



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

***“CARTOGRAFIA TEMPORAL E ANÁLISE GEOAMBIENTAL DA
DINÂMICA DA FOZ DO RIO PIRANHAS-AÇU, REGIÃO DE
MACAU-RN, COM BASE EM IMAGENS LANDSAT 5-TM”***

Autor:

ADRIANO DE LIMA ALVES

Orientador:

Prof. Dr. *Venerando Eustáquio Amaro* (DG-UFRN)

Co-orientadora:

Prof^a. Dra. *Helenice Vital* (DG-UFRN)

Dissertação n^o 24/ PPGG

Natal - RN, abril de 2001



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“CARTOGRAFIA TEMPORAL E ANÁLISE GEOAMBIENTAL DA DINÂMICA DA FOZ DO RIO PIRANHAS-AÇU, REGIÃO DE MACAU-RN, COM BASE EM IMAGENS LANDSAT 5-TM”

Autor:

ADRIANO DE LIMA ALVES

*Dissertação de Mestrado apresentada
em 25 de abril de 2001, 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)

Prof^ª. Dra. HELENICE VITAL (Co-orientadora)

Prof^ª. Dra. LÚCIA MARIA MAFRA VALENÇA (DGEO/UFPE)

Prof. Dr. CARLOS AUGUSTO RAMOS E SILVA (DOL/UFRN)

Natal - RN, abril de 2001

RESUMO

Este trabalho trata da aplicação dos dados das imagens digitais do Landsat 5-TM, dos períodos de 02/08/1989 e 22/09/1998, na cartografia temporal e análise geoambiental da dinâmica da Foz do Rio Piranhas-Açu, na região de Macau-RN. Essas imagens, após serem submetidas a diversas técnicas de processamento digital (composição colorida em RGB, razão entre bandas, análise por principais componentes, métodos de índices, entre outros) proporcionaram a geração de diversos produtos imagem e de mapas multitemporais da morfodinâmica costeira da área de estudo. Por meio dos produtos imagem foi possível realizar a identificação e caracterização dos principais elementos de interesse contidos na superfície da área estudada (vegetação, solo, geologia e água), associando as características espectrais destes àquelas apresentadas nos produtos imagem resultantes dos processamentos digitais. Desta forma foi possível definir os diferentes tipos de solos: Amd, AQd6, SK1 e LVe4; agrupamentos de vegetação: caatinga arbustiva-arbórea aberta, caatinga arbustiva-arbórea fechada, caatinga arbórea fechada, vegetação de mangue, vegetação de dunas e áreas constituídas predominantemente por juremas; unidades geológicas: unidades quaternárias – sedimentos quartzo-arenosos de praias, restingas, pisos de dunas, ilha barreira, dunas móveis, dunas fixas, aluviões, planícies de maré e de inundação, fácies arenosa da Formação Potengi - ; unidades terciário-quaternárias – Formação Barreiras agrupada às fácies argilosas dos sedimentos terciários da Formação Potengi, sedimentos da Formação Tibau agrupados aos basaltos e diabásios terciários da Formação Macau - ; unidade cretácea – Formação Jandaíra; além de identificar o limite terra/mar, áreas submersas rasas e sedimentos em suspensão. Os mapas multitemporais da morfodinâmica costeira permitiram a identificação e uma avaliação semi-quantitativa das regiões que foram submetidas a processos erosivos e construtivos nessa última década. Essa avaliação semi-quantitativa associada a caracterização geoambiental da área estudada, representam, desta forma, importantes dados para elaboração de medidas que possam minimizar os possíveis/prováveis impactos a serem causados com a implantação do Pólo Gás-Sal e para o monitoramento das áreas de exploração das indústrias do petróleo e do sal.

ABSTRACT

This work embraces the application of Landsat 5-TM digital images, comprising August 2 1989 and September 22 1998, for temporal mapping and geoenvironmental analysis of the dynamic of Piranhas-Açu river mouth, situated in the Macau (RN) region. After treatment using several digital processing techniques (e.g. colour composition in RGB, ratio of bands, principal component analysis, index methods, among others), it was possible to generate several image products and multitemporal maps of the coastal morphodynamics of the studied area. Using the image products it was possible the identification and characterization of the principal elements of interest (vegetation, soil, geology and water) in the surface of the studied area, associating the spectral characteristics of these elements to that presented by the image products resulting of the digital processing. Thus, it was possible to define different types of soils: Amd, AQd6, SK1 and LVe4; vegetation grouping: open arboreal-shrubby caatinga, closed arboreal-shrubby caatinga, closed arboreal caatinga, mangrove vegetation, dune vegetation and areas predominately constituted by juremas; geological units: quaternary units – beach sediments, sand banks, dune flats, barrier island, mobile dunes, fixed dunes, alluvium, tidal and inundation flats, and sandy facies of the Potengi Formation; tertiary-quaternary units – Barreiras Formation grouped to the clayey facies of the Potengi Formation, Macau Formation grouped to the sediments of the Tibau Formation; Cretaceous units – Jandaíra Formation; moreover it was to identify the sea/land limit, shallow submersed areas and suspended sediments. The multitemporal maps of the coastal morphodynamics allowed the identification and a semi-quantitative evolution of regions which were submitted to erosive and constructive processes in the last decade. This semi-quantitative evolution in association with an geoenvironmental characterization of the studied area are important data to the elaboration of actions that may minimize the possible/probable impacts caused by the implantation of the Polo Gas/Sal and to the monitoring of areas explored by the petroleum and salt industries.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro pela orientação e discussões acadêmicas durante todas as etapas de realização deste trabalho.

À Prof^a. Dr. Helenice Vital pela co-orientação, objetividade e constante estímulo durante todo o período de desenvolvimento desta dissertação.

À Agencia Nacional de Petróleo (ANP) pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de mestrado.

Ao DFG através do Projeto “*Kusten Entwicklung u nd Dynamiknan die Rio Grande do Norte-NE Brasilien*” pelo suporte financeiro referente à etapa de campo de reconhecimento regional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG/UFRN), por todo o apoio logístico.

À Vladimir Medeiros pelas discussões durante a fase de pré-processamento e processamento digital das imagens e pela amizade.

Aos amigos Francisco Oliveira, Flávia Taone, Flávia Milene, Zuleide, Werner, Josibel, Luciano Formiga e Fátima Barbosa, pela agradável convivência e pelos momentos de alegria e de descontração.

Aos colegas Michael e Patrícia Rose pelo auxílio na impressão de figuras e imagens finais.

Aos meus pais, por todo o apoio e incentivo durante estes dois anos de trabalho.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÃO INICIAIS	1
1.1 – Introdução	1
1.1.1 – Apresentação.....	1
1.1.2 – Objetivos.....	2
1.2 – Descrição da Área Estudada	2
1.2.1 – Localização da Área.....	2
1.2.2 – Aspectos Fisiográficos da Área.....	2
1.2.2.1 – <i>Clima, Hidrografia e Relevo</i>	4
1.2.2.2 – <i>Vegetação</i>	6
1.2.2.3 – <i>Solos</i>	8
1.3 – Contexto Geológico	11
1.3.1 – Introdução.....	11
1.3.2 – Litoestratigrafia da Bacia Potiguar.....	12
1.3.3 – Modelos Evolutivos da Bacia Potiguar.....	18
1.3.3.1 – <i>A Evolução Mesozóica</i>	18
1.3.3.2 – <i>A Evolução Cenozóica</i>	20
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 – Introdução	25
2.2 – Histórico do Sensoriamento Remoto nas Faixas Espectrais do Visível e Infravermelho	25
2.3 – Alguns Aspectos de Sensoriamento Remoto por Sistemas Óticos	26
CAPÍTULO 3 – ASPECTOS METODOLÓGICOS	31
3.1 – Introdução	31
3.2 – Seleção do Material Bibliográfico e Cartográfico	32
3.3 – Pré-processamento das Imagens	33
3.4 – Processamento Digital de Imagens	34
3.5 – Etapas de Campo	35
3.6 – Integração dos Dados e Confecção das Cartas Temáticas Finais	36

CAPÍTULO 4 – PROCESSAMENTO DIGITAL E INTEGRAÇÃO TEMPORAL DE IMAGENS LANDSAT 5-TM NO MONITORAMENTO GEOAMBIENTAL APLICADO À ZONA COSTEIRA DE MACAU/RN.....	37
4.1 – Introdução	37
4.2 – Trabalhos Prévios de Aplicação do Sensoriamento Remoto à Pesquisa e Monitoramento em Zonas Costeiras	38
4.3 – Composições Coloridas e Combinações de Bandas VISIR em RGB.....	43
4.4 – Feições Geomorfológicas Costeiras.....	58
ARTIGO – <i>MULTITEMPORAL ANALISYS OF MULTISPECTRAL LANDSAT 5-THEMATIC MAPPER IMAGES FOR MONITORING AND AVALIATION OF COASTAL MORPHODYNAMIC ON THE NORTHEASTERN COAST OF BRAZIL.....</i>	65
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização geográfica da área de trabalho.....	3
Figura 1.2 – Linhas de fluxo atmosférico das dunas da faixa costeira do Estado do Rio Grande do Norte.....	5
Figura 1.3 – Mapa de vegetação da área de trabalho.....	7
Figura 1.4 – Mapa de solos da área de trabalho.....	9
Figura 1.5 – Mapa de localização e arcabouço estrutural da Bacia Potiguar.....	11
Figura 1.6 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar.....	13
Figura 1.7 – Coluna crono-litoestratigráfica da Bacia Potiguar.....	15
Figura 1.8 – Mapa geológico da área de estudo.....	17
Figura 1.9 – Evolução da separação dos continentes Sul-Americano e Africano.....	19
Figura 1.10 – Modelo para discordância pós-Jandaíra.....	20
Figura 2.1 – Curvas de comportamento espectral de alvos.....	29
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia adotada.....	32
Figura 4.1 – Imagens da composição colorida das bandas 4-3-2 do Landsat 5-TM combinadas em RGB.....	45
Figura 4.2 – Imagens da composição colorida das bandas 4-5-3 do Landsat 5-TM combinadas em RGB.....	46
Figura 4.3 – Imagens da composição colorida das bandas 1-4-5 do Landsat 5-TM combinadas em RGB.....	50
Figura 4.4 – Área de detalhe da Figura 4.3B mostrando salinização do Rio Amargoso.....	51
Figura 4.5 – Área de detalhe da Figura 4.3B mostrando salinização das áreas alcançadas pelas gamboas.....	51
Figura 4.6 – Área de detalhe da Figura 4.3B mostrando salinização da Lagoa Salgada e Lagoa Doce.....	51

Figura 4.7 – Imagens da composição colorida das bandas 4 e 3 do Landsat 5-TM com o NDWI, combinados em RGB, respectivamente.....	52
Figura 4.8 – Imagens da composição colorida das bandas 7 e 2 do Landsat 5-TM com o NDVI, combinados em RGB, respectivamente.....	53
Figura 4.9 – Imagens da composição colorida das principais componentes PC1-PC2-PC3 das seis bandas do VISIR do Landsat 5-TM (bandas 1-5 e 7), combinadas em RGB.....	56
Figura 4.10 – Imagens da composição colorida das razões de bandas 7/4-5/3-4/3 Do Landsat 5-TM, combinadas em RGB.....	57

LISTA DE FOTOS

Foto 4.1 – Salinas em atividade na região da Foz do Rio Piranhas-Açu.....	46
Foto 4.2 – Área com sedimentos aluvionares do Rio Piranhas-Açu mostrando predominância de vegetação de jurema.....	46
Foto 4.3 – Afloramento de calcário da Formação Jandaíra localizados às margens do Rio Amargoso.....	54
Foto 4.4 – Extremidade W da Península de Macau.....	59
Foto 4.5 – Visão frontal do extremo W da Península de Macau mostrando linhas de acreção indicando crescimento para W.....	60
Foto 4.6 – Visão longitudinal da Península do Macau.....	60
Foto 4.7 – Extremidade W do esporão arenoso da Península do Madeiro.....	61
Foto 4.8 – Extremidade W do esporão arenoso da Ponta do Tubarão e extremidade E da ilha barreira da Ponta do Tubarão.....	61
Foto 4.9 – Planície de maré com desenvolvimento de sedimentos lamosos e vegetação de mangue.....	63
Foto 4.10 – Dunas costeiras (móveis), adjacentes à Cidade de Barreira, migrando para W.....	63
Foto 4.11 – Estrutura em barcana indicando direção e sentido preferencial dos ventos.....	64
Foto 4.12 - Dunas costeiras (móveis), adjacentes à Cidade de Diogo Lopes migrando para W.....	64

C
A
P
Í
T
U
L
O
1

Capítulo 1

CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

1.1 – INTRODUÇÃO

1.1.1 – Apresentação

A região onde está inserida a área deste trabalho possui riquezas naturais como petróleo, sal, gás natural e calcário. Devido a estas riquezas, o Governo do Estado do Rio Grande do Norte elaborou um megaprojeto, denominado Pólo Gás-Sal, o qual deverá ser brevemente implantado. Um grande complexo industrial deverá ser instalado nesta região, onde a implantação de uma fábrica de barrilha e uma termelétrica são as âncoras deste megaprojeto.

Num paralelo com outras regiões do país, onde atividades industriais deste porte foram implantadas, é de se esperar que ocorram agressões ao meio ambiente, principalmente naqueles elementos mais vulneráveis, como reservatórios de águas subterrânea e manguezais, representando este último um importante ecossistema responsável pela reprodução e manutenção da vida de diversos organismos marinhos.

A relevância social e econômica deste megaprojeto, como fonte de geração de empregos e incremento na arrecadação fiscal do Estado, faz com que o monitoramento geoambiental torne-se bastante importante no sentido de avaliar a dinâmica ambiental ocorrida no período entre 02/08/1989 e 22/09/1998 e, de analisar tendências futuras de sua evolução. Desta forma, a utilização de produtos de sensoriamento remoto para confecção de cartas temáticas multitemporais, por meio de técnicas de processamento digital de imagens e integração de dados, é de fundamental importância, pois com a composição destas cartas será possível mensurar qualitativamente e semi-quantitativamente a dinâmica do meio ambiente na última década e assim fazer-se uma projeção de sua evolução natural, possibilitando, então, a elaboração de medidas que possam minimizar os possíveis/prováveis impactos a serem causados com a implantação do Polo Gás-Sal.

1.1.2 – Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal uma avaliação da dinâmica ambiental da região costeira adjacente à foz do Rio Piranhas-Açu no período entre 02/08/1989 e 22/09/1998, por meio de monitoramento geoambiental, utilizando imagens digitais do satélite Landsat 5-TM e técnicas de processamento digital de imagens. Estas geotecnologias permitem uma avaliação mais precisa das medidas a serem adotadas para minimizar os possíveis impactos gerados durante e após a implantação do Pólo Gás-Sal, na região costeira adjacente à foz do Rio Piranhas-Açu.

Para alcançar estes objetivos, pretende-se a confecção de cartas temáticas multitemporais comparativas sobre a morfologia costeira e geração de imagens para caracterização da vegetação, solos e geologia da área em apreço, combinadas à base geológica obtida em levantamentos episódicos de campo, como base para elaboração futura de modelos geoambientais.

1.2 – DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A seguir serão abordados os seguintes aspectos relacionados à área estudada: localização e aspectos fisiográficos.

1.2.1 – Localização da Área

A área objeto deste trabalho situa-se na porção setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, sendo limitado pelas coordenadas 9424455 – 9442415 mN e 749665 – 788785 mE (UTM), com dimensão aproximada de 702 km², a qual inclui parcialmente os municípios de Macau e Guamaré, sendo Macau a cidade mais importante, a qual dista de Natal/RN, por via rodoviária, cerca de 190km, através da BR 406 (Figura 1.1).

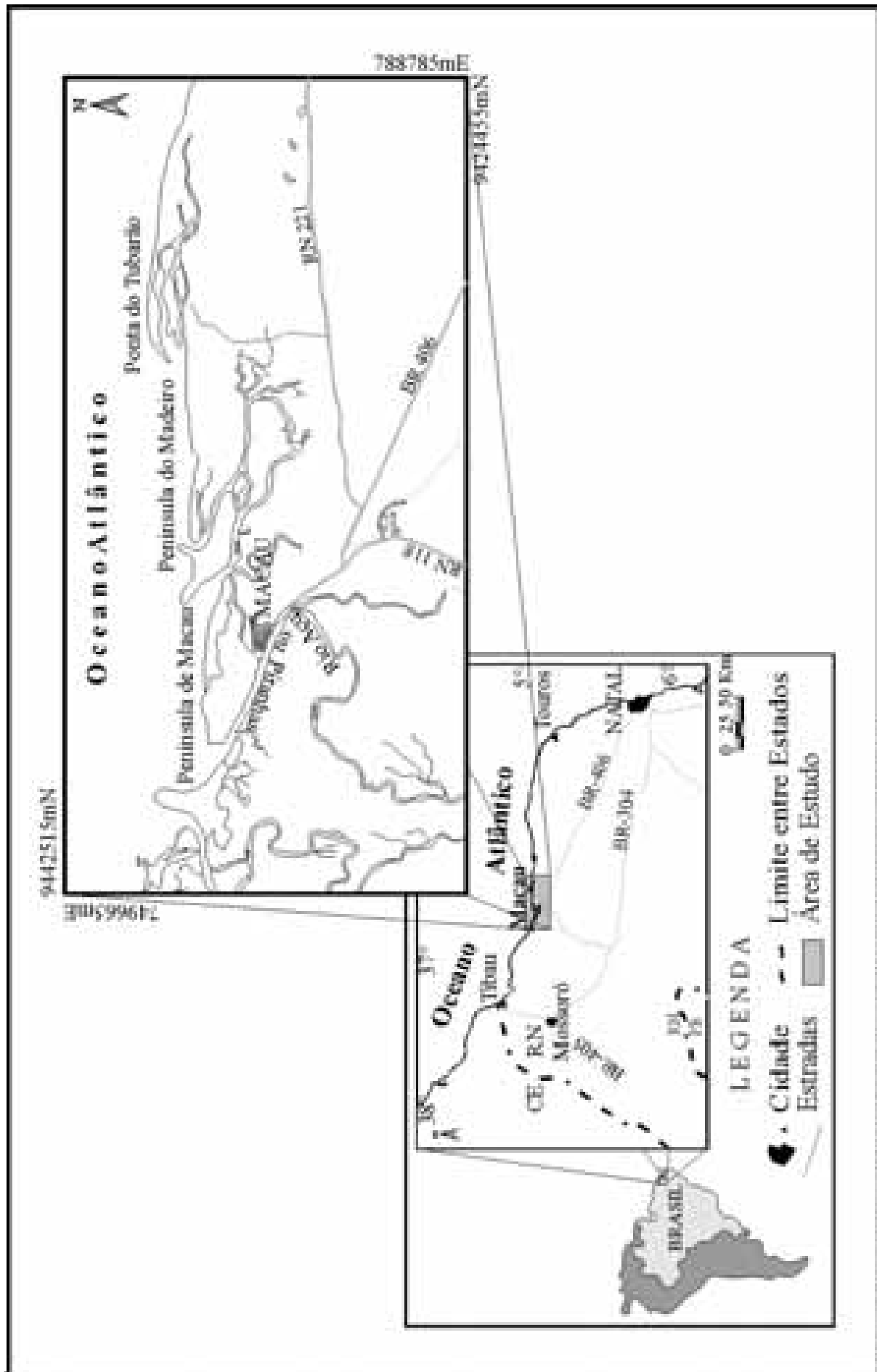


Figura 1.1 - Mapa de localização geográfica da área de trabalho.

1.2.2 – Aspectos Fisiográficos da Área

1.2.2.1 – *Clima, Hidrografia e Relevo*

Nesta região o clima é o semi-árido quente (clima tropical equatorial, segundo Nimer 1989) com estações secas de 7 a 8 meses de duração (junho a janeiro), e uma estação chuvosa de fevereiro a maio (período úmido), com um período super úmido (precipitação superior à 100 mm) de março a meados de maio. De acordo com Silva (1991), a precipitação pluviométrica anual é inferior a 750 mm. Os meses mais frios, com temperatura média de cerca de 24°C ocorrem entre junho e julho, sendo novembro o mês que melhor caracteriza a estação quente, com temperaturas máximas ultrapassando 40°C. A umidade relativa do ar pode sofrer uma variação anual de 20%, ficando sua média em torno de 68%.

No litoral norte do Estado do Rio Grande do Norte os ventos sopram predominantemente de E-NE, como atestado por Fortes (1987) ao mapear a orientação das areias de dunas eólicas na região litorânea do Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1.2). Neste trabalho, o referido autor destaca a tendência de orientação E-NE das dunas no segmento E-W da linha de costa W do Cabo do Calcanhar em 35° W. Nas fotografias aéreas e imagens de satélite, as dunas da área de estudo têm orientação NE-SW, com migração para SW. A velocidade dos ventos, medida na Estação Meteorológica de Macau (NATRONTEC/ECOPLAM 1995. Fonte: DNMET) no período de 1961 e 1990, é maior durante do verão, com máximo de 8,5 m/s para o mês de outubro, e menor durante o inverno, com mínimo de 0,7 m/s para o mês de abril. Medições locais realizadas por Tabosa (2000) ao longo da Praia de São Bento do Norte-RN, durante o mês de novembro de 1999, mostraram uma velocidade média de 6,9 m/s, provenientes, sobretudo, de E.

A região de Macau é caracterizada por possuir um dos maiores estuários do litoral do Rio Grande do Norte denominado Estuário do Rio Piranhas-Açu. Um outro pequeno estuário ocorre à leste da Cidade de Macau, constituído pelos “rios” da Casqueira e Conceição, cuja contribuição proveniente do continente é feita por drenagens ativas apenas durante o período chuvoso e, com vazões reduzidas. Os “rios” da Casqueira e Conceição constituem canais sujeitos integralmente à ação das marés. Segundo Miranda (1983), as marés controlam a hidrografia, sendo a variação máxima entre a preamar e a

baixamar de 330 cm e a mínima de 90 cm. Silva (1991), reporta dados das marés observadas na Estação Pontal do Alagamar, localizada em Macau (Marinha do Brasil/DHN). As marés são do tipo semidiurnas, mostrando desigualdade diária (*daily inequality*). O nível de maré médio é de 133,1 cm, com nível médio de maré alta de sizígia (*mean-spring-high-tidal level*) de 284,55 cm e a amplitude de maré de quadratura (*neap-tidal amplitude*) de 127,79 cm. Estas características de maré permitem classificá-lo no regime de mesomaré de Hayes (1979, *apud* Silva 1991).

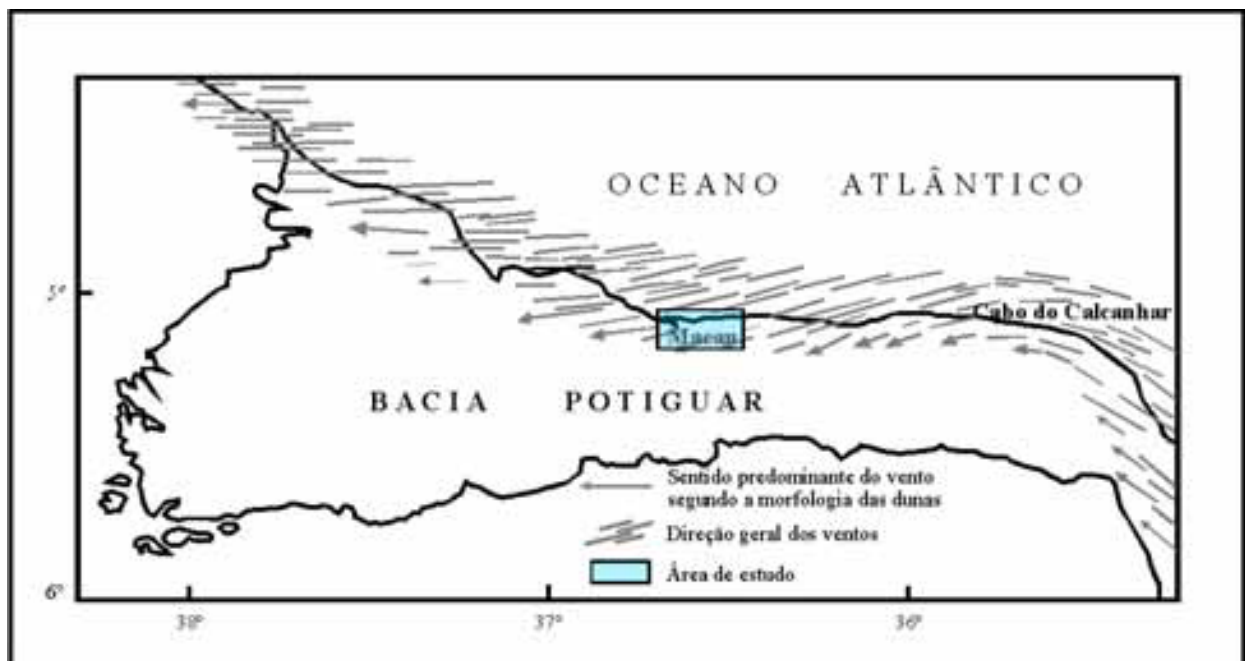


Figura 1.2 - Linhas de fluxo atmosférico ao nível das dunas na faixa costeira do Estado do Rio Grande do Norte. Compilado de Costa Neto (1997).

As ondas aproximam-se da costa vindas da mesma direção dos ventos dominantes (E-NE), conforme observado em imagens de satélite e fotografias aéreas da área estudada. Medições de ondas, realizadas por meio de observação visual, na região de Galinhos e São Bento do Norte, desde de novembro de 1999, mostraram variações de altura entre 0,2m a 0,5m (Lima, Z.M. 2001, comunicação pessoal).

As correntes marinhas na área formam-se em resposta à orientação E-W da linha de costa e o trem de ondas vindas de NE-E, que desenvolvem uma importante corrente de deriva litorânea (*longshore drifte*), que flui para W. Segundo Costa Neto (1997), a direção predominante desta corrente é observada na orientação E-W e a migração para W dos pontais arenosos (*spits*) costeiros e canais de maré (*tidal creeks*). Segundo Farias (1997), no passado o Rio Piranhas-Açu provavelmente desembocava na foz do pequeno estuário dos rios da Conceição e Casqueira e, devido à dinâmica fluvial e das correntes marinhas, tenha infletido para noroeste, assumindo sua forma atual.

No aspecto geomorfológico, a região costeira é produto da sua evolução geológica (diversas transgressões e regressões) associada à ação da natureza (clima, marés, ventos, ação das ondas e correntes marinhas) e do homem, representando estes últimos, importantes agentes modeladores do relevo (Farias 1997). A área deste trabalho está representada por diversos compartimentos de relevo denominados superfícies de tabuleiro costeiro, vertentes, terraços fluviomarinhas, terraços estuarinos, planície de inundação estuarina, restinga e dunas recentes e subrecentes (NATRONTEC 1998).

1.2.2.2 – *Vegetação*

A área deste trabalho, de acordo com o IBAMA (1992), é caracterizada, basicamente, por dois tipos principais de vegetação definidos como vegetação litorânea e vegetação de caatinga.

A vegetação litorânea, que ocupa a parte norte da área e sofre influência marinha, engloba, principalmente, vegetação de mangue e de dunas fixas e a vegetação de caatinga, que caracteriza regiões semi-áridas, envolve aquelas classificadas como arbustiva-arbórea aberta, arbustiva-arbórea fechada e arbórea fechada (Figura 1.3).

O tipo caatinga arbustivo-arbórea aberta é caracterizado por possuir porte médio de 3 m de altura, baixo índice de cobertura do solo e a quase ausência de sub-bosque.

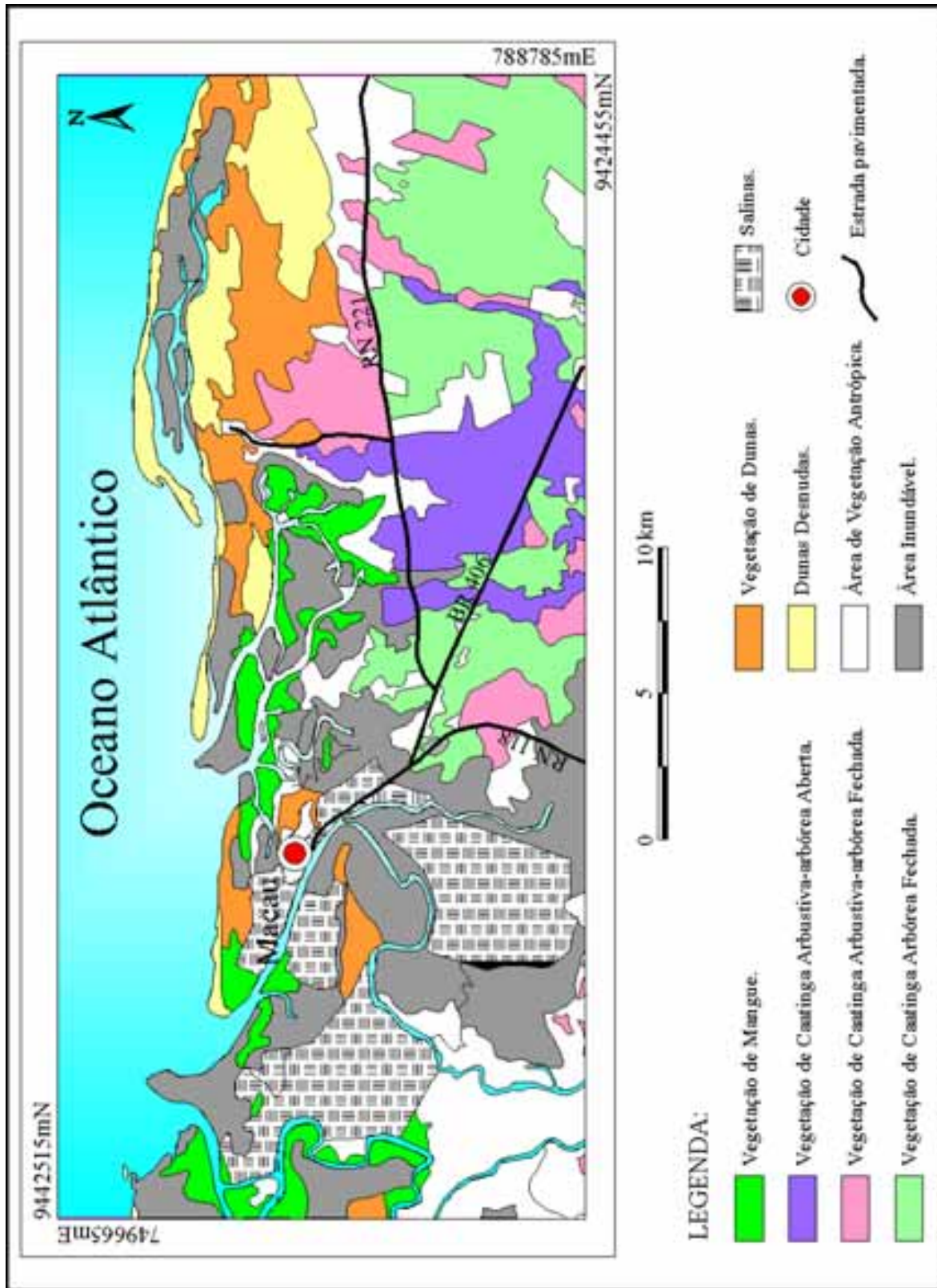


Figura 1.3 - Mapa de vegetação da área de estudo, extraído do Levantamento de Vegetação Lenhosa do Estado do Rio Grande do Norte - Projeto PNUD/FAO/IBAMA/87/007 (1992).

Ocorre nos locais onde os solos são rasos, pedregosos e quase sempre com afloramentos rochosos. A vegetação do tipo caatinga arbustivo-arbórea fechada caracteriza-se por possuir porte médio de 3 a 4 m de altura, com alto grau de cobertura do solo. A caatinga do tipo arbórea fechada apresenta um porte de 4 a 5 m de altura, com árvores emergentes em número significativo, com alto grau de cobertura do solo e presença de sub-bosque.

1.2.2.3 – Solos

A área é caracterizada por quatro diferentes tipos e associações de solos (SUDENE 1971), como pode ser observado na Figura 1.4. A descrição mineralógica dos solos refere-se apenas à porção mais superficial dos mesmos.

O tipo **SKI**, caracterizado por apresentar crostas superficiais de sais cristalinos nos períodos de seca, é encontrado em áreas baixas (várzeas) do litoral norte, influenciado pelas águas do mar onde as altitudes predominantes atingem 2 e 3 metros ou pouco mais. São derivados de sedimentos desde argilosos até arenosos não consolidados do Holoceno. A cobertura vegetal é representada pelas formações halófilas, havendo grandes áreas desprovidas de vegetação em função da salinidade, conhecidas como “deserto salino”. Poucas são as espécies presentes, denotando a presença mais constante do perrexiu ou pirixiu, brêdo e nas partes de níveis mais altos, encontram-se, por vezes, carnaubeiras, juncos e quebra-panels.

O tipo **AMd** corresponde às areias quartzosas de origem marinha depositadas pela ação dos ventos, compreendendo não só as dunas fixas, com vegetação, que apresentam horizonte A muito pouco desenvolvido, como também as dunas móveis, sem desenvolvimento de horizontes. Nas dunas fixas a vegetação é arbustiva ou arbóreo-arbustiva, constituindo moitas densas, normalmente com cajueiros. Formações baixas e rasteiras, com plantas esparsas são também encontradas. As dunas móveis são desprovidas de vegetação.

O tipo **AQd6** é composto pela associação de três diferentes tipos de solos caracterizados a seguir:

- *Areias Quartzosas Distróficas fase caatinga hiperxerófila relevo plano:*
solos derivados de sedimentos areno-quartzosos do Grupo Barreiras,

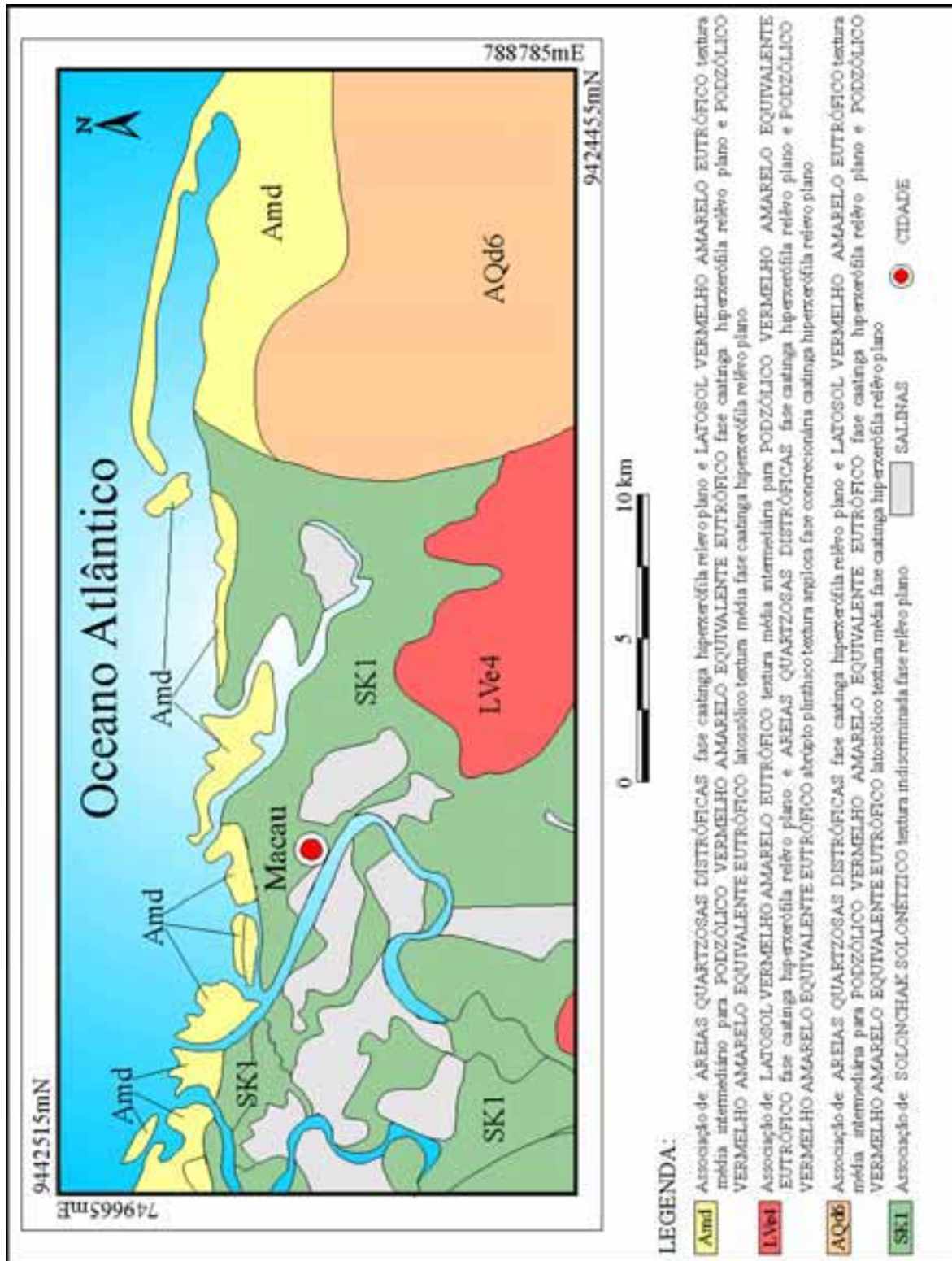


Figura 1.4 - Mapa de solos da área de estudo, extraído do Mapa Exploratório - Reconhecimento de Solos do Rio Grande do Norte (SUDENE 1968).

apresentando cobertura vegetal de caatinga hiperxerófila arbustiva ou arbórea-arbustiva densa ou pouco densa, destacando-se as seguintes espécies: angico, jurema, marmeleiro, mufumbo e facheiro. São constituídos por areias quartzosas, cascalhos e concreções ferruginosas (goetita).

- *Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico textura média intermediária para Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico fase caatinga hiperxerófila relevo plano*: solos desenvolvidos a partir de sedimentos arenosos e areno-argilosos do Grupo Barreiras, com cobertura vegetal de caatinga hiperxerófila arbustiva densa. Constituídos por areias e cascalhos quartzosos, geralmente com aderência argilo-ferruginosa.
- *Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico latossólico textura média fase caatinga hiperxerófila relevo plano*: solos predominantemente arenosos originados a partir do Grupo Barreiras, com provável influência de calcário do Cretáceo. Possui vegetação composta por caatinga hiperxerófila densa com muita jurema e marmeleiro. É constituída principalmente por areias e cascalhos quartzosos.

O tipo *LVe4*, assim como o AQd6, é composto pela associação de três tipos de solos caracterizados a seguir:

- *Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico textura média intermediária para Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico fase caatinga hiperxerófila relevo plano*: (idem ao que ocorre em AQd6).
- *Areias Quartzosas Distróficas fase caatinga hiperxerófila relevo plano*: (idem ao que ocorre em AQd6).
- *Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico abrupto plínthico textura argilosa fase concrecionária caatinga hiperxerófila relevo plano*: solos originados dos sedimentos argilo-arenosos do Grupo Barreiras, sendo constituídos de areias quartzosas com aderência ferruginosa esparsa e cascalhos com aderência de manganês, além de concreções ferruginosas (goetita). A cobertura vegetal é formada pela caatinga hiperxerófila, com

predomínio de marmeleiro, apresentando ainda substrato de gramíneas esparsas.

1.3 – CONTEXTO GEOLÓGICO

1.3.1 – Introdução

A Bacia Potiguar, onde está inserida a área deste trabalho, está implantada na Província Borborema, de Almeida *et al.* (1977), e situa-se aproximadamente entre 35° e 38° de longitude oeste e 03°45' e 05°45' de latitude sul, limitando-se a noroeste pelo Alto Estrutural de Fortaleza, a oeste e a sul pelas rochas do embasamento cristalino e a norte, a nordeste e a leste pela cota batimétrica de -200 m (Figura 1.5). Abrange uma área total de 48.000 km², dos quais 21.500 km² encontram-se submersos e 26.500 km² estão distribuídos entre as cidades de Natal e Fortaleza, englobando, respectivamente, as porções norte e nordeste dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará.



Figura 1.5 - Mapa de localização e arcabouço estrutural da Bacia Potiguar. Compilado de Bertani *et al.* (1990).

Estruturalmente, a Bacia Potiguar apresenta uma configuração geométrica constituída por um conjunto de grábens assimétricos de direção NE-SW, denominados Umbuzeiro, Guamaré, Boa Vista e Apodi (Bertani *et al.* 1987; Cremonine *et al.* 1996, entre outros). Estes grábens são separados por altos internos do embasamento cristalino, denominados Quixaba, Serra do Carmo e Macau (Figura 1.5).

1.3.2 – Litoestratigrafia da Bacia Potiguar

A exemplo das bacias marginais do Recôncavo, Tucano, Jatobá e Sergipe-Alagoas, a Bacia Potiguar é resultante dos esforços decorrentes da formação do Oceano Atlântico. Esse processo teve início no Mesozóico, com a reativação e/ou superimposição de descontinuidades pré-existentes por uma série de fraturamentos durante a ruptura do Gondwana, no Neocomiano (Matos 1987). Segundo Lima Neto (1994), esta bacia registra os processos que culminaram com a separação da América do Sul e África, e conseqüentemente formação do Oceano Atlântico na sua porção equatorial. Desta forma, o registro meso-cenozóico está representado pelos terrenos sedimentares da Bacia Potiguar.

Segundo Farias (1997), a Bacia Potiguar apresenta vários estágios tectônicos e deposicionais na sua história, que podemos dividir em quatro megasseqüências e grupos de seqüências principais com suas sedimentações correlatas: Megasseqüência Mesozóica Rift (Formação Pendências), Grupo de Seqüências Mesozóicas Transicionais (formações Pescada e Alagamar), Grupo de Seqüências Mesozóicas Fluvio marinhas Transgressivas (formações Açú, Ponta do Mel, Ubarana e Jandaíra) e Grupo de Seqüências Mesozóicas Fluvio marinhas Regressivas (formações Guamaré, Tibau e Barreiras) (Farias 1997). Completando este último grupo de seqüências estão os sedimentos Quaternários, subdivididos por Silva e Nogueira (1995) em Seqüência Quaternária Sub-recente e Seqüência Quaternária Recente (Figura 1.6). A Seqüência Quaternária Sub-recente engloba as unidades que já completaram o seu processo de sedimentação, encontrando-se ou não litificadas (Formação Potengi; Beach Rock; Areias de Dunas Fixas, Cascalheiras e Colúvios), enquanto que a Seqüência Quaternária Recente é uma unidade composta por

sedimentos que participam dos processos deposicionais atuantes nos dias atuais (leques aluviais, sedimentos de praia recente, dunas móveis, aluviões e manguezais).

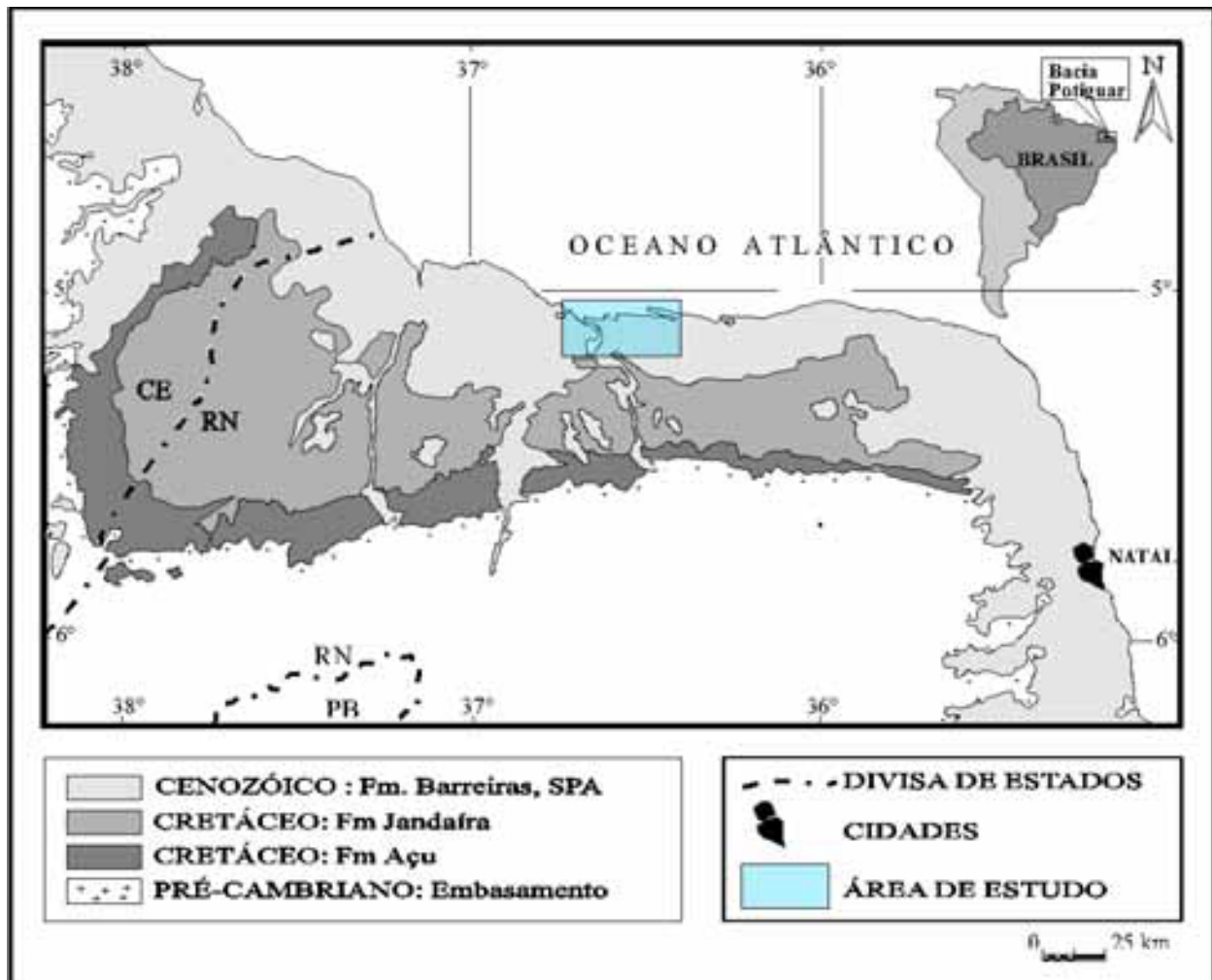


Figura 1.6 - Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar. SPA, sedimentos de praias e aluviões. Compilado de Dantas (1998).

Para a caracterização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar, foi utilizada, neste trabalho, a subdivisão adotada por Araripe e Feijó (1994), que organizaram os litotipos da Bacia Potiguar segundo três unidades principais, ordenadas da base para o topo como: Grupo Areia Branca, Grupo Apodi e Grupo Agulha (Figura 1.7).

O Grupo Areia Branca constitui a sucessão basal da Bacia Potiguar, de caráter eminentemente clástico continental, e inclui as formações Pendências, Pescada e Alagamar. A Formação Pendências (Souza 1982) é constituída por arenitos médios a

grossos, com intercalações de folhelhos e siltitos, dispostos em discordância angular com o embasamento cristalino. A Formação Pescada (Teixeira 1990; Fonseca 1992), constituída por arenitos médios e finos com intercalações de folhelhos e siltitos, repousa discordantemente sobre a Formação Pendências. A Formação Alagamar (Souza 1982), que possui contato inferior discordante com as formações Pescada e Pendências, ou sobre o embasamento cristalino, é composta por dois membros (Upanema e Galinhos) separados por uma seção pelítica, informalmente denominada Camadas Ponta do Tubarão. O Membro Upanema (basal) caracteriza-se por arenitos fino a grosso e folhelho esverdeado. As Camadas Ponta do Tubarão são formadas por calcarenitos, calcilutitos e folhelhos. O Membro Galinhos é predominantemente pelítico, com folhelhos e calcilutitos.

O Grupo Apodi engloba as formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra. A Formação Açú é constituída por arenitos médios a muito grossos, intercalados com siltitos e argilitos, possuindo contato inferior discordante com a Formação Alagamar e lateralmente interdigita-se com as formações Ponta do Mel e Quebradas. A Formação Ponta do Mel (Tibana & Terra 1981) é composta por calcarenitos com intercalações de folhelhos. A Formação Quebradas (Souza 1982; Araripe e Feijó 1994), que está posicionada entre as formações Ponta do Mel (inferior) e Jandaíra (superior), é subdividida em dois membros: o Membro Redonda, formado por intercalações de arenitos, folhelhos e siltitos, enquanto que o Membro Porto do Mangue é representado por folhelhos e, subordinadamente, arenitos. A Formação Jandaíra (Sampaio & Schaller, 1968), composta basicamente por calcarenitos bioclásticos e calcilutitos, possui contato inferior concordante com a Formação Açú ou Formação Quebradas e, localmente, interdigita-se com a parte inferior da Formação Ubarana. Esta última unidade, na área de trabalho, foi constatada por Farias (1997) em um ponto, no sopé da falésia basáltica, na área de Macauzinho, onde mostra-se bastante recristalizada (Figura 1.8).

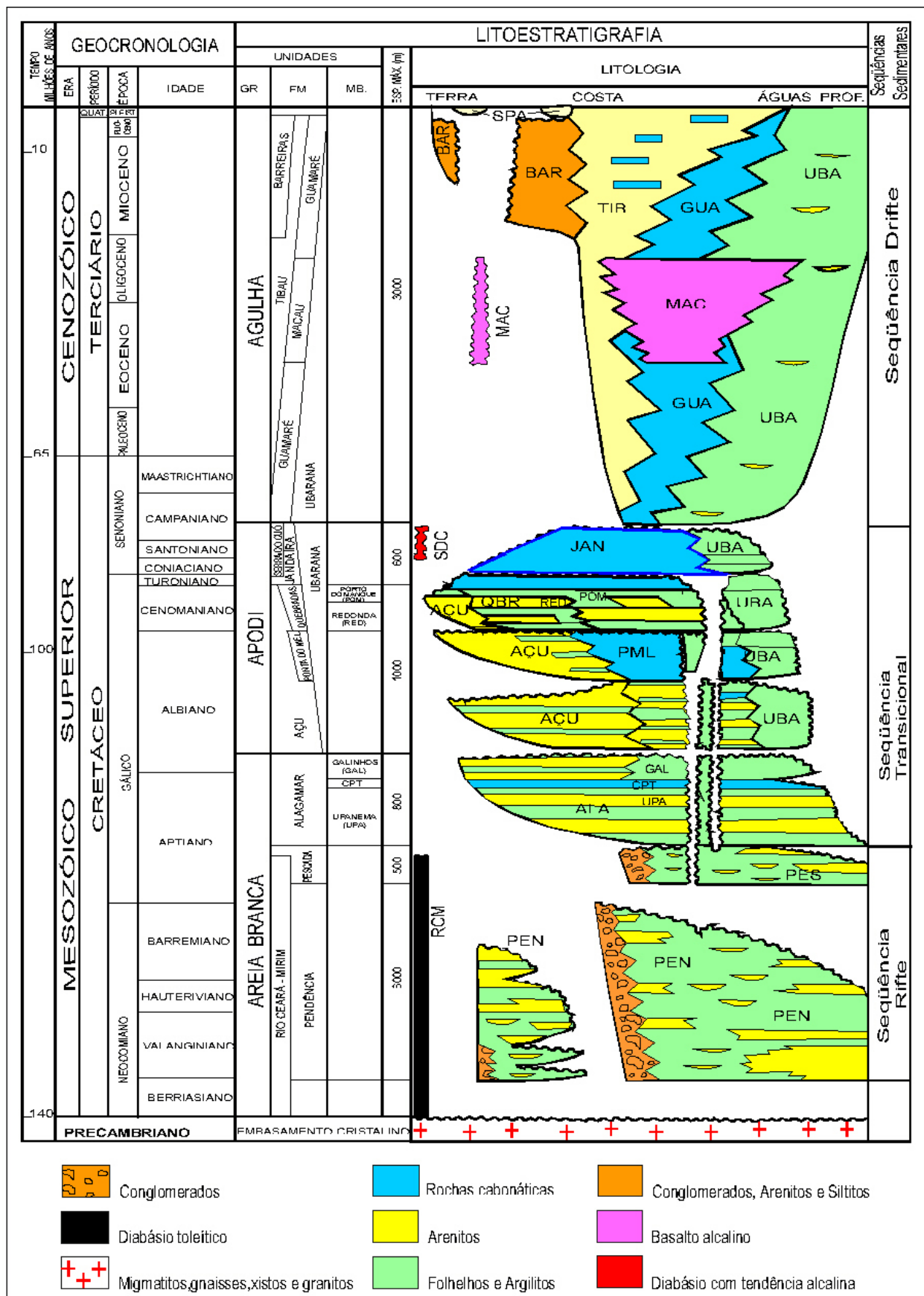


Figura 1.7 - Coluna crono-litoestratigráfica da Bacia Potiguar (Araripe & Feijó 1994).

O Grupo Agulha envolve as formações Ubarana, Guamaré e Tibau, formadas por rochas sedimentares clásticas depositadas sob ambiente de alta e baixa energia. A Formação Ubarana (Mayer 1974) é constituída por folhelhos e argilitos, entremeados por camadas delgadas de arenitos, siltitos e folhelhos, e estão geralmente interdigitadas, em direção ao continente, com rochas do Grupo Apodi e as da Formação Guamaré. A formação Guamaré (Souza 1982) constitui uma sequência carbonática interposta lateralmente aos pelitos Ubarana e aos arenitos Tibau. A Formação Tibau (Silva 1966) é composta por arenitos calcíferos grossos, que podem interdigitarem-se lateralmente com as rochas das formações Guamaré e Barreiras. Na área deste trabalho, segundo Farias (1997), a Formação Tibau ocorre na porção centro sul onde encontra-se, topograficamente, sobreposta aos basaltos e diabásios que compõem a Formação Macau, sendo que localmente mostra-se intrusionada e/ou intercalada por estas rochas vulcânicas.

Três eventos magmáticos estão associados aos processos de formação da Bacia Potiguar e suas sedimentações correlatas, desde o Jurássico até o Terciário (Araripe & Feijó 1994): magmatismo Rio Ceará Mirim (Souza 1982), de idade entre 120 e 140 milhões de anos; magmatismo Serra do Cuó (Mizusak 1993 *apud* Araripe & Feijó 1994), de idade da ordem de 84 milhões de anos; magmatismo Macau (Mizusak 1987 *apud* Araripe & Feijó 1994), datados em 29 a 45 Ma. As rochas do magmatismo Macau ou Formação Macau, que se mostram em sua maior parte intensamente alteradas, ocorre, segundo Farias (1997), na porção centro sul da área deste trabalho, aflorando na meia encosta das falésias que delimitam a salina Cirne, passando pela vila residencial da Alcanorte e terminando na Estação Coletora de Óleo de Conceição (Figura 1.8).

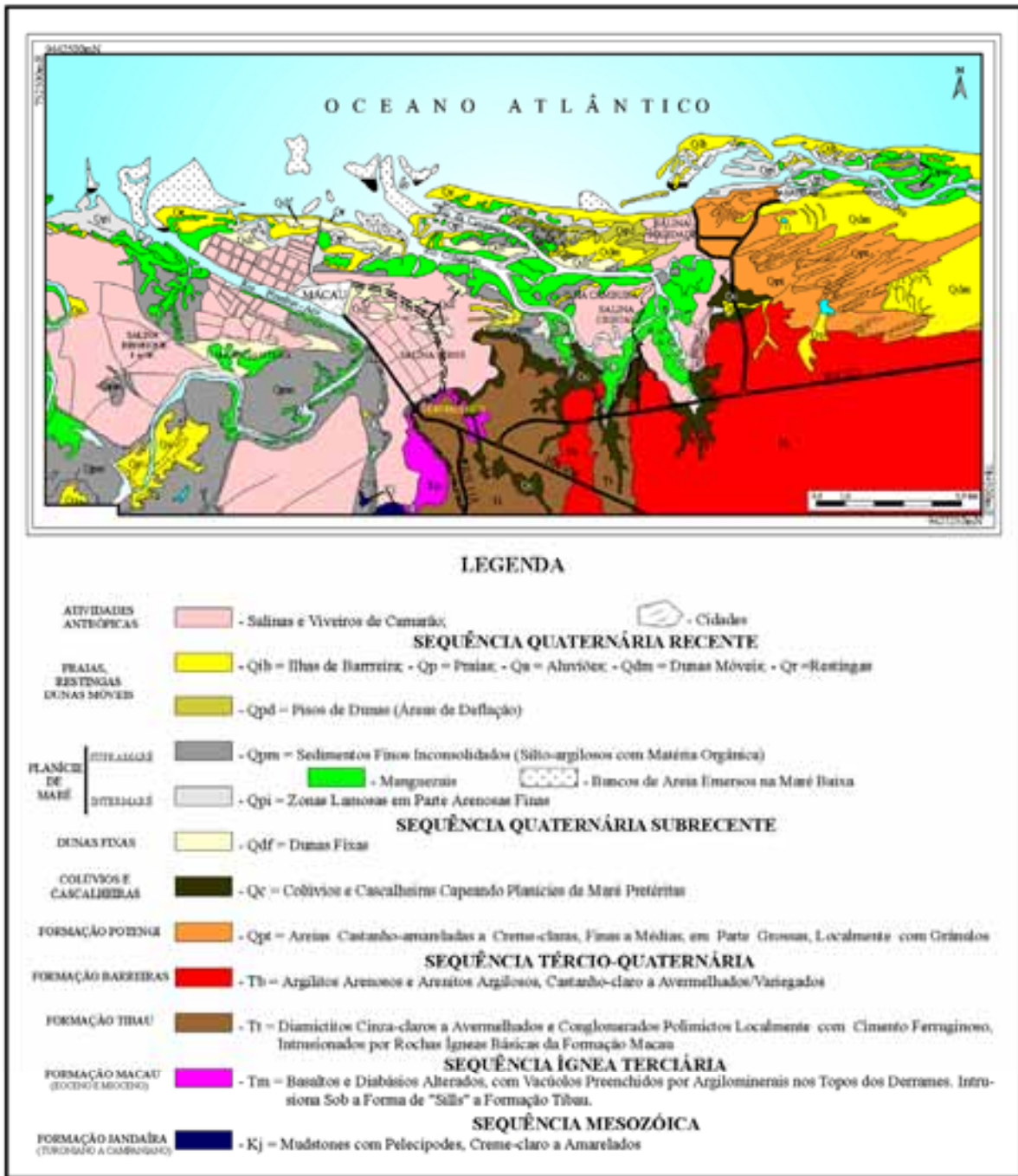


Figura 1.8 - Mapa geológico da área de estudo. Modificado de Farias (1997).

1.3.3 – Modelos Evolutivos da Bacia Potiguar

A porção norte dos estados do RN e CE tem sido alvo de estudo de diversos pesquisadores (Szatimari *et al.* 1987; Françolin e Szatimari 1987; Fonseca 1996; Caldas 1996 e 1998; Bezerra *et al.* 1998, entre outros), no sentido de elucidar a história evolutiva do Atlântico Sul e suas bacias marginais, em particular, a Bacia Potiguar, no período de tempo que vai do Mesozóico ao Cenozóico. Muitos modelos abordam esta história evolutiva, porém alguns aspectos ainda não foram satisfatoriamente solucionados.

1.3.3.1 – A Evolução Mesozóica

Dentre os modelos de evolução propostos para o Mesozóico, os dois mais difundidos, no meio científico, são os de Matos *et al.* (1987) e Matos (1992) e Françolin e Szatimari (1987).

Para Matos (1992), a gênese da Bacia Potiguar é decorrente de um processo de rifteamento, em resposta a um afinamento crustal ocorrido durante o fraturamento do Gondwana e formação do Oceano Atlântico. Nesse período, o nordeste brasileiro estaria submetido a tensões tangenciais que resultariam em movimentos divergentes E-W. Tais esforços se inverteriam no Neocominiano produzindo movimentos compressivos na margem equatorial, que resultariam na geração e reativação de falhas normais E-W, dando origem aos grabens da atual porção emersa da Bacia Potiguar.

No modelo proposto por Françolin e Szatimari (1987), a separação dos continentes sul-americano e africano teve início com a propagação (Jurássico Superior), para norte, de uma extensa fratura originada na porção sul do supercontinente Gondwana (durante o Cretáceo Inferior), acompanhando linhas de fraqueza do substrato, associada a um movimento divergente E-W (Figura 1.9A). Com uma diferenciação na velocidade de abertura, o afastamento continental foi muito maior a sul, propiciando uma rotação horária da placa sul-americana, e originando um polo de rotação no nordeste brasileiro (Figura 1.9B). Essa rotação horária impôs movimentos compressivos e distensivos nas proximidades do pólo, o qual permaneceu neste local durante o Neocomiano. Este pólo teria migrado para noroeste, em direção ao litoral do Amapá, durante o Aptiano (Figura

1.9C). Após o rompimento total do supercontinente Gondwana, teve início, no Albiano, a separação E-W entre América do Sul e África, gerando um cisalhamento lateral dextral (Figura 1.9D) na atual margem equatorial do Brasil, além de marcar o início da sedimentação (Albiano Inferior) no extremo norte da costa leste e permitir a entrada do mar, que causou a transgressão marinha que atingiu todas as bacias da margem equatorial (Albiano ao Campaniano). A ocorrência de um evento compressivo (após o Campaniano), de direção N-S, pode ser observado na Bacia Potiguar. Este evento provocou soerguimento da plataforma carbonática e reativação de numerosas falhas. Françaolin e Szatimari consideram ser este o último evento deformacional importante, ocorrido na margem equatorial (Figura 1.9E).

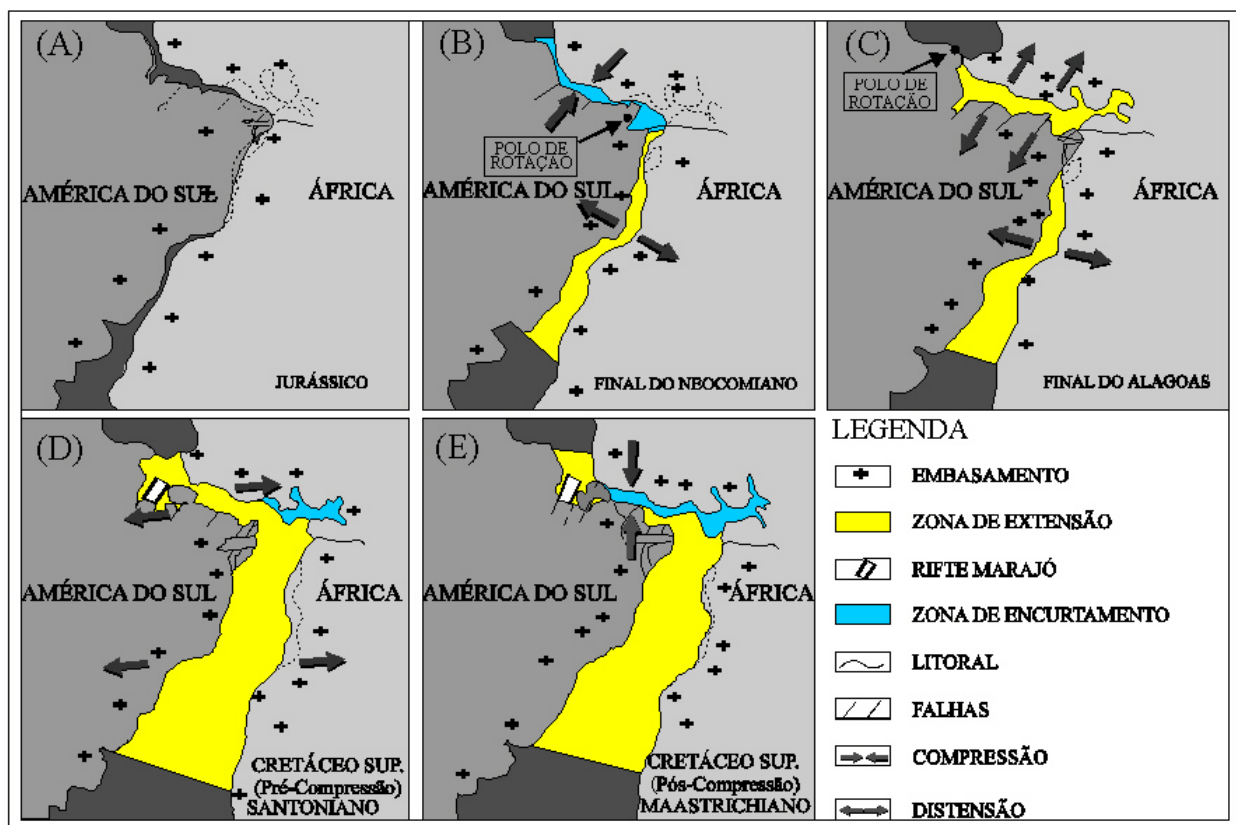


Figura 1.9 - Evolução da separação dos continentes Sul-Americano e Africano. Compilado de Szatimari e Françaolin (1987).

1.3.3.2 – A Evolução Cenozóica

A evolução Cenozóica da Bacia Potiguar ainda é controversa, não havendo consenso entre os autores e, desta forma, não possuindo assim um modelo considerado definitivo.

A transição, nesta bacia, do Mesozóico para o Cenozóico é marcada por uma extensa superfície de erosão, denominada Discordância Pré-Ubarana, a qual atinge as formações Jandaíra e Ubarana, que antecede uma seqüência regressiva marinha predominantemente Terciária. Cremonini e Karner (1995), na tentativa de explicar esta discordância, sugeriram que a passagem de um centro de espalhamento oceânico ao longo da margem equatorial brasileira durante o Mesocampaniano teria fornecido calor suficiente para provocar o soerguimento da Bacia Potiguar. Esse evento reativou diversas falhas pré-existentes e deflagrou intenso processo erosivo de alcance regional (Figura 1.10A). O processo de resfriamento das litosferas oceânica e continental justapostas iniciou após a passagem deste centro (Figura 1.10B). Um Outro evento associado á transição entre o Mesozóico e o Cenozóico é a ocorrência dos diques de diabásio que constituem a Formação Serra do Cuó.

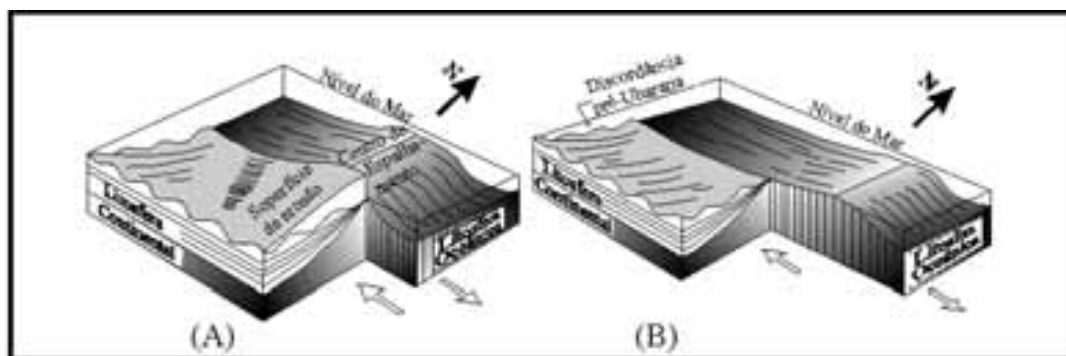


Figura 1.10 - Modelo para origem da discordância pós-Jandaíra. (a) Caracteriza a passagem do centro de espalhamento em frente à Bacia Potiguar, causando o aquecimento, o soerguimento e erosão dos sedimentos; (b) Início do resfriamento e subsidência da Bacia Potiguar após a passagem do centro de espalhamento. Compilado de Cremonini e Karner (1995).

No Cenozóico ocorrem eventos tectônicos de menor magnitude, como reativação de importantes falhamentos (sistemas de falhas Afonso Bezerra e Carnaubais), dobramentos com grande comprimento de onda e eixos orientados na direção N-S resultantes de esforços compressivos E-W aos quais a Bacia Potiguar esteve submetida no Terciário, e reativações tectônicas associadas a intrusões básicas relacionadas com a Formação Macau (Costa Neto 1985). Para Sial (1976), a ascensão de magmas relacionados aos litotipos da Formação Macau seria resultante do alívio de pressão, no Terciário, de regiões arqueadas durante o Mesozóico, devido a ajustes internos da Placa Sul-Americana. Associado à atenuação progressiva do tectonismo durante o Mesozóico, a partir do Neocretáceo, ocorre uma movimentação epirogenética de soerguimento, com intensidade espacialmente variável (Rolim 1985). Correspondentes a estes ciclos tectônicos desenvolveram-se processos de aplainamento, com relevos rejuvenescidos. A parte mais jovem destes aplainamentos é tida como pleistocênica, denominada Superfície Sertaneja Velhas. Esta superfície corresponde a superfície de erosão e desnudação geral do Nordeste, que se apresenta no interior como uma área pediplanizada e na região costeira como um conjunto de tabuleiros sedimentares, todos reunidos no Grupo Barreiras de Bigarella (1965)

As primeiras referências ao Barreiras devem-se a Branner (1902 *apud* Alheiros *et al.* 1988), ao mencionar barreiras ao longo da costa nordestina, associando esta feição morfológica a rochas terciárias como as que descreveu nas imediações de Paratibe – PE. Morais Rego (1930 *apud* Alheiros *et al.* op.cit.) correlacionou as rochas terciárias que constituem os baixos platôs amazônicos aos tabuleiros da costa do Brasil até o sul da Bahia e os denomina de “Série das Barreiras”. Bigarella e Andrade (1964, *apud* Alheiros & Lima Filho 1991) identificaram duas unidades fundamentais separadas por uma disconformidade, denominado-as de Formação Guararapes (inferior) e Formação Riacho Morno (superior), caracterizando, então, o Grupo Barreiras. Mabesoone *et al.* (1972) propuseram a divisão do Grupo Barreiras em três unidades estratigráficas distintas, onde cada unidade seria caracterizada por uma capa de intemperismo típico (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 – Proposta de divisão para o “Grupo Barreiras” (Mabesoone et al. 1972).

IDADE	UNIDADE LITO-ESTRATIGRÁFICA	UNIDADE EDAFO-ESTRATIGRÁFICA
Holoceno	Areias Brancas	
Pleistoceno	Formação Macaíba	Intemperismo Potengi
Plioceno	Formação Guararapes	Intemperismo Riacho Morno
Mioceno	Formação Serra do Martins	Intemperismo Laterítico
Oligoceno		Intemperismo Caulinitico

Alheiros *et al.* (1988) sugeriram, após revisão de dados, que o pacote “Barreiras” constitui uma única unidade litoestratigráfica, sendo assim uma formação com apenas diferenças faciológicas, devido a diferentes sistemas deposicionais. Esta unidade ocorre principalmente no quadrante SE da área deste trabalho, a qual é constituída predominantemente de arenitos médios a grossos, muito argilosos, que gradam lateralmente para argilito arenoso (Farias 1997).

Os Colúvios e Alúvios Subrecentes, unidade que capeia indistintamente outras unidades litológicas, é constituída por areias castanho-escuro a amareladas, fina até muito grossas, quartzosas, localmente com seixos de quartzo, sílex, cataclasito, fragmentos de rochas e concreções ferruginosas, mal selecionadas e subarredondadas. Ocorrem na área deste trabalho nas porções centro sul e centro sudeste. Localmente ocorrem concentrações de seixos geralmente com diâmetros entre 1 e 2 cm, e alguns calhaus com diâmetro entre 6 e 8 cm, formando cascalheiras. Os colúvios são constituídos de areias, em parte conglomeráticas, castanho amareladas grossas/muito grossas, argilosas, subarredondadas/subangulares, com seixos de quartzo e feldspato, raramente sílex.

A Formação Potengi, de Vilaça *et al.* (1986), é constituído por sedimentos areno-quartzosos com pouca argila e grânulos de limonita, de coloração avermelhada, tornando-se mais escuras em direção ao litoral. No contato com depósitos dunares atuais apresentam laminações paralelas. Estes sedimentos estão posicionados estratigraficamente acima dos sedimentos da Formação Barreiras e abaixo dos sedimentos dunares. Englobam-se nesta unidade a Formação Natal, de Nogueira (1982), como também parte dos “sedimentos mistos” mapeados por Nogueira *et al.* (1984 e 1985), além do “intemperismo Potengi”, de Mabesoone *et al.* (1972). Segundo Farias

(1997) esta unidade ocorre principalmente no quadrante NE da área deste trabalho, e no terço superior da falésia da Ponta do Tubarão.

Os *Beach-Rocks* ou arenitos de praia são rochas sedimentares usualmente formadas na zona intermaré, embora possa desenvolver-se também em zona sublitorânea. A mineralogia dos *beach-rocks* pode variar de areias silícicas puras a areias carbonáticas biogênicas, enquanto que o cimento pode variar de aragonita a calcita magnesiana Bezerra *et al.* (1998), em seu estudo de análise de variações do nível do mar em registros sedimentares holocênicos do nordeste do Brasil, concluiu que os *beach-rocks* são úteis como indicadores do nível do mar em regime mesomaré. Segundo Bezerra *et al.* (1998) a idade destes *beach-rocks*, determinada pelo método ^{14}C , varia de cerca de 7.000 a 1.150 anos A. P. A espessura mensurável destes corpos pode atingir pelo menos 5 m, e sua largura é bastante variável. Seu posicionamento em relação ao nível do mar é variável e podem ser encontrados corpos cerca de 5 m acima do atual nível do mar, ao nível do mar, a 5, 10 e 20 m (Statteger 2000, comunicação pessoal) e possivelmente 35 m abaixo do nível atual (Vianna e Solewicz 1988). Estas rochas ocorrem em um terraço retrabalhado pelo mar, topograficamente os pés da falésia da Ponta do Tubarão, estendendo-se por uma faixa de até 100 m de comprimento por 20 m de largura.

As Dunas Fixas são descritas como sedimentos eólicos quaternários, constituídas, predominantemente, por quartzo em forma de areias quartzosas, bem selecionadas e com grãos arredondados (Gomes *et al.*, 1981). Estas Dunas Fixas (por vegetação) cobrem a parte norte e nordeste da área e capeiam as areias da Formação Potengi no quadrante nordeste e ocorrem na área central da Península do Madeiro, onde envolvem um cinturão de dunas móveis. Ocorrem ainda na Ilha do Paraíso e como alguns resquícios de dunas a leste e sudeste da Cidade de Macau, que sobressaem das salinas da Cirne.

As Dunas Móveis referem-se àquelas que se formam atualmente, estando associadas ao desenvolvimento do litoral atual, e formam extensos cordões paralelos à praia. Recobrem tanto a Formação Barreiras como os depósitos fluviais recentes. Na área deste trabalho, estas dunas, que ocorrem principalmente nas porções NE e N, são caracterizadas predominantemente por uma granulometria de areia fina constituídas principalmente por quartzo e fragmentos de conchas de organismos marinhos, e apresentam estruturas do tipo barcana.

Os Sedimentos de Praia Recentes estão sendo depositados nas atuais zonas de praia, como uma estreita faixa constante, paralela à linha de costa, interrompida apenas na foz do Rio Açú/Piranhas e na dos Rios da Casqueira e Conceição. São depósitos sedimentares que estão submetidos à retrabalhamento constante, por processos fluvial, e, principalmente, marinho e eólico, com aporte contínuo de sedimentos. São constituídos por areias quartzosas com presença de bioclastos e minerais pesados. Estudos de minerais pesados realizados por Miranda (1983), na parte leste da área (ilhas de barreira da Ponta do Tubarão), mostram predomínio de opacos (50%), seguindo-se o zircão (30%), turmalina (10%), clorita (5%) e minerais acessórios (rutilo, estauroлита e granada). Esses minerais pesados, segundo Costa Neto (1997), têm como origem os sedimentos das Formações Tibau e Barreiras. Silva (1999) estudando os minerais pesados nos sedimentos de praia da região da Foz do Rio Piranhas-Açú verificou a predominância de zircão (38,8%), seguido por opacos (36%), hornblenda (16,34%), epídoto (5,45%) e estauroлита (3,40%), tendo, esses minerais, como prováveis rochas-fonte as rochas pré-cambrianas em geral e sedimentares (zircão); todas as rochas cortadas pelo Rio Piranhas-Açú (opacos); os micaxistos da Formação Seridó, ortognaisses e anfibólitos do Complexo Caicó, paragnaisses e paranfibólitos da Formação Jucurutu e intrusões graníticas (hornblenda); os paragnaisses e calciosilicáticas da Formação Jucurutu, intrusões graníticas, cascalheiras do Rio Piranhas-Açú e Formação Açú (epídoto); micaxistos da Formação Seridó (estauroлита).

Os Sedimentos Aluvionares Recentes, constituídos basicamente por areias quartzosas de granulação média a fina, estão distribuídos, na área deste trabalho, nas porções sudoeste (a sul da Salina Henrique Lage) e sudeste.

Os Sedimentos de Mangue, na área deste trabalho, ocorrem, basicamente, ao longo de toda faixa litorânea, naquelas regiões protegidas da ação direta das ondas, estando diretamente relacionados a influencia das marés, correntes e aporte fluviomarinhas de sedimentos finos. Estes sedimentos são predominantemente lamosos, ricos em matéria orgânica e apresentam acréscimo de sedimentos de granulometria areia, à medida que se aproxima da zona de praia.

C
A
P
Í
T
U
L
O
2

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda os fatos históricos da origem e evolução do sensoriamento remoto, e descreve algumas características espectrais dos elementos da superfície terrestre analisados neste trabalho - solo, vegetação, água e geologia.

2.2 – HISTÓRICO DO SENSORIAMENTO REMOTO NAS FAIXAS ESPECTRAIS DO VISÍVEL E INFRAVERMELHO

O *Manual of Remote Sensing* da América Society Photogrametry and Remote Sensing (ASPRS) divide a história do sensoriamento remoto em dois períodos principais: o período de 1860 a 1960 no qual o sensoriamento remoto era baseado na utilização de fotografias aéreas, e o período de 1960 até os nossos dias caracterizado pela multiplicidade de sistemas de sensores. O progresso do sensoriamento remoto está vinculado, sobretudo, ao desenvolvimento da Teoria da Luz (ou dos conceitos de espectro eletromagnético) em 1922. No entanto, esta ciência é fruto de um esforço multidisciplinar que envolve avanços na Física, Estatística, Físico-Química, Química, Biociências, Geociências, Ciências da Computação, entre outras.

As primeiras fotografias da Terra tomadas a partir do espaço, obtidas nas décadas de 50 e 60 pelas missões espaciais VIKING, TIROS e MERCURY, demonstraram de imediato o enorme potencial de informações da superfície terrestre contidas nessas fotos. Essa constatação fez com que fosse criado o projeto *Synoptic Terrain Photography Experiment* no âmbito da missão espacial seguinte à missão GEMINE (1963-1966). Esse projeto teve como objetivo a obtenção de fotografias multiespectrais do espaço, obtidas pela Missão APOLLO, no período de 1968-1969 e que culminaram com a descida do homem à lua. Essas fotos serviram para definir e testar as faixas espectrais que seriam utilizadas no primeiro satélite não tripulado de Sensoriamento Remoto de Recursos

Naturais – *Earth Resources Technology Satellite 1* (ERTS 1), lançado em junho de 1972 e que em 1975 passou a ser chamado Landsat 1. Ainda nessa década, foram lançados o segundo e o terceiro satélites, em janeiro de 1975 e março de 1978, respectivamente.

Tendo em vista o grande sucesso obtido pelos satélites da série Landsat, foram também lançados outros, utilizando sensores nas faixas espectrais do visível, infravermelho e microondas. Em 1978, a NASA lançou o satélite Seasat com um sensor ativo na faixa das microondas para avaliação dos aspectos ambientais nas áreas oceânicas. Esse satélite manteve-se em órbita durante 100 dias, até que ocorreram falhas em seus circuitos eletrônicos que interromperam sua operação.

Na década de 80 foram lançados os satélites da série Landsat 4 e 5, em julho de 1982 e março de 1984, respectivamente. Ainda nessa década, outros satélites foram lançados, como, por exemplo, o satélite SPOT (*Système Probatoire d'Observatoire de la Terre*) idealizado pelo *Centre National d'Étude Spatiales* (CNES), construído por um consórcio franco-belga-sueco, em operação desde fevereiro de 1986. Esse satélite possui sensores de alta resolução espacial, capacidade de imageamento *off-nadir*, ou seja, de imageamento laterais à sua órbita, o que permite o aumento na repetitividade do recobrimento e ainda a possibilidade de obtenção de pares estereoscópicos.

Na década de 90 foram lançados mais dois satélites da série Landsat. O primeiro deles, o Landsat 6-ETM (*Enhanced Thematic Mapper*), foi lançado em outubro de 1993 para substituir o Landsat 5-TM, porém falhou em atingir a órbita final e caiu no mar. Para não ocorrer uma ausência da continuidade dos dados, o Landsat 5-TM continuou operante até o lançamento do Landsat 7-ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) ocorrido em abril de 1999.

2.3 – ALGUNS ASPECTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO POR SISTEMAS ÓTICOS

Os sensores dos satélites concebidos para estudos dos recursos terrestres são, na sua maioria, operantes em bandas na faixa do visível (0,4 a 0,77 μm) e infravermelho (0,78 a 14,7 μm , subdivididos em infravermelho próximo, médio e termal). A Tabela 2.1

mostra algumas características dos sensores TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat 5 e 7.

Tabela 2.1 – Características dos sensores óticos dos satélites Landsat 5-TM e 7-TM.

SATÉLITE	LANÇAMENTO.	ALTITUDE	BANDAS	RESOLUÇÃO.
LANDSAT 5-TM	1984	705 km	B1: 0,45 – 0,52 μm	30 m
			B2: 0,52 – 0,60 μm	30 m
			B3: 0,63 – 0,69 μm	30 m
			B4: 0,76 – 0,90 μm	30 m
			B5: 1,55 – 1,75 μm	30 m
			B7: 2,08 – 2,35 μm	30 m
			B6: 10,4 – 12,5 μm	120 m
LANDSAT 7-TM	1999	705 km	P: 051 – 073 μm	15 m
			B1: 0,45 – 0,52 μm	30 m
			B2: 0,52 – 0,60 μm	30 m
			B3: 0,63 – 0,69 μm	30 m
			B4: 0,76 – 0,90 μm	30 m
			B5: 1,55 – 1,75 μm	30 m
			B7: 2,08 – 2,35 μm	30 m
			B6: 10,4 – 12,5 μm	30 m

Os sistemas imageadores óticos medem, no visível e infravermelho próximo (0.4 a 0.97 μm), a quantidade de energia eletromagnética solar refletida pelos alvos. Já no infravermelho médio e termal, mede-se a emissão de energia pelos corpos na superfície terrestre (Smith 1983). Na interpretação de dados de sensoriamento remoto nesta faixa do espectro eletromagnético, é importante um conhecimento prévio do comportamento espectral dos alvos observados. A curva de reflectância dos alvos em relação aos diferentes comprimentos de onda expressa este comportamento, sendo o principal meio pelo qual são escolhidas as bandas a serem analisadas e analisados os aspectos que permitem a identificação e separação de alvos na superfície terrestre. Os radiômetros, sensores que fornecem dados de reflectância em intervalos espectrais definidos, são geralmente os instrumentos através dos quais obtém-se este tipo de medida em terra. Para comparação com os valores obtidos via radiômetros orbitais ou aerotransportados, é

preciso considerar a influência da atmosfera e seus elementos (partículas, vapor d'água, etc.), assim como as condições de iluminação. A Figura 2.1 ilustra curvas genéricas de reflectância dos alvos mais comumente encontrados na superfície terrestre, juntamente com as faixas cobertas pelas bandas TM.

A vegetação, de forma geral, exibe um padrão característico de reflectância. Na região do visível, os pigmentos da folha são os responsáveis pela baixa reflectância. As clorofilas e, em menor proporção, as xantofilas e carotenos, absorvem a energia nos comprimentos de onda de 0,457 μm (azul) e 0,687 μm (vermelho), com um pequeno pico de reflectância no verde (0,567 μm). A partir de 0,77 μm , o *red-edge*, ou a subida brusca da curva, marca o efeito da estrutura do mesófilo na resposta foliar à energia. A interface de ar células-espacos determina a ocorrência de reflexões múltiplas dentro da estrutura foliar, provocando o aparecimento de altos valores de reflectância. Já no infravermelho médio, o conteúdo hídrico determina os picos de absorção da água presentes na curva da resposta espectral da vegetação (picos em 1,4; 1,9 e 2,77 μm). À medida que as folhas tornam-se mais maduras, os valores de reflectância no visível tendem a diminuir, enquanto que no infravermelho próximo tendem a aumentar. No caso da senescência do vegetal, a situação inverte-se. Nos comprimentos de onda correspondentes ao termal (3 a 14,7 μm), a emissividade dos vegetais é sempre superior a 0,85. No intervalo 8 – 14 μm a emissividade pode chegar até 0,99 para folhas bem hidratadas (Smith 1983). Dependendo da espécie vegetal estudada, do seu estado fenológico e nutricional, a curva de reflectância pode apresentar variações. Este tipo de medida geralmente é realizada em folhas isoladas, sendo também necessário considerar as diferenças inerentes quando trata-se de um dossel vegetal, podendo ocorrer a participação dos demais componentes da planta, o eventual sensoriamento do solo, etc.

Os diferentes tipos de solos também exibem curvas espectrais características. A reflectância de um solo depende das propriedades físicas e químicas de seus componentes, do conteúdo hídrico, de matéria orgânica e de óxidos de ferro presentes, assim como de sua textura e rugosidade. As curvas características de solos geralmente exibem aumentos da reflectância com o aumento do comprimento de onda. Observa-se a influência da presença de água, que baixa os valores de reflectância. O aumento da concentração de matéria orgânica e óxidos de ferro diminui os valores de reflectância,

pelo menos na faixa visível do espectro. Um solo com granulometria fina geralmente apresenta alta reflectância, embora esta dependência possa desaparecer quando a rugosidade e os efeitos de sombra predominam. No termal, a emissividade aumenta com o comprimento de onda, sendo tanto maior quanto maior for o conteúdo hídrico e menor a granulometria do solo (Smith 1983).

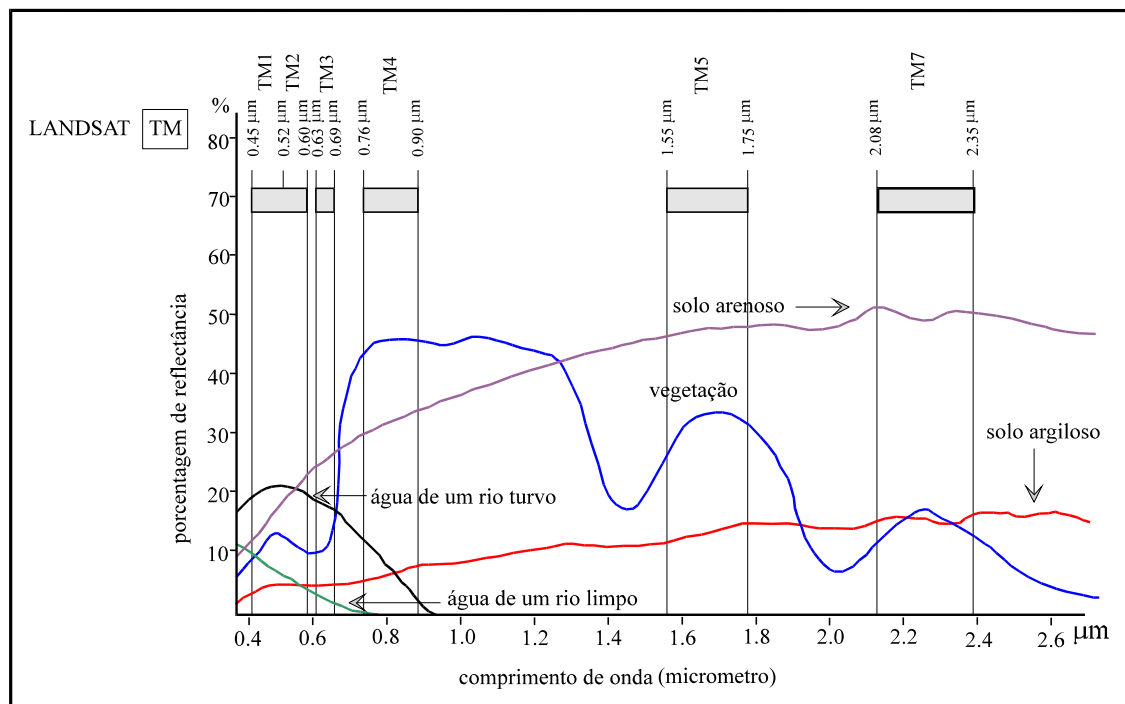


Figura 2.1 – Curvas de comportamento espectral de alvos (Florenzano et al. 1988)

Quanto à água, Guyot (1989) afirma que sua reflectância e emissividade estão ligadas às suas propriedades óticas, às substâncias dissolvidas e/ou em suspensão. As substâncias presentes na água correspondem às partículas minerais (sedimentos), matéria orgânica dissolvida (substância amarela) e fitoplâncton. O comportamento espectral da água geralmente é descrito em termos de coeficiente de absorção. São característicos os baixos valores de reflectância, até a absorção praticamente total no infravermelho próximo. Altas concentrações de sedimentos ou de fitoplâncton podem aumentar os valores da curva. A emissividade também é elevada, chegando a valores próximos de 1 no intervalo 8-14 μm , decrescendo à medida que a carga de sedimentos aumenta.

As rochas e minerais apresentam bandas de absorção controladas, principalmente, pela presença de íons Fe^{3+} , Fe^{2+} e OH, além da molécula de H_2O . Os óxidos de ferro, comum nos produtos de alteração dos minerais ferromagnesianos, mostram bandas de absorção decorrentes da presença do Fe^{3+} centradas em $0,65 \mu\text{m}$, e entre $0,86\text{-}0,94 \mu\text{m}$, segundo o óxido (hematita em $0,86\text{-}0,88 \mu\text{m}$; goethita em $0,90\text{-}0,93 \mu\text{m}$; limonita em $0,90\text{-}0,91 \mu\text{m}$). O quartzo, quando composto por silicatos simples em estrutura tetraédrica apresenta bandas de absorção na região do MIR, porém, as freqüentes impurezas e/ou inclusões com íons de Fe e H_2O controlam as bandas de absorção (em $1,4$ e $1,9 \mu\text{m}$) e a coloração dos cristais. As feições de absorção característica das argilas são definidas pelas combinações Al-OH (em $2,2 \mu\text{m}$), Mg-OH (em $2,3 \mu\text{m}$) e pela presença de moléculas de água (em $0,9$ e $1,4 \mu\text{m}$). Quando o Fe substitui o Mg ou o Al ocorre um incremento das absorções na região entre $0,4\text{-}1,0 \mu\text{m}$. A região entre $2,1\text{-}2,4 \mu\text{m}$ é marcada pela intensa absorção, com pico de reflectância em $1,6 \mu\text{m}$, quando se trata de associação de minerais de argila em zonas de alteração hidrotermal.

C
A
P
Í
T
U
L
O
3

Capítulo 3

ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 – INTRODUÇÃO

Nos procedimentos metodológicos adotados na avaliação da evolução geoambiental da área em estudo, buscou-se definir os métodos mais eficientes que auxiliassem na diferenciação e identificação das diversas unidades de paisagem (vegetação, morfologia costeira, áreas urbanas, ação antrópica, solo e geologia), e possibilitassem a análise das mudanças ocorridas na área e registradas nos dois conjuntos de imagens digitais do Landsat 5-TM obtidas em 02/08/1989 e 22/09/1998. Basicamente, a metodologia adotada, mostrada no fluxograma da Figura 3.1, constou das seguintes etapas:

- 1) Seleção de material bibliográfico e cartográfico prévios;
- 2) Pré-processamento das imagens: georreferenciamento e registro dos conjuntos de imagens digitais do Landsat 5-TM de 02/08/1989 e 22/09/1998, respectivamente;
- 3) Processamento digital das imagens: Composições Coloridas em RGB, Razão de Bandas, Métodos de Índices (NDVI e NDWI), Análise por Principais Componentes (APC), Realce por Decorrelação, IHS (I= *Intensity*, H= *Hue*, S= *Saturation*), HRGB e RGBI;
- 4) Etapas de campo para avaliação das condições atuais das unidades de paisagem;
- 5) Integração dos dados e confecção das cartas temáticas finais.

As etapas de pré-processamento, processamento digital e integração de imagens foram realizadas no *software* ER-Mapper v.5.5 (*Earth Resource Mapping Pty Ltd.*) disponível no Laboratório de Geoprocessamento do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.

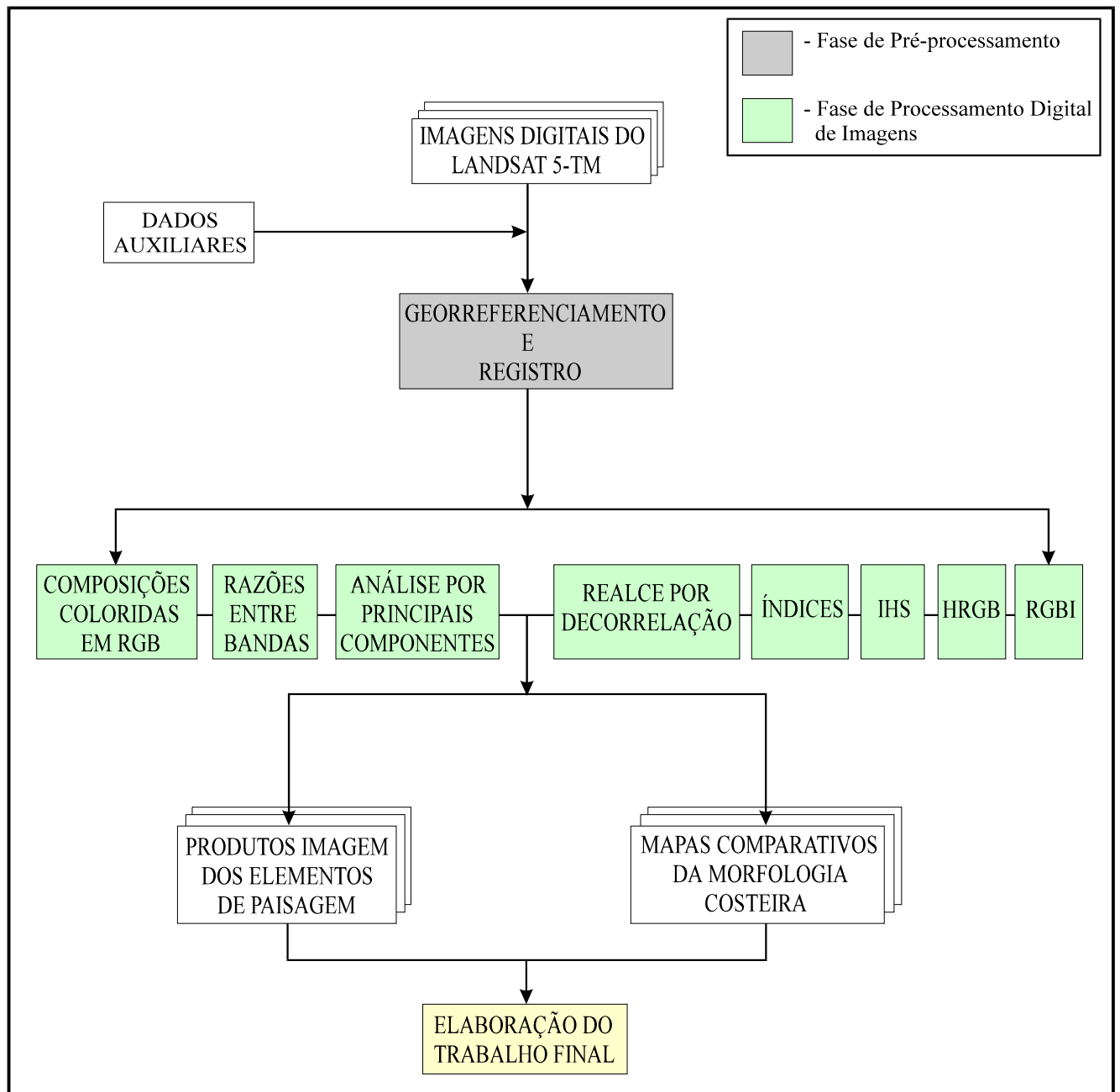


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia adotada.

3.2 – SELEÇÃO DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO

A análise e compilação da bibliografia pré-existente foram realizadas para atender tanto aos procedimentos metodológicos (interpretação de produtos de sensoriamento remoto) como aos exemplos de aplicação a contextos semelhantes (sensoriamento remoto aplicado à evolução do meio ambiente), além dos trabalhos de enfoque regional realizados na área.

As cartas e os mapas que envolvem a área estudada utilizados neste trabalho foram os seguintes: Folhas Topográficas Macau-RN (SB.24-X-D-II, 1972-Diretoria de Serviço Geográfico do Ministério do Exército-DSG) e São Bento do Norte/RN (SB.24-X-D-III, 1972-Diretoria de Serviços Geográficos do Ministério do Exército-DSG) em escala 1:100.000, Mapa de Vegetação Nativa Lenhosa do Estado do Rio Grande do Norte (Projeto PNUD/FAO/IBAMA/87/007, 1992) em escala 1:100.000, Mapa Geológico de Superfície da Área de Detalhe de Macau (Projeto de Caracterização Ambiental das Áreas de Atuação da PETROBRAS no Rio Grande do Norte, 1997) em escala 1:50.000 e Mapa de Solos (Mapa Exploratório – Reconhecimento de Solos – Estado do Rio Grande do Norte, 1968 – SUDENE) em escala 1:500.000.

Dados adicionais de precipitação, direção dos ventos, ondas e correntes marinhas, além das condições da maré durante o momento do imageamento pelo satélite Landsat 5-TM, foram adquiridos nesta fase e denotam que para as imagens de 02/08/1989 a baixa-mar ocorreu as 11:00 hs, com altura de 0,20 m e para as imagens de 22/09/98 a baixa-mar também ocorreu as (11:00 hs), porém com altura de 0,53 m. Os dados de pluviosidade para a região de Macau, cedidos pela EMPARN (Empresa de Pesquisas Agropecuária do Rio Grande do Norte), indicam uma precipitação anual média para os meses de julho, agosto e setembro de 25,7 mm, 7,8 mm e 3,9 mm, respectivamente. Esses dados levam a concluir que nas imagens tomadas em 02/08/1989, as condições de umidade para o desenvolvimento da vegetação eram mais favoráveis em relação ao momento do registro das imagens tomadas em 22/09/1998, como pode ser observado com o confronto entre as mesmas.

3.3 – PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Imagens geradas por sensores remotos, estão sujeitas a uma série de distorções espaciais (rotação da terra, curvatura da terra, variações de altitude, posição e velocidade da plataforma, entre outras), não possuindo, portanto, precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados (Crosta 1992). Desta forma, é necessário aplicar correções que vão reorganizar essas informações em relação a um sistema de projeção cartográfica. Essas correções, chamadas de

georreferenciamento ou *correção geométrica*, são realizadas a partir da identificação de feições na imagem, que possuem um correspondente na carta topográfica, tornando possível saber as coordenadas dessas feições, segundo algum sistema de coordenadas. Neste trabalho, o georreferenciamento das imagens digitais do Landsat 5-TM de 02/08/1989 foi realizada com base em cartas da DSG (escala 1:100.000) onde adotou-se o datum Córrego Alegre e a projeção UTM S 24 e utilizou-se, como pontos de controle no terreno (*GCPs*), as interseções entre estradas, estradas e caminhos, estradas e linhas de ferro, caminhos e linhas de ferro, além de confluência de rios e quaisquer outros pontos de amarração confiáveis reconhecíveis, tanto nas cartas da DSG quanto nas imagens digitais.

A análise de mudanças temporais de elementos da superfície terrestre com emprego de imagens de satélite, exige uma maior precisão com relação ao posicionamento geográfico desses elementos nas imagens utilizadas. Esse procedimento, denominado *registro*, foi realizado com base na identificação de pontos de controle no terreno, de forma semelhante ao realizado no georreferenciamento usando *GCPs*, sendo que ao invés de registrar as coordenadas em pixel/linha de uma imagem às coordenadas geográficas de um mapa, registrou-se duas coordenadas tipo pixel/linha entre si. Desta forma, a imagem de 22/09/1998 foi registrada com base na imagem de 02/08/89.

3.4 – PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Nesta fase, foram aplicadas técnicas de síntese (redução da dimensionalidade) e realce das informações contidas nos dois conjuntos de imagens do Landsat 5-TM, com objetivo de ampliar o contraste entre as diferentes unidades de paisagem. Trata-se, portanto, de uma etapa de preparação para a atividade de interpretação dos produtos de sensoriamento remoto resultantes do tratamento digital:

Os processamentos aqui utilizados foram:

- a) Composições Coloridas em RGB;
- b) IHS, RGBI e HRGB;
- c) Métodos de Índices (NDVI e NDWI);
- d) Análise por Principais Componentes;

- e) Realce por Decorrelação;
- f) Razão de Bandas.

Cada banda individualmente foi submetida a modificações de contraste do histograma, de maneira a favorecer o destaque visual dos limites entre os elementos de superfície. As técnicas usadas foram as transformações lineares (Realce Linear de Contraste) e não-lineares (Gaussiana, Equalização, 99% *Autoclip*) presentes no **ER-Mapper v.5.5**. Esse processamento envolve um maior espalhamento dos dados contidos nas imagens ao longo do intervalo de níveis de cinza (0 a 255), geralmente concentrados num pequeno intervalo do histograma causando baixo contraste entre as feições nas imagens.

A composição colorida é um dos produtos básicos do processamento digital de imagens, que consiste em associar três bandas espectrais num sistema de cores. No caso, foram empregadas as três cores primárias aditivas R (*Red* = vermelho), G (*Green* = verde) e B (*Blue* = azul). Desta forma, variações nas respostas espectrais dos diversos materiais presentes na superfície em estudo, foram evidenciados por diferenças e contrastes entre cores e suas combinações.

A razão de bandas é utilizada para realçar a diferença de resposta espectral de alvos em diferentes bandas, como a razão de argila ($B5/B2$), o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*). A razão de argila foi utilizada para diferenciar áreas com maior concentração de argila, daquelas com maior concentração de sedimentos arenosos. O NDWI ($B2-B4/B2+B4$, para o Landsat TM), que aumenta o contraste entre mar e terra, foi empregado no auxílio da delimitação da linha praia. O NDVI ($B4-B3/B4+B3$, para o Landsat TM), que aumenta o contraste entre vegetação e solo, foi utilizado, principalmente, na caracterização da vegetação de mangue e caatinga.

A análise por principais componentes (APC) é uma técnica que aumenta o conteúdo de informação, isola componentes de ruído e reduz a dimensionalidade de conjuntos de dados. Quando combinadas ao sistema RGB podem favorecer a discriminação de alvos na superfície terrestre. Foram efetuadas análises por principais componentes nos dois conjuntos de imagens do Landsat 5-TM e combinadas no sistema RGB (PC1, PC2 e PC3 associadas à R, G e B, respectivamente).

3.5 – ETAPAS DE CAMPO

Durante e após etapa de processamento digital, foram realizadas etapas de campo com o intuito de checar as unidades de paisagem identificadas nas imagens, onde grande parte da área de estudo foi percorrida através das principais vias de acesso. Essas etapas foram realizadas nos dias 21/12/1999, 27/01/2000 e 19-20/12/2000. As coordenadas dos pontos escolhidos para checagem foram obtidos diretamente nas imagens georreferenciadas e plotados na folha topográfica, que com auxílio de GPS (tipo *Garmin 12*), possibilitou uma localização mais precisa dos mesmos.

Algumas regiões foram definidas em função do padrão espectral dominante, devido ao reduzido tempo das etapas de campo, não permitindo, assim, a observação de cada uma delas.

3.6 – INTEGRAÇÃO DOS DADOS E CONFECÇÃO DAS CARTAS TEMÁTICAS FINAIS

De posse dos dados obtidos nas etapas de seleção de material bibliográfico e cartográfico, processamento digital e etapas de campo, foi realizado a integração dos mesmos, para a geração de produtos imagem e confecção de cartas temáticas temporais da morfologia costeira da área de estudo. Nos produtos imagem foram realizados a identificação de diferentes tipos de solos, agrupamentos de vegetação, litologias e distinção entre áreas emersas e submersas, sempre em função de suas características espectrais.

Para o estudo da morfodinâmica costeira, foram selecionadas três áreas (Foz do Rio Piranhas/Açu, foz dos rio da Casqueira e Conceição e Ponta do Tubarão) identificadas, nas imagens, como de maior dinâmica. Para cada uma dessas áreas foram confeccionadas cartas temáticas temporais da morfologia costeira para os períodos de 02/08/89 e 22/09/98. Em seguida foi realizada a integração dessas cartas temáticas temporais, gerando uma carta temática multitemporal para cada área selecionada, o que possibilitou a avaliação das regiões submetidas aos processos erosivos e construtivos.