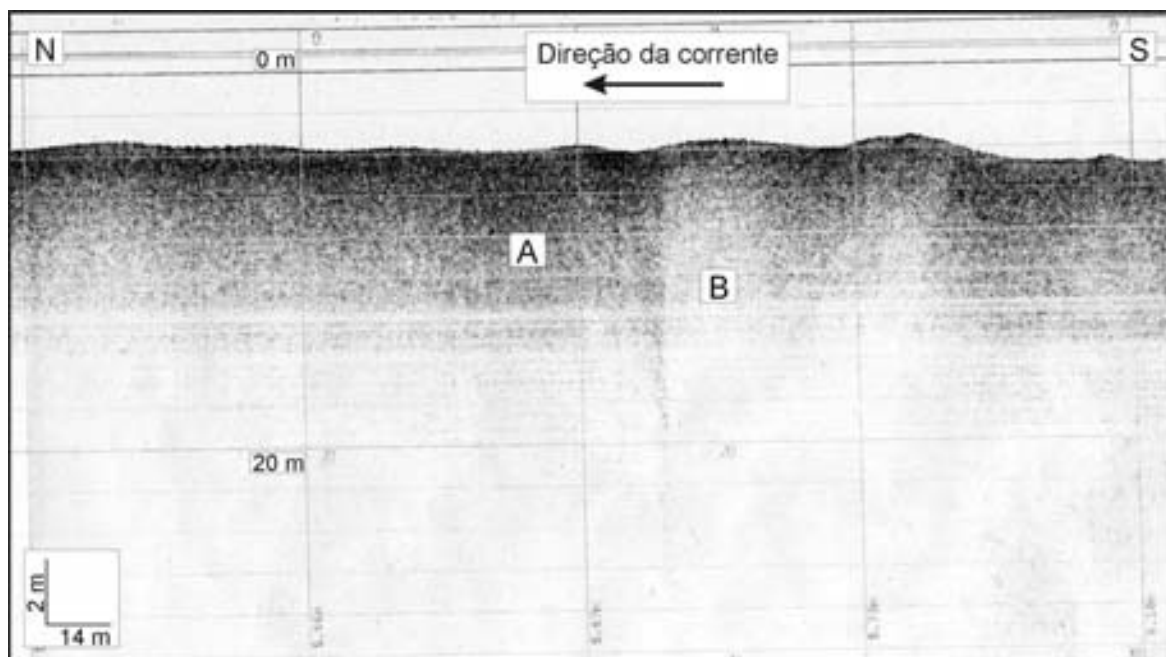


Figura 4.10 – Sonograma mostrando o tipo de sedimento. Sedimento de textura argilosa (A) passando a areia fina a muito fina (B).

Os dados batimétricos foram analisados conjuntamente com os dados dos sonogramas e as amostras de fundo, permitindo, com isso, uma analogia entre profundidade e material de fundo. Wewetzer *et al.*(1999), em um trabalho realizado no estuário do Rio Tay na Escócia, analisou os dados de sonogramas e de profundidade, onde observou que nem sempre uma mudança brusca na morfologia e no tipo de sedimento é registrada na variação batimétrica. No caso do ERP, observou-se que nos locais de menor energia, inferiores a dois metros, há um predomínio de material arenoso de textura fina a muito fina, enquanto que nos locais de maior energia predomina material arenoso de textura grossa, podendo estar misturado a material mais fino (areno-lamosa).

Os dados batimétricos revelam que, de uma maneira geral, o estuário é relativamente raso, principalmente na sua porção superior, evidenciados pela presença de

um grande número dunas subaquosas que ficam expostas durante a maré baixa. Estas dunas são evidências de que o estuário está em processo contínuo de assoreamento, podendo vir a comprometer o seu ecossistema.

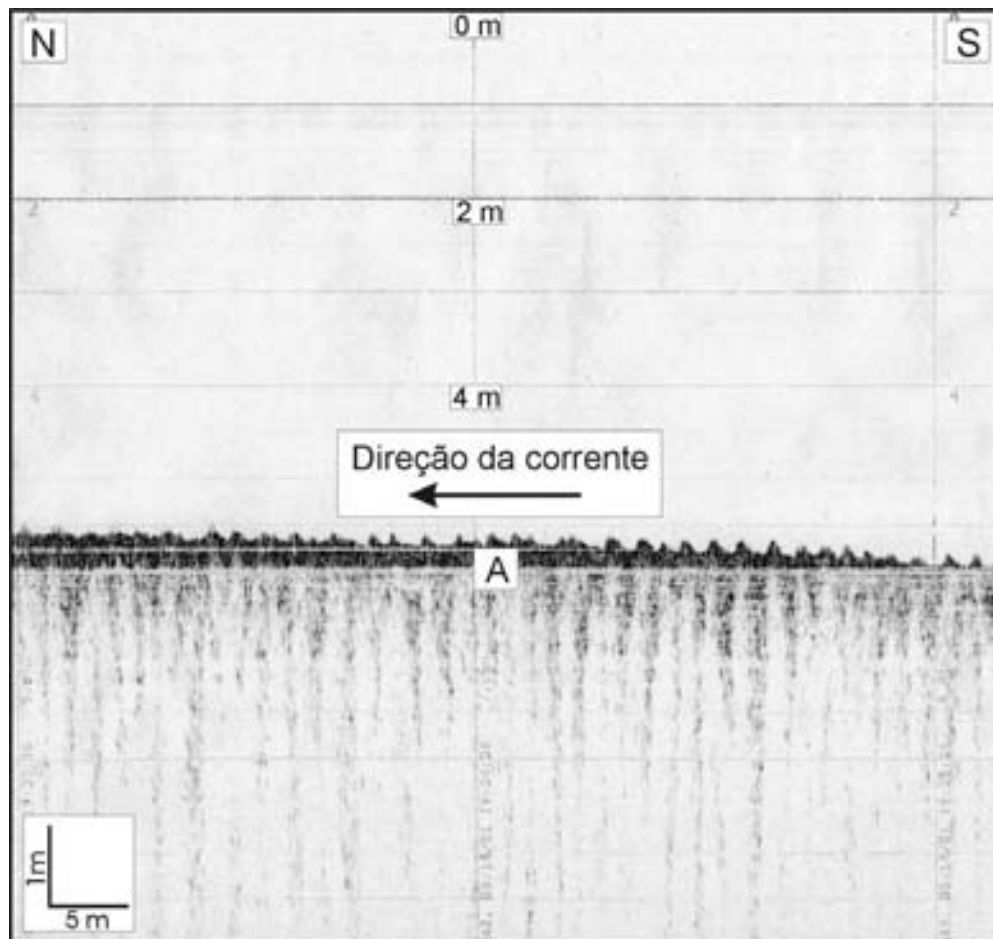


Figura 4.11 – Sonograma mostrando a morfologia do fundo. A – formas de fundo do tipo duna 2-D pequena a média, cristas retas, levemente assimétricas, indicando direção da corrente para Norte.

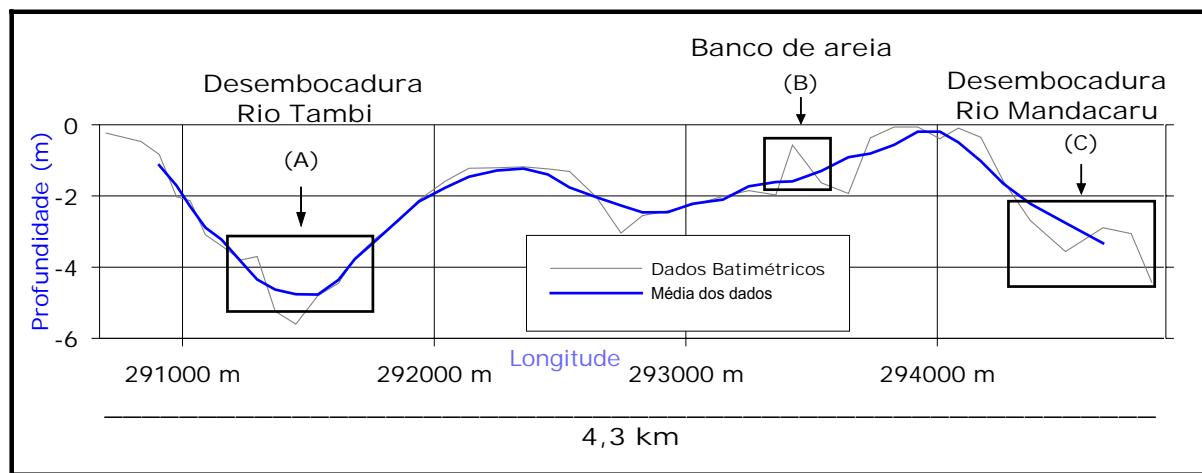


Figura 4.12 - Perfil longitudinal da porção do Rio Paraíba do Norte entre os Rios Mandacaru e Tambiá (direção N-S), mostrando os pontos de maior profundidade da margem direita do rio principal (exceto a porção do Porto de Cabedelo).

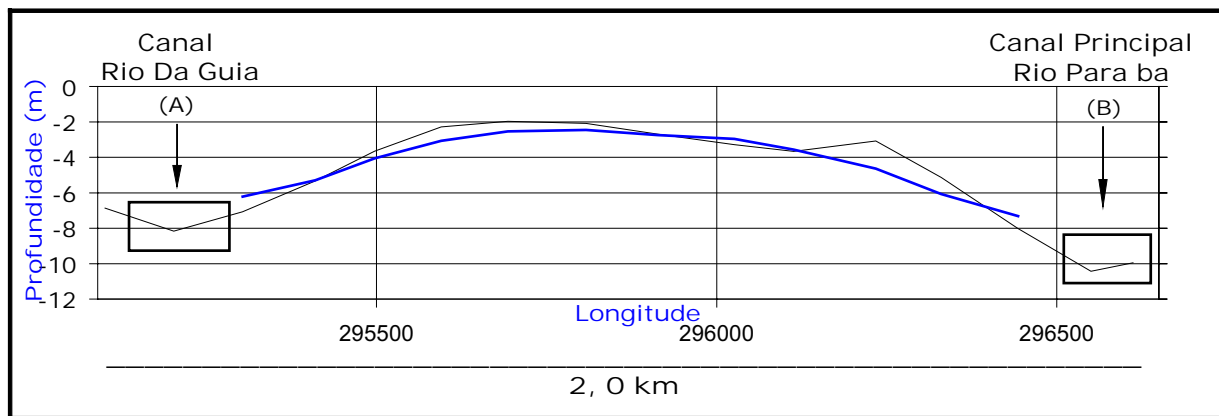


Figura 4.13 - Perfil transversal do Rio Paraíba do Norte (direção W-L) entre a foz do Rio Da Guia e o Porto de Cabedelo, mostrando o canal principal (a direita) e o canal formado na foz do Rio Da Guia (a esquerda).

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A integração de produtos multitemporais (mapas digitais e imagens de sensores remotos) utilizados como base no estudo multitemporal do Estuário do Rio Paraíba do Norte, mostraram-se eficientes na análise das modificações ocorridas neste ambiente nas últimas três décadas. Dentre os aspectos de maior importância, pode-se ressaltar:

- As cartas da SUDENE, utilizadas como base cartográfica na extração das informações de topografia, hidrografia e uso e ocupação do solo do ERP para o ano de 1969, foram de fundamental importância na realização deste trabalho, pois a escala de 1:25.000 que estas apresentam permitiu representar, com um bom grau de detalhe, os diferentes elementos naturais que compunham a paisagem do ERP naquele ano.
- As imagens de sensoriamento remoto orbital (Landsat 7 ETM+ e Spot HRVIR), analisadas individualmente ou em conjunto, constituíram-se no meio mais eficiente e economicamente viável para a caracterização geoambiental do ERP. A partir das técnicas de processamento digital aplicadas nestas imagens foi possível extrair as informações que viabilizaram a geração dos mapas temáticos atuais do ERP e que juntamente com os dados extraídos das cartas da SUDENE, possibilitaram o mapeamento e análise das modificações geambientais do ERP no período de 1969 a 2001. Dentre as técnicas de PDI, as composições coloridas das bandas 2,3,4,5 e 7 combinadas em tripletes simples ou em forma de razões no sistema de cores RGB foram as que apresentaram os melhores resultados no realce das unidades geambientais presentes na área de estudo.
- A técnica de fusão RGBI mostrou-se uma poderosa ferramenta de PDI na delimitação dos contatos das unidades que compõem os mapas de uso e ocupação e geomorfológico, devido ao aumento da resolução espacial que esta técnica permitiu comparada às imagens originais em RGB. Como

exemplo, pode-se citar a composição das razões de bandas do Landsat 7 ETM+ 5/7-3/1-5/4-Pan que se constitui num dos melhores produtos imagens utilizados neste trabalho.

- O MDT juntamente com as imagens de satélite Landsat 7 ETM+ e Spot HRVIR foram de fundamental importância no mapeamento geomorfológico do ERP. A partir da visualização do MDT de forma tridimensional foi possível delimitar as grandes unidades geomorfológicas (tabuleiro costeiro e planície litorânea). Com a sobreposição da imagem colorida das razões de bandas 5/7-3/1-5/4-Pan combinadas em RGBI ao MDT, foi possível observar as subunidades da planície litorânea, obtendo-se, com isso, um mapa geomorfológico mais detalhado do ERP.
- O sonar de varredura lateral (*side scan sonar*) e o ecobatímetro juntamente com coletas de sedimentos de fundo, possibilitaram uma análise do comportamento da morfologia de fundo do Rio Paraíba do Norte na sua porção estuarina, revelando feições típicas de um canal submetido há um regime de médio fluxo, possibilitando a formação de pequenas dunas e apresentando profundidades, em média, de 3 m, a exceção de pontos próximos ao Porto de Cabedelo que chegam a 11 m.

A partir da caracterização geoambiental e geológica-geofísica do ERP, observou-se que este passou por profundas modificações no decorrer das últimas três décadas, conseqüentes de uma forte influência de agentes sócios-econômicos, principalmente os relacionados com construção civil e obras para controle de erosão.

O crescimento desordenado dos centros urbanos que o circundam resultou em alterações no seu quadro natural. A vegetação natural foi praticamente substituída cedendo lugar aos empreendimentos urbanos e no tabuleiro costeiro à cultura de cana-de-açúcar. A construção de viveiros de camarão, é outro fato a ser destacado, pois ainda não se mensurou os danos que esta atividade possa estar trazendo ao estuário.

A construção do Porto de Cabedelo e posteriormente do molhe no extremo norte da Planície Praial provavelmente interferiu na morfodinâmica do estuário e seu entorno, evidenciadas principalmente na porção superior do canal principal e nas proximidades do porto. As obras de engenharia conhecidas como gabiões, evidencia os processos erosivos

na costa dos municípios de Cabedelo e Lucena causados, provavelmente, pela construção do molhe.

A interação destas obras de engenharia provavelmente gerou uma dinâmica peculiar carreando sedimentos para dentro do canal do ERP, resultando na formação de dunas subaquosas em frente a Ilha da Restinga e na porção mais interna, onde se concentram em maior número. Estes últimos se formaram paralelos às ilhas, sendo que em alguns casos se juntaram a estas e foram colonizados pela vegetação de mangue.

Para o planejamento de ações futuras, é inevitável pensar no agravamento das condições atuais, em particular as derivadas da continuidade do processo erosivo da costa, desmatamento da vegetação de mangue, aterros nas margens do estuário, lançamento de efluentes domésticos e industriais e especulação imobiliária. Por isso sugere-se que o Estuário do Rio Paraíba do Norte, como principal estuário do Estado da Paraíba, seja alvo de monitoramentos periódicos não só da sua porção estuarina, mas também do seu entorno, pois ações antrópicas devem ser planejadas de modo a não interferirem nas modificações sazonais do fluxo estuarino.