

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7010-TDI/658

**DESCRIÇÃO DE CORPOS ARENOSOS DE GRANDE ESCALA NA
ZONA COSTEIRA E NA PLATAFORMA CONTINENTAL NORTE
DO RIO GRANDE DO NORTE POR IMAGENS TM/LANDSAT**

Marciel Silva Santos

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Márcio Luiz
Vianna, aprovada em 22 de setembro de 1998.

INPE
São José dos Campos
1999

528.711.7:551.46

SANTOS, M. S.

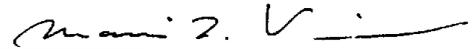
Descrição de corpos arenosos de grande escala na zona costeira e na plataforma continental norte do Rio Grande do Norte por imagens TM/Landsat / M. S. Santos – São José dos Campos: INPE, 1998.

123p. – (INPE-7010-TDI/658).

1.Costas. 2.Rio Grande do Norte (estado). 3.Landsat 5.
4.Dunas submarinas. 5.Meio ambiente. I.Título.

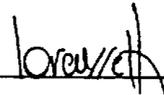
Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Sensoriamento Remoto.**

Dr. Márcio Luiz Vianna



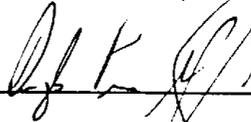
Presidente/Orientador

Dr. João Antonio Lorenzetti



Membro da Banca

Dr. Douglas Francisco Marcolino Gherardi



Membro da Banca
Convidado

Dr. José Maria Landim Dominguez



Membro da Banca
Convidado



Candidato: Marciel Silva Santos

São José dos Campos, 22 de setembro de 1998

DEDICATÓRIA

Aos meus tios (pais de criação) José Ferreira Mocó e Maria de Lurdes Santos Silva que mostraram-me o caminho do conhecimento, do respeito ao próximo e por terem proporcionado-me uma infância saudável e de muito carinho.

Aos meus sobrinhos Ícaro e Danilo Bistaffa, Rodrigo e Gabriela, Bruno e Maiara, e ao pequeno Mateus que, sem saberem, deram-me ânimo para que não tomasse o caminho mais fácil, o da desistência, e que não me permitisse dar o pior dos exemplos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao bom Deus pela oportunidade da vida, permitindo-me cumprir mais uma etapa dela, e por ter consciência da Sua presença.

Agradeço a minha família por auxiliar-me nos momentos de dificuldades.

Agradeço aos professores Dr. José Luiz Stech e Dr. Merritt Raymond Stevenson responsáveis, também, pelo meu acolhimento na equipe de Oceanografia do INPE, dando-me oportunidade para iniciar o mestrado.

Agradeço a Sra. Etelvina, secretária do SERE - Sensoriamento Remoto, pelos auxílios e pelo tratamento de respeito e carinho dados a todos a sua volta.

Agradeço à Prof^ª Dr. Corina da C. F. Yanasse, da Divisão de Processamento de Imagens do SERE/INPE, pelas sugestões e atenção dispensadas.

Agradeço ao Prof. MSc. Guaraci José Erthal, da Divisão de Processamento de Imagens do SERE/INPE, pela atenção dispensada e ajuda no tratamento de ruídos.

Agradeço ao Prof. MSc. Júlio César Lima d'Alge, também da Divisão de Processamento de Imagens do SERE/INPE, pelas contribuições prestadas e pela disposição em sempre auxiliar seus alunos.

Agradeço, em especial, ao Prof. Dr. Márcio Luiz Vianna pela oportunidade, pela orientação, pelo rigor, pelas críticas, pelo encorajamento e pelos valiosos conhecimentos a mim transmitidos.

Agradeço, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo suporte financeiro e pela oportunidade de poder desenvolver este trabalho em um centro de excelência.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pelos recursos disponíveis para o cumprimento deste trabalho.

Agradeço a minha querida esposa Luciana Aparecida Campos Santos pela paciência, pela compreensão nos momentos de ausência, pelo encorajamento nos momentos de indecisão e pelo seu amor.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram com o desenvolvimento desta pesquisa, tais como todos os colegas discentes do SERE, Meteorologia, CAP, Astrofísica e da biblioteca, entre outras.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de corpos submarinos arenosos, observáveis por dados de sensoriamento remoto a partir do sensor TM/Landsat-5, na costa norte do Estado do Rio Grande do Norte. A área está compreendida entre as latitudes 4° 20' 00" S; 5° 10' 00" S e longitudes 35° 50' 00" W; 37°20' 00" W. O mapeamento da área foi realizado através de imagens registradas pela carta náutica B700 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Embora dados de correntes não sejam apresentados, prováveis processos oceânicos, que modelam ou geram as feições submarinas, são sugeridas, baseados sobre os dados disponíveis de carta náutica e do sensor TM. Além disso, um perfil de sondagem batimétrico foi utilizado para comparar com um perfil espacial de nível de cinza, sugerindo que este possa ser útil em análise fotobatimétrica e mapeamento, baseando-se em uma única imagem. Os tipos de corpos arenosos encontrados são: extensas dunas assimétricas (geradas por correntes unidirecional) de cerca de 10 m de altura; extensas dunas de areia simétricas (geradas por maré); complexos ilhas barreiras/cristas de areia de origem desconhecida, provavelmente geradas por interações entre correntes de maré e ondas; substratos consolidados, provavelmente associados à corais, algas coralinas e “beach rock”; “spits” erosivos. Comparado com os procedimentos tradicionais, o mapeamento e a descrição dos corpos arenosos mostram-se vantajosos quanto à visão regional, incorporando a alta resolução espacial que possibilita estudos de sub-áreas, à repetitividade e custos baixos em relação aos procedimentos tradicionais. As análises das imagens, no período entre os anos de 1984 e 1990, não possibilitaram averiguar qualquer mudança de movimentação de corpos arenosos. Entretanto, foi possível documentar mudanças importantes na linha da costa. A utilização da Transformada de Fourier mostrou-se muito útil na eliminação de ruídos como o “striping”, sendo recomendável seu uso para tal processamento.

DESCRIPTION OF LARGE SCALE BEDFORMS BY LANDSAT THEMATIC MAPPER IN THE NORTHERN SHELF OF THE RIO GRANDE DO NORTE STATE

ABSTRACT

This work presents a study of large scale bedforms observable by the Landsat Thematic Mapper on the northern shelf of the State of "Rio Grande do Norte", northeast Brazil. The area is located between 4° 20' 00" S; 5° 10' 00" S and 35° 50' 00" W; 37°20' 00" W. Mapping of the area is accomplished by registration of the images with a single bathymetric chart issued by the Directorate of Hydrography and Navigation (DHN) of the Brazilian Navy. Despite of the lack of current and wave data for the study area it is possible to suggest the such as oceanic processes are likely to be forcing the generation of the observed bedforms. Besides a depth profile obtained from an old ship transect is also used to compare with the gray level variation along an adjacent image transect in order to suggest that the photobathymetric analysis and mapping based on a single image is feasible. The bedform types identified in the present study area: large dunes (unidirectional current generated, asymmetrical) of about 10m height; large tidal sand waves (symmetrical); Sand Ridge/ Barrier Island complexes of unknown origin, probably caused by wave/tidal current interactions; hard substrates possibly of coral/coralline algae/beach rock associations and erosive spits. The mapping and description of large scale bedforms using datas from Landsat Thematic Mapper, indicate that there weren't displacements for them in the period of 1984-1990. However, it was possible to identify changes in shelf line. The use of Fourier Transform was helpful in image restoration and noise removal.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | |
| LISTA DE TABELAS | |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS | |
| <u>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</u> | 21 |
| 1.1 OBJETIVOS | 23 |
| 1.1.1 OBJETIVO GERAL..... | 23 |
| 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 23 |
| 1.2 PROCESSOS SEDIMENTARES NA ZONA COSTEIRA | 23 |
| 1.2.1 TÉCNICAS DE MAPEAMENTO SUBMARINO..... | 25 |
| <u>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: ÓPTICA MARINHA E FEIÇÕES SUBMARINAS</u> | 27 |
| 2.1 TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO ATRAVÉS DA ATMOSFERA | 29 |
| 2.1.1 ESPALHAMENTO..... | 29 |
| 2.1.2 ABSORÇÃO..... | 30 |
| 2.2 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A ÁGUA | 30 |
| 2.2.1 PROPRIEDADES ÓPTICAS DA ÁGUA..... | 31 |
| <u>CAPÍTULO 3 – UTILIZAÇÃO DE IMAGENS TM LANDSAT PARA CARACTERIZAÇÃO DA MORFOLOGIA DE FUNDO</u> | 35 |
| 3.1 SENSOR TM LANDSAT | 35 |
| 3.1.1 FILTRAGEM..... | 36 |
| 3.1.2 “STRIPING”..... | 36 |
| 3.2 ESTRUTURAS SEDIMENTARES OBSERVÁVEIS POR IMAGENS TM/LANDSAT | 36 |
| 3.2.1 FORMAS DE LEITO LONGITUDINAIS..... | 38 |
| 3.2.1.1 “Scour hollows”, “longitudinal furrows” e “obstacle marks”..... | 38 |
| 3.2.1.2 “Sand ribbons” e “longitudinal sand patches”..... | 39 |
| 3.2.2 FORMAS DE LEITO TRANSVERSAIS..... | 40 |
| 3.2.2.1 “Sand patches” e “sand waves”..... | 40 |
| <u>CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS</u> | 43 |
| 4.1 ÁREA DE ESTUDO | 43 |
| 4.2 MATEIRIAIS | 44 |
| 4.3 DIGITALIZAÇÃO DA CARTA NÁUTICA | 45 |

| | | |
|--|---|------------|
| 4.4 | PROCESSAMENTO DAS IMAGENS..... | 46 |
| 4.4.1 | REGISTRO..... | 46 |
| 4.4.2 | CORREÇÃO ATMOSFÉRICA..... | 46 |
| 4.4.3 | SUB-AMOSTRAGEM DA ÁREA DE ESTUDO..... | 47 |
| 4.5 | MÉTODO UTILIZADO PARA REALIZAR MEDIDAS DE DISTÂNCIAS ENTRE DOIS PONTOS EM IMAGENS..... | 48 |
| 4.6 | TRATAMENTO DAS IMAGENS..... | 49 |
| <u>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</u> | | 51 |
| 5.1 | REGISTRO DAS IMAGENS..... | 51 |
| 5.2 | CORRELAÇÃO ENTRE NC E PROFUNDIDADE..... | 54 |
| 5.2.1 | LEITURA DE “PIXES”..... | 54 |
| 5.2.1.1 | Localização geográfica das feições vistas na sondagem ecobatimétrica..... | 69 |
| 5.2.1.2 | Cálculo das posições das feições (Dunas)..... | 70 |
| 5.3 | ANÁLISE FOTOBATIMÉTRICA..... | 73 |
| 5.4 | FATIAMENTO A PARTIR DOS DADOS DA CARTA NÁUTICA B 700..... | 84 |
| 5.5 | ANÁLISE DAS FEIÇÕES SUBMARINAS VISÍVEIS NAS IMAGENS..... | 86 |
| 5.5.1 | DUNAS SUBMARINAS (REGIÃO 1)..... | 87 |
| 5.5.2 | REGIÃO DO PALEOCANAL DO RIO AÇÚ (REGIÃO 2)..... | 90 |
| 5.5.3 | REGIÃO DO PALEOCANAL DO RIO MOSSORÓ (REGIÃO 3)..... | 93 |
| 5.5.4 | REGIÃO DO CAMPO DE DUNAS DE GALINHOS (REGIÃO 4)..... | 96 |
| 5.5.5 | REGIÃO COM PLATAFORMAS DE EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO DA PETROBRÁS (REGIÃO 5)..... | 99 |
| 5.5.6 | REGIÃO DA COROA DAS LAVADEIRAS (REGIÃO 6)..... | 101 |
| 5.6 | COMPARAÇÃO DA CARTA NÁUTICA COM IMAGEM..... | 102 |
| <u>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u> | | 107 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | | 111 |
| APÊNDICE A – ECOGRAMA..... | | 119 |
| APÊNDICE B – CORREÇÃO DAS PROFUNDIDADES LIDAS NO ECOGRAMA.... | | 123 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| 1.1 – Área de estudo----- | 22 |
| 2.1 - Fatores que influenciam a quantidade de radiação que chega ao sensor a partir do corpo d'água. Dimensões exageradas para melhor visualização----- | 28 |
| 3.1 - Diagrama relacionando as formas dos corpos arenosos com a velocidade de corrente máxima de superfície em cm/s----- | 37 |
| 3.2 - Diagrama mostrando a variação do posicionamento de um obstáculo em relação à corrente e a conseqüente formação das "obstacle marks" ----- | 39 |
| 4.1 - Região de estudo e sua localização----- | 43 |
| 4.2 - Subárea de estudo onde foi realizada uma sondagem ecobatimétrica em 16/05/1989----- | 47 |
| 5.1 - Carta imagem TM/Landsat de 15/06/1989 mostrando a região de estudo----- | 52 |
| 5.2 - Gráfico de dispersão entre profundidade e NC extraído da imagem a partir da Tabela 5.4----- | 57 |
| 5.3 - Imagem TM mostrando o ruído “striping”----- | 58 |
| 5.4 - Imagem espectral da Transformada de Fourier da banda TM1. Negativa. Os eixos Ku e Lv representam, respectivamente, os números de onda predominantes na direção vetical e horizontal da imagem original ----- | 59 |
| 5.5 - Imagem espectral da Transformada de Fourier corrigida. Negativa----- | 60 |
| 5.6 - Sub-área de estudo com os pontos batimétricos digitalizados (em cor amarela) a partir da carta náutica 720 da DHN ----- | 63 |
| 5.7 - Gráfico de dispersão de NC (TM89) e profundidade (carta náutica 720) ---- | 65 |

| | |
|---|-----------|
| 5.8 - Imagem TM2 com ruídos e as isobatimétricas (em vermelha)----- | 66 |
| 5.9 - Imagem TM2 com ruídos minimizados e as isobatimétricas (em vermelha) ----- | 67 |
| 5.10 - Perfis espaciais de NC (linhas em verde, azul escura, amarela e azul clara) próximo ao trajeto do barco ----- | 68 |
| 5.11 - Perfis espaciais de NC para a região de prováveis dunas de maré ----- | 69 |
| 5.12 - Gráfico relacionando os níveis de cinza com as profundidades (a partir do ecograma) no provável trajeto do barco----- | 74 |
| 5.13 - Perfil espacial e batimétrico (trajeto do navio)----- | 76 |
| 5.14 - Perfil espacial de nível de cinza e batimétrico (trajeto verde)----- | 77 |
| 5.15 - Perfil espacial de nível de cinza e batimétrico (trajeto azul escuro)----- | 78 |
| 5.16 - Perfil de nível de cinza e batimétrico (trajeto amarelo)----- | 79 |
| 5.17 - Perfil de nível de cinza e batimétrico (trajeto azul claro)----- | 80 |
| 5.18 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto amarelo)----- | 81 |
| 5.19 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto azul claro)----- | 82 |
| 5.20 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto verde escuro)----- | 82 |
| 5.21 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto rosa escuro)----- | 83 |
| 5.22 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto vermelho) ----- | 83 |
| 5.23 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto azul escuro)----- | 84 |

| | |
|--|-----|
| 5.24 - Fatiamento batimétrico baseado nos dados da carta náutica B700 da DHN----- | 85 |
| 5.25 - Imagem TM/Landsat 5 com registros em coordenadas UTM da região de estudo (15/06/1989)----- | 86 |
| 5.26 - Área de dunas submarinas modeladas, possivelmente, por correntes de maré e corrente unidirecional ----- | 87 |
| 5.27 - Imagem da segunda componente das PCs ----- | 89 |
| 5.28 - Imagem da passagem 16/06/1984 com a formação de um banco de areia--- | 91 |
| 5.29 - Imagem da passagem 30/07/1988 com a formação de um banco de areia--- | 91 |
| 5.30 - Imagem da passagem 15/06/1989 com a formação de um banco de areia--- | 92 |
| 5.31 - Imagem da passagem 06/09/1990 com a formação de um banco de areia--- | 93 |
| 5.32 - Imagem da passagem 16/06/1984 da região do paleocanal do Rio Mossoró ----- | 94 |
| 5.33 - Imagem da passagem 30/07/1988 da região do paleocanal do Rio Mossoró ----- | 95 |
| 5.34 - Imagem da passagem 15/06/1989 da região do paleocanal do Rio Mossoró ----- | 96 |
| 5.35 - Imagem da passagem 06/09/1990 da região do paleocanal do Rio Mossoró ----- | 96 |
| 5.36 - Imagem TM1/Landsat 5 de 16/06/1984 do campo de dunas de Galinhos --- | 97 |
| 5.37 - Imagem TM1/Landsat 5 de 06/09/1990 do campo de dunas de Galinhos --- | 97 |
| 5.38 - Imagem TM1/Landsat 5 de 30/07/1988 do campo de dunas de Galinhos --- | 98 |
| 5.39 - Imagem TM1/Landsat 5 de 15/06/89 do campo de dunas de Galinhos ----- | 98 |
| 5.40 - Imagem TM_banda 1 de 15/06/1989 com as localizações de plataformas de exploração de petróleo e gás natural ----- | 100 |
| 5.41 - Imagem do lineamento conspícuo da Coroa das Lavadeiras (30/07/1988) - | 101 |

| | |
|---|------------|
| 5.42 - Imagem do lineamento conspícuo da Coroa das Lavadeiras (16/06/1984) - | 102 |
| 5.43 - Imagem de 16/06/1984 da Ponta do Tubarão ----- | 103 |
| 5.44 - Imagem de 30/07/1988 da Ponta do Tubarão ----- | 105 |
| 5.45 - Imagem de 15/06/1989 da Ponta do Tubarão ----- | 105 |
| 5.46 - Imagem de 06/09/1990 da Ponta do Tubarão ----- | 106 |
| A.1 - Feições presentes no trajeto entre as posições D1-D2----- | 119 |
| A.2 - Feições presentes no trajeto entre as posições D2-D3----- | 119 |
| A.3 - Feições presentes no trajeto entre as posições D3-D4----- | 120 |
| A.4 - Feições presentes no trajeto entre as posições D4-D5----- | 120 |
| A.5 - Feições presentes no trajeto entre as posições D5-D6----- | 120 |
| A.6 - Feições presentes no trajeto entre as posições D6-D7----- | 121 |
| A.7 - Feições presentes no trajeto entre as posições D7-D8----- | 121 |
| A.8 - Feições presentes no trajeto entre as posições D8-D9 e D9-D10----- | 121 |

LISTA DE TABELAS

| | Pág. |
|---|------|
| 3.1 - Características do sensor tm..... | 35 |
| 5.1 - Erros dos pontos de controle para cada data..... | 51 |
| 5.2 - Dados mensais de precipitação..... | 53 |
| 5.3 - Dados mensais de velocidade média do vento para a região de estudo entre 1982 e 1991..... | 53 |
| 5.4 - Médias de níveis de cinza com janelas de 3 por 3 e 5 por 5 “pixels” e suas respectivas profundidades a partir da imagem com “striping”..... | 55 |
| 5.5 - Correlação entre as médias de nc e profundidade a partir da imagem com “striping”..... | 56 |
| 5.6 - Colunas que foram eliminadas na imagem espectral da transformada de fuorier..... | 60 |
| 5.7 - Médias de níveis de cinza com janelas de 3 por 3 e 5 por 5 “pixels” e suas respectivas profundidades a partir da imagem com “destriping” | 61 |
| 5.8 - Correlação entre as médias de nc e profundidade a partir da imagem com “destriping”..... | 62 |
| 5.9 - Médias de níveis de cinza com janelas de 3 por 3 e 5 por 5 “pixels” e suas respectivas profundidades a partir dos pontos digitalizados da carta náutica 720 da dhn e da imagem com “destriping” | 63 |
| 5.10 - Correlação entre as médias de nc e profundidade a partir dos pontos digitalizados e da imagem com “destriping” | 65 |
| 5.11 - Pontos marcados no perfil ecobatimétrico (ecograma)..... | 70 |

| | |
|--|------------|
| 5.12 - Média das distâncias calculadas para cada posição selecionada dentro do intervalo de marcação da sondagem..... | 71 |
| 5.13 - Distâncias obtidas via equação 4.1 e via spring e as escalas utilizadas..... | 72 |
| 5.14 - Distâncias dos pontos selecionados em escala natural..... | 72 |
| 5.15 - Profundidades para os pontos selecionados no ecograma..... | 73 |
| 5.16 - Dados cinemáticos do barco durante o transecto..... | 75 |
| 5.17 - Deslocamento anual da extremidade da Ponta do Tubarão..... | 104 |
| B.1 - Profundidades a partir do ecograma com correção e sem correção..... | 123 |
| B.2 - Estatística de regressão para correção das profundidades..... | 123 |
| B.3 - Coeficiente adquiridos na regressão..... | 123 |

LISTA DE SÍGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|---------------|--|
| AVHRR | - Advanced Very High Resolution Radiometer |
| CD | - Compact Disc |
| DHN | - Diretoria de Hidrografia e Navegação |
| DPI | - Divisão de Processamento de Imagens |
| Freq. | - Frequência |
| HRV | - High-Resolution Visible |
| IFOV | - Instantaneous Field of View |
| INPE | - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| MNT | - Modelo Numérico de Terreno |
| MSS | - Multi-Spectral Scanner |
| PAG | - Plataforma de Agulha |
| Prof. | - Profundidade |
| PUB | - Plataforma de Ubarana |
| SGI | - Sistema Geográfico de Informações |
| SITIM | - Sistema de Tratamento de Imagens |
| SPRING | - Sistema de Processamento de Imagens e Informações Geográficas |
| TIROS | - Television Infrared Observation Satellite |
| TOPSUB | - Topografia Submarina |
| UTM | - Universal Transversa de Mercator |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde o lançamento do primeiro satélite da série LANDSAT na década de 70, os sensores orbitais passivos, operando nas bandas do visível, infravermelho e termal do espectro eletromagnético, têm sido empregados no sensoriamento remoto e nas mais diversas áreas de pesquisas geo-ambientais (Meireles, 1980). O lançamento de uma outra família de satélites, portando sensores ativos, que não apenas recebem, mas também emitem radiação nos alvos terrestres e oceânicos com energia eletromagnética na faixa do microondas, operando em diversas combinações de frequências e polarizações, iniciou-se em 1978 com o Seasat.

Uma das áreas de aplicação importante do sensoriamento remoto orbital é a oceanografia. O mapeamento e monitoramento em escala global da evolução dos campos de temperatura da superfície do oceano, concentração de pigmentos de clorofila, localização de correntes e estimativas de suas velocidades e monitoramento do nível médio do mar, dentre outras, constituem-se hoje em aplicações tradicionais. O mapeamento e a estimativa de profundidade de águas rasas e transparentes em áreas costeiras, assim como a determinação de ocorrência de erosão na linha da costa e a presença de barreiras de areia ou corais, constituem-se em uma aplicação estratégica menos convencional: o sensor na banda azul do Thematic Mapper (TM) do satélite Landsat-4, lançado em 1982, foi projetado com esta finalidade.

A estimativa de profundidade e a verificação de mudanças da mesma, causadas ou por deposição de sedimentos ou pela erosão destes, podem ser, hoje, realizadas por meio de imagens obtidas por sensores do tipo TM. Numa área costeira cuja presença de navios petroleiros, por exemplo, é constante, o monitoramento da dinâmica sedimentar da plataforma continental é de grande interesse. A segurança do tráfego marítimo, bem como a preservação dos ecossistemas costeiros, podem ser ampliados com a aplicação desta tecnologia.

Neste trabalho, procurou-se descrever o uso de imagens TM/Landsat-5, com suas quatro primeiras bandas, associadas aos dados de cartas náuticas, para identificar, classificar e documentar a distribuição de corpos arenosos e unidades geo-biológicas que constituem a geomorfologia submarina da Plataforma Continental norte do Estado do Rio Grande do Norte, utilizando-se de quatro imagens diferentes da órbita/ponto 215/63, correspondentes às datas 16/06/84, 30/07/88, 15/06/89 e 06/09/90.

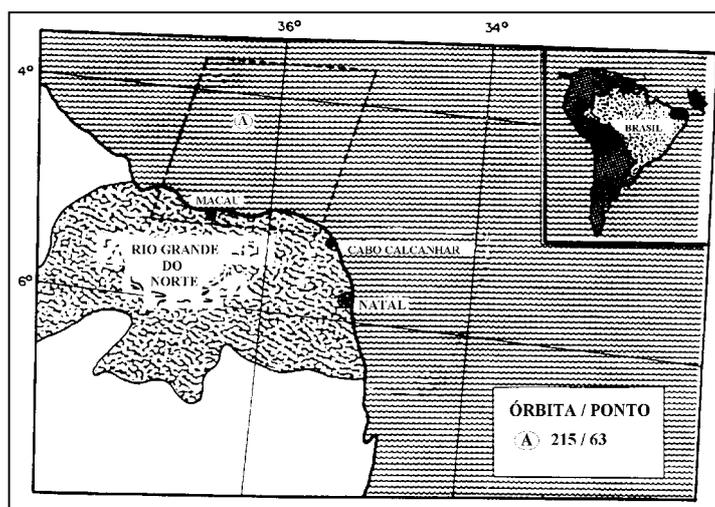


Fig. 1.1 – Área de estudo

FONTE: Adaptada de Solewicz (1989, p. 60).

A área de estudo escolhida situa-se na Bacia de Potiguar (Fig. 1.1), no Estado do Rio Grande do Norte, entre as latitudes $4^{\circ} 20' 00''$ S e $5^{\circ} 10' 00''$ S e longitudes $35^{\circ} 50' 00''$ W e $37^{\circ} 20' 00''$ W, compreendida entre os municípios de São Bento do Norte e Areia Branca, desde a linha da costa até a profundidade de 30 m. Esta área se caracteriza por apresentar águas relativamente claras com baixa concentração de material em suspensão, em determinados meses do ano, durante o inverno. Esta área é de grande interesse sócio-econômico, pois nela se realizam atividades intensas e conflitantes: a produção e o transporte de petróleo, a pesca, o turismo e a aquicultura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

1) Mapear e descrever a natureza dos corpos arenosos e afloramentos rochosos visíveis nas imagens, através de comparação com trabalhos anteriores, que contêm interpretações apoiadas em trabalhos de campo; 2) descrever qualitativamente a ocorrência de processos erosivos e de deposição, através da análise de imagens multiespectrais e multitemporais; 3) analisar e documentar a fisiografia submarina sugerida por imagens e modelos numéricos de terreno, baseados em dados batimétricos disponíveis sobre a área.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Produzir, a partir de imagem TM da área de estudo, imagens processadas onde o ruído é eliminado e os dados obtidos por reflexão da luz no fundo sejam realçados;
- 2) Registrar as imagens obtidas com base cartográfica obtida por carta batimétrica, através de SGI;
- 3) Caracterizar os diferentes tipos de fundo presentes na área de estudo, identificáveis nas imagens TM;
- 4) Comparar perfil batimétrico linear, obtido por navio com perfis de nível de cinza de imagens TM, geo-referenciados numa mesma área;
- 5) Comparar a fisiografia sugerida pela interpretação visual das imagens com a sugerida por uma carta batimétrica.

1.2 PROCESSOS SEDIMENTARES NA ZONA COSTEIRA

Segundo Stride (1982), para o caso de águas costeiras, o transporte de sedimentos arenosos sobre o fundo depende da intensidade e direção da distribuição de correntes de maré. Há correlações empíricas entre a morfologia dos fundos arenosos marinhos com a intensidade de corrente, porém há pouco entendimento no que diz respeito à interpretação dos processos envolvidos no modelamento da topografia, no tocante aos corpos arenosos.

Uma das teorias que explica a formação dos corpos arenosos atuais é que, durante a transgressão marinha, os depósitos sedimentares da plataforma foram "retrabalhados"; estes corpos devem ter sido construídos por correntes de maré durante o período de intensa variação do nível do oceano no decorrer da transgressão Holocênica. Também há evidências de que modificações da direção de uma corrente, devido às mudanças na orientação da costa, podem acarretar alterações na disposição dos sedimentos (Stride, 1982).

Curray (1977) classifica os ambientes de deposição costeiros e marinhos como sendo: meio continental, zona de praia, recifes continentais, talude continental, base do talude, bacias oceânicas e platôs submarinos. O meio ambiente continental é um reservatório de partículas que, através dos processos eólicos e litorâneos, podem abastecer outros meios como a zona de praia, por exemplo. Curray considera que a areia e os corpos arenosos submersos recentes, são provenientes, não de processos relacionados às descargas de rio, mas sim de um processo cíclico, regido pela interação das variações do nível do mar ocorridas entre 15.000 e 20.000 anos atrás, com fenômenos de alta energia associados às marés, ondas, ventos e correntes.

Cornaglia (1977) discute o processo que leva a movimentação de sedimentos em águas costeiras. Segundo ele, locais onde não há corrente, a movimentação de sedimentos é causada pela ação de ondas no assoalho marinho quando este é constituído por material sedimentar, como areia e cascalho.

Schwartz (1977) estudou a relação das mudanças de nível do mar com a erosão costeira, apresentando teorias para esta relação. Ele discorre que, quando o nível do mar é mais alto, o material da parte superior da praia é transportado para a parte mais profunda. As implicações deste processo são: (1) a parte superior da praia deve ser erodida, (2) o material erodido deve ser igual ao volume do material depositado no fundo e (3) a diminuição da profundidade na plataforma interna deve ser resultado da deposição e deve ser igual ao aumento do nível do mar, permanecendo assim, com a profundidade local constante. Esta relação é hoje conhecida como o regra de Bruun (Zenkovich, 1967).

Howarth (1982) relata que os processos dinâmicos em áreas costeiras modificam as feições submarinas em períodos de tempo relativamente curtos. Estas modificações podem ser observadas nas alterações do contorno da costa, das isobatimétricas, das unidades estruturais e suas morfologias (Soares e Fiori, 1976).

1.2.1 TÉCNICAS DE MAPEAMENTO SUBMARINO

O mapeamento de assoalho submarino é tradicionalmente realizado através de sonares de varredura lateral. Em águas rasas, é possível realizar este trabalho através de ecobatímetros aerotransportados, como o “Light Detection and Ranging” (LIDAR) (Woods et al, 1994).

Os primeiros estudos das feições submarinas, através de sensor remoto orbital, foram realizados pelo "US Naval Oceanographic Office" (Escritório de oceanografia naval dos Estados Unidos), comparando as feições imageadas com as feições descritas em cartas náuticas. Como resultado, notou-se que havia imprecisões em lugares específicos. Estas imprecisões poderiam ser devidas à própria operação de sondagem ou às variações recentes das feições. Mais tarde, constatou-se que elas eram devidas à sondagem. Entretanto, em outras regiões de estudo, observou-se que as imprecisões deviam-se às modificações geológicas posteriores às sondagens.

Stafford e Langfelder (1971) discutem as vantagens e desvantagens do uso de fotografia aérea para detecção de erosão costeira, assim como Dolan e Vincent (1973) que verificam a utilização da técnica da fotografia para monitorar crescimento de feições de areia dentro de bacias e próximo às praias.

Meireles (1980) e Solewicz (1989) descrevem as dificuldades para um levantamento hidrográfico, desde o método de sondagem, com a necessidade de tempo excessivo para cumprir uma missão e campo de "visada" pequeno, até a utilização de dados de "laser" e imagens orbitais.

Vianna et al. (1989) discutem as relações existentes entre feições submarinas, observadas por dados de imagens orbitais (TM/Landsat 5) produzidos na banda do azul

do espectro do visível, e as mudanças do nível do mar, na plataforma continental do Estado do Rio Grande do Norte.

Vianna e Solewicz (1989) descrevem feições submarinas, descobertas com dados TM, como um campo de dunas submarinas, numa região mais ao leste da área de estudo do atual trabalho, caracterizando aquelas dunas como compostas por areia quartzosa média.

Vianna et al. (1991, 1993) apresentam uma caracterização da morfologia da Plataforma Continental, discutem o mapeamento de antiga linha de costa numa profundidade até 25 m e o mapeamento de algas na região do nordeste brasileiro (Cabo Calcanhar), dentro da plataforma continental até a profundidade de 40 m, a partir de dados TM/Landsat e dados ecobatimétricos. As características daquela região se assemelham em muito com a região do atual trabalho. Testa (1996) apresenta estudos detalhados da distribuição dos sedimentos superficiais daquela região, bem como descrição dos corpos arenosos visíveis por imagens TM. Nestes trabalhos, a coleta dos sedimentos e observação dos corpos arenosos foram realizadas através de mergulho (cerca de 400 estações), utilizando-se barcos lagosteiros como plataformas de mergulho, dentro de uma metodologia desenvolvida pelo Projeto TOPSUB/INPE.

Algumas características das feições submarinas podem fornecer as direções de correntes unidirecionais e de marés, como poderá ser observado neste trabalho, o que se constitui o tradicional “problema inverso”, usualmente utilizado por geólogos para caracterizar correntes marinhas de épocas anteriores.

Cabral (1993) realizou um estudo fotobatimétrico de um setor da costa leste do Estado do Rio Grande do Norte, utilizando-se de imagens TM/Landsat-5 e de um transecto batimétrico linear para calibração dos dados orbitais. Neste estudo, ele obteve uma estimativa do coeficiente de atenuação da água, para as bandas 1 e 2, e gerou uma imagem fotobatimétrica e outra imagem temática de tipo de fundo, utilizando-se, para isso, do método descrito em (Lyzenga, 1978). Além disso, Cabral aplicou a técnica da Transformação por Componentes Principais para geração de imagem fotobatimétrica e de tipo de fundo, obtendo bom resultado com a fotobatimetria.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: ÓPTICA MARINHA E FEIÇÕES SUBMARINAS

As características de águas rasas e as feições submarinas, cor da água, transparência, tipos de fundo, onda, dentre outras, têm sido estudadas desde o final da década de 60 e início da década de 70 (Polcyn e Rollin, 1969; Polcyn et al., 1970) por medidas de sensoriamento remoto. Estes estudos têm desenvolvido técnicas específicas para cada uma dessas aplicações (Polcyn e Rollin, 1969; Polcyn et al., 1970; Gordon e McCluney, 1975; Polcyn e Lyzenga, 1975; Lyzenga, 1978, 1979, 1981; Paredes e Spero, 1983; Clark et al., 1987; Spitzer e Dirks, 1987; Philpot, 1989; Bierwirth et al., 1993; Maritorena, 1996).

De acordo com as análises de Spitzer e Dirks (1987), somente as respostas espectrais das primeiras duas bandas do MSS e HRV e as três primeiras bandas do TM são úteis para o estudo da batimetria por sensores a bordo de satélites, uma vez que estão na faixa do espectro eletromagnético cuja atenuação da água é menor. Nenhuma diferença substancial foi verificada quando da utilização do algoritmo usado por estes pesquisadores para estes três sensores.

O intervalo de profundidade da água, que pode ser medido através de técnicas de sensoriamento remoto, é limitado para uma dada banda espectral devido à propagação da radiação ter uma dependência exponencial com o coeficiente de atenuação da água. Assim, a profundidade em águas rasas é medida pela determinação dos coeficientes de atenuação, a partir dos valores radiométricos dos “pixels”, em diferentes bandas espectrais. Como diferentes comprimentos de onda penetram em diferentes profundidades na água, os métodos para extração da batimetria, por múltiplos canais, são úteis quando duas ou mais bandas são utilizadas.

A Figura 2.1 ilustra o comportamento da radiação a partir do sol e interagindo com o corpo d'água até atingir o sensor. O sinal proveniente do fundo do mar, registrado pelo

sensor, sofre a influência do retroespalhamento da radiação pela atmosfera, da reflectância da superfície da água, da profundidade e dos materiais na coluna d'água (matéria orgânica, sedimentos em suspensão e substâncias dissolvidas), o que irão influenciar no fluxo da radiação absorvida e espalhada. É sabido que esses efeitos variam com o comprimento de onda (Mobley, 1994).

A confiabilidade das medidas do sensor orbital para indicação de profundidade de águas rasas é influenciada pela qualidade da luz, material em suspensão, tipo de fundo e presença de vegetação. Assim, a quantidade de luz refletida para o sensor é proporcional a vários fatores, tais como à transparência da água, profundidade, propriedades ópticas e à reflectância do material do fundo (Lyzenga, 1981; Moritorena, 1994, 1996).

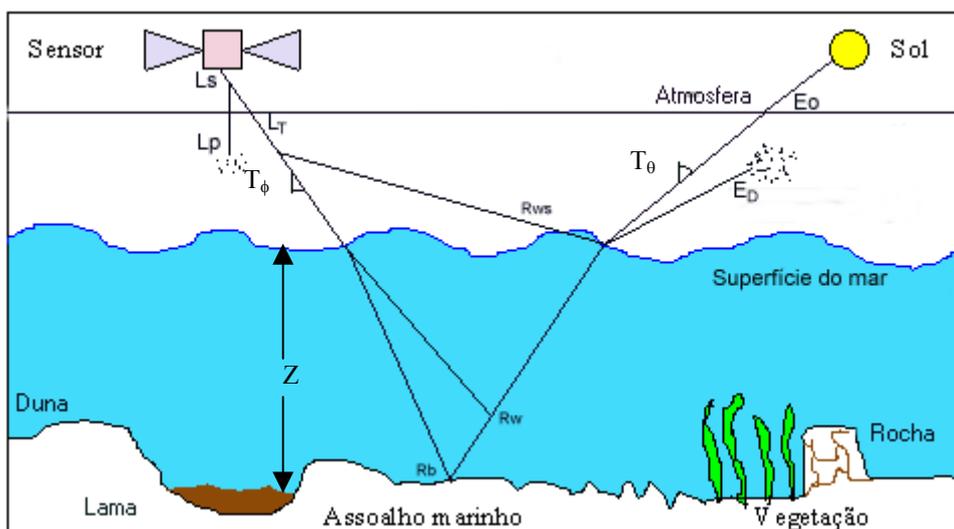


Fig. 2.1- Fatores que influenciam a quantidade de radiação que chega ao sensor a partir do corpo d'água. Dimensões exageradas para melhor visualização.

Z é a profundidade da coluna de água;

$E_0 \equiv$ constante solar;

$T_\phi, T_\theta \equiv$ transmitância atmosférica;

$E_D \equiv$ irradiância difusa do céu;

$R_{ws} \equiv$ reflectância da superfície da água;

$R_w \equiv$ reflectância das moléculas e partículas na coluna de água;

R_b \equiv reflectância do fundo;

R_E \equiv reflectância efetiva do corpo d'água;

L_P \equiv radiância retroespalhada pela atmosfera;

L_T \equiv radiância do alvo transmitida através da atmosfera;

L_S \equiv radiância recebida pelo sensor.

A reflectância do fundo não é diretamente observável pelo sensor orbital, já que ela é modificada pelos efeitos de absorção e espalhamento na coluna d'água. Lyzenga (1981) observa que, em princípio, estes efeitos podem ser calculados se a profundidade e as propriedades ópticas forem conhecidas em cada ponto da cena. Estas propriedades da água podem, freqüentemente, ser consideradas uniformes sobre áreas razoavelmente extensas devido à mistura horizontal da coluna de água.

2.1 TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO ATRAVÉS DA ATMOSFERA

A interação da radiação eletromagnética com a atmosfera depende do seu comprimento de onda, do tamanho das partículas em suspensão, sua composição e concentrações. Ao ser transmitida na atmosfera, a radiação sofre os efeitos de espalhamento e absorção. Ao processo conjunto de absorção e espalhamento é dado o nome de atenuação, que é causada pelas partículas em suspensão tais como poeira, fumaça, névoa, vapor d'água e componentes gasosos dos tipos N_2 , O_2 , O_3 , CO_2 , CO , H_2O e CH_4 (Szekiela, 1988).

2.1.1 ESPALHAMENTO

Há dois processos básicos de espalhamento, o espalhamento Mie e o espalhamento Rayleigh. Segundo Slater (1980) o espalhamento Rayleigh é o principal efeito da interação da radiação com a atmosfera na faixa do espectro eletromagnético do visível, cuja seção de choque da radiação com os elementos espalhadores, tais como as moléculas de ar seco (CO_2 , O_3 , N_2O , CO , CH_4 e N_2), é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação.

O espalhamento representa a perda da energia de um feixe de radiação pelo redirecionamento de parte de seus fótons em outras direções. Quando as dimensões dos

elementos espalhadores é comparável ao comprimento de onda do feixe incidente, tem-se o chamado espalhamento Mie, que é predominante na direção de propagação da radiação e independe do comprimento de onda.

2.1.2 ABSORÇÃO

A absorção é uma transformação termodinâmica da energia radiante em calor. Na região espectral do visível, em uma atmosfera clara, a absorção é considerada muito baixa e, portanto, insignificante. Isto deve-se ao fato de que o processo de absorção é causado principalmente por partículas, e o processo é função do comprimento de onda da radiação. Assim, a absorção deve ser considerada, para atmosfera úmida (vapor de água) e poluída (aerossóis, tais como fumaça industrial, pólen, erupções vulcânicas, etc.), de acordo com os cálculos da transferência radiativa (Chandrasekhar, 1960). A absorção por gases é um processo seletivo, por exemplo, devido ao ozônio a absorção é muito intensa para comprimentos de ondas menores que $0,29 \mu\text{m}$, e o vapor de água e o dióxido de carbono causam maior absorção na banda do infravermelho. Quando se trata de gases, o processo de absorção depende do estado de energia de uma molécula.

2.2 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A ÁGUA

As interações fundamentais da luz com um meio aquoso são:

- a) a reflexão na superfície da água do feixe incidente;
- b) a refração do feixe incidente na superfície da água;
- c) a absorção pela água e outros materiais na coluna d'água;
- d) o espalhamento pelos materiais em suspensão na água e
- e) a reflexão do fundo.

Um modelo para a batimetria, que determina as mudanças da radiação causadas pelas variações de profundidade, ou do tipo de fundo, necessita levar em consideração todas as interações acima citadas.

Segundo Polcyn e Rollin (1969), para medida de profundidade do relevo submarino, requer-se um conhecimento da transmitância espectral da água pura, oceânica e costeira

e dos efeitos das partículas inorgânicas e orgânicas sobre essa transmissão. Porém, nem sempre é possível obter todos os parâmetros necessários num espaço de tempo suficiente e concomitante à passagem de um sensor remoto.

2.2.1 PROPRIEDADES ÓPTICAS DA ÁGUA

A completa caracterização da interação da radiação eletromagnética num corpo d'água é descrita por suas propriedades ópticas, estas são divididas em propriedades ópticas inerentes (POI) e propriedades ópticas aparentes (POA) (Mobley, 1994).

Uma propriedade óptica é dita inerente, se o seu valor operacional em um dado ponto do meio for invariante com a mudança da distribuição da radiação naquele ponto. As propriedades ópticas inerentes (POI) são especificadas diretamente pelos coeficientes de espalhamento e absorção que caracterizam o meio, e são independentes do material dissolvido e suspenso na água, e das propriedades eletromagnéticas do meio.

Uma propriedade óptica é dita aparente, se seu valor operacional em um dado ponto do meio depender da distribuição da radiação naquele ponto. As propriedades ópticas aparentes (POA) podem ser relacionadas pelas POI através da teoria da transferência radiativa, e são dependentes dos materiais dissolvidos e em suspensão na água, e da geometria da distribuição da luz.

Qualquer medida remota de batimetria requer dados que especifiquem os parâmetros ópticos da água que, idealmente, seriam obtidos sem medidas de verdade de campo e produzidos a partir de modelos. No entanto, é difícil se medir as POI, especialmente *in situ*. Somente o coeficiente de atenuação do feixe é medido rotineiramente e com acurácia em medidas *in situ*. As medidas comumente realizadas são de várias propriedades ópticas aparentes.

A atenuação da energia luminosa aumenta com a espessura da coluna de água devido à absorção da luz pelas moléculas do líquido, pelas substâncias dissolvidas ou partículas (orgânicas e inorgânicas), e devido ao espalhamento a partir das partículas em suspensão.

A intensidade da radiação espalhada e absorvida pela água é calculada pela lei de Beer (Mobley, 1994).

$$\mu \frac{dL}{dz} = -L, \quad (2.1)$$

onde L é a radiância, $\mu = \cos\theta$ é o coseno médio da direção da irradiância em relação nadir e z é a profundidade. Maiores detalhes desta formulação podem ser vistos no trabalho de Mobley (1994).

A Equação 2.1 é facilmente integrada e produz:

$$L(z, \phi) = L(0, \phi) \exp.(-z / \mu), \quad (2.2)$$

onde ϕ é o ângulo zenital referente a direção do feixe de radiação.

A equação acima pode ser substituída pela seguinte expressão:

$$I_z = I_0 e^{-\alpha z}, \quad (2.3)$$

onde,

I_z é a intensidade da radiação após percorrer a distância z ;

I_0 é a intensidade na superfície;

z é a distância percorrida na água;

α é o coeficiente de atenuação total da água com unidade de m^{-1} e $\alpha = \alpha_s + \alpha_a$.

Aqui, α_s é o coeficiente de espalhamento do meio e das partículas em suspensão e α_a é o coeficiente de absorção. Ambos os coeficientes são dependentes do comprimento de onda.

Algoritmos mais gerais têm sido elaborados, levando-se em conta os efeitos do tipo de fundo, tal como o que segue (Bierwirth et al., 1993):

$$L_E = \exp.(-2kZ)L_b + (1 - \exp.(-2kZ))L_w, \quad (2.4)$$

onde L_E é a radiância emergindo da massa de água, L_b é a radiância do fundo, L_w é a radiância para águas profundas e k é o coeficiente de atenuação efetivo do corpo d'água.

No entanto, é preferível utilizar a propriedade da reflectância ao invés da radiância. Isso se deve ao fato de que a reflectância do fundo e da coluna d'água serem medidas que não dependem das condições de iluminação, e que a reflectância é a razão da radiância emergente pela irradiância total, e a reflectância é proporcional à radiância. Então, a Equação 2.4 pode ser normalizada para a reflectância, dando

$$R_E = \exp(-2kZ)R_b + (1 - \exp(-2kZ))R_w. \quad (2.5)$$

CAPÍTULO 3

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS TM LANDSAT PARA A CARACTERIZAÇÃO DA MORFOLOGIA DE FUNDOS

3.1 SENSOR TM LANDSAT

Sensores operam em muitos comprimentos de onda, desde o ultravioleta até as microondas. Para se obter informações sobre a profundidade de águas rasas, os sensores normalmente utilizados operam na faixa do visível do espectro eletromagnético, onde a absorção da radiação é mínima para o meio aquoso (Prewett et al., 1973). A Tabela 3.1 mostra as características do sensor TM/Landsat.

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS DO SENSOR TM

| Resolução espectral | Número de banda | Largura da banda (μm) | Sensitividade radiométrica ($NE\Delta\rho$) |
|-------------------------------|---|------------------------------------|---|
| | 1 | 0.45 - 0.52 | 0.8 |
| | 2 | 0.53 - 0.61 | 0.5 |
| | 3 | 0.62 - 0.69 | 0.5 |
| | 4 | 0.78 - 0.91 | 0.5 |
| | 5 | 1.57 - 1.78 | 1.0 |
| | 6 | 10.42 - 11.66 | 0.5 |
| | 7 | 2.08 - 2.35 | 2.4 |
| IFOV sobre o solo | 30 m (bandas 1 -5 e 7) 120 m (banda 6) | | |
| Nível de quantização do sinal | 256 (8-bit) | | |
| Taxa de dados | 85 Mbit/sec | | |

FONTE: Adaptada de Szekiela (1988, p. 22).

O satélite Landsat 5 fornece dados entre as latitudes 81° norte e 81° sul. A órbita é quase polar, solssíncrona e encontra-se numa altitude de cerca de 705 km, possibilitando uma repetitividade de 16 dias sobre uma mesma faixa de terreno.

3.1.1 FILTRAGEM

O processo de filtragem deve-se ao fato de haver a presença de ruídos sobre imagens e tem como objetivo eliminar ou minimizar esses efeitos indesejáveis. Um destes ruídos em imagens multiespectrais é comumente conhecido como "striping" (Malaret et al., 1985), e é predominantemente verificado em regiões escuras das imagens, tais como corpos de água e sombras, onde ocorre baixa intensidade e pouca variação de nível de cinza ou sinal. Em trabalhos sobre águas, principalmente sobre as bandas 2 e 3 do TM, é notório a presença deste efeito.

3.1.2 "STRIPING"

Há basicamente dois tipos de efeitos quando se trata do ruído "striping": um devido às diferenças de ganho entre os detectores em qualquer banda, o outro devido à diferença de brilho entre as varreduras do sensor.

Para o caso do sensor TM, o "striping" deve-se ao fato de não haver total calibração entre os 16 detectores do sensor. Existem técnicas que tentam eliminar ou minimizar este tipo de problema. Uma delas é pela equalização do histograma (Singh, 1985a; 1985b) uma outra pela Transformada de Fourier (Mascarenhas e Velasco, 1984; Richards, 1986; Souza Filho e Dinniss, 1997).

3.2 ESTRUTURAS SEDIMENTARES OBSERVÁVEIS POR IMAGENS

TM/LANDSAT

As correntes de marés contribuem para o transporte de sedimentos, provocando ou deposição, ou erosão dos mesmos. Por consequência, este processo modifica os parâmetros ópticos da água, deixando-a turva. No entanto, correntes unidirecionais são também responsáveis por efeitos modeladores das feições submarinas. A Figura 3.1 mostra um diagrama que relaciona as diversas formas de feições submarinas com as

velocidades de correntes, mostrando que os tipos de feições e suas formas (transversais e longitudinais) dependem da velocidade do fluxo e do tipo de sedimentos recobrendo a Plataforma.

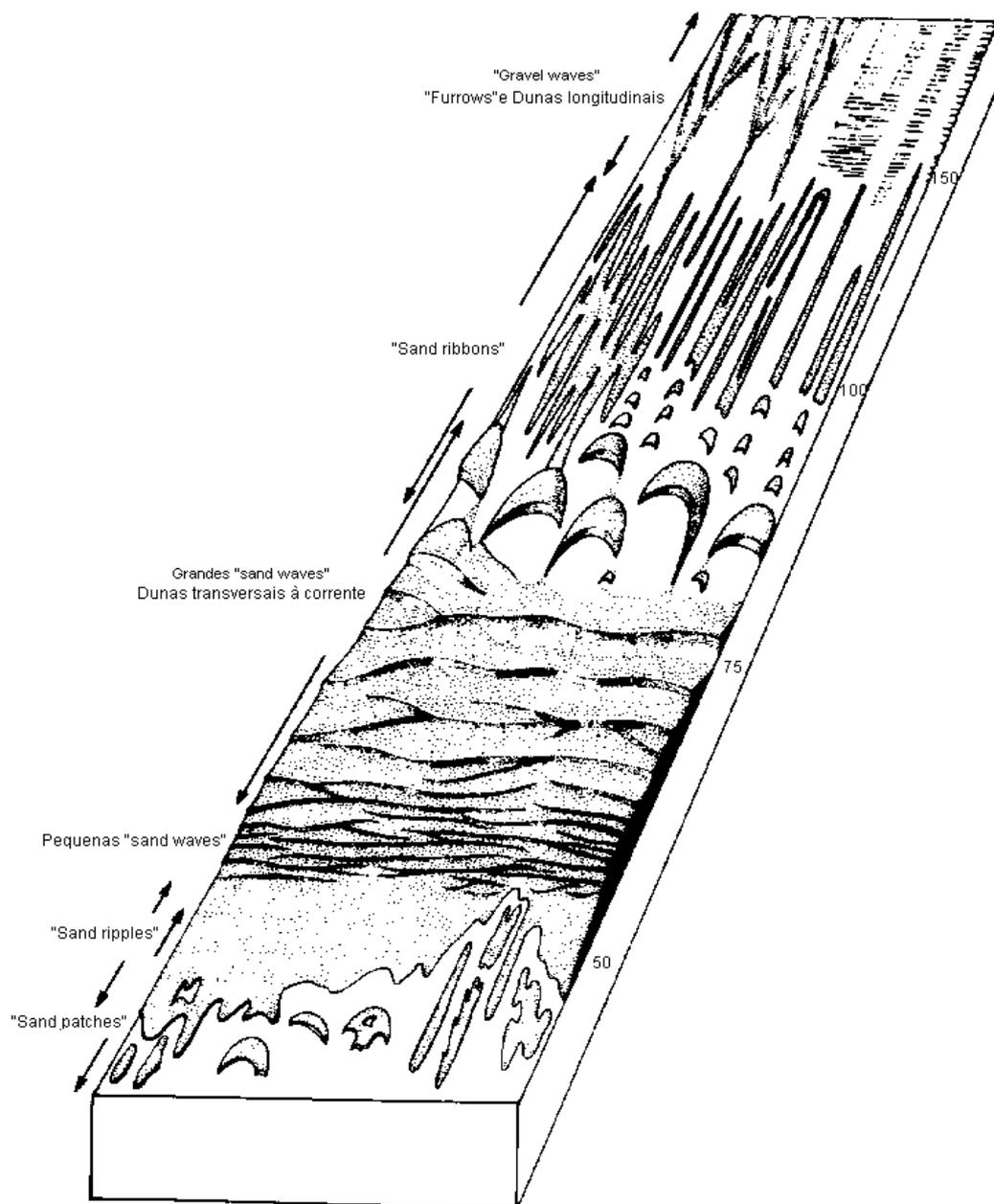


Fig. 3.1 - Diagrama relacionando as formas dos corpos arenosos com a velocidade de corrente máxima de superfície em cm/s.

FONTE: Adaptada de Belderson et al (1982, p. 28).

Para a área de estudo deste trabalho, as correntes presentes não passam de cerca de 40 cm/s na zona mais externa à costa, e é dominada por correntes de maré na zona interna. Nela observa-se, no setor mais externo, corpos do tipo dunas assimétricas de grande escala e, na parte mais interna, dunas simétricas formadas, possivelmente, por correntes de maré.

3.2.1 FORMAS DE LEITO LONGITUDINAIS

Estas estruturas podem ser associadas com as velocidades máximas da corrente de maré, restritas dentro de um certo intervalo de intensidade. Alguns exemplos são as "scour hollows", "longitudinal furrows", "obstacle marks", "sand ribbons", "longitudinal sand patches" e "sand banks" (Belderson et al., 1982).

3.2.1.1 "SCOUR HOLLOWs", "LONGITUDINAL FURROWS" E "OBSTACLE MARKS"

As feições do tipo "scour hollows" são estruturas formadas a partir de erosão da superfície do fundo provocada por corrente, ou pela presença de obstáculos resistentes à corrente. São confinadas em áreas próximo à superfície onde a velocidade de corrente de maré chega a cerca de 150 cm/s ou mais, tendendo a se alongarem segundo a direção da corrente.

As "longitudinal furrows" são também feições de erosão, associadas à correntes unidirecionais. Essas feições, em fundos de cascalho, são formadas por correntes de marés que alcançam até 150 cm/s ou mais. Elas chegam a ter 8 km de comprimento, 30 m de largura e 1 m de profundidade. Em locais dominados por sedimentos lamosos as "longitudinal furrows" chegam a possuir 1,5 km de comprimento, 15 m de largura e 1 m de profundidade, numa área com cerca de 70 cm/s de corrente de maré (Belderson et al, 1982).

Obstáculos à corrente podem causar a erosão e/ou deposição de sedimentos, dependendo do material que compõe tanto o obstáculo quanto o fundo. A forma e a dimensão de um obstáculo, assim como a intensidade da corrente e a quantidade de

material sedimentar variam de tal forma que podem provocar feições de quilômetros de comprimento e algumas dezenas de metros de altura, são as "obstacle marks". Elas aparecem alongadas no sentido da corrente devido ao transporte de sedimentos (Figura 3.2).

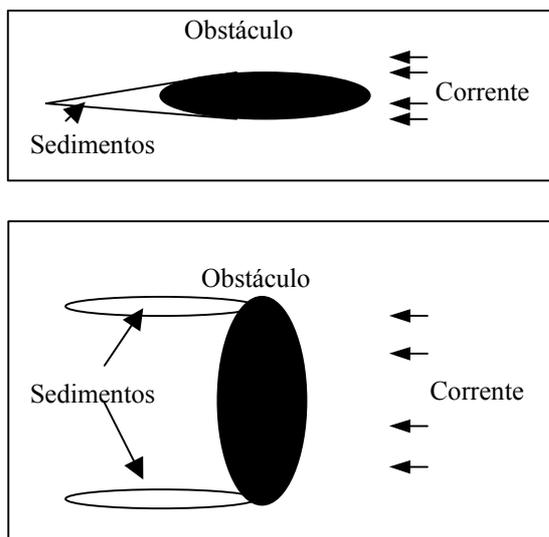


Fig. 3.2 - Diagrama mostrando a variação do posicionamento de um obstáculo em relação à corrente e a conseqüente formação das "obstacle marks".

FONTE: Adaptada de Belderson et al (1982), p. 46.

3.2.1.2 "SAND RIBBONS" E "LONGITUDINAL SAND PATCHES"

As "sand ribbons" são feições longitudinais geralmente constituídas de areia e formadas pela ação de correntes unidirecionais sobre os sedimentos. Suas cristas são dispostas paralelamente à direção da corrente, podem atingir até 15 km de comprimento e largura de até 200 m (Belderson et al, 1982), espaçadas uma das outras entre 40 a 60 m por longas distâncias (Allen, 1968). São localizadas onde ocorre correntes intensas.

As "sand patches" são associadas às correntes fracas de maré (menos de 50 cm/s) e ocorrem geralmente em locais arenosos, direcionadas tanto longitudinalmente como transversalmente à corrente de maré, chegam a alcançar de 2 a 3 metros de largura (Belderson et al, 1982). Normalmente, próximo a uma zona de "sand ribbons" ocorre

uma zona de “sand patches”, estas duas espécies de feições são separadas por uma zona de “sand waves” (Belderson et al, 1982).

3.2.2 FORMAS DE LEITO TRANSVERSAIS

Estruturas transversais tais como as do tipo "sand ripples", "sand patches" e "sand waves", estas últimas chamadas de “dunas” (Ashley et al, 1990), são geralmente diferenciáveis pelas suas dimensões e, por serem dependentes da profundidade, tendo, em geral, orientação transversal ao sentido da corrente. No entanto, elas podem apresentar orientações variáveis. A variabilidade denota instabilidade, possibilitando inferir sobre a dimensão dos grãos de areia que as compõem, ou mesmo a velocidade da corrente sobre elas.

3.2.2.1 "SAND PATCHES" E "SAND WAVES"

"Sand patches" são encontradas em regiões com correntes fracas (cerca de 50 cm/s, ou menos) e variam de tamanho. Podem ser transversais ou longitudinais à corrente. Apresentam dimensões de largura variando entre 2 a 4 m, tendendo a serem distorcidas na sua forma (Belderson et al, 1982).

Feições de grande escala com dimensões de largura típicas entre 10 a 100 m, as "sand waves" transversais (ondas de areia submarinas assimétricas) são dispostas transversalmente à corrente de maré, e modeladas pela mesma. Suas localizações são restritas a locais que tenham picos de correntes superficiais de maré relativamente fortes (maiores que 50 cm/s) e onde os sedimentos superficiais não são coesivos.

Grandes "sand waves" são associadas empiricamente a picos de corrente de maré com velocidade em torno de 65 cm/s, com média de cerca de 50 cm/s. Por suas elevadas dimensões, apresentam faces de avalanche com inclinações entre 25° a 30°. Estudos sugerem que são necessárias correntes com velocidades entre 40 a 50 cm/s para se construir dunas de areia com grãos de diâmetro de 100 µm (Belderson et al, 1982). Uma implicação para este estudo seria que, a partir do conhecimento da existência de feições

do tipo “sand waves” num determinado local, poder-se-ia inferir a velocidade máxima de corrente próximo à superfície.

As Dunas submersas, que são grandes ondas de areia assimétricas causadas por correntes unidirecionais, incorporam em geral faces de avalanche em seu bordo de sotavento. Elas se distinguem das “sand waves” por serem assimétricas, com a morfodinâmica dependente mais de correntes unidirecionais do que correntes que se invertem em um ciclo de maré.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na Bacia Potiguar, no Estado do Rio Grande do Norte, entre as coordenadas UTM 690.000 E e 840.000 E, 9.430.000 S e 9.510.000 S (Figura 4.1), compreendida entre os municípios de São Bento do Norte e Areia Branca. Esta é uma zona costeira de águas rasas e de mar aberto que inclui a Plataforma Continental interna e média, cuja largura, até a isóbata (linha que liga pontos de igual profundidade) de 30 metros, varia de cerca de 17 km a 40 km, e na qual se encontram diversas feições submarinas como campos de dunas hidráulicas vegetadas. A economia da região é baseada na pesca, que é proibida nas épocas da procriação (dezembro a maio) (Testa, 1996).

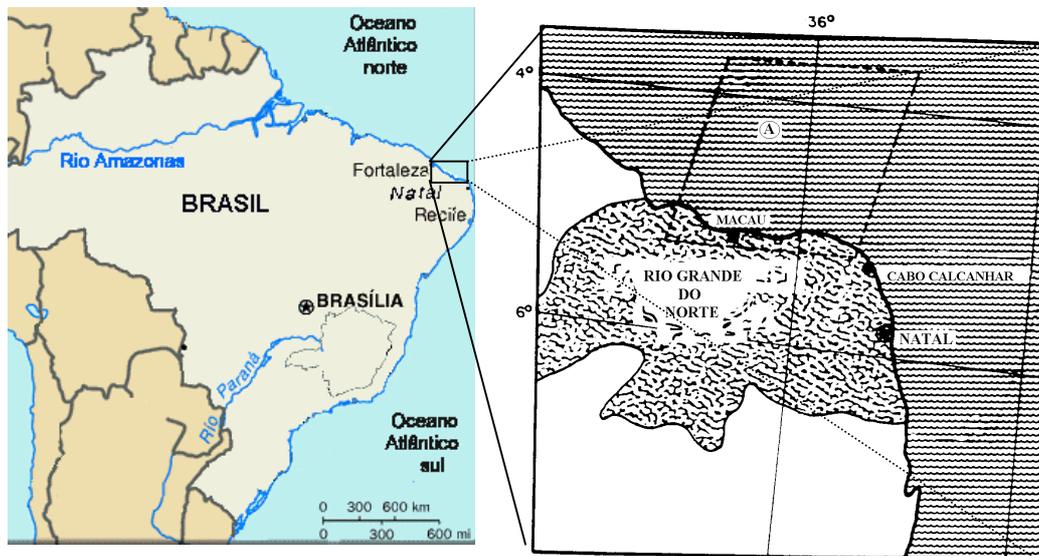


Fig. 4.1 - Região de estudo e sua localização.

FONTE: Adaptada de Solewicz (1989, p. 60).

Segundo Barreto e Summerhayes (1977) a concentração de material em suspensão, para as águas da região que compreende este trabalho, é geralmente muito baixa (menos de 0.5 mg/l).

Em relação aos sedimentos que recobrem a Plataforma, Summerhayes et al. (1977) indicam que o substrato da região é predominantemente composto de areia e cascalho a profundidades de 20 m, contendo menos de 2,5 % de argila.

4.2 MATERIAIS

1) Documentos cartográficos:

- Carta náutica B 700 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) em escala 1:316.220 em Projeção de Mercator de dezembro de 1980 (esgotada, mas disponível no Projeto TOPSUB/INPE);
- Carta náutica 720 da DHN em escala 1:100.000 em Projeção de Mercator de maio de 1974 (adquirida junto à mapoteca da biblioteca do INPE) e
- Ecograma.

2) Produtos TM/Landsat-5:

| <i>Base/ponto</i> | <i>Quadrante</i> | <i>Data</i> | <i>Bandas</i> |
|-------------------|------------------|-------------|---------------|
| 215/63 | cena | 16/06/1984 | 1, 2, 3 e 4 |
| 215/63 | cena | 30/07/1988 | 1, 2, 3 e 4 |
| 215/63 | cena | 15/06/1989 | 1, 2, 3 e 4 |
| 215/63 | cena | 06/09/1990 | 1, 2, 3 e 4 |

As imagens TM/Landsat-5 adquiridas da área de estudo, correspondentes à órbita/ponto 215/63, foram obtidas em “Compact Disc” (CD) a partir do INPE de Cachoeira Paulista. Elas foram selecionadas tendo como critério a cobertura mínima de nuvem. Cada imagem correspondendo a uma cena inteira com correção geométrica e radiométrica (nível de correção 6). Utilizando-se do módulo IMPIMA do aplicativo Sistema de Processamento de Imagens e Informações Geográficas - SPRING (versão 2.0.4), elaborado na Divisão de Processamento de Imagens (DPI), que tem a função de realizar

leituras de imagens e possibilitar a escolha de setores dentro das mesmas, foi selecionada a área correspondente até a isóbata de 1000 m, aproximadamente.

3) “Aplicativos” utilizados:

- SPRING (versão 2.0.4) – aplicativo desenvolvido pelo INPE para Processamento de imagens e Geoprocessamento;
- Sistema Geográfico de Informações - SGI (versão 2.5) – aplicativo desenvolvido pelo INPE para Processamento de imagem e Geoprocessamento;
- “The Enviroment for Visualizing Images”, ENVI (versão 2.6), aplicativo licenciado para o Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais – LTID/INPE;
- Paint Shop Pro (verão 4.12) e
- Excel (versão 7.0).

4) Outros:

- Mesa digitalizadora Digigraf 1 para digitalização de cartas e mapas;
- Estações de trabalho Sun com sistema operacional UNIX para Geoprocessamento.

4.3 DIGITALIZAÇÃO DA CARTA NÁUTICA

A carta náutica B 700 da DHN foi digitalizada através do aplicativo SGI. Utilizando-se da função de definição de projeto, criou-se o projeto Tuba e, com a função de criação de planos de informações (PIs), foram criados os PIs Foto e Mol que correspondem à categoria Modelo Numérico de Terreno (MNT) e Temático, respectivamente. O projeto foi definido em projeção UTM/Holdfiel/Córrego Alegre na escala da carta náutica de 1 / 316220. Inicialmente o retângulo envolvente do projeto foi definido em coordenadas geodésicas: 4° 20' 00" S e 5° 10' 00" S, 35° 50' 00"W e 37°20' 00" W, que corresponde a área de estudo, e com meridiano central em 39° 00' 00" W.

Com a função de entrada de dados MNT inicializou-se a digitalização com distância mínima das amostras de 5. Esta distância corresponde ao espaçamento entre os pontos digitalizados de uma linha.

As isobatimétricas encontram-se dispostas em intervalos de 5 m até a isobatimétrica de 50 m. De 50 a 100 m encontram-se em intervalos de 10 m, e finalmente, de 100 a 1000 m em intervalos de 100 m.

4.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

4.4.1 REGISTRO

O estudo multitemporal (imagens de datas diferentes) e multiespectral (bandas diferentes) necessita que haja uma justaposição entre os “pixels” que representam uma mesma área.

O registro das imagens foi realizado a partir da carta náutica B700 da DHN digitalizada. Para isso, fez-se o uso do aplicativo SPRING (versão 2.0.4) com sua função de registro. Assim, foi utilizada a linha da costa como referência para a realização desta tarefa, juntamente com a banda 4 que separa claramente a terra da água.

Os pontos de controle foram dispostos ao longo da linha da costa, tendo apenas um dos pontos posicionado no Porto-Ilha de Termisa, cuja localização geográfica se tinha conhecimento (9.467.162 S e 716.889 W em coordenadas UTM).

Foram selecionados um número suficiente de pontos de controle, seis ao todo, utilizando-se do polinômio de primeiro grau para o ajuste. Estes pontos de controle foram escolhidos de maneira a fornecer um menor valor do erro dos pontos de controle (em unidades de resolução de “pixels”), fornecido pelo SPRING (INPE, 1997).

4.4.2 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Com relação à correção atmosférica, entendendo-se que não havia necessidade de submeter as imagens a qualquer correção, uma vez que as informações extraídas das imagens (interpretação visual) não seriam influenciadas significativamente, optou-se em utilizar o método de Chaves Jr. (1988) apenas para classificar as condições da atmosfera a partir da leitura dos níveis de cinza iniciais do histograma das imagens.

4.4.3 SUB-AMOSTRAGEM DA ÁREA DE ESTUDO

Após realizado o registro das imagens, criou-se um projeto dentro do SPRING, cuja área compreende um setor no qual foi realizado uma sondagem ecobatimétrica em 16/05/1989. Para este projeto foram importadas as imagens correspondentes à data de 15/06/1989, assim como o PI (Plano de Informação) numérico da carta digitalizada. A sub-área encontra-se entre as coordenadas geodésicas $04^{\circ} 44' 51.1''$ S e $04^{\circ} 34' 18.0''$ S, $37^{\circ} 03' 03,81''$ W e $36^{\circ} 48' 18.3''$ W. A Figura 4.2 mostra a imagem TM/Landsat-5 na banda 1 com o traçado da trajetória da sondagem ecobatimétrica realizada por um navio (Corveta Forte de Coimbra). A elaboração deste traçado será descrita mais adiante. A área encontra-se a noroeste do paleocanal do Rio Mossoró e do porto ilha de Termisa. Segundo França et al. (1979), na região ocorre a presença de areias carbonáticas biogênicas podendo conter pequenas quantidades de areia quartzosa relíquia. As algas calcárias são os restos mais abundantes nesses sedimentos.

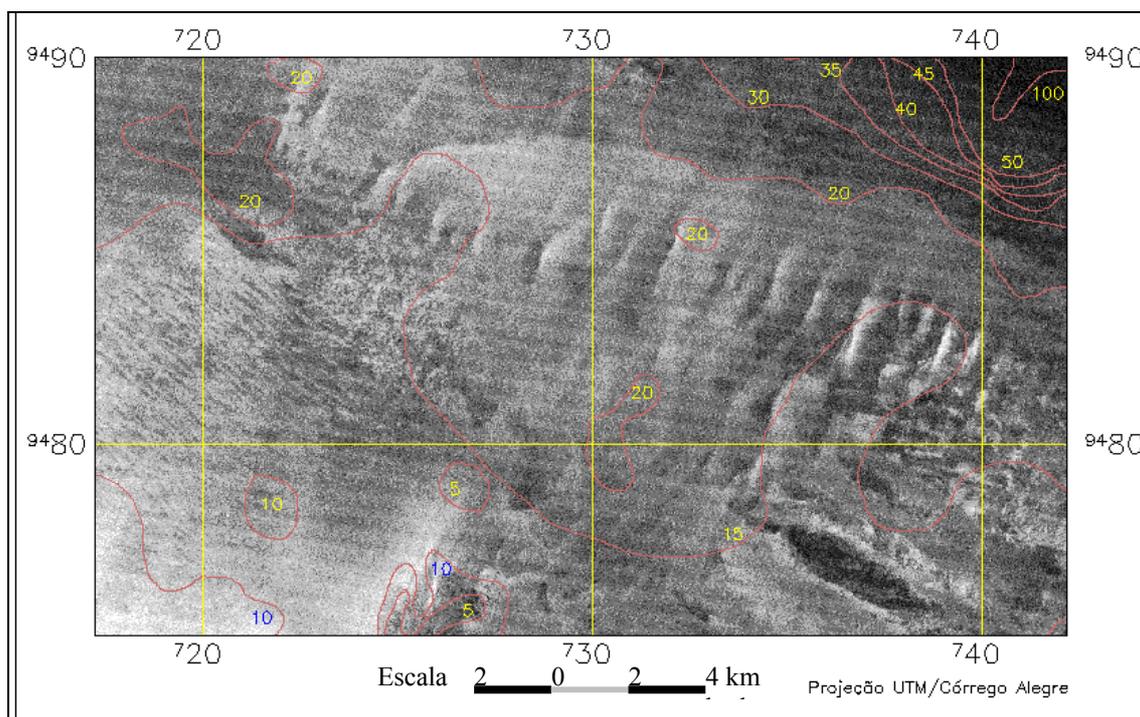


Fig. 4.2 – Sub-área de estudo onde foi realizado uma sondagem ecobatimétrica em 16/05/1989. A obtenção da imagem acima, georeferenciada, é descrita adiante.

Esta área exibe uma certa complexidade no que se refere a circulação local, fato esse verificado através das inúmeras prováveis feições de areia: umas causadas provavelmente por correntes de maré na zona próximo a costa (profundidades entre 5 a 15 m); outras (dunas assimétricas), numa zona mais externa, geradas provavelmente por correntes unidirecionais de cerca de 50 cm/s, como relata Beldernson et al (1982). Nela foram obtidos diversos perfis espaciais de NC, através do aplicativo ENVI, para posterior comparação com o perfil batimétrico.

Toda a área de estudo foi amostrada em sub-áreas para melhor detalhamento e mapeamento das feições presentes. Isto foi realizado para todas as imagens (banda 1) adquiridas, no intuito de avaliar os possíveis processos de sedimentação através da análise de interpretação visual multitemporal e multiespectral (bandas 1, 2 e 3).

O mapeamento e documentação das feições foram realizados no módulo SCARTA do aplicativo SPRING, onde se gerou as imagens em coordenadas UTM.

4.5 MÉTODO UTILIZADO PARA REALIZAR MEDIDAS DE DISTÂNCIAS ENTRE DOIS PONTOS DA IMAGEM

Através da equação 4.1 pode-se obter distâncias entre pontos cujas coordenadas geodésicas são conhecidas:

$$\Delta S = (a\pi)/180[(\Delta\theta)^2 + \cos\theta_A \cos\theta_B (\Delta\alpha)^2]^{1/2}, \quad (4.1)$$

onde ΔS é a distância entre os pontos, θ_A e θ_B são as latitudes em radianos nos pontos A e B, $\Delta\theta$ e $\Delta\alpha$ são as diferenças das latitudes e das longitudes dos mesmos, respectivamente, e a é o raio médio da Terra (Gemael, 1982). A equação acima foi utilizada para auxiliar na localização dos corpos arenosos, registrados por sondagem batimétrica, em imagem TM.

4.6 TRATAMENTO DAS IMAGENS

Na manipulação de imagens multiespectrais, formadas por suas bandas, utiliza-se com sucesso técnicas estatísticas, como a análise por componentes principais (Richards, 1986; Crosta, 1993). Esta técnica consiste em produzir, a partir de uma imagem multiespectral, uma nova imagem com a mesma estrutura, onde as novas bandas são combinações lineares das bandas da imagem multiespectral original, que têm propriedades estatísticas de grande importância, como a maximização das variâncias. Assim, a primeira componente é a componente linear normalizada que apresenta a maior variância, isto é, contendo a maior parte de informação. A segunda componente é a combinação linear normalizada, não correlacionada com a primeira componente, que apresenta a maior variância que a terceira e menor que a primeira, e assim por diante. Normalmente, nas últimas componentes restringem-se os ruídos inerentes. A imagem formada pelas componentes principais é o resultado de uma transformação linear da imagem multiespectral, que tem as propriedades de uma rotação. De uma maneira equivalente, os valores assumidos pela imagem formada pelas componentes principais correspondem a uma decomposição dos valores assumidos pela imagem original, num novo sistema de coordenadas deduzido do sistema de coordenadas original por uma rotação (Banon, 1992).

Neste trabalho utilizou-se a técnica da transformada por componentes principais para discriminação de feições, e a técnica da Transformada de Fourier para eliminar os efeitos de ruídos sobre imagens.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 REGISTRO DAS IMAGENS

A Tabela 5.1 mostra os valores referente aos erros de pontos de controles (em unidades de resolução de “pixel”) para cada data das imagens utilizadas.

TABELA 5.1 - ERROS DOS PONTOS DE CONTROLE PARA CADA DATA

| Imagens | Erro dos Pontos de Controle |
|----------------|-----------------------------|
| TM5 16/06/1984 | 1,788 |
| TM5 30/07/1988 | 1,668 |
| TM5 15/06/1989 | 0,317 |
| TM5 06/09/1990 | 1,145 |

O menor erro para a imagem de 15/06/89 foi devido a utilização da imagem de 06/09/90 tomada como base para registrá-la.

Como pode ser observado na Tabela 5.1, os erros dos pontos de controle foram maiores do que 30 m. Estes erros podem ter sido causados pela imprecisão da carta náutica que foi utilizada, pela imprecisão da digitalização da mesma, como também pela própria limitação de se registrar áreas marítimas sem pontos de controle no setor externo à linha de costa.

Uma solução para este último caso, seria a realização de um trabalho de campo para o reconhecimento de pontos ou feições que pudessem ser observados na imagem, cujas localizações poderiam ser obtidas através de um “Global Position System” (GPS).

Enfim, percebe-se que o registro ficou relativamente bom. Observa-se que algumas feições visíveis nas imagens estão bem representadas na carta náutica, como a Urca do Tubarão, os delineamentos dos paleocanais dos rios Mossoró e Açú, os Recifes do João da Cunha, além do contorno da costa.

A Fig. 5.1 mostra a sobreposição das isolinhas digitalizadas com a imagem TM/Landsat de 15/06/1989, dando uma visão geral da área de estudo. Na seção 5.5, que se refere às análises das feições submarinas, serão descritas as feições visíveis em sub-amostras da área de estudo, como segue: região de dunas submarinas (1); região do paleocanal do Rio Açú (2); região do paleocanal do Rio Mossoró (3); região de campos de dunas de Galinhos (4); região com plataformas de extração de petróleo (5); região da Coroa das Lavadeiras (6) e região da Ponta do Tubarão (7).

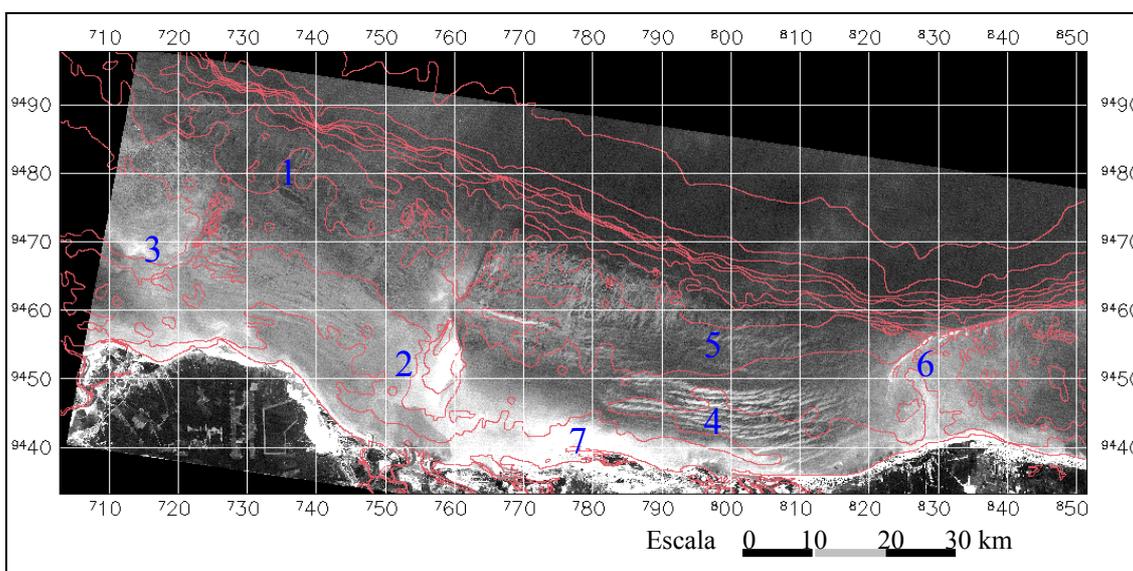


Fig. 5.1 – Carta imagem TM/Landsat de 15/06/1989 mostrando a região de estudo.

Esta região é caracterizada por baixos índices de precipitação como pode ser verificado na Tabela 5.2. A tabela fornece dados da média mensal de sete postos de coleta de precipitação localizados dentro da região de estudo, assim como nas suas proximidades. Os dados correspondem aos meses cujas imagens foram adquiridas.

TABELA 5.2 - DADOS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO

| Período | Média mensal (mm) | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|--|---|
| | 05° 05' S / 37° 38' W Baraunas/ Mossoro. | 04° 57' S / 37° 08' W Areia Branca/ Areia Branca | 04° 50' S / 37° 15' W Tibau Grossos | 05° 12' S / 37° 21' W Mossoro/ Mossoro | 05° 20' S / 37° 18' W Santana/ Mossoro | 05° 27' S / 37° 13' W Hipolito/ Mossoro | 05° 07' S / 36° 38' W Macau/ Macau |
| 06/1984 | 61,2 | 103,5 | 54,8 | 54,1 | 39,6 | 22,8 | 30,0 |
| 07/1988 | 144,6 | 48,7 | ... | ... | 27,0 | 0,0 | ... |
| 06/1989 | 51,4 | 12,8 | 0,0 | 82,2 | 54,0 | ... | ... |
| 09/1990 | ... ¹ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | ... | ... | ... |
| Código dos Postos | 3804176 | 2895974 | 2895653 | 3805431 | 3805643 | 3805957 | 3806275 |

FONTE: UFPB/ DCA/CCT.

A intensidade média mensal da velocidade de vento para a região, cuja direção dominante é de sudeste, é mostrada na Tabela 5.3. Percebe-se que os meses de setembro a janeiro possuem maiores intensidades, com intensidade menores nos outros meses. Os dados da tabela correspondem a um período entre 1982 a 1991, dados estes coletados na região de Cabo Calcanhar - RN.

TABELA 5.3 - DADOS MENSAIS DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO PARA A REGIÃO DE ESTUDO ENTRE 1982 E 1991

| Mês | velocidade em m/s | | Direção (N=0° ;E=90°) |
|-----------|-------------------|-----------------|------------------------|
| | Máximo | Intervalo médio | |
| Janeiro | 11,3 | 8,2 - 9,3 | 140 |
| Fevereiro | 13,9 | 5,1 - 6,2 | 140 |
| Março | 13,4 | 4,1 - 5,1 | 160 |
| Abril | 13,4 | 4,1 - 5,1 | 180 |
| Mai | 30,4 | 4,1 - 5,1 | 180 |
| Junho | 20,6 | 5,1 - 6,2 | 180 |
| Julho | 15,4 | 5,1 - 6,2 | 180 |
| Agosto | 13,9 | 5,1 - 6,2 | 140 |
| Setembro | 13,4 | 8,2 - 9,3 | 140 |
| Outubro | 12,9 | 8,2 - 9,3 | 140 |
| Novembro | 12,3 | 8,2 - 9,3 | 140 |
| Dezembro | 11,8 | 8,2 - 9,3 | 140 |

FONTE: OCEANSAT (1998).

¹ Dados desconhecidos ou não disponíveis.

5.2 CORRELAÇÃO ENTRE NC E PROFUNDIDADE

Com o objetivo de se verificar a correlação de profundidade e NC e comparar perfis de NC e batimétricos, sobre a região de dunas submarinas, foram obtidos os resultados que seguem nas próximas seções.

5.2.1 LEITURA DOS "PIXELS"

A leitura dos "pixels" sobre a imagem foi realizada através do aplicativo SPRING. Nele há a função "leitura de pixel" com interface de entrada para digitalizar coordenadas em geodésica, ou UTM, ou por linha e coluna da imagem. Como a variação entre as coordenadas de entrada digitalizadas, que localizam as profundidades a partir do transecto ecobatimétrico, e as coordenadas de saída, fornecida pelo SPRING, são menores que 30 x 30 m, que corresponde à dimensão de um "pixel", optou-se para ler os valores dos "pixels" de acordo com sua posição na imagem, ou seja, por linha e coluna. Isso devido ao fato de apenas facilitar a extração dos valores dos "pixels", pois anteriormente já haviam sido obtidos via digitalização das coordenadas em UTM.

O SPRING fornece uma leitura de "pixel" através de uma janela de 5 por 5 "pixels" a partir do valor central da leitura. Assim, procurou-se obter uma média a partir de uma leitura de 3 por 3 "pixels" e uma outra a partir de 5 por 5, como pode ser observado na Tabela 5.4. Esta tarefa foi necessária devido a imprecisão da localização exata das coordenadas dos pontos, que foram obtidas a partir do transecto ecobatimétrico, e da incerteza da trajetória do navio que realizara a sondagem.

TABELA 5.4 - MÉDIAS DE NÍVEIS DE CINZA COM JANELAS DE 3 POR 3 E 5 POR 5 “PIXELS” E SUAS RESPECTIVAS PROFUNDIDADES A PARTIR DA IMAGEM COM “STRIPING”

| Posições | NC 1 ¹ | NC 3 ² | NC 5 ³ | Prof. (m) |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| t1 | 64 | 64,11 | 63,16 | 18,5 |
| t2 | 67 | 67 | 66,76 | 18 |
| t3 | 64 | 63,55 | 64,04 | 17 |
| t4 | 63 | 63,33 | 63,64 | 15 |
| t5 | 66 | 64,22 | 64 | 18 |
| t6 | 64 | 63,11 | 63,64 | 11,5 |
| t7 | 64 | 64,44 | 63,76 | 15,5 |
| t8 | 64 | 63,77 | 63,68 | 14,5 |
| t9 | 64 | 64,11 | 64,68 | 17,5 |
| t10 | 69 | 66,88 | 67,4 | 16 |
| t11 | 62 | 62,77 | 63,24 | 20 |
| t12 | 63 | 63,11 | 63,48 | 11,5 |
| t13 | 66 | 65,88 | 66,04 | 13,5 |
| t14 | 67 | 66,11 | 65,36 | 15 |
| t15 | 63 | 63,55 | 64 | 17,5 |
| t16 | 65 | 63,55 | 63,32 | 14,5 |
| t17 | 64 | 63,88 | 64,08 | 19,5 |
| t18 | 64 | 64,88 | 63,92 | 14 |
| t19 | 65 | 63,88 | 63,6 | 17,5 |
| t20 | 66 | 63,55 | 64 | 17,5 |
| t21 | 63 | 63,22 | 62,96 | 20,5 |
| t22 | 63 | 63,88 | 63,32 | 12 |
| t23 | 65 | 65,33 | 65,32 | 17 |
| t24 | 64 | 64 | 64,48 | 16 |
| t25 | 65 | 63,66 | 63,84 | 20 |
| t26 | 65 | 64,33 | 64,48 | 16,5 |
| t27 | 62 | 63,33 | 63,24 | 19,5 |
| t28 | 66 | 64,88 | 65,12 | 17,5 |
| t29 | 65 | 65,22 | 65,32 | 20,5 |
| t30 | 64 | 64,88 | 64,4 | 18 |
| t31 | 64 | 63,22 | 63,92 | 14 |
| t32 | 62 | 64,44 | 62,04 | 21,5 |
| t33 | 61 | 62,22 | 62,88 | 16,5 |
| t34 | 64 | 62,77 | 62,72 | 19,5 |
| t35 | 70 | 69,11 | 68,52 | 19 |
| t36 | 67 | 66,88 | 66,2 | 18,5 |
| t37 | 62 | 63 | 63,52 | 15,5 |
| t38 | 64 | 65,66 | 65,8 | 16 |
| t39 | 64 | 63,33 | 63,24 | 19 |

(Continua)

¹ Nível de cinza central da janela 5 por 5 “pixels”.

² Média da janela de 3 por 3 “pixels”.

³ Média da janela de 5 por 5 “pixels”.

TABELA 5.4 – Conclusão

| | | | | |
|-----|----|-------|-------|------|
| t40 | 67 | 65,55 | 65,08 | 16,5 |
| t41 | 66 | 64,11 | 63,84 | 17 |
| t42 | 63 | 64 | 63,68 | 13 |
| t43 | 64 | 63,55 | 63,76 | 15 |
| t44 | 64 | 65 | 65,16 | 16,5 |
| t45 | 68 | 65,77 | 65,68 | 14 |
| t46 | 63 | 63,55 | 64,36 | 17 |
| t47 | 67 | 65 | 65,44 | 14 |
| t48 | 63 | 65,44 | 65,56 | 16,5 |

Com a intensidade dos "pixels" em mãos, juntamente com os valores das profundidades, verificou-se a correlação entre as médias e a profundidade, como mostra a Tabela 5.5.

TABELA 5.5 - CORRELAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DE NC E PROFUNDIDADE A PARTIR DA IMAGEM COM “STRIPING”

| <i>Correlação</i> | NC 1 | NC 3 | NC 5 | Prof. (m) |
|-------------------|--------|-------|--------|-----------|
| NC 1 | 1 | - | - | - |
| NC 3 | 0,786 | 1 | - | - |
| NC 5 | 0,783 | 0,905 | 1 | - |
| Prof. (m) | -0,026 | 0,053 | -0,051 | 1 |

Observa-se que a correlação entre a profundidade e os níveis de cinza obtidos pela média da janela de 5 por 5 “pixels” foi maior, uma vez que se sabe teoricamente que a correlação de nível de cinza com a profundidade é negativa, ou seja, quanto maior a profundidade menor será o nível de cinza, utilizou-se, então, os níveis de cinza desta média de 5 por 5 “pixels” para traçar o gráfico da Figura 5.2.

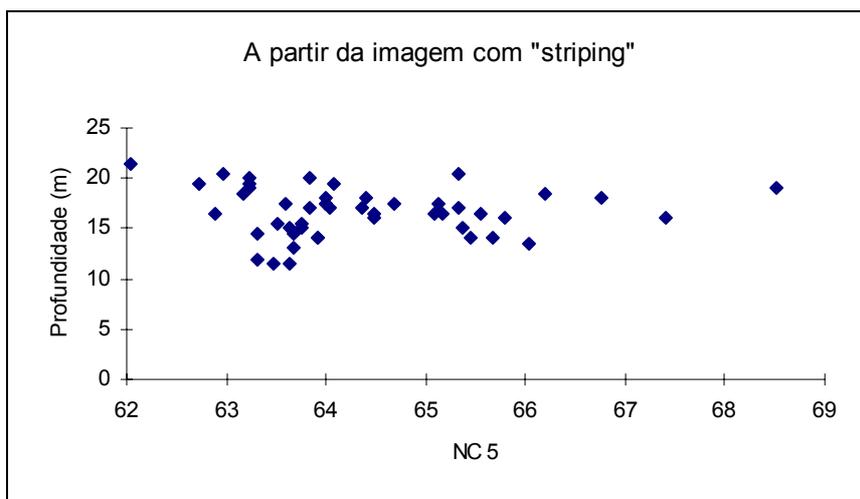


Fig. 5.2 - Gráfico de dispersão entre profundidade e NC extraído da imagem a partir da Tabela 5.4.

Pela Tabela 5.5 e pelo gráfico da Figura 5.2, verificou-se então que não havia qualquer relação entre profundidade e nível de cinza. Um motivo para que isso ocorresse seria a presença de "striping" sobre a imagem (Figura 5.3). Foi observado que entre as varreduras de tons, ora escuros, ora claros, havia um gradiente de intensidade de nível de cinza variando de 3 a 6 níveis.

Diante destes fatos procurou-se eliminar ou minimizar o ruído através de dois processos, ou programas, elaborados na DPI/INPE - Divisão de Processamento de Imagens, onde um dos programas utiliza a Transformada de Fourier (tff2-nome dado ao protótipo) e o outro da Equalização dos Histogramas ("destrip"- nome dado ao protótipo). A aplicação dos dois processos exige que as imagens não estejam registradas. Como as imagens já se encontravam registradas, utilizaram-se as imagens originais, sem registro, limitando-se apenas à sub-área de interesse.

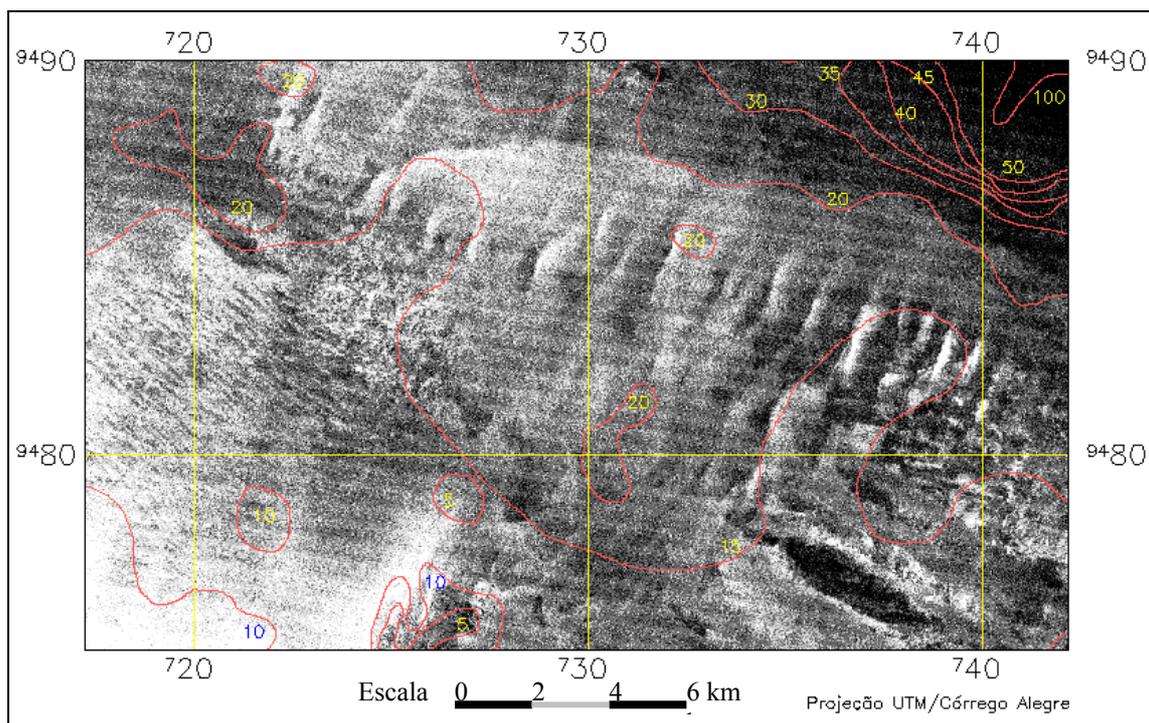


Fig. 5.3 - Imagem TM mostrando o ruído “striping”.

O programa “tff2”, que realiza a transformada de Fourier, procede da seguinte maneira: a partir da imagem original (não registrada) que se pretende tratar, gera-se a parte real e imaginária dos dados originais, descarta-se a parte real e utiliza-se a parte imaginária para gerar a imagem espectral da transformada (Figura 5.5). Através do espectro da transformada observam-se as frequências correspondentes aos ruídos, dispostas na imagem em colunas de intensidades diferentes, a fim de identificar as mesmas e, através de um arquivo de dados, eliminá-las.

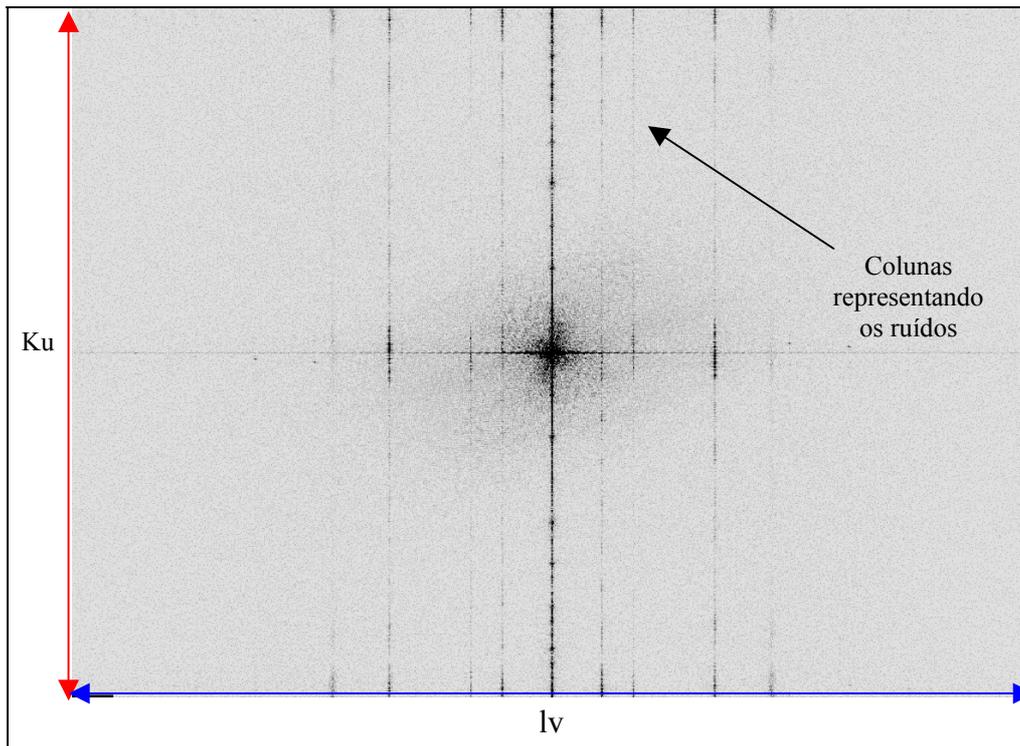


Fig. 5.4 - Imagem espectral da Transformada de Fourier da banda TM1 (negativa). Os eixos Ku e lv representam, respectivamente, os números de onda na vertical e na horizontal.

A Tabela 5.6 mostra o formato do arquivo de dados utilizado para a banda 1. O raio referido corresponde à distância (em número de “pixels”) compreendida entre o eixo horizontal de simetria, na imagem espectral da transformada, e o “pixel” da coluna a partir do qual os restantes serão eliminados. Portanto, os “pixels” compreendidos no raio não serão alterados (Figura 5.5). Após isso, faz-se a transformada inversa, levando os dados do domínio das freqüências para o domínio espacial novamente, gerando a imagem com os ruídos eliminados, ou minimizados.

TABELA 5.6 - COLUNAS QUE FORAM ELIMINADAS NA IMAGEM ESPECTRAL DA TRANSFORMADA DE FOURIER

| Coluna | Raio |
|--------|------|
| 339 | 1 |
| 425 | 1 |
| 459 | 13 |
| 512 | 15 |
| 565 | 485 |
| 598 | 1 |
| 599 | 1 |
| 685 | 1 |
| 686 | 1 |

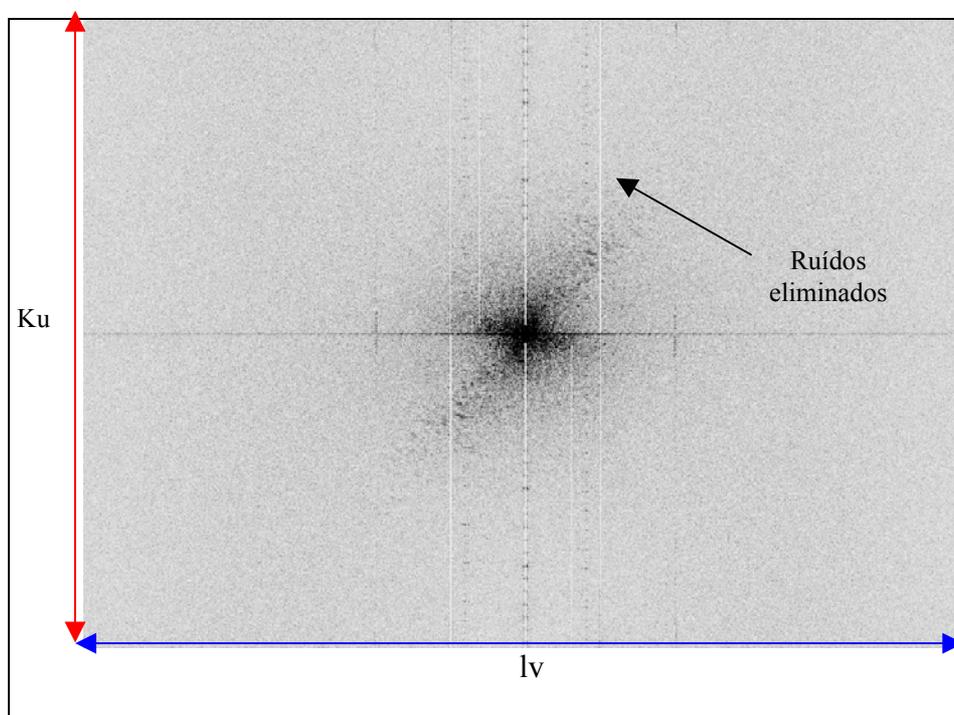


Fig. 5.5 - Imagem espectral da Transformada de Fourier corrigida. Negativa.

O método da equalização procura, a partir da estatística de um varredura (16 detectores ou linhas) na imagem sem registro, pegar uma linha como base, através de sua estatística (média e variância) dentro da varredura, e verificar qual detector tem sua média mais afastada daquele tomado como referência, e então equaciona-se a varredura, ajustando-a com a média do detector tomado como base.

O método da equalização não foi satisfatória para a correção de ruído presente nas imagens usadas, banda 2 e 3. Porém, a combinação do programa com a Transformada de Fourier possibilitou uma melhora da banda 2. O mesmo não se pôde obter com a banda 3.

Para a banda 1 foi utilizado somente o método da Transformada de Fourier, obtendo-se excelente resultado, como pode ser observado comparando a Figura 5.3, com “striping”, e a 5.6, corrigida.

Realizada a minimização do ruído, para a banda TM1 (banda 1), pelo procedimento acima, fez-se as medidas novamente dos níveis de cinza para os mesmos pontos (Tabela 5.7). Em seguida obteve-se a correlação dos mesmos com a profundidade. O resultado é mostrado na Tabela 5.8.

TABELA 5.7 - MÉDIAS DE NÍVEIS DE CINZA COM JANELAS DE 3 POR 3 E 5 POR 5 “PIXELS” E SUAS RESPECTIVAS PROFUNDIDADES A PARTIR DA IMAGEM COM “DESTRIPING”

| NC 1 ¹ | NC 3 ² | NC 5 ³ | Prof. (m) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| 63.0 | 63.2 | 62.4 | 18.5 |
| 67.0 | 66.6 | 66.1 | 18.0 |
| 63.0 | 62.8 | 63.4 | 17.0 |
| 62.0 | 62.0 | 62.2 | 15.0 |
| 64.0 | 62.8 | 62.8 | 18.0 |
| 64.0 | 62.8 | 63.1 | 11.5 |
| 64.0 | 64.2 | 63.5 | 15.5 |
| 63.0 | 62.4 | 62.3 | 14.5 |
| 63.0 | 63.3 | 63.6 | 17.5 |
| 69.0 | 66.7 | 66.8 | 16.0 |
| 62.0 | 62.4 | 62.9 | 20.0 |
| 63.0 | 62.7 | 63.0 | 11.5 |
| 66.0 | 65.4 | 65.6 | 13.5 |
| 67.0 | 65.8 | 65.0 | 15.0 |
| 62.0 | 62.7 | 63.3 | 17.5 |
| 64.0 | 62.6 | 62.8 | 14.5 |
| 63.0 | 63.2 | 63.4 | 19.5 |
| 63.0 | 63.8 | 63.3 | 14.0 |
| 64.0 | 62.9 | 60.0 | 17.5 |
| 66.0 | 63.6 | 63.8 | 17.5 |
| 63.0 | 63.6 | 62.8 | 20.5 |
| 63.0 | 63.6 | 63.1 | 12.0 |

(Continua)

¹ Nível de cinza central da janela 5 por 5 “pixels”.

² Média da janela de 3 por 3 “pixels”.

³ Média da janela de 5 por 5 “pixels”.

TABELA 5.7 – (Conclusão)

| | | | |
|------|------|------|------|
| 64.0 | 64.7 | 64.7 | 17.0 |
| 64.0 | 63.7 | 64.3 | 16.0 |
| 64.0 | 62.8 | 63.0 | 20.0 |
| 64.0 | 63.3 | 63.5 | 16.5 |
| 62.0 | 63.0 | 62.8 | 19.5 |
| 65.0 | 64.1 | 64.4 | 17.5 |
| 64.0 | 64.1 | 64.3 | 20.5 |
| 64.0 | 64.1 | 63.5 | 18.0 |
| 63.0 | 62.6 | 63.2 | 14.0 |
| 61.0 | 61.9 | 61.5 | 21.5 |
| 61.0 | 61.9 | 62.4 | 16.5 |
| 64.0 | 62.8 | 62.6 | 19.5 |
| 70.0 | 69.0 | 68.4 | 19.0 |
| 67.0 | 66.8 | 66.2 | 18.5 |
| 63.0 | 63.4 | 63.8 | 15.5 |
| 63.0 | 64.8 | 65.0 | 16.0 |
| 64.0 | 62.8 | 62.6 | 19.0 |
| 63.0 | 64.4 | 64.3 | 16.5 |
| 65.0 | 63.6 | 63.4 | 17.0 |
| 63.0 | 63.8 | 63.4 | 13.0 |
| 64.0 | 63.1 | 63.2 | 15.0 |
| 64.0 | 64.3 | 64.4 | 16.5 |
| 68.0 | 65.8 | 65.4 | 14.0 |
| 63.0 | 63.6 | 64.2 | 17.0 |
| 67.0 | 64.9 | 65.3 | 14.0 |
| 62.0 | 64.4 | 64.6 | 16.5 |

TABELA 5.8 - CORRELAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DE NC E PROFUNDIDADE A PARTIR DA IMAGEM COM “DESTRIPIING”

| <i>Correlação</i> | <i>NC 1</i> | <i>NC 3</i> | <i>NC 5</i> | <i>Prof. (m)</i> |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
| NC 1 | 1 | - | - | - |
| NC 3 | 0,837 | 1 | - | - |
| NC 5 | 0,760 | 0,914 | 1 | - |
| Prof. (m) | -0,0831 | -0,0163 | -0,0795 | 1 |

Como pode ser observado, houve uma melhora da correlação entre a profundidade e NC1 e NC5, mas não o suficiente para que, a partir dos dados em mão, se elaborasse um algoritmo para geração de uma imagem batimétrica. Uma explicação para isso seria às imprecisões das localizações dos pontos no perfil ecobatimétrico na época de aquisição, resultando na imprecisão sobre a imagem e, talvez, do próprio registro.

Desta forma, procurou-se como alternativa, digitalizar pontos de batimetria a partir da carta náutica número 720 da DHN sobre a região. Estes pontos foram digitalizados utilizando-se o SGI/SITIM. A Figura 5.6 mostra a localização dos pontos, num total de 56.

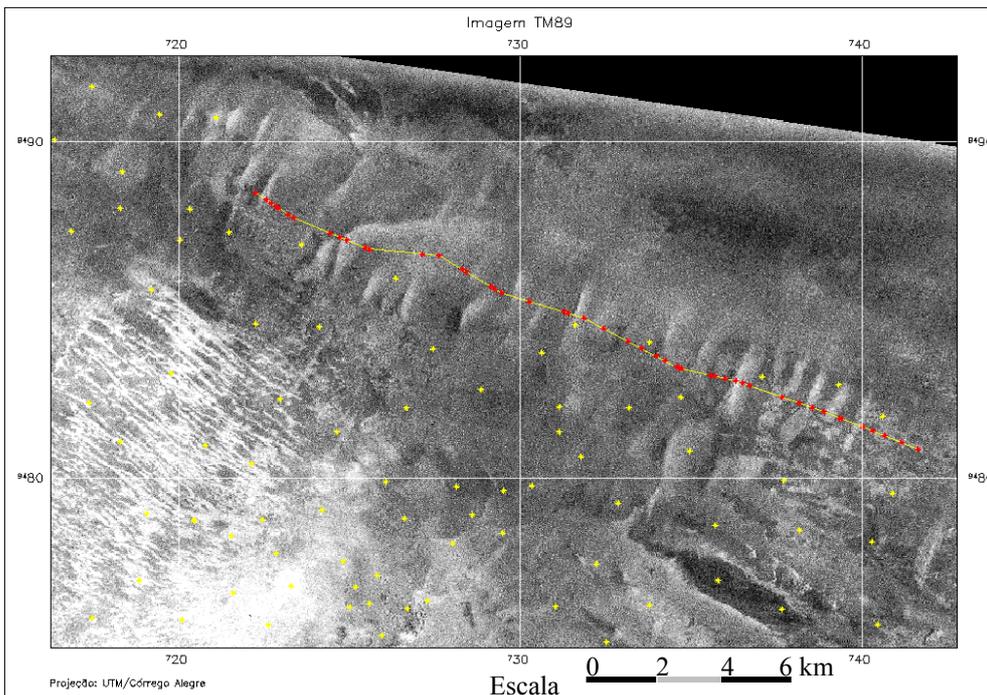


Fig. 5.6 - Sub-área de estudo com os pontos batimétricos digitalizados (em cor amarela) a partir da carta náutica 720 da DHN.

Digitalizados os pontos da carta náutica 720 no SGI e importados para o SPRING, obteve-se os níveis de cinza dos mesmos (Tabela 5.9) os quais foram correlacionados com as profundidades registradas na carta (Tabela 5.10).

TABELA 5.9 - MÉDIAS DE NÍVEIS DE CINZA COM JANELAS DE 3 POR 3 E 5 POR 5 “PIXELS” E SUAS RESPECTIVAS PROFUNDIDADES A PARTIR DOS PONTOS DIGITALIZADOS DA CARTA NÁUTICA 720 DA DHN E DA IMAGEM COM “DESTRIPIING”

| NC 1 | NC 3 | NC 5 | Prof. |
|------|------|------|-------|
| 69,0 | 68,2 | 68,0 | 10,3 |
| 69,0 | 67,9 | 67,5 | 10,3 |
| 72,0 | 71,0 | 71,0 | 9,6 |
| 70,0 | 70,4 | 69,6 | 10,5 |
| 69,0 | 67,6 | 68,2 | 10,7 |
| 65,0 | 65,0 | 64,8 | 10,0 |
| 62,0 | 63,4 | 63,7 | 15,0 |
| 66,0 | 66,8 | 67,7 | 11,3 |

(Continua)

TABELA 5.9 – Conclusão

| | | | |
|------|------|------|------|
| 66,0 | 65,9 | 66,8 | 11,6 |
| 72,0 | 72,7 | 72,6 | 11,6 |
| 71,0 | 70,9 | 71,0 | 11,8 |
| 72,0 | 70,1 | 70,6 | 10,5 |
| 68,0 | 70,1 | 69,5 | 11,7 |
| 67,0 | 67,8 | 67,6 | 11,9 |
| 70,0 | 68,9 | 68,1 | 10,6 |
| 69,0 | 68,9 | 69,5 | 9,9 |
| 64,0 | 64,0 | 64,1 | 13,0 |
| 68,0 | 66,2 | 66,4 | 13,5 |
| 64,0 | 62,6 | 62,6 | 13,1 |
| 64,0 | 65,0 | 65,2 | 15,5 |
| 63,0 | 62,8 | 63,1 | 11,3 |
| 64,0 | 63,7 | 64,4 | 13,6 |
| 65,0 | 64,2 | 64,5 | 12,8 |
| 63,0 | 63,0 | 62,7 | 14,7 |
| 63,0 | 63,6 | 63,7 | 14,9 |
| 64,0 | 64,0 | 63,2 | 12,2 |
| 68,0 | 66,9 | 67,4 | 15,5 |
| 62,0 | 63,4 | 63,6 | 17,5 |
| 62,0 | 62,1 | 62,4 | 15,0 |
| 61,0 | 60,9 | 60,6 | 11,8 |
| 62,0 | 62,7 | 63,6 | 15,0 |
| 60,0 | 60,2 | 60,2 | 13,8 |
| 65,0 | 65,8 | 64,8 | 15,5 |
| 65,0 | 63,9 | 64,0 | 15,5 |
| 61,0 | 60,1 | 60,0 | 10,6 |
| 71,0 | 71,8 | 70,8 | 8,9 |
| 70,0 | 73,2 | 73,1 | 10,2 |
| 69,0 | 68,1 | 68,4 | 9,5 |
| 63,0 | 63,1 | 63,1 | 23,0 |
| 61,0 | 61,9 | 61,9 | 19,0 |
| 63,0 | 64,6 | 64,2 | 15,5 |
| 64,0 | 63,9 | 63,6 | 23,0 |
| 62,0 | 61,2 | 61,6 | 15,5 |
| 65,0 | 67,0 | 67,1 | 13,0 |
| 63,0 | 61,9 | 61,7 | 22,0 |
| 64,0 | 62,8 | 62,8 | 18,5 |
| 63,0 | 62,2 | 62,2 | 24,0 |
| 61,0 | 62,3 | 63,4 | 22,0 |
| 60,0 | 62,8 | 62,7 | 17,5 |
| 63,0 | 61,7 | 61,9 | 16,5 |
| 62,0 | 62,9 | 63,0 | 19,0 |
| 63,0 | 63,2 | 62,8 | 17,5 |
| 62,0 | 61,8 | 61,8 | 21,0 |
| 64,0 | 63,9 | 64,0 | 17,0 |
| 60,0 | 62,7 | 63,0 | 14,7 |
| 67,0 | 66,4 | 65,8 | 17,0 |

TABELA 5.10 - CORRELAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DE NC E PROFUNDIDADE A PARTIR DOS PONTOS DIGITALIZADOS E DA IMAGEM COM “DESTRIPING”

| Correlação | NC 1 | NC 3 | NC 5 | Prof. |
|------------|----------|----------|--------|-------|
| NC 1 | 1 | - | - | - |
| NC 3 | 0,942258 | 1 | - | - |
| NC 5 | 0,93611 | 0,990451 | 1 | - |
| Prof. | -0,604 | -0,599 | -0,599 | 1 |

O que se percebeu com esse procedimento é que houve uma melhora da correlação entre os níveis de cinza e as profundidades, em seus respectivos pontos. A Figura 5.7 mostra o gráfico de dispersão a fim de verificar a relação de NC com a profundidade. As funções e os coeficientes de determinação nele inseridos são geradas automaticamente pelo aplicativo Excel. Percebe-se que o coeficiente de determinação é relativamente baixo, tanto para a relação linear quanto exponencial, como se pretendia supor para esta última relação de NC com profundidade.

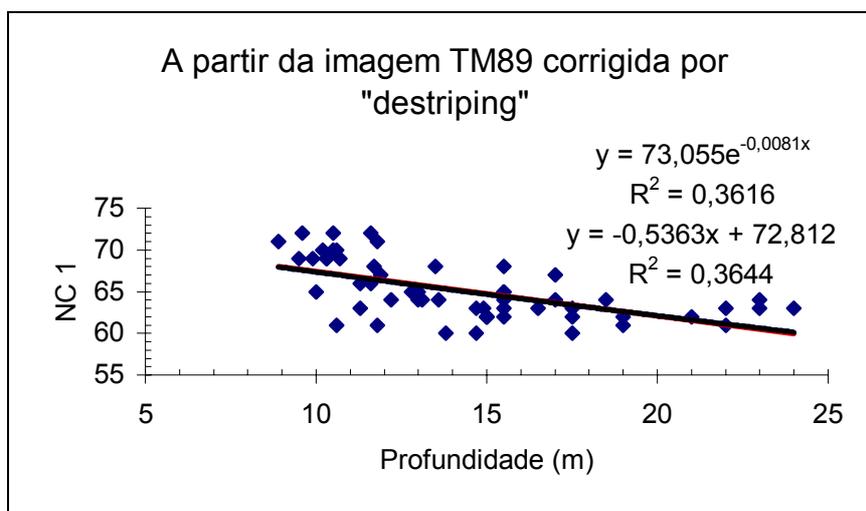


Fig. 5.7 - Gráfico de dispersão de NC (TM89) e profundidade (carta náutica 720).

Devido à complexidade dos ruídos presentes na banda 2 (Figura 5.8), mesmo com a utilização da Transformada de Fourier, em conjunto com o método da Equalização de Histograma, a elaboração de um algoritmo para posterior geração de imagem fotobatimétrica fica prejudicada, não permitindo, assim, discriminar se as variações dos níveis de cinza devem-se às mudanças do tipo de substrato marinho e/ou da

profundidade, mais a diferença de tempo entre o levantamento que gerou a carta náutica e a imagem. A utilização de mais de uma banda, como é sugerida pela literatura, possibilita evitar a confusão de mistura de “pixels”. Porém, Tanis e Hallada (1984) relatam que se as influências dos processos de absorção e espalhamento da radiação na coluna d’água são aproximadamente uniformes, em toda a área de estudo, uma única banda é suficiente para estimativa de profundidade por sensores remotos como o TM/Landsat. A Figura 5.9 mostra o resultado da correção para a banda TM2 (banda 2).

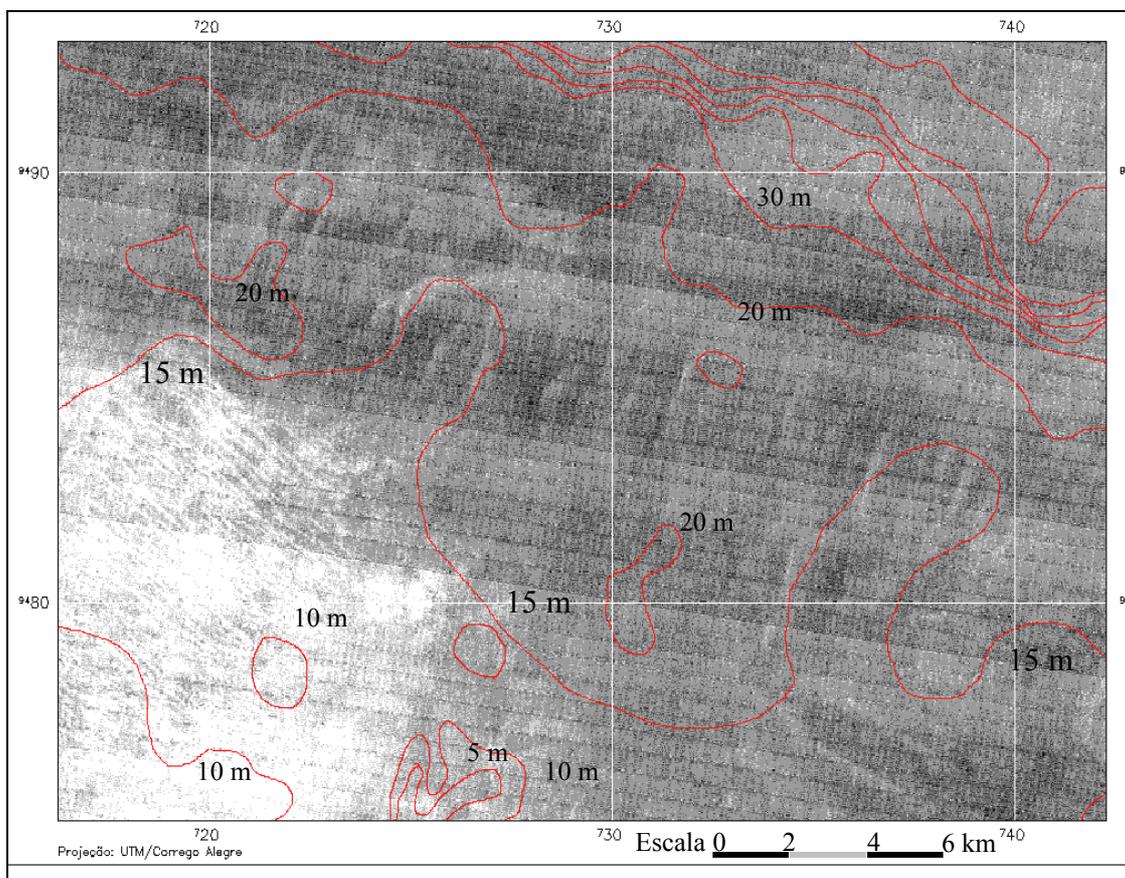


Fig. 5.8 - Imagem TM2 com ruídos e as isobatimétricas (em vermelho).

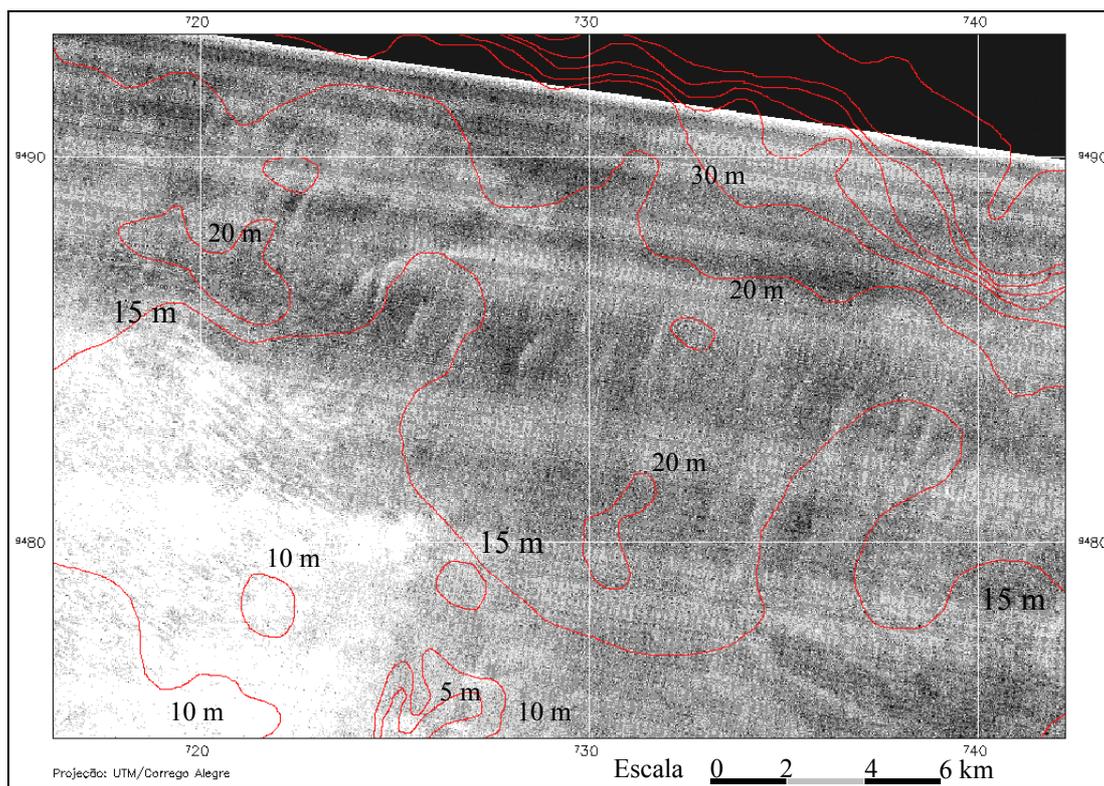


Fig. 5.9 - Imagem TM2 com ruídos minimizados e as isobatimétricas (em vermelho).

Um procedimento para avaliar a baixa correlação entre os níveis de cinza e as profundidades fornecidas pela sondagem ecobatimétrica foi realizado. Através da obtenção de diversos perfis espaciais de NC ao longo de transectos sobre a imagem, realizado por um dos módulos do aplicativo ENVI, e do provável trajeto da embarcação no qual foi realizado o perfil batimétrico, procurou-se, a partir da aproximação deste último, obter as correspondentes feições verificadas no perfil espacial de NC com o perfil batimétrico. A Figura 5.10 mostra os perfis espaciais em cores diferentes, juntamente com o traçado do barco (em vermelho). A análise destes perfis possibilitará comparar com o perfil ecobatimétrico sobre a assimetria ou não das feições ali presentes.

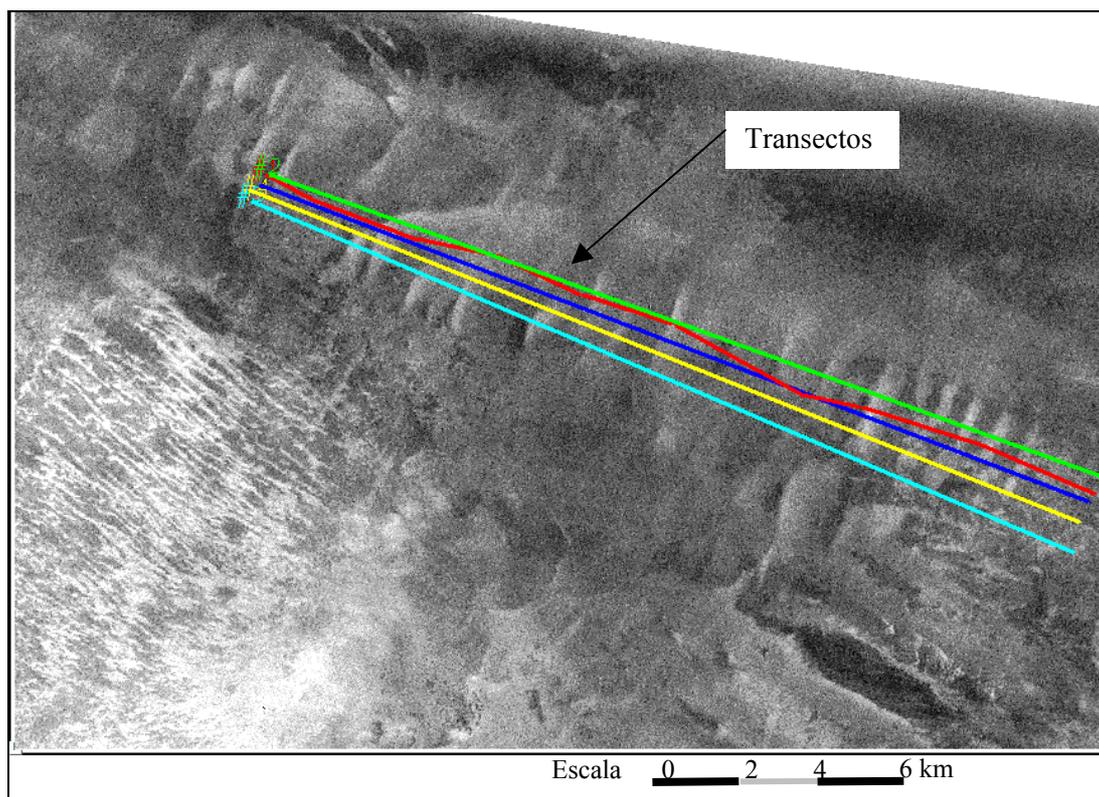


Fig. 5.10 - Perfis espaciais de NC (linhas em verde, azul escura, amarela e azul clara) próximo ao trajeto do barco (linha em vermelha).

Este mesmo procedimento, a obtenção de alguns perfis espaciais de NC, foi realizado na região de dunas submersas que corresponde ao canto inferior esquerdo da Figura 5.10, afim de verificar a distribuição espacial das mesmas e suas características dimensionais. A Figura 5.11 mostra os perfis traçados.

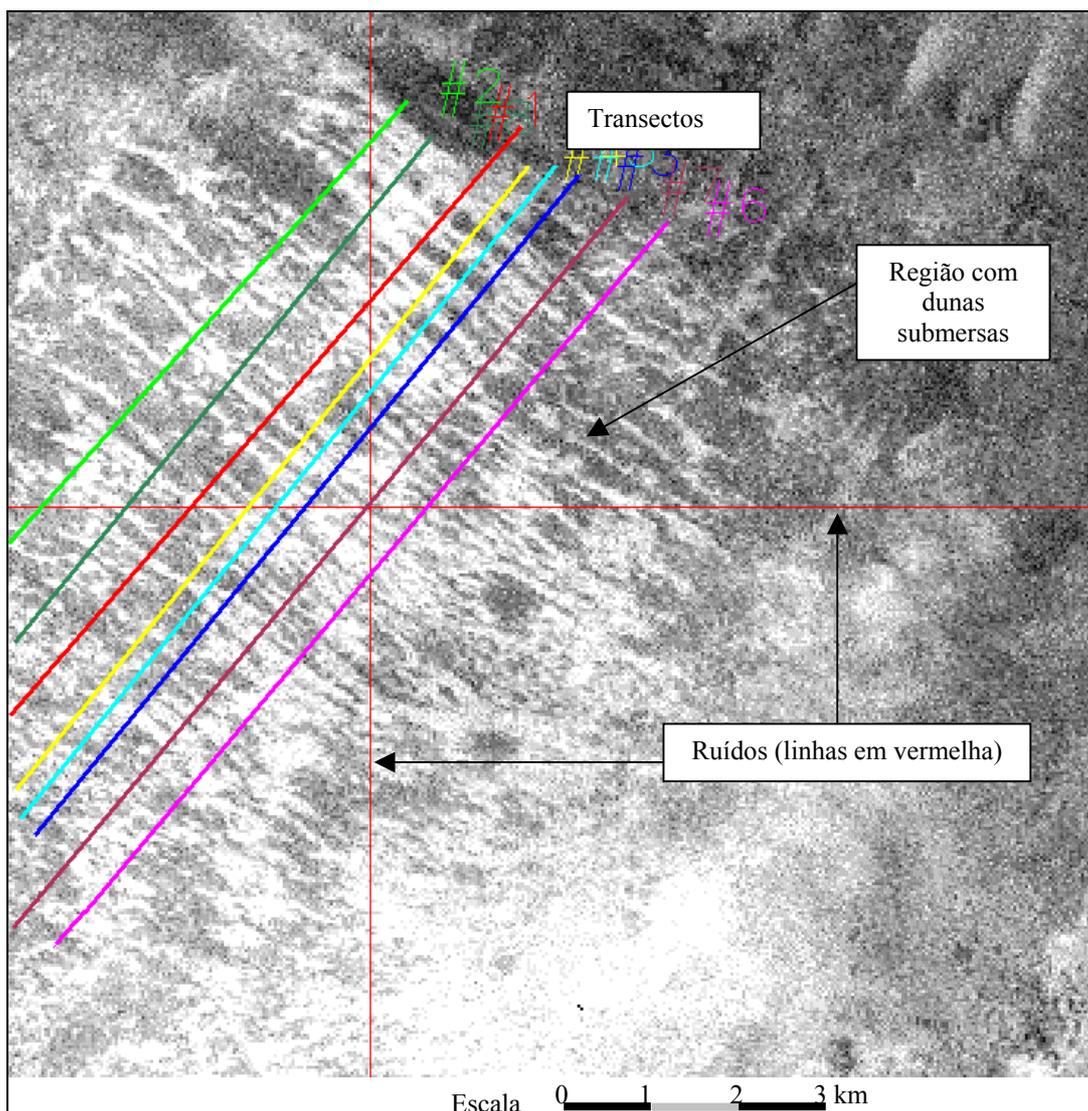


Fig. 5.11 - Perfis espaciais de NC para a região de prováveis dunas de maré.

5.2.1.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS FEIÇÕES VISTAS NA SONDAGEM ECOBATIMÉTRICA

Para correlacionar os níveis de cinza da imagem com os dados do perfil ecobatimétrico (Apêndice A) ou ecograma⁴, no qual são fornecidas as profundidades, é necessário que alguns pontos sobre o perfil sejam localizados na imagem. Os pontos já marcados no ecograma, extraídos da carta náutica nr 700 (posicionamento radar), foram os

⁴ Sondagem batimétrica pontual gravada continuamente num rolo de papel. Dados obtidos por Vianna (1997) em cruzeiro da Corveta Forte de Coimbra, do 3º Distrito Naval, em 16/05/1989; Projeto TOPSUB.

inicialmente escolhidos como base, pois suas coordenadas geográficas eram conhecidas. As coordenadas geográficas dos pontos marcados no perfil ecobatimétrico e suas respectivas profundidades (corrigindo-se os efeitos do calado da embarcação e da maré) são apresentados na Tabela 5.11.

TABELA 5.11 - PONTOS MARCADOS NO ECOGRAMA

| Ponto/hora | Latitude (S) | Longitude (W) | Profundidade (m) |
|------------|--------------|---------------|------------------|
| D-1/03:51 | 04° 37.5' | 036° 59.8' | 19,7 |
| D-2/04:06 | 04° 37.9' | 036° 59.2' | 16,7 |
| D-3/04:21 | 04° 38.4' | 036° 58.0' | 12,8 |
| D-4/04:36 | 04° 38.5' | 036° 56.9' | 15,8 |
| D-5/04:51 | 04° 39.1' | 036° 55.9' | 18,9 |
| D-6/05:01 | 04° 39.5' | 036° 54.6' | 18,0 |
| D-7/05:13 | 04° 40.3' | 036° 53.1' | 20,1 |
| D-8/05:20 | 04° 40.5' | 036° 52.2' | 20,2 |
| D-9/05:30 | 04° 41.0' | 036° 50.8' | 18,3 |
| D-10/05:38 | 04° 41.6' | 036° 49.3' | 18,4 |

FONTE: Vianna (1989).

As coordenadas dos pontos marcados no perfil foram modificadas, convertendo os minutos para minutos e segundos, de acordo com as coordenadas geográficas fornecidas pelo SPRING sobre a imagem TM. Com as coordenadas modificadas e suas respectivas profundidades obtidas no perfil, criou-se um PI numérico no SPRING no qual foram digitalizados. Feito isso, pôde-se traçar o suposto trajeto do navio que realizara a sondagem (Figura 5.6).

As feições de interesse (dunas submersas assimétricas), entre os pontos marcados no perfil, foram identificadas em seus vales e cristas a fim de verificá-las na imagem. Para isso, as posições dos vales e cristas foram localizadas como segue adiante.

5.2.1.2 CÁLCULOS DAS POSIÇÕES DAS FEIÇÕES (DUNAS)

No perfil da sondagem ecobatimétrica foram marcadas as posições correspondentes aos pontos de interesses (vales e cristas das dunas), a partir da marcação inicial de cada intervalo de pontos marcados no ecograma (Tabela 5.11). Por exemplo, no intervalo

entre D-1 e D-2 foram marcadas cinco posições. No intervalo entre D-2 e D-3 foram marcadas quatro posições, e assim por diante (Apêndice A). O número de posições corresponde à cristas e cavados de feições notórias dentro do intervalo.

As distâncias, no perfil batimétrico, foram medidas através de um escalímetro em escala 1:1 a partir do ponto inicial de cada intervalo. Realizou-se três medidas para cada posição, para que não houvesse dúvidas das mesmas, e tirou-se a média. A Tabela 5.12 mostra o resultado.

TABELA 5.12 – MÉDIAS DAS DISTÂNCIAS CALCULADAS PARA CADA POSIÇÃO SELECIONADA DENTRO DO INTERVALO DE MARCAÇÃO DA SONDAGEM

| Perfil | Distância |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Posição | D1-D2 (mm) | D2-D3 (mm) | D3-D4 (mm) | D4-D5 (mm) | D5-D6 (mm) | D6-D7 (mm) | D7-D8 (mm) | D8-D9 (mm) | D9-D10 (mm) |
| 1 | 41,00 | 78,00 | 129,50 | 63,00 | 39,00 | 28,00 | 5,00 | 7,00 | 13,50 |
| 2 | 60,50 | 114,00 | - | 75,00 | 88,00 | 62,50 | 51,00 | 13,00 | 15,00 |
| 3 | 81,00 | 99,50 | - | 142,00 | 94,00 | 81,00 | 58,50 | 43,00 | 41,50 |
| 4 | 131,25 | 153,50 | - | 152,25 | - | 102,00 | 74,50 | 58,50 | 66,00 |
| 5 | 91,00 | - | - | - | - | 114,50 | - | 70,00 | 33,00 |
| 6 | - | - | - | - | - | 131,00 | - | - | 51,50 |

Com as distâncias das feições de interesse medidas no perfil ecobatimétrico (Tabela 5.12) e com os pontos iniciais (Tabela 5.11), procurou-se relacionar as posições das feições localizadas no perfil com suas coordenadas na imagem.

Uma vez sabendo das coordenadas dos pontos marcados no perfil, pode-se calcular as distâncias dos mesmos utilizando suas coordenadas em UTM ou usando a equação 4.1.

Feitos os cálculos, pôde-se estabelecer uma escala para cada intervalo marcado no ecograma com a equação que segue:

$$E = d_i / D_i, \tag{5.1}$$

onde E é o valor da escala a ser calculado, d_i é a distância, em milímetros, entre os pontos no ecograma e D_i é a distância, em metros, calculada a partir das posições dos pontos pela Equação 4.1.

A Tabela 5.13 mostra as distâncias obtidas entre os pontos de interesse a partir de cada ponto D_i no ecograma, a distância obtida via SPRING, o erro relativo entre as mesmas e as escalas correspondentes.

TABELA 5.13 - DISTÂNCIAS OBTIDAS VIA EQUAÇÃO 4.1 E VIA SPRING E AS ESCALAS UTILIZADAS

| Intervalos | Perfil | Distância (m) | SPRING (m) | Erro relativo (%) | Escala |
|------------|--------|---------------|------------|-------------------|--------|
| D1-D2 | 153,50 | 1334,927 | 1330,742 | 0,3145 | 0,1150 |
| D2-D3 | 162,50 | 2405,295 | 2405,660 | 0,0152 | 0,0676 |
| D3-D4 | 169,50 | 2042,690 | 2042,616 | 0,0036 | 0,0830 |
| D4-D5 | 171,50 | 2158,520 | 2154,696 | 0,1775 | 0,0795 |
| D5-D6 | 117,00 | 2516,011 | 2511,958 | 0,1614 | 0,0465 |
| D6-D7 | 134,00 | 3146,044 | 3137,163 | 0,2831 | 0,0426 |
| D7-D8 | 91,09 | 1705,173 | 1707,521 | 0,1375 | 0,0534 |
| D8-D9 | 81,00 | 2750,096 | 2752,046 | 0,0709 | 0,0295 |
| D9-D10 | 80,25 | 2988,843 | 2982,303 | 0,2193 | 0,0268 |

As medidas através do SPRING foram realizadas utilizando-se da função "ÚTIL-medidas" que mede as distâncias entre pontos na imagem (INPE, 1997).

Assim, tendo-se a escala e as distâncias medidas das feições no ecograma, pôde-se achar as posições das mesmas em escala natural, dentro da imagem. Para isso, utilizou-se os dados fornecidos pelo SPRING, uma vez que as diferenças com os dados calculados foram pequenas. A Tabela 5.14 mostra o resultado das medidas em metros.

TABELA 5.14 - DISTÂNCIAS DOS PONTOS SELECIONADOS EM ESCALA NATURAL

| Posição | D1-D2 (m) | D2-D3 (m) | D3-D4 (m) | D4-D5 (m) | D5-D6 (m) | D6-D7 (m) | D7-D8 (m) | D8-D9 (m) | D9-D10 (m) |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1 | 197,480 | 448,758 | 153,594 | 407,611 | 244,763 | 308,642 | 20,997 | 81,233 | 185,591 |
| 2 | 291,403 | 572,455 | - | 485,251 | 552,285 | 688,934 | 214,172 | 150,860 | 206,212 |
| 3 | 390,143 | 655,878 | - | 918,742 | 589,941 | 892,858 | 245,667 | 499,000 | 453,667 |
| 4 | 438,309 | 883,134 | - | 985,060 | - | 1124,340 | 312,859 | 678,872 | 570,521 |
| 5 | 632,177 | - | - | - | - | 1262,126 | - | 812,326 | 707,996 |
| 6 | - | - | - | - | - | 1444,005 | - | - | 907,335- |

Sabendo-se da localização dos pontos marcados no ecograma em coordenadas planas, acrescentou-se aos valores da Tabela 5.11 para localizar as posições dos mesmos sobre a imagem através da provável trajetória retilínea do navio. As profundidades naqueles pontos estão indicadas na Tabela 5.15. Como as profundidades lidas no ecograma não estavam corrigidas, foi necessário realizar uma linearização das mesmas com as profundidades já corrigidas (Tabela 5.11). Assim, obteve-se um valor que foi adicionado aos valores lidos no ecograma, este valor foi de 1,27 (Apêndice B).

TABELA 5.15 - PROFUNDIDADES PARA OS PONTOS SELECIONADOS NO ECOGRAMA

| Posição | Profundidade (m) | | | | | | | | |
|---------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | D1-D2 | D2-D3 | D3-D4 | D4-D5 | D5-D6 | D6-D7 | D7-D8 | D8-D9 | D9-D10 |
| 1 | 18,0 | 14,5 | 13,5 | 17,5 | 17,5 | 16,0 | 14,0 | 18,5 | 13,0 |
| 2 | 17,0 | 17,5 | - | 14,5 | 20,5 | 20,0 | 21,5 | 15,5 | 15,0 |
| 3 | 15,0 | 16,0 | - | 19,5 | 12,0 | 16,5 | 16,5 | 16,0 | 16,5 |
| 4 | 18,0 | 20,0 | - | 14,0 | - | 19,5 | 19,5 | 19,0 | 14,0 |
| 5 | 11,5 | - | - | - | - | 17,5 | - | 16,5 | 17,0 |
| 6 | - | - | - | - | - | 20,5 | - | - | 14,0 |

Feito isso, procurou-se obter os valores de níveis de cinza naquelas posições para, numa etapa posterior, tentar verificar a correlação entre os mesmos e as profundidades fornecidas pelos dados do perfil ecobatimétrico, com a possibilidade de se gerar um algoritmo para produzir, a partir do mesmo, uma imagem fotobatimétrica fatiada em intervalos de profundidade.

5.3 ANÁLISE FOTOBATIMÉTRICA

A Figura 5.12 mostra a relação existente entre os níveis de cinza e as profundidades (a partir do ecograma) demonstrando o porquê da baixa correlação entre os mesmos. As curvas procuram salientar as posições dos corpos arenosos (dunas assimétricas) ao longo da trajetória do barco, tanto a partir das respectivas profundidades como a partir das respectivas médias dos níveis de cinza para as posições marcadas no ecograma. Percebe-se que, em alguns trechos das duas curvas, há feições correspondentes, mas que estão deslocadas. Este deslocamento se deve, provavelmente, aos seguintes fatores: 1) devido às variações de velocidade do barco; 2) devido à imprecisão das posições

marcadas no ecograma; 3) devido ao erro de registro de imagem e 4) devido aos erros de localização do posicionamento do barco.

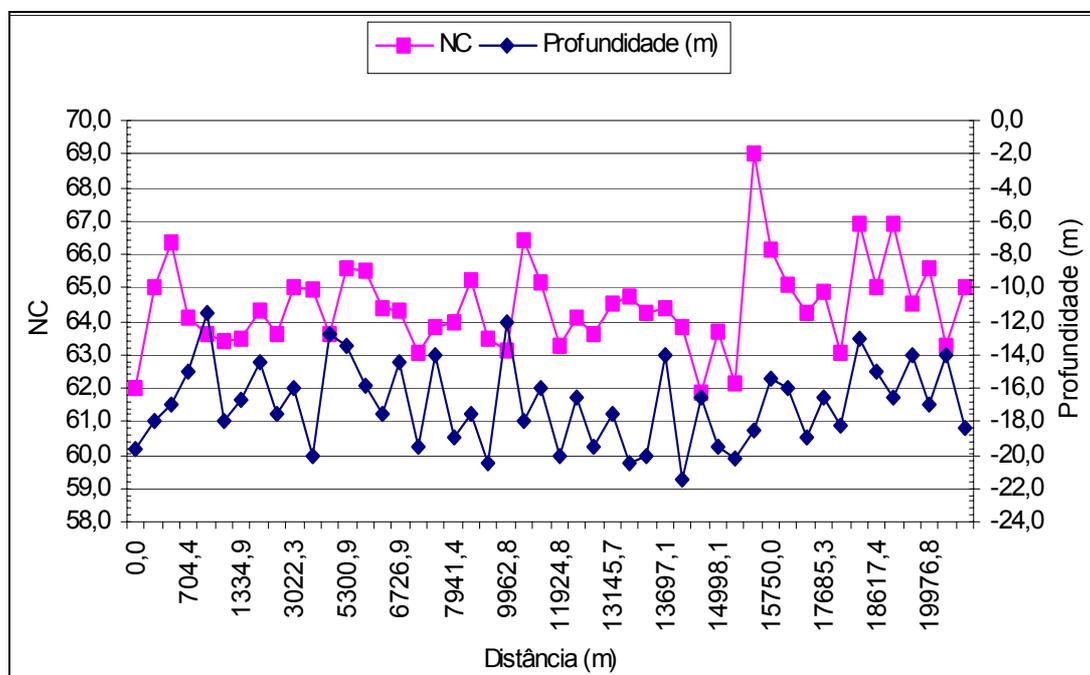


Fig. 5.12 - Gráfico relacionando os níveis de cinza com as profundidades (a partir do ecograma) no provável trajeto do barco.

A Tabela 5.16 mostra os dados relativos ao movimento do barco durante o seu trajeto de acordo com as posições marcadas no ecograma. A discrepância dos posicionamentos entre as feições descritas (Figura 5.12) e os níveis de cinza na imagem deveu-se, provavelmente, à variação da velocidade relativa do barco em relação as feições submarinas, pois a velocidade sobre a crista de uma duna é diferente da velocidade sobre o cavado no momento das aquisições das medidas ecobatimétricas.

TABELA 5.16 – DADOS CINEMÁTICOS DO BARCO DURANTE O TRAJETO

| Horário (h) | Tempo (s) | Posições | Δs (m) | ΔT (s) | Velocidade (m/s) | (km/h) |
|-------------|-----------|----------|----------------|----------------|------------------|--------|
| 03:51 | 13860 | d1-d2 | 1334,93 | 900 | 1,48 | 5,340 |
| 04:06 | 14760 | d2-d3 | 2405,30 | 900 | 2,67 | 9,621 |
| 04:21 | 15660 | d3-d4 | 2042,69 | 900 | 2,27 | 8,171 |
| 04:36 | 16560 | d4-d5 | 2158,52 | 900 | 2,40 | 8,634 |
| 04:51 | 17460 | d5-d6 | 2516,01 | 600 | 4,19 | 15,096 |
| 05:01 | 18060 | d6-d7 | 3146,04 | 720 | 4,37 | 15,730 |
| 05:13 | 18780 | d7-d8 | 1705,17 | 420 | 4,06 | 14,616 |
| 05:20 | 19200 | d8-d9 | 2750,10 | 600 | 4,58 | 16,501 |
| 05:30 | 19800 | d9-d10 | 2988,84 | 480 | 6,23 | 22,416 |
| 05:38 | 20280 | - | - | - | - | - |

Para avaliar outras possibilidades de discrepância, a análise dos perfis espaciais dos níveis de cinza com a distância, realizado no ENVI, proporcionou os resultados mostrados nas Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17, onde se encontram cada perfil realizado sobre a imagem tratada por “destriping” (Figura 5.6).

Dos perfis traçados, o que mais se aproximou do perfil da sondagem batimétrica foi o do traçado verde (Figura 5.14), no qual percebe-se semelhanças nas características dos corpos arenosos (assimetrias) e suas localizações. Daí a justificativa, observando-se os outros perfis, da baixa correlação entre os níveis de cinza e as profundidades ecobatimétricas para as posições localizadas no ecograma. Considerando-se que as localizações na sondagem são pontuais e que as dimensões de um “pixel” são de 30 por 30 m, uma variação de um “pixel” dentro de um trajeto, mais o erro associado ao registro das imagens, provocariam uma degradação do coeficiente de correlação.

A partir dos perfis de níveis de cinza, também pode-se demonstrar o caráter assimétrico das dunas, possibilitando inferir que as mesmas são modeladas por correntes unidirecionais, no caso, a vertente da Corrente Norte do Brasil. A observação destes corpos arenosos, com características assimétricas, permite inferir que a corrente atuante na região é de cerca de 50 cm/s, como demonstrado por Belderson et al (1982). Trabalhos anteriores demonstram que a corrente possui uma forte deriva para noroeste, nesta região.

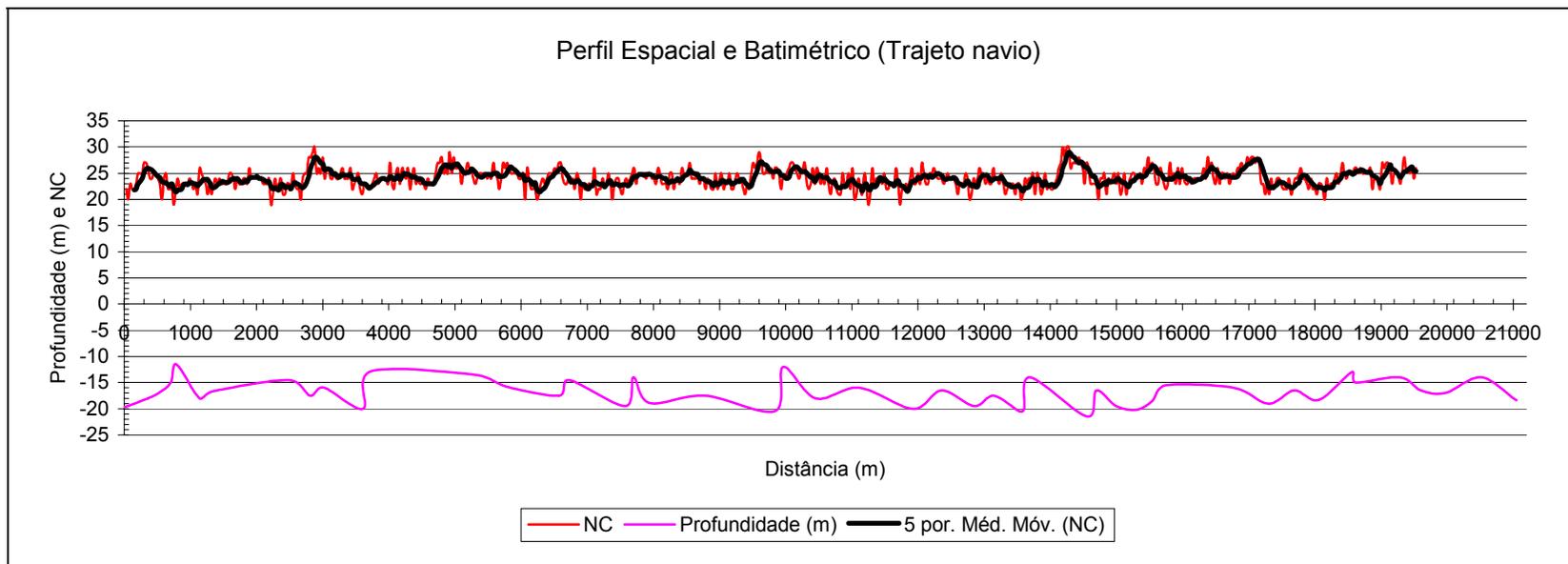


Fig. 5.13 - Perfil espacial e batimétrico (trajeto do navio). A linha escura representa uma média móvel de período 5.

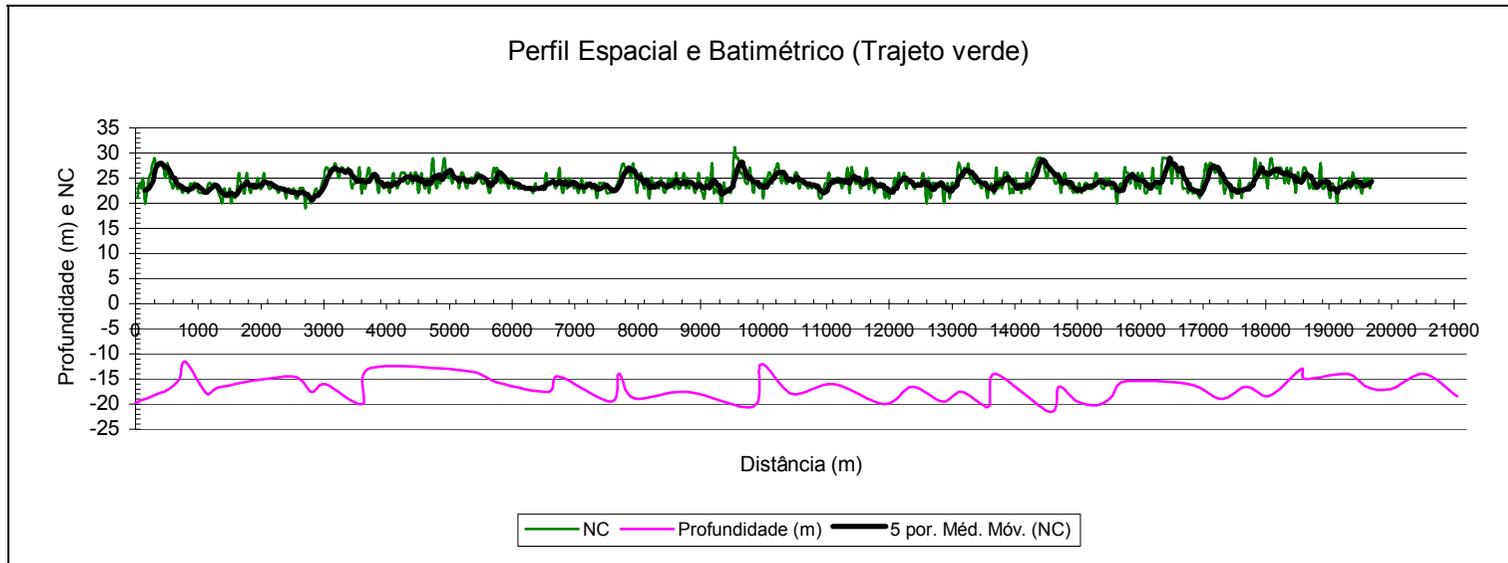


Fig. 5.14 - Perfil espacial de nível de cinza e batimétrico (trajeto verde).

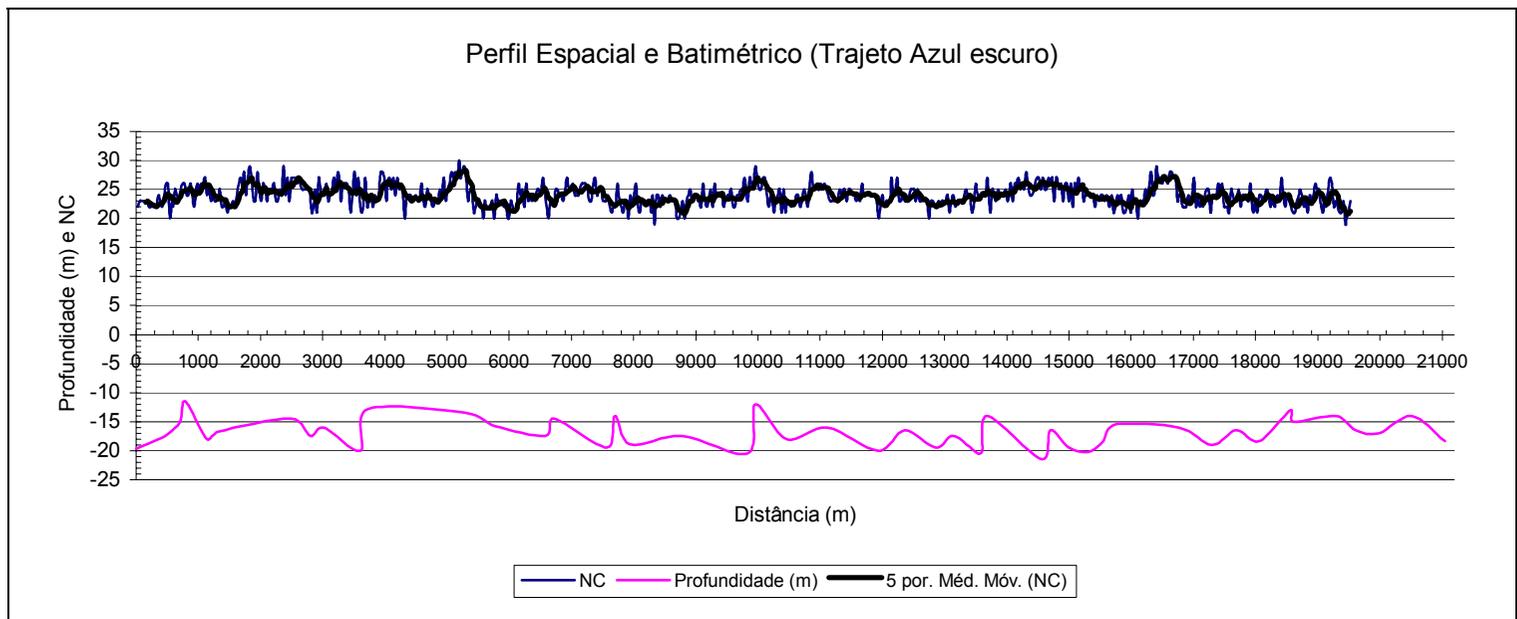


Fig. 5.15 - Perfil espacial de nível de cinza e batimétrico (trajeto azul escuro).

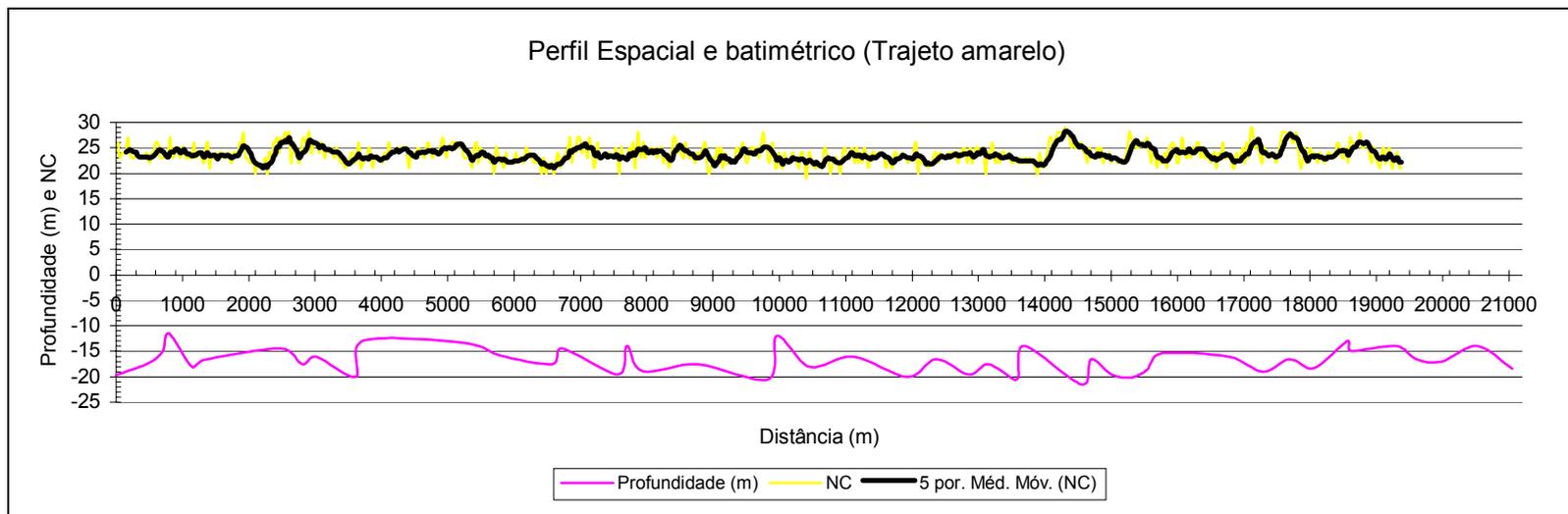


Fig. 5.16 - Perfil de nível de cinza e batimétrico (trajeto amarelo).

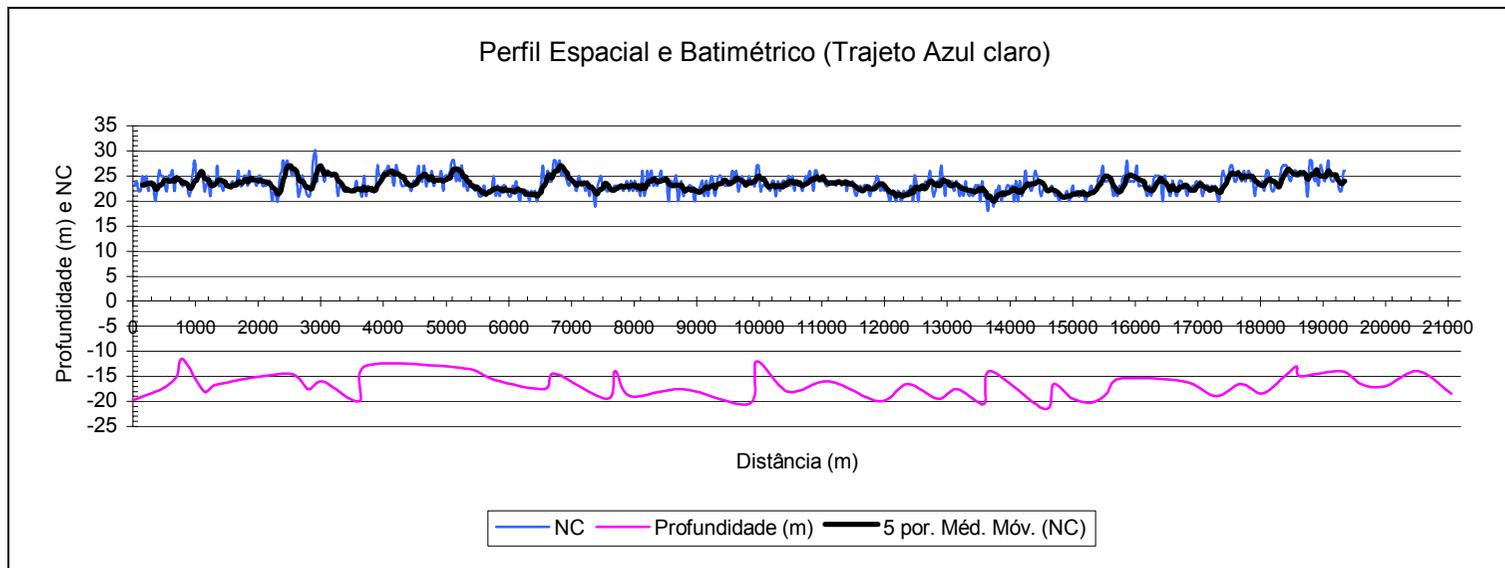


Fig. 5.17 - Perfil de nível de cinza e batimétrico (trajeto azul claro).

Os perfis realizados na região das dunas hidráulicas (Figura 5.11) resultaram nas Figuras 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23. Observa-se que, de todos os trajetos representados nas figuras, os de cor vermelho e amarelo mantiveram uma profundidade média aproximadamente constante (representada pela linha preta sobre as curvas), levando-se em conta a intensidade do nível de cinza, enquanto nos restantes dos trajetos ocorrem um decréscimo da profundidade média em direção à costa. Todos os trajetos mostram que não há um padrão de distribuição espacial das dunas, isto é, comprimentos de ondas regulares. Isto pode se dever aos canais de drenagem (em formas de bifurcação) da maré, ou às variações de formas de fundos de menores dimensões. Estes canais determinam a forma de estrias das feições. Os perfis demonstram que as dunas são simétricas em relação às cristas, denotando que as mesmas são modeladas por correntes de maré. As correntes de maré atuantes nesta área, que compreende os traçados, apresentam deriva para oeste (OCEANSAT, 1998).

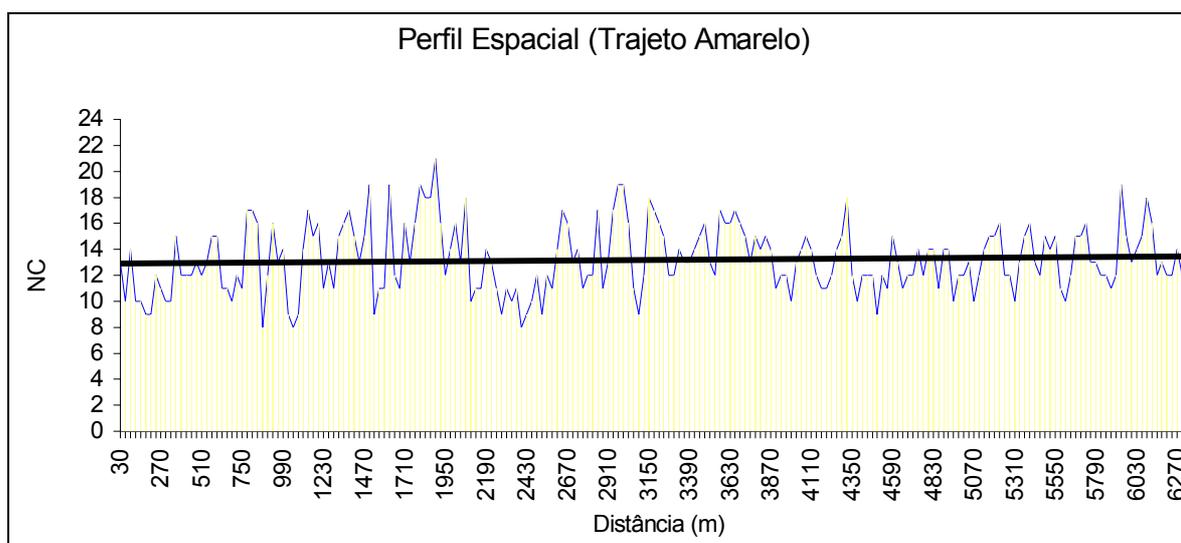


Fig. 5.18 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto amarelo). A linha preta representa a média de nível de cinza.

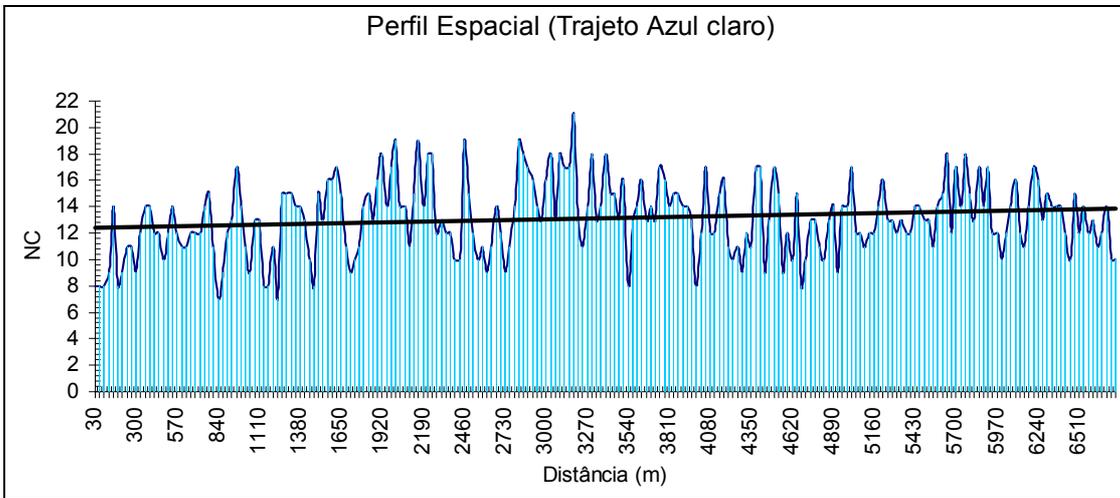


Fig. 5.19 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto azul claro).

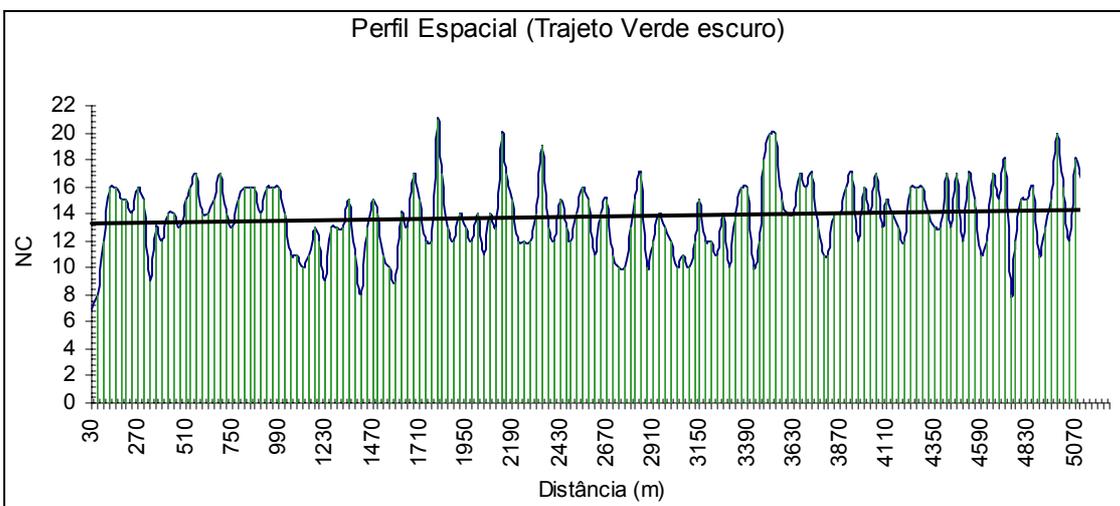


Fig. 5.20 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto verde escuro).

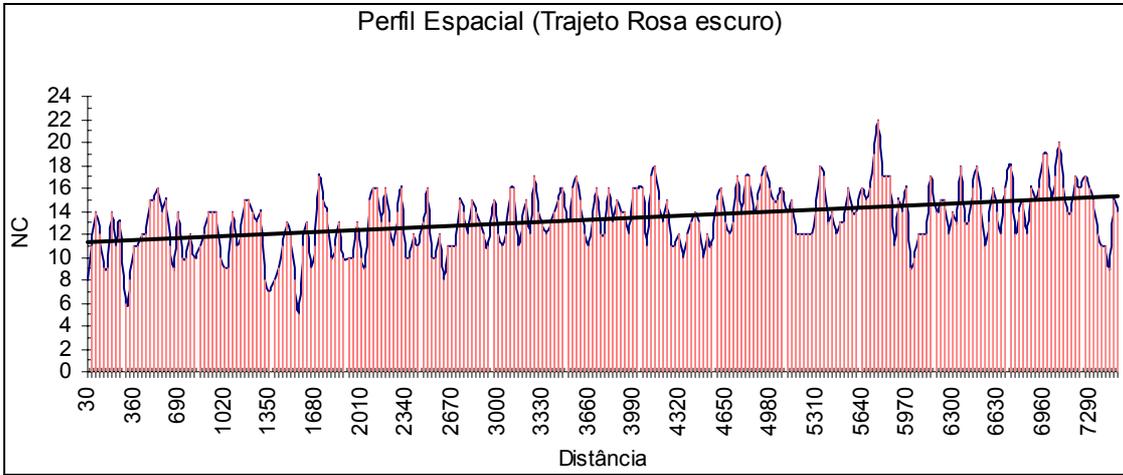


Fig. 5.21 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto rosa escuro).

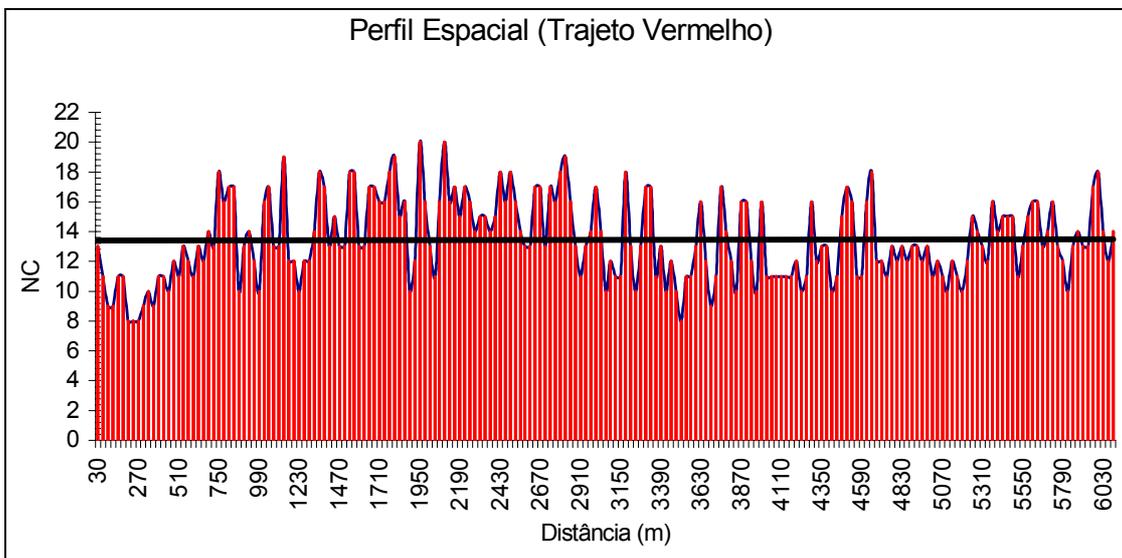


Fig. 5.22 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto vermelho).

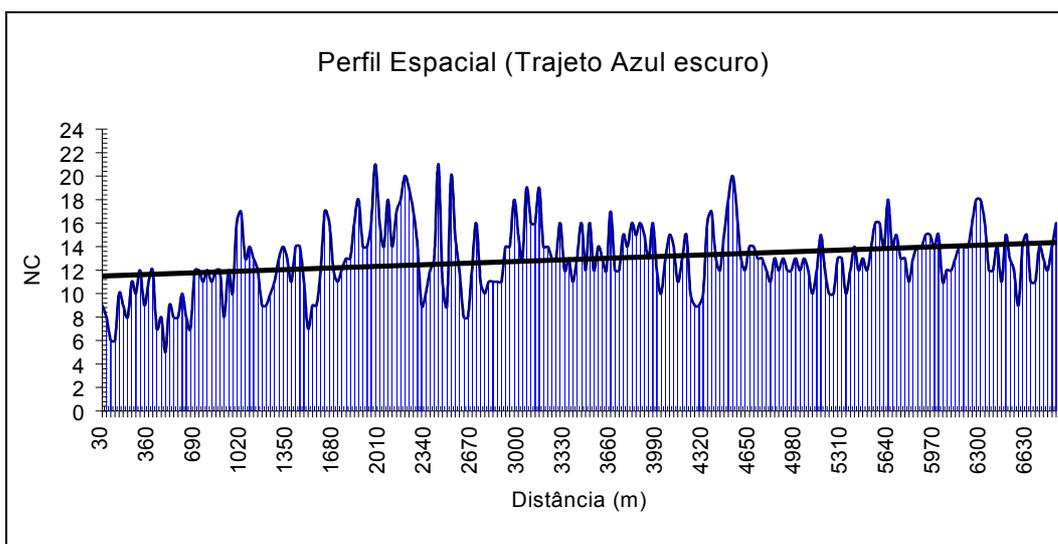


Fig. 5.23 - Perfil espacial de nível de cinza na região de dunas de maré (trajeto azul escuro).

5.4 FATIAMENTO A PARTIR DOS DADOS DA CARTA NÁUTICA B700

No presente trabalho utilizou-se da Carta Batimétrica B700 da DHN, que faz parte do acervo do Projeto TOPSUB/INPE. Esta carta náutica foi digitalizada e posteriormente fatiada para ser analisada em conjunto com as imagens TM. A Figura 5.24 mostra o resultado do fatiamento da batimetria realizado através do aplicativo Paint Shop Pro 4. Este fatiamento mostra a geomorfologia submarina de grande escala, como o delineamento dos paleocanais dos Rios Acú (2) e Mossoró (3), além da formação conhecida pelos pescadores locais como “Riscas do Meio”, localizada aproximadamente na posição 9.458.000 S e 770.000 W em coordenadas UTM

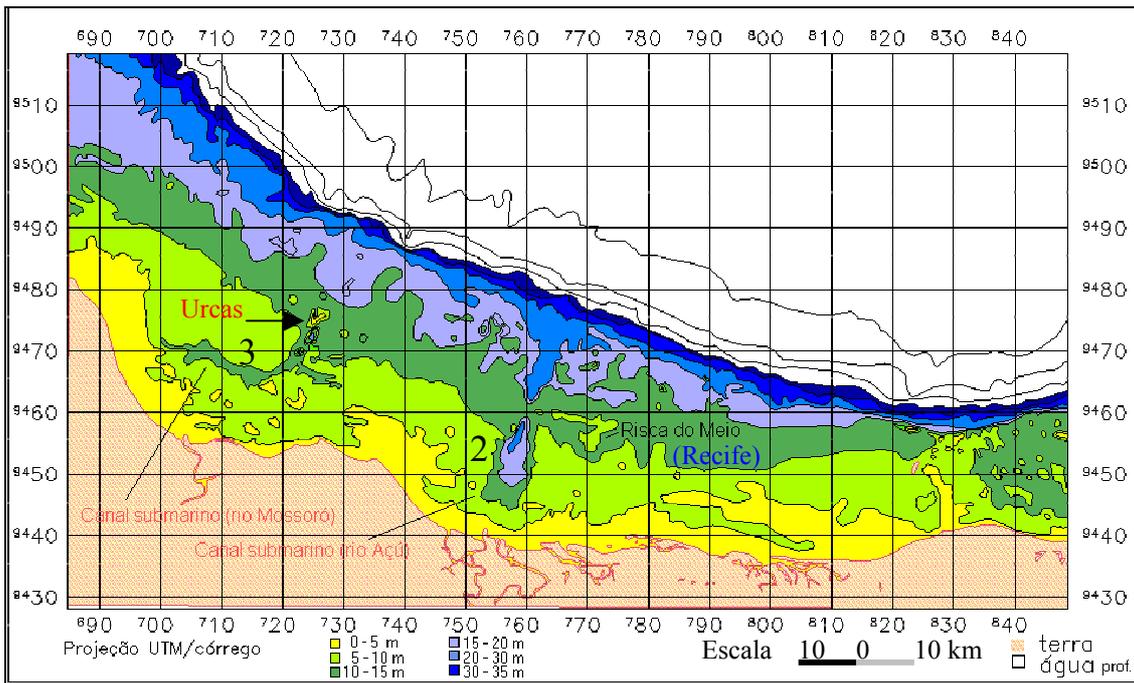


Fig. 5.24 - Fatiamento batimétrico baseado nos dados da carta náutica B700 da DHN.

O fatiamento mostra que grande parte da Plataforma Continental da região de estudo está compreendida entre as isóbatas de 0 a 35 metros, cuja variação em largura é de cerca de 18 km, em sua faixa estreita, e de 40 km em sua faixa mais larga.

A Figura 5.25 mostra a região de estudo através da imagem TM/Landsat 5 na banda 1, de 15/06/1989, com registro geográfico em coordenadas UTM. Nela percebe-se a grande riqueza de feições submarinas, demonstrando o seu potencial para futuros trabalhos mais detalhados.

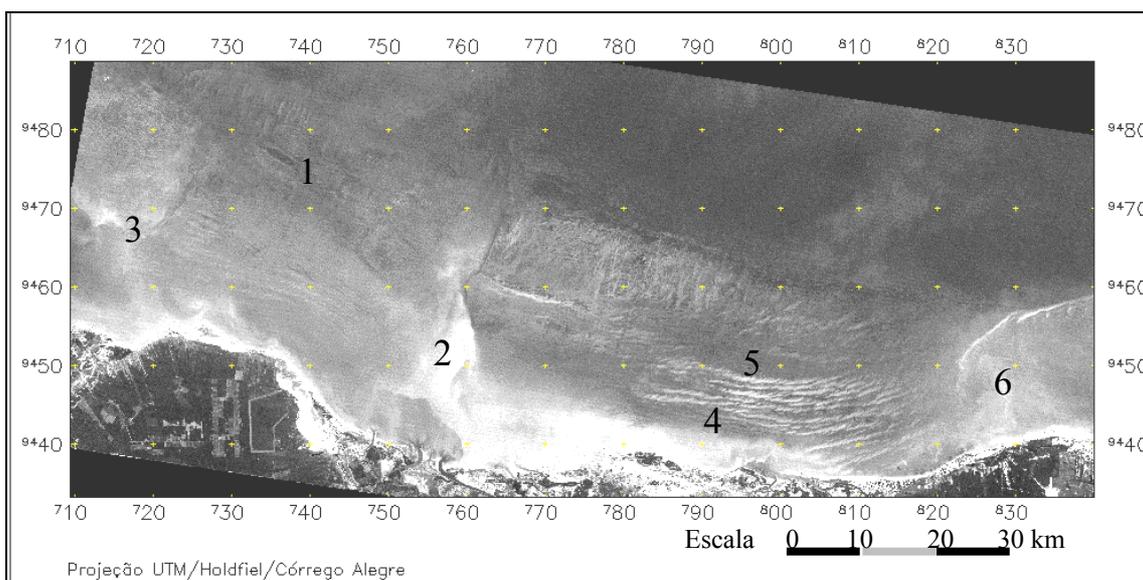


Fig. 5.25 - Imagem TM/Landsat 5 com registros em coordenadas UTM da região de estudo (15/06/1989).

Uma comparação da carta fatiada com a imagem mostra incoerência entre os níveis de cinza e a batimetria. Na região central, no que parece corresponder ao paleocanal do Rio Açú (2), há uma área com inversão significativa da profundidade. Próximo à coordenada 760.000 E e 9.450.000 S UTM, a região que na carta fatiada está em cor lilás, o que lhe confere profundidades entre 15 e 20 m, na imagem apresenta-se num tom de cinza mais intenso que suas redondezas, o que a caracteriza numa profundidade menor, cerca de 5 m ou menos, quando comparado ao tom de cinza da região próximo à linha da costa (cor amarela), que na carta representa profundidades entre 0 e 5 m. Isto mostra que o levantamento batimétrico detalhado desta área deveria ser realizado periodicamente pois as imagens sugerem que esta área apresenta formações de bancos de areia os quais constituem perigos à navegação.

5.5 ANÁLISE DAS FEIÇÕES SUBMARINAS VISÍVEIS NAS IMAGENS

Nesta seção serão descritas as feições submarinas visíveis nas imagens multitemporais, baseadas nos conhecimentos de geomorfologia e circulação oceânica, e sugerindo possíveis processos de sedimentação. Todas as imagens foram georeferenciadas no módulo SCARTA do SPRING, o qual tem como função a geração de mapas e cartas.

Como exposto anteriormente, a região de estudo foi dividida em sub-amostras para melhor discriminar as feições visíveis pelas imagens. São elas: região de dunas submarinas (1); região do paleocanal do Rio Açú (2); região do paleocanal do Rio Mossoró (3); região de campos de dunas de Galinhos (4); região com plataformas de extração de petróleo (5); região da Coroa das Lavadeiras (6) e região da Ponta do Tubarão (7).

5.5.1 DUNAS SUBMARINAS (REGIÃO 1)

A região na qual foi realizada a sondagem ecobatimétrica em 1989, apresenta uma complexidade de feições submarinas. A Figura 5.26 mostra três áreas distintas quanto a composição do assoalho oceânico e a influência das correntes.

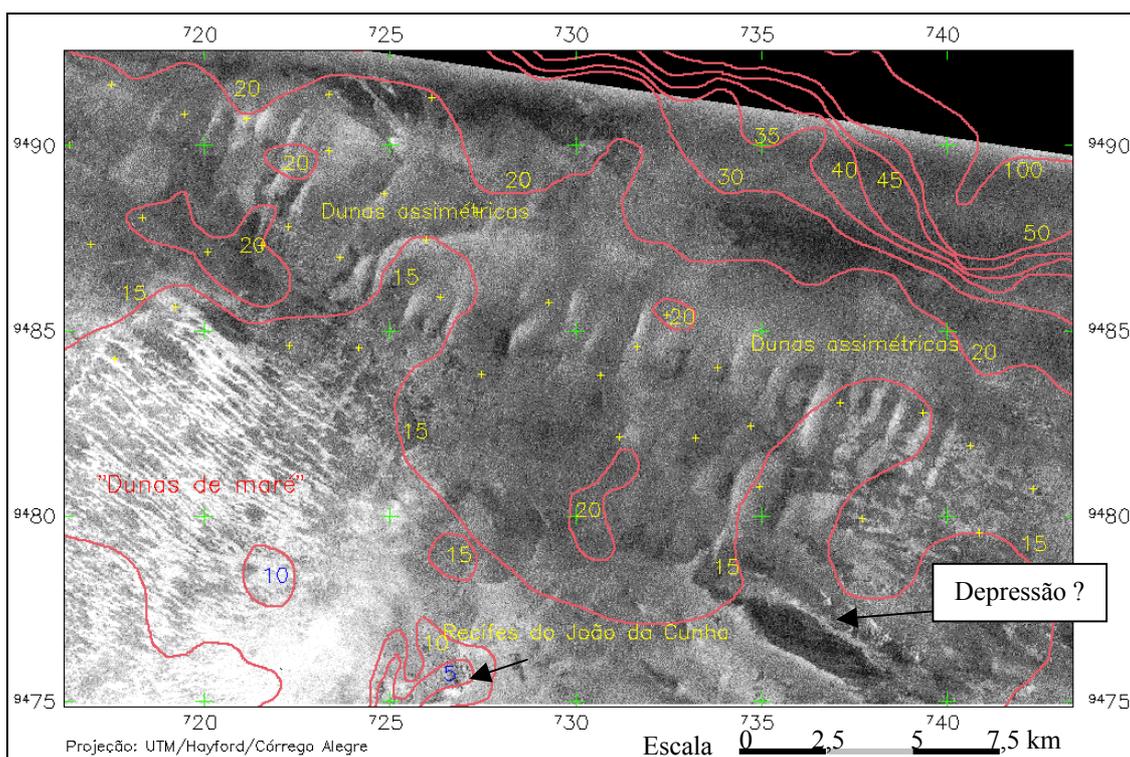


Fig. 5.26 - Área de dunas submarinas modeladas, provavelmente, por correntes de maré e corrente unidirecional.

Vianna et al. (1991) descrevem três zonas distintas no que se refere a geomorfologia do assoalho oceânico: zona interna, onde ocorre a ação das marés; zona intermediária, na

qual ocorre a influência tanto das correntes de maré quanto de correntes unidirecionais e zona externa, dominada por correntes unidirecionais. No setor da zona interna encontra-se uma área de cerca de 73,5 km² com lineamentos, a noroeste do paleocanal do Rio Mossoró (canto inferior esquerdo da Figura 5.26). Estes lineamentos com bifurcações, provavelmente constituídos de areia e direcionados obliquamente em relação a linha de costa (aproximadamente 45°), parecem corresponder à dunas de areia simétricas e transversais à corrente de maré. Estas feições têm comprimentos e larguras aproximadamente compreendidos entre 5.500 m a 7.500 m e entre 30 m a 215 m, respectivamente. A separação entre suas cristas varia entre 45 m a 150 m, aproximadamente.

Para as outras datas, não se pôde verificar as feições devido ao material em suspensão proveniente da zona interna, próximo a costa, causado pela turbulência das ondas e pela corrente de maré, principalmente para as imagens de 1988 e 1990. Para a imagem de 1984, a concentração de material em suspensão era menor, mas não foi possível observar o assoalho marinho no setor específico das dunas de maré.

No canto inferior direito da Figura 5.26, em aproximadamente 4° 44' S e 36° 52' W, nota-se uma feição que, pelo nível de cinza, poderia ser uma depressão, cujo comprimento seria de cerca de 4.500 m e cuja largura variaria entre 650 m a 1.160 m. Porém, os pontos digitalizados sobre ela mostram que não se trata de uma depressão, mas sim de, possivelmente, um afloramento rochoso coberto por vegetação. Chegou-se a esta conclusão pelo fato de que os pontos sobre a feição, da direita para esquerda, possuíam profundidades de 10,6 m e 11,8 m, respectivamente, segundo a carta náutica 720 digitalizada, enquanto que, os pontos cujos níveis de cinza, ou mais claros (13,5 m), ou mais escuros (entre 15 m e 15,5 m), ao redor da feição, variavam entre 13 m a 15,5 m.

Observando a imagem da segunda componente principal (Figura 5.27), gerada pela Transformada das PCs - Principais Componentes, com relação à feição descrita acima, percebe-se que os níveis de cinza sobre a feição são caracterizados, praticamente, pela mesma intensidade das áreas mais rasas, o que vem mais uma vez indicar que a feição

escura é realmente uma área vegetada. Nesta imagem, ainda é notória a presença dos ruídos, caracterizados pelas faixas claras, consequência da própria transformada das PCs. Como foram utilizadas apenas as duas primeiras bandas do TM, os ruídos tendem a ser acumulados nas últimas componentes, no caso, na segunda componente.

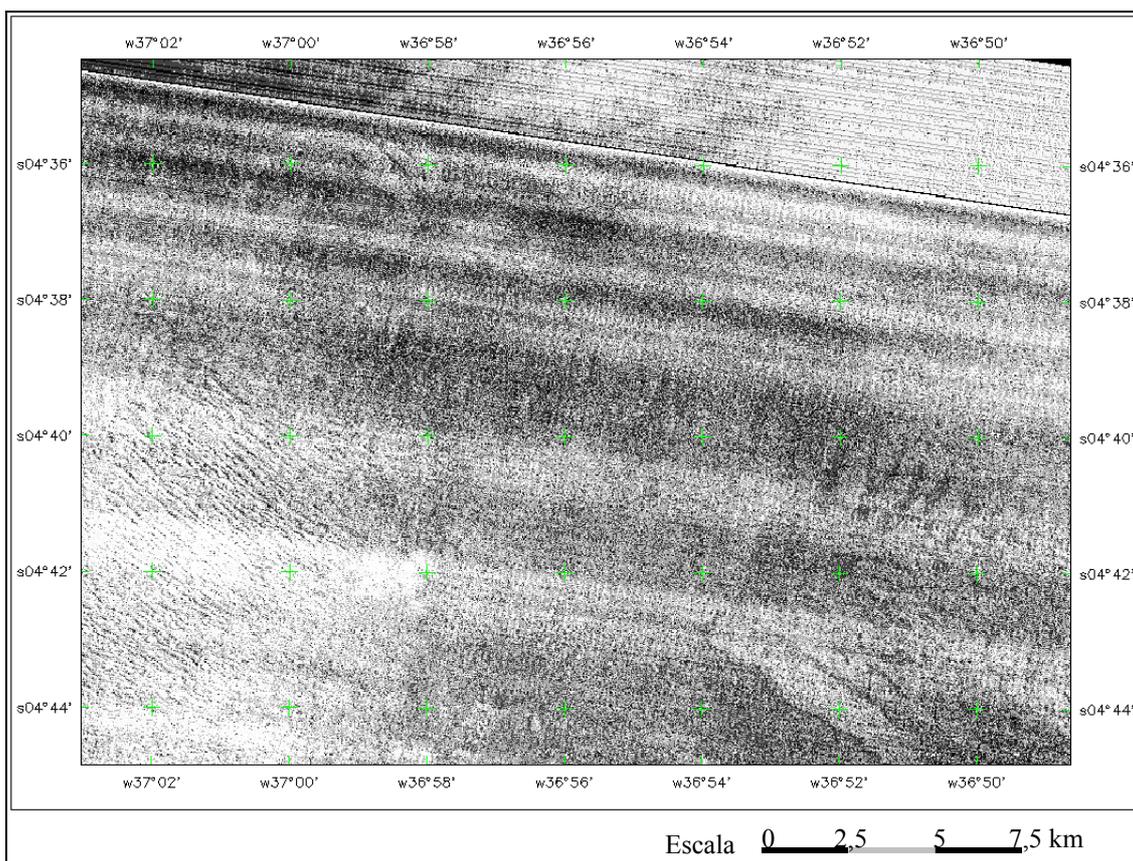


Fig. 5.27 - Imagem da segunda componente das PCs.

Mais ao norte, no sentido diagonal da Figura 5.26, verifica-se a presença de dunas assimétricas. Como citado por Stride (1982), locais que possuem estas feições podem implicar na presença de correntes da ordem de 50 cm/s. Através da análise do ecograma, ou sondagem ecobatimétrica, percebe-se que estas feições possuem alturas que variam entre 2 a 10 metros (Apêndice A).

Solewicz (1989), Vianna et al (1991) e Testa (1996) descrevem feições semelhantes (campos de dunas) na região de Touros - Cabo Calcanhar, região esta mais a leste da região de interesse deste trabalho. As amostras de sedimento coletadas nestas dunas

apresentavam predominância de areia média quartzosa (maior que 90%). Pela proximidade das regiões, pode-se assumir que as feições descritas acima poderão apresentar características texturais semelhantes, fato este que poderá vir a ser confirmado em futuros trabalhos de campo.

5.5.2 REGIÃO DO PALEOCANAL DO RIO AÇÚ (REGIÃO 2)

A formação que se apresenta no setor do delta do Rio Açú apresenta mudanças significativas. Na imagem de 30/07/88 (Figura 5.29) percebe-se uma barreira submarina, provavelmente de areia, alongada na direção perpendicular à costa, e no sentido ao antigo delta do rio. Ela se estende por cerca de 17.700 m. Esta medida foi obtida por meio do SPRING utilizando-se da função “UTIL-medidas” (INPE, 1997). Esta formação possui, aparentemente devido a um acúmulo de sedimentos, duas cristas de areia equidistantes de cerca de 3.170 m. Já na imagem da passagem de 16/06/1984 (Figura 5.28), cuja existência dos cristas já se apresentavam, a distância era de cerca de 2.300 m.

Aqui ocorre um intenso processo de sedimentação que é notório no período compreendido entre 1984 a 1990, como ficará evidente mais adiante.

Para a imagem de 15/06/1989 (Figura 5.30) e de 06/09/90 (Figura 5.31), esta feição apresenta um acúmulo na posição intermediária de seu alongamento, onde anteriormente estavam posicionados as cristas, estendendo-se na direção tanto longitudinal quanto transversal. Este fato é verificado principalmente na imagem da passagem de 06/09/90.

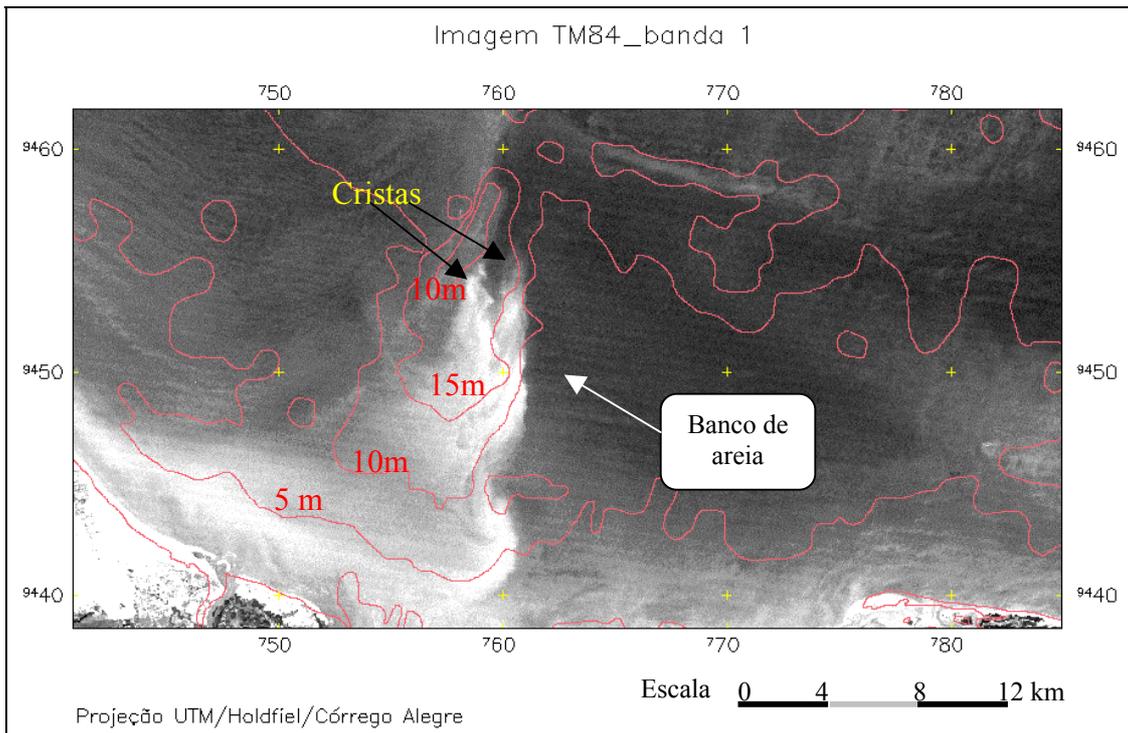


Fig. 5.28 - Imagem da passagem 16/06/1984 com a formação de um banco de areia.

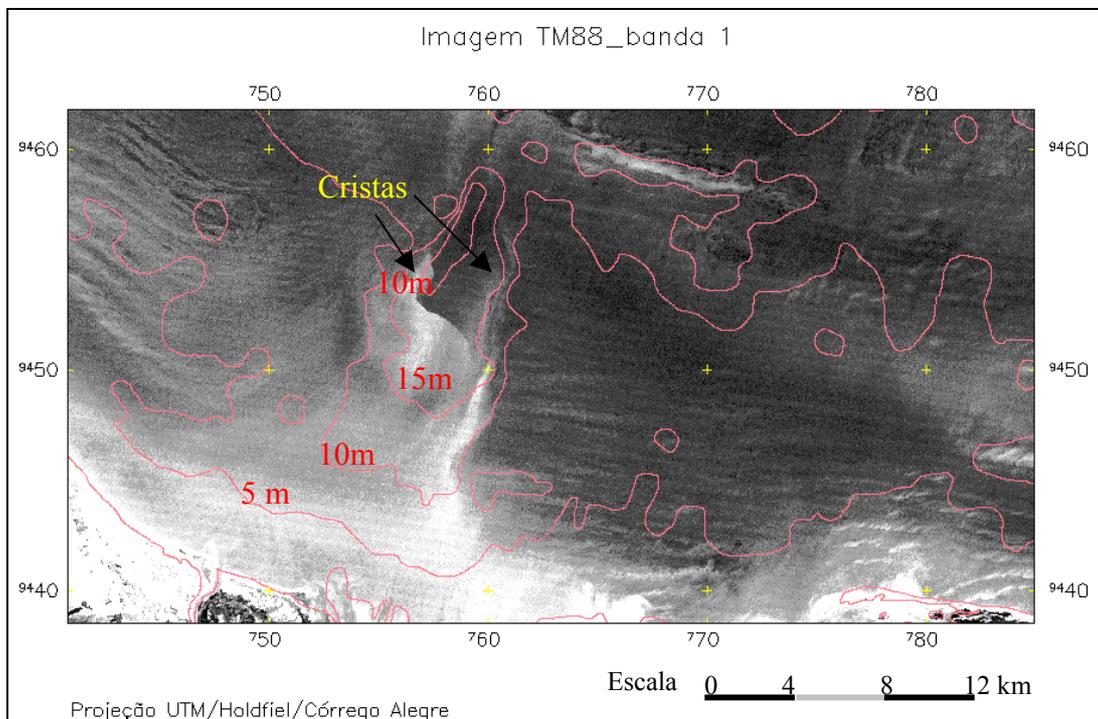


Fig. 5.29 - Imagem da passagem 30/07/1988 com a formação de um banco de areia.

A imagem de 06/09/1990 corresponde ao período cujas intensidades de vento são maiores, compreendendo os meses de setembro a janeiro, como pode ser verificado na Tabela 5.3, especificamente com velocidade média entre 8.2 - 9.3 m/s. A intensidade destes ventos contribui para o aparecimento de material em suspensão.

As imagens de 16/06/1984 e 15/06/1989 correspondem ao período em que os ventos são menos intensos, tendo em média 5,6 m/s; ainda assim, percebem-se algumas regiões nas imagens com materiais em suspensão.

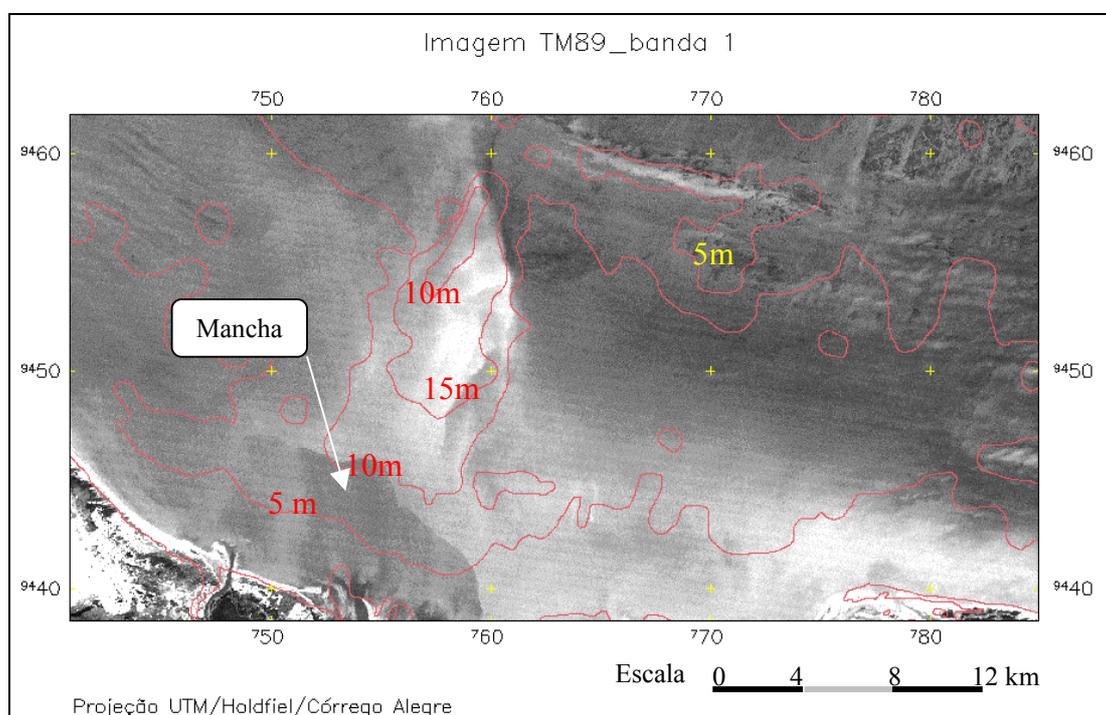


Fig. 5.30 - Imagem da passagem 15/06/1989 com a formação de um banco de areia.

Na imagem da Figura 5.31 são visíveis as descargas do Rio das Conchas, Rio dos Cavalos e Rio Açú pela diferença de tonalidade de nível de cinza menos intensos, provavelmente, devido à matéria orgânica dissolvida presente nas águas. Para as outras imagens as descargas não são tão intensas. Verificando-se a Tabela 5.2, que dá os dados médios de precipitação do mês referente as datas de aquisição das imagens utilizadas neste trabalho, observa-se que a precipitação foi relativamente baixa para a data da imagem em questão.

A mancha de tom de cinza menos intensa (Fig. 5.30) alonga-se no sentido noroeste ao longo da costa devido, provavelmente, à presença de corrente paralela à costa (“longshore”) e a barreira de areia situada à frente do delta deste rio.

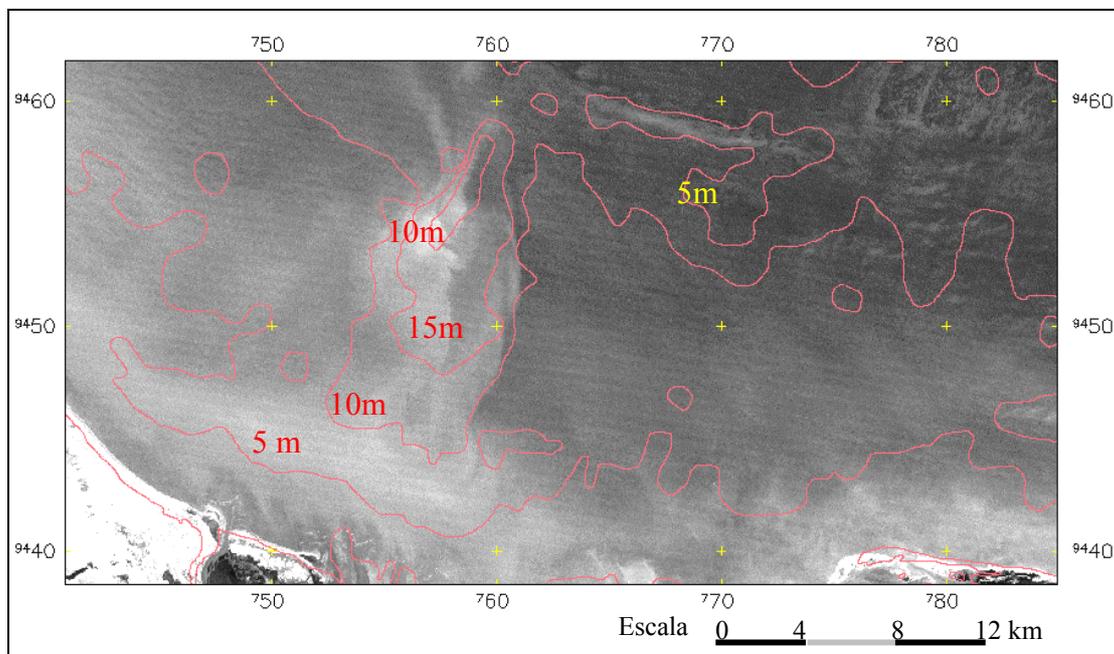


Fig. 5.31 - Imagem da passagem 06/09/1990 com a formação de um provável banco de areia.

5.5.3 REGIÃO DO PALEOCANAL DO RIO MOSSORÓ (REGIÃO 3)

As quatro imagens apresentam-se diferenciadas para esta região. As imagens de 1984 e de 1988 (Figuras 5.32 e 5.33) apresentam uma deposição, provavelmente, de areia sobre o canal submarino, próximo ao Porto-Ilha de Termisa (9.467.162 S e 716.889 W em coordenadas UTM). O assoalho marinho, até a distância de aproximadamente 9.700 m da frente da foz do Rio Mossoró, a partir da linha da costa, parece ser de areia (Summerhayes et al.,1977), uma vez que se verifica um rápido processo de mudanças.

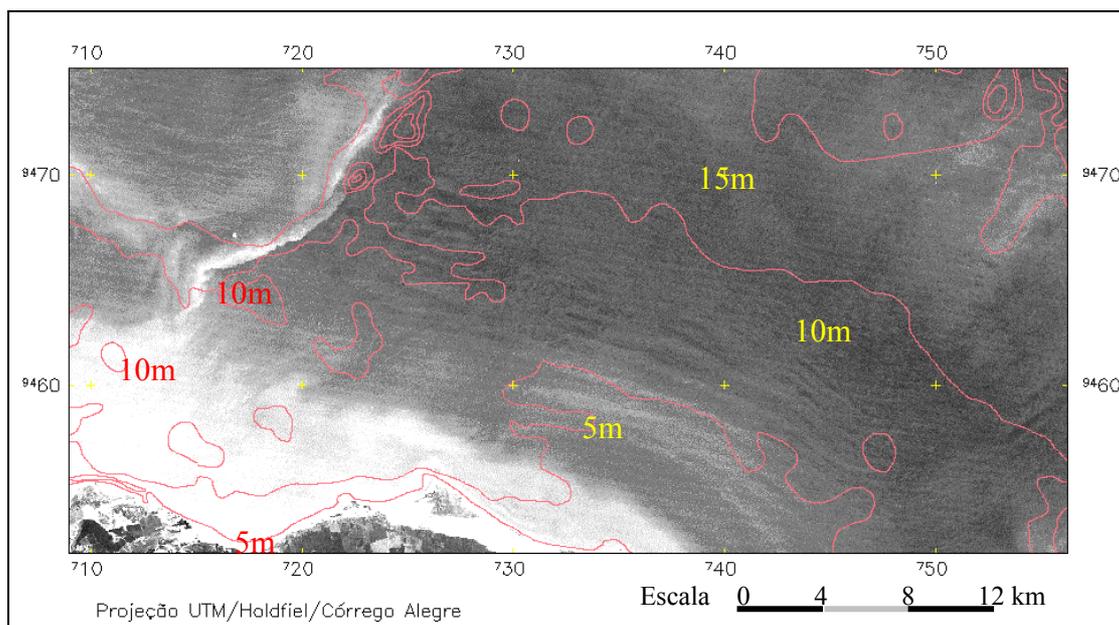


Fig. 5.32 - Imagem da passagem 16/06/1984 da região do paleocanal do Rio Mossoró.

Mais a sudeste (centro das Figuras 5.32, 5.33 e 5.34) do paleocanal do Rio Mossoró, numa área de cerca de 170 km^2 , num perímetro de cerca de 58 km, encontra-se um campo de dunas que, pela sua disposição e localização, parece ser modelado pelas correntes de maré ali atuantes. Pela análise das imagens utilizadas neste trabalho, as dunas são aparentemente estáveis, não havendo nenhuma modificação visível quanto a algum deslocamento, para a resolução do sensor TM (30 m). As dunas possuem comprimentos que variam entre 16 km a 22 km, possuindo larguras entre 200 m a 1.300 m. As distâncias entre as cristas variam entre 800 m a 1.500 m. Na imagem de 1988 verifica-se a presença de dunas em menor escala, mais próximas à linha da costa: possuem comprimentos entre 4.200 m a 6.000 m e larguras entre 30 m a 300 m, com distâncias entre as cristas de cerca de 300 m a 600 m.

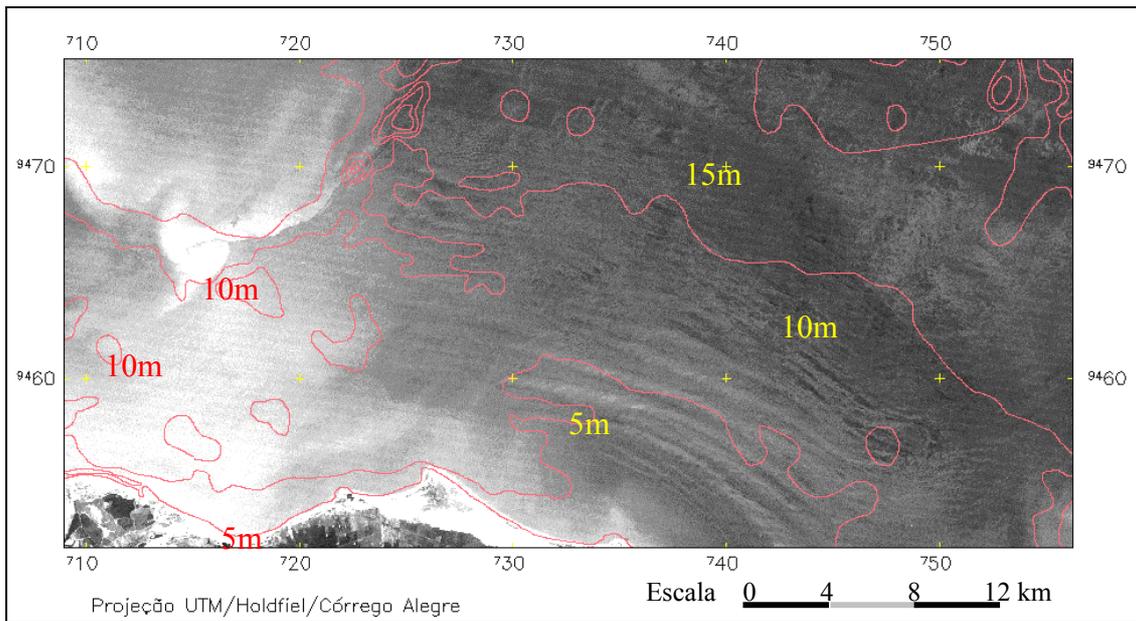


Fig. 5.33 - Imagem da passagem 30/07/1988 da região do paleocanal do Rio Mossoró.

A imagem de 1989 (Figura 5.34) extraordinariamente não apresenta a deposição de areia sobre o canal, notório na imagem de 1984 e 1988. Enquanto que na imagem de 1990 a região aparece praticamente toda coberta por materiais em suspensão (Figura 5.35). Esta data de 1990, mês de setembro, corresponde ao período de ventos intensos para a região, com média entre 8,2 – 9,3 m/s, isto proporciona uma maior quantidade de material em suspensão tanto na atmosfera quanto sobre as águas.

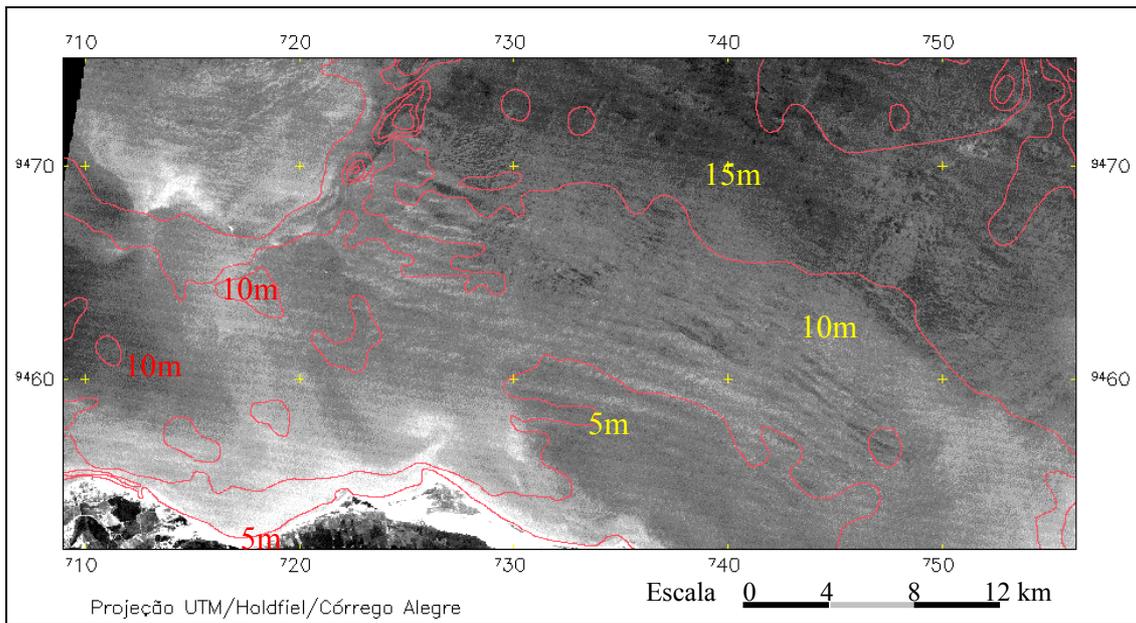


Fig. 5.34 - Imagem da passagem 15/06/1989 da região do paleocanal do Rio Mossoró.

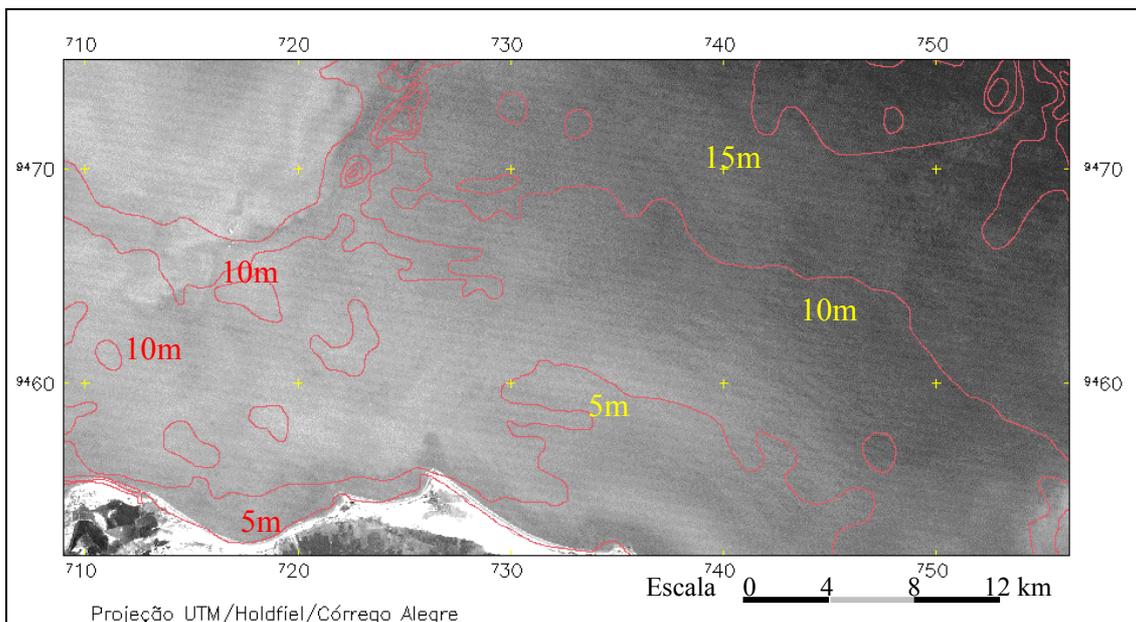


Fig. 5.35 - Imagem da passagem 06/09/1990 da região do paleocanal do Rio Mossoró.

5.5.4 REGIÃO DO CAMPO DE DUNAS DE GALINHOS (REGIÃO 4)

Para a região do campo de dunas hidráulicas próximo a Galinhos, as imagens dos anos de 1984 (Figura 5.36) e de 1990 (Figura 5.37) encontram-se parcialmente cobertas por

sedimentos em suspensão. Na imagem de 1989 percebe-se o surgimento de prováveis formações de novas dunas próximo à costa, junto a Galinhos, como pode ser visto fazendo-se uma comparação entre as imagens de 1988 e 1989 (Figuras 5.38 e 5.39).

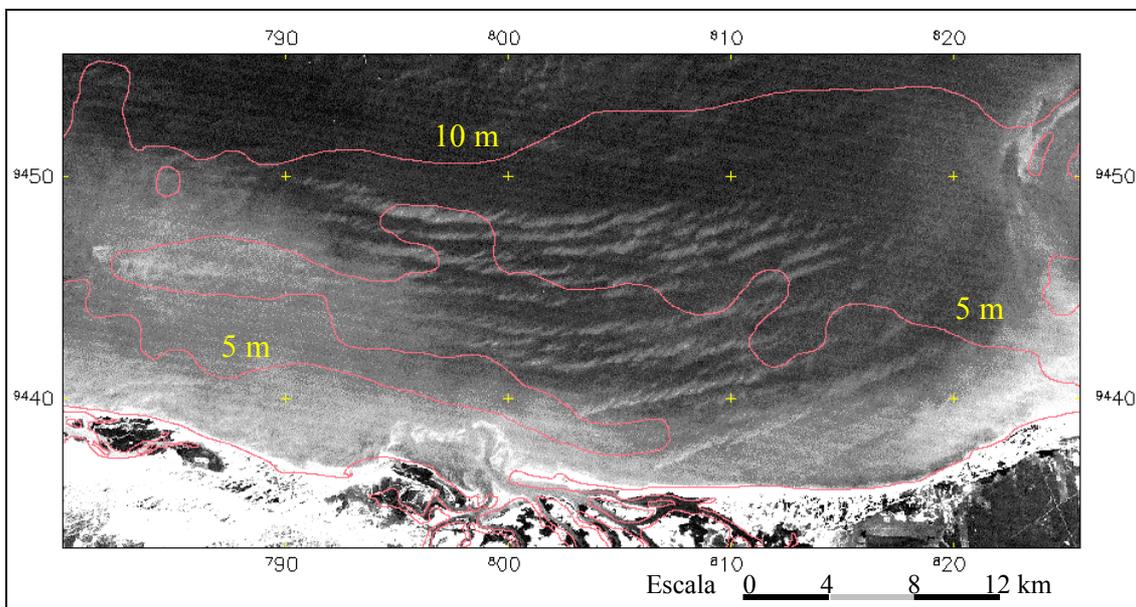


Fig. 5.36 - Imagem TM1/Landsat 5 de 16/06/1984 do campo de dunas de Galinhos.

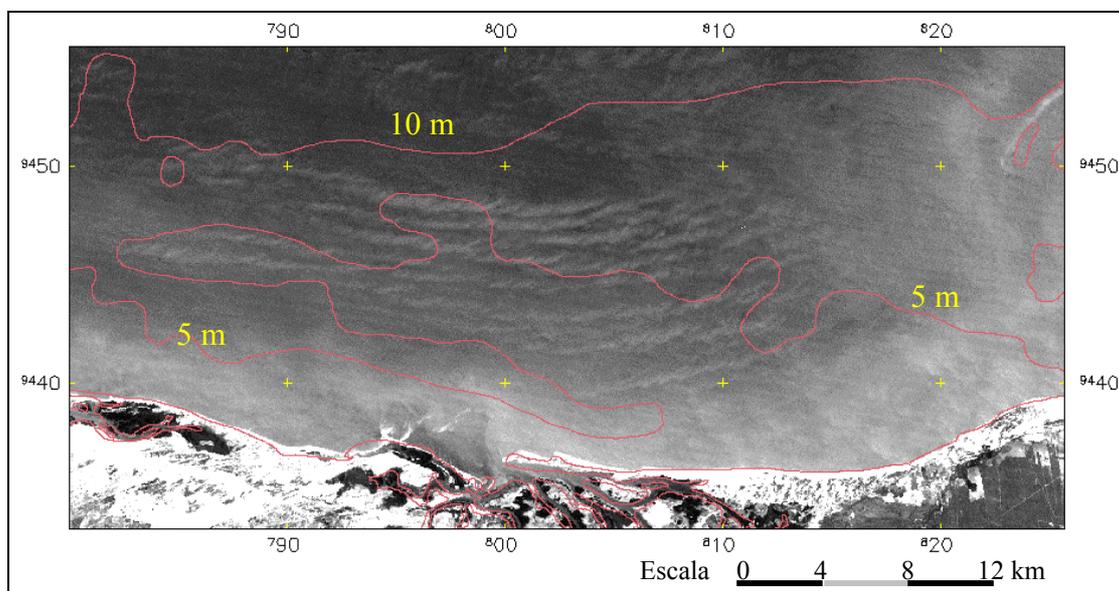


Fig. 5.37 - Imagem TM1/Landsat 5 de 06/09/1990 do campo de dunas de Galinhos.

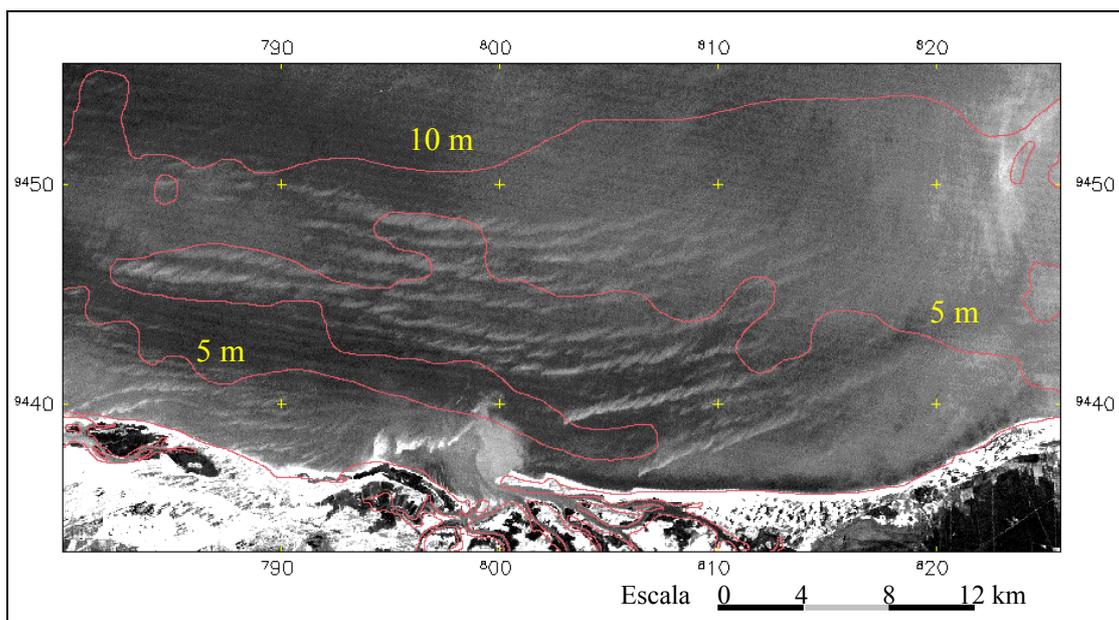


Fig. 5.38 - Imagem TM1/Landsat 5 de 30/07/1988 do campo de dunas de Galinhos.

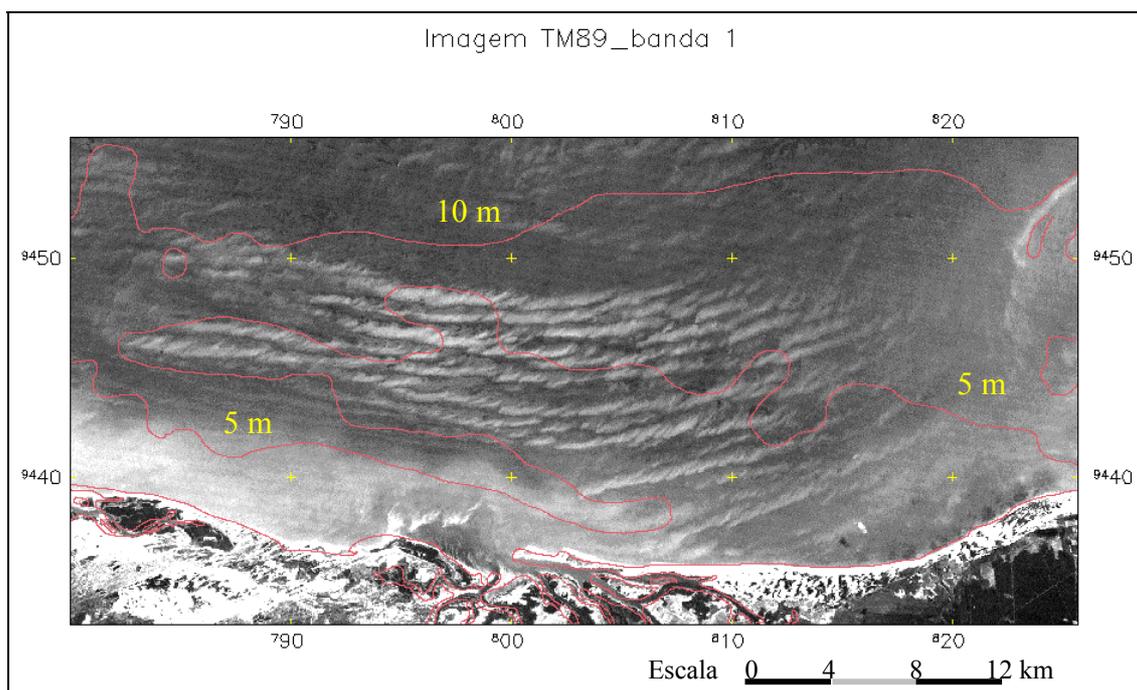


Fig. 5.39 - Imagem TM1/Landsat 5 de 15/06/89 do campo de dunas de Galinhos.

Este campo de dunas possui uma área de aproximadamente 370 km² compreendido num perímetro de cerca de 90 km. As dunas apresentam canais nos quais parece haver a presença de vegetação. Estes canais são causados, provavelmente, por correntes de

escoamento da maré sobre as dunas. As distâncias entre as cristas variam entre cerca de 600 m a 2.000 m e as larguras das mesmas variam entre 200 m a 900 m. A intensidade dos níveis de cinza nos cavados indica que ali deve existir vegetação.

Não se percebeu qualquer movimentação das dunas no período correspondente entre os anos de 1984 e 1990, levando-se em consideração a resolução do sensor TM (30 m).

5.5.5 REGIÃO COM PLATAFORMAS DE EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO DA PETROBRÁS (REGIÃO 5)

A Figura 5.40 mostra algumas posições de plataformas para exploração de petróleo e gás natural detectáveis na imagem TM/Landsat-5. A imagem, que se apresenta em melhores condições de visibilidade, refere-se à passagem de 15/06/1989.

O que se percebe em relação ao posicionamento das plataformas, a partir da imagem, é que estas estão localizadas na parte interna da plataforma continental, numa área cuja profundidade varia entre 10 a 20 m e cujo assoalho é constituído por feições do tipo dunas assimétricas, direcionadas tanto transversalmente quanto longitudinalmente à corrente, algumas sendo oblíquas.

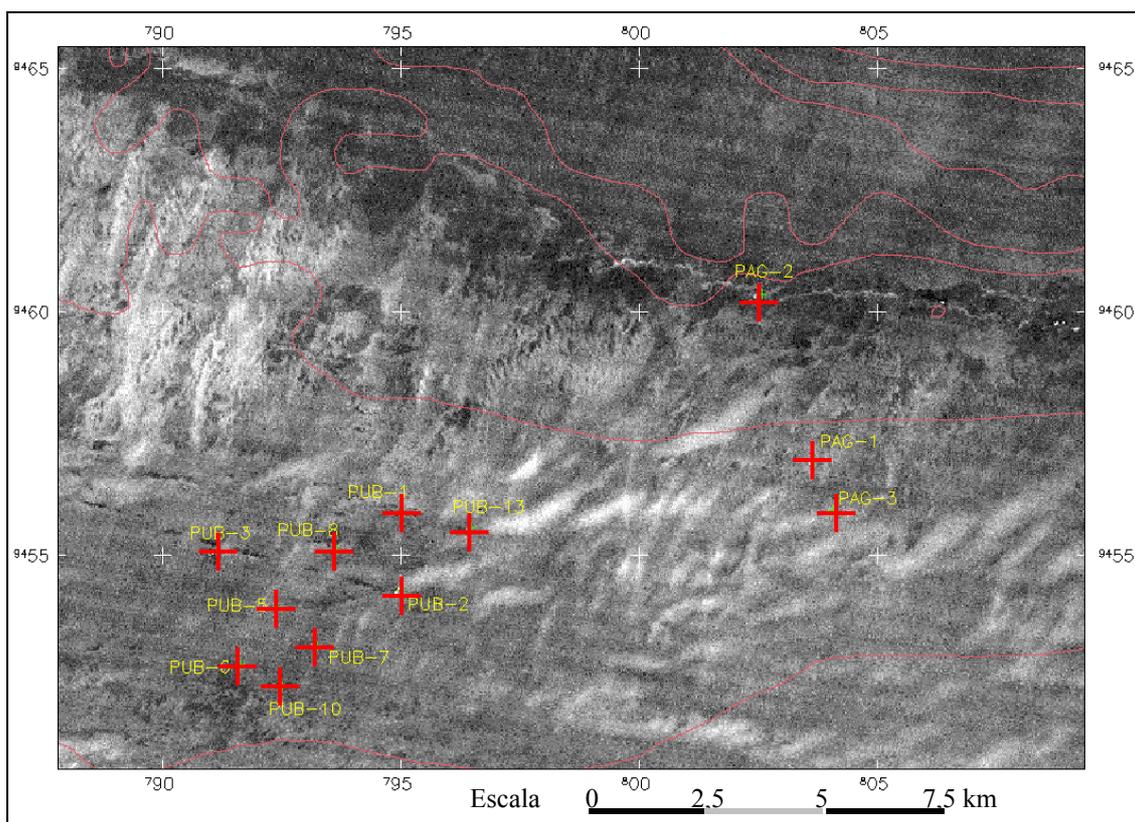


Fig. 5.40 - Imagem TM_banda 1 de 15/06/1989 com as localizações de plataformas de exploração de petróleo e gás natural.

A geomorfologia para a região parece ser regida pela circulação das águas, como as correntes de maré, e pela influência da Corrente Norte do Brasil, é o que demonstram as disposições das diversas formas e direcionamentos das feições presentes. A maioria das plataformas estão posicionadas numa área aparentemente mais homogênea. A Plataforma Continental para esta região não parece ter um gradiente elevado, como demonstram as isolinhas e a própria imagem até a isóbata de 20 m.

A área no canto superior direito aparece clara na Figura 5.40 devido a presença de materiais em suspensão, uma vez que esta área situa-se em águas profundas.

5.5.6 REGIÃO DA COROA DAS LAVADEIRAS (REGIÃO 6)

Nesta região encontra-se um lineamento que tem aproximadamente 30 km de comprimento e largura variando entre 150 m a 500 m. Posicionada paralelamente a linha da costa, acompanhando seu contorno (direção sudoeste), próximo a Ponta dos Três Irmãos, esta feição, como descrita por Solewicz (1989), parece ser de origem tectônica.

Para a região mais interna, a partir do lineamento, na imagem de 1988 (Figura 5.41) observa-se a presença de materiais em suspensão, deixando parte do lineamento e algumas dunas transversais adjacentes cobertas, as quais podem ser observadas nas outras imagens. Pela análise multitemporal das imagens, as estruturas geomorfológicas submarinas não parecem apresentar quaisquer modificações. As únicas observações que puderam ser feitas é a menor ou maior presença de materiais em suspensão.

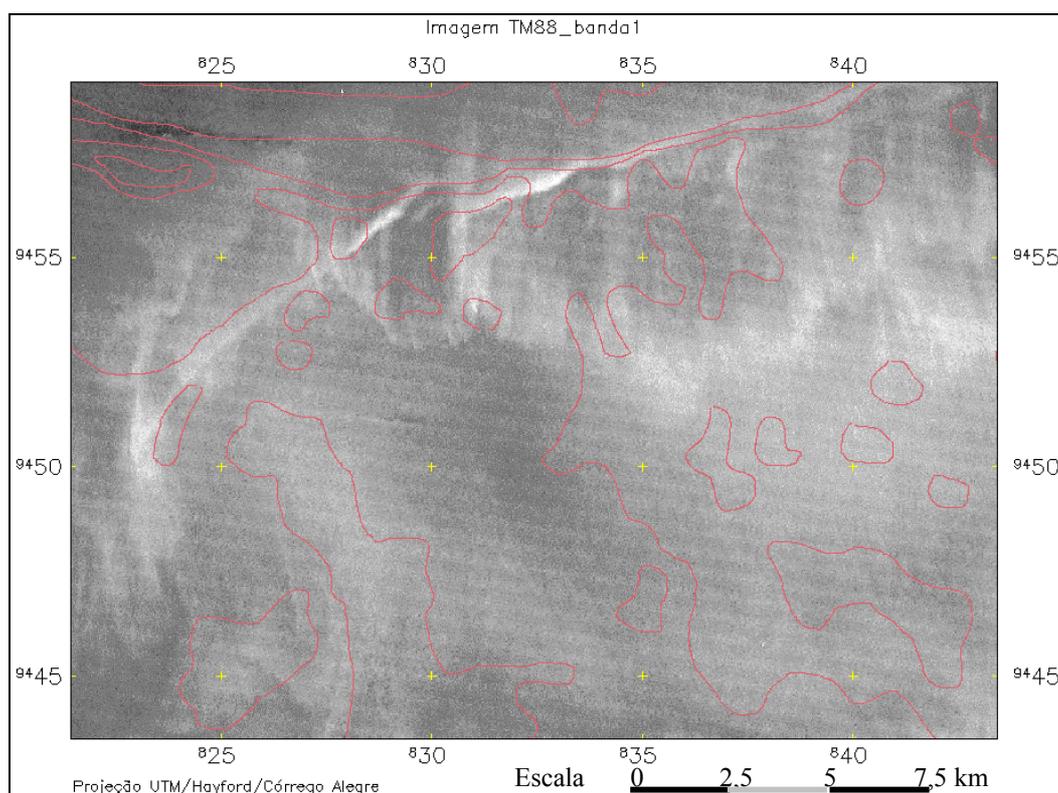


Fig. 5.41 - Imagem do lineamento conspícuo da Coroa das Lavadeiras (30/07/1988).

Próximo ao lineamento, a cerca de 4 km ao sul deste, encontra-se a Urca da Cotia, que está representada na Figura 5.42. As dunas assimétricas ali presentes, entre o lineamento e a costa, apresentam comprimentos que variam entre cerca de 500 m a 1.000 m e larguras entre 100 m a 200 m.

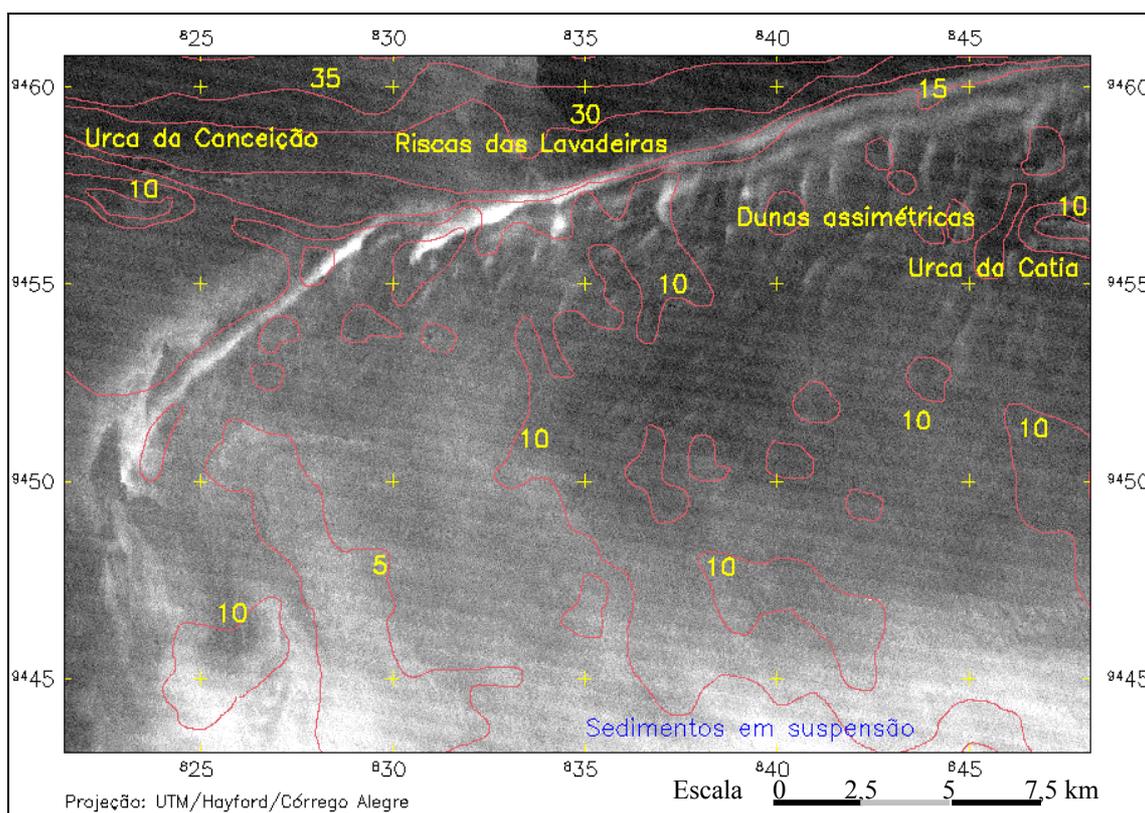


Fig. 5.42 - Imagem do lineamento conspícuo da Coroa das Lavadeiras (16/06/1984).

5.6 COMPARAÇÃO DA CARTA NÁUTICA COM A IMAGEM

Com respeito às isobatimétricas da carta B 700, algumas não coincidem com a imagem. Isto pode ser observado na Figuras 5.40 e 5.42, por exemplo. Há isóbatas cruzando dunas em suas cristas e cavas e caracterizando as mesmas como apresentando uma única profundidade, o que é compreensível em função das duas metodologias empregadas: sensores remotos e levantamento batimétricos.

A carta descreve razoavelmente algumas feições visíveis nas imagens, como a feição conhecida como Risca do Meio, cuja localização sobre a imagem encontra-se, em

coordenadas UTM, entre 763.188 E e 775.918 E e 9.452.816 S e 9.461.030 S, a qual corresponde a uma área de cerca de 33 km² num perímetro de 50 km. Esta é uma das feições que mereceria atenção em futuros trabalhos, pois próximo dela encontram-se diversas dunas assimétricas de pequena escala, cujas disposições são diversas. Além da Risca do Meio, a carta descreve os paleocanais do Rio Açú e do Rio Mossoró, como também a Urca do Tubarão, a Urca da Cotia e o delineamento da Coroa das Lavadeiras.

No que diz respeito à linha de costa, é notória a modificação sofrida pela mesma quando se compara os dados das imagens com a carta náutica B 700 da DHN (dados efetuados pela Marinha do Brasil até 1973), digitalizada previamente. Isso pode ser verificado na Figura 5.43. No trecho conhecido como a Ponta do Tubarão, percebe-se que a extremidade daquela formação tem sido modificada com o passar dos anos, no sentido do mar para a costa (direção sul) e para oeste, o que sugere que a corrente marítima e a corrente de maré influenciam no processo de migração desta feição.

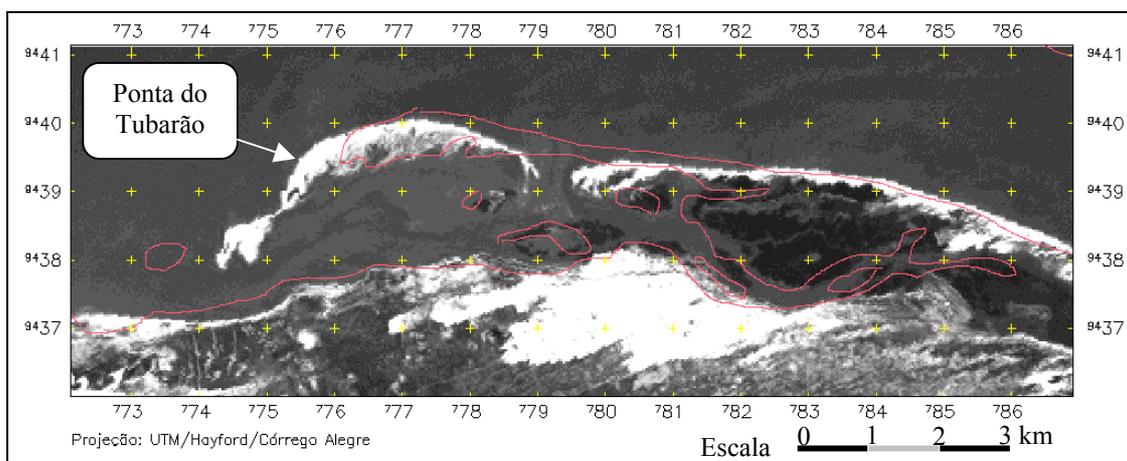


Fig. 5.43 - Imagem de 16/06/1984 da Ponta do Tubarão.

Uma análise das imagens correspondentes aos anos de 1984, 1988, 1989 e 1990, juntamente com a carta náutica B 700 digitalizada, mostra que a dinâmica costeira atuante no sistema ilha de barreira/laguna, Ponta do Tubarão, altera circunstancialmente a geometria dos corpos sedimentares e dos ecossistemas ali presentes. A seqüência multitemporal das imagens mostra o gradativo deslocamento da Ponta do Tubarão.

Realizando-se medições do deslocamento sofrido pela extremidade da Ponta do Tubarão, através da função “medidas” do SPRING, entre a extremidade da Ponta do Tubarão, na carta náutica e nas imagens, obteve-se os resultados expressos na Tabela 5.17. Nela pode-se tirar as seguintes conclusões: em média, de 1973 a 1990, a estimativa do deslocamento anual foi de cerca de 202 m/ano; de 1984 a 1988 houve um aumento da distância; após o ano de 1988 esta distância diminuiu, e no ano de 1990 aumentou. Considerando-se o erro dos registros das imagens, a diferença, a partir do ano de 1989, parece não ser significativa, ou seja, a diferença está dentro dos 90 metros que é a dimensão de dois “pixels”. Porém, a diminuição da distância entre os anos de 1988 e 1989 pode se dever à adição de alguma barreira móvel, ou banco de areia, junto à extremidade da Ponta do Tubarão. Segundo Bagnoli e Oliveira (1995), está havendo uma incorporação anual de cerca de 345.000 m³ de areia ao sistema da Ponta do Tubarão. Como a formação encontra-se próxima a uma descarga de rio (delta do Rio Açú), local de profundidade rasa, as correntes de maré contribuem para esta incorporação.

TABELA 5.17- DESLOCAMENTO ANUAL DA EXTREMIDADE DA PONTA DO TUBARÃO

| Ano | Distâncias ¹ (m) | Deslocamento (m/ano) |
|------|-----------------------------|----------------------|
| 1984 | 2.395.1 | 217.7 |
| 1988 | 3252.0 | 216.8 |
| 1989 | 3.046.2 | 190.4 |
| 1990 | 3.123.0 | 183.7 |

¹ Em relação à posição da Ponta do Tubarão descrita na carta náutica B 700 da DHN (1974).

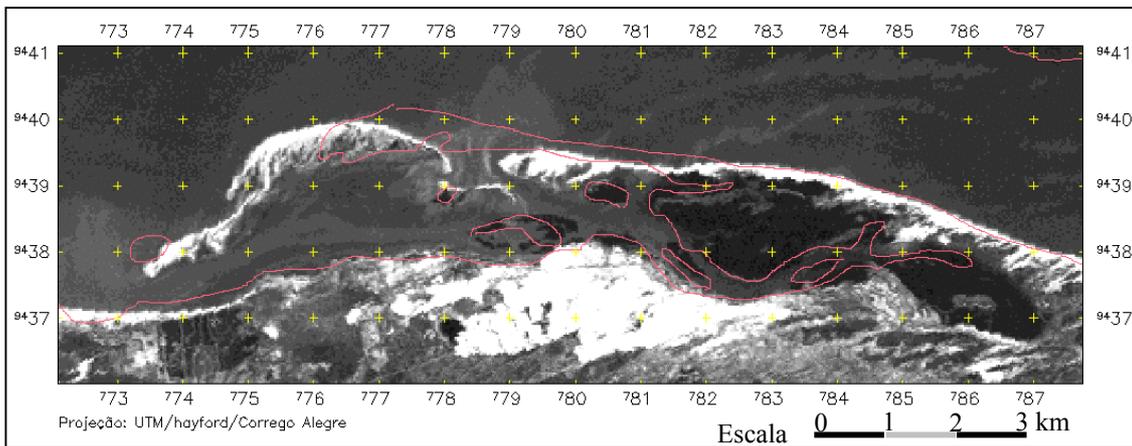


Fig. 5.44 - Imagem de 30/07/1988 da Ponta do Tubarão.

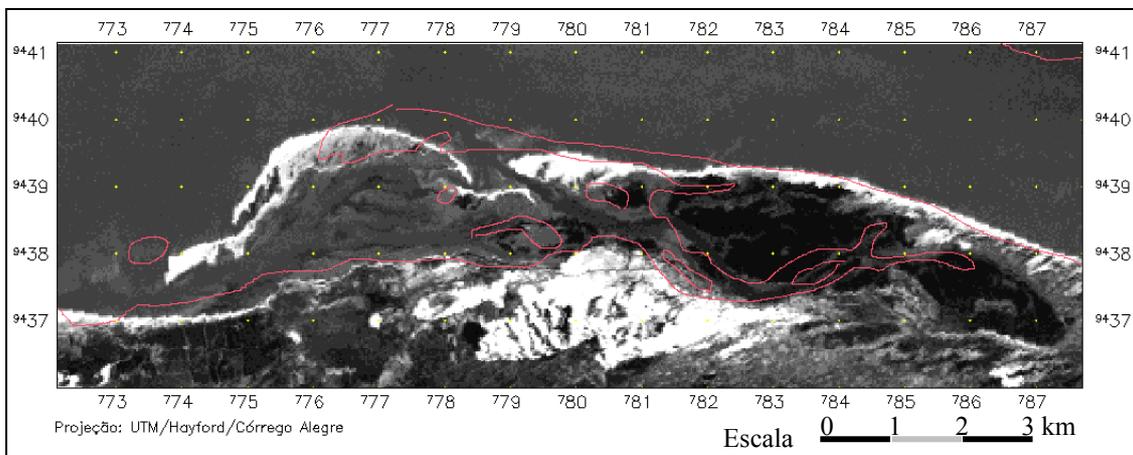


Fig. 5.45 - Imagem de 15/06/1989 da Ponta do Tubarão.

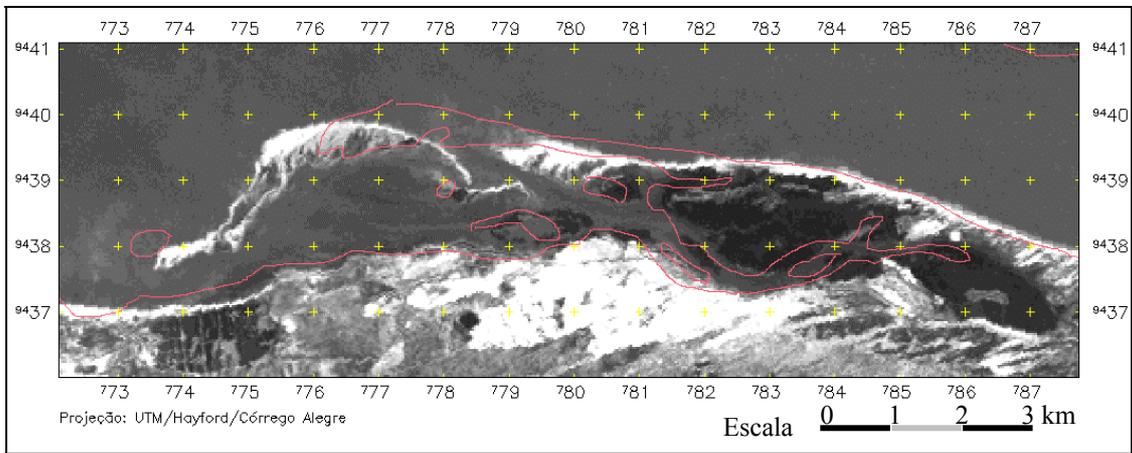


Fig. 5.46 - Imagem de 06/09/1990 da Ponta do Tubarão.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora o mapeamento e a descrição dos corpos arenosos submarinos por imagens LANDSAT-TM (região do visível), mostrem-se vantajosos quanto à repetitividade das observações sinópticas, somente com a interação das imagens e dados coletados em campo é que se pode concluir acerca dos processos de sedimentação e erosão que ocorrem na área de estudo.

Os corpos arenosos documentados na área de estudo apresentam diferenças com relação às feições presentes na região do Cabo Calcanhar, tais como dunas simétricas de maré, urcas e extensas áreas de recifes submarinos, assim como sistemas de ilhas-bareira e esporões, como canais de drenagem de maré, causadas pela corrente de maré e regime de ondas sub-paralelas à costa.

As análises das imagens TM no período entre os anos de 1984 e 1990 não possibilitaram a identificação de qualquer movimentação das dunas assimétricas (região da sondagem batimétrica) e de dunas da região de Guamaré.

As cartas náuticas utilizadas no trabalho encontram-se desatualizadas em alguns setores dentro da Plataforma Interna Continental, em relação à batimetria. A utilização de imagens orbitais pode minimizar e/ou melhorar os problemas que limitam a precisão e a atualização rápida das cartas. Por outro lado, as cartas apresentam um bom ajuste dos delineamentos de algumas feições não moveis, tais como a Risca do Meio e Urcas.

A verificação qualitativa de ocorrência de processos erosivos e de deposição submarina, utilizando-se da metodologia empregada neste trabalho, através de análise multitemporal de imagens, foi evidenciada, mostrando-se eficiente na determinação de áreas onde ocorrem estes fenômenos.

O procedimento de se utilizar dados de sondagem batimétrica, concomitantemente com dados de imagem, permitiu verificar a necessidade de se trabalhar com dados batimétricos muito bem georeferenciados por GPS, quando se pretende correlacioná-los entre si.

A comparação de perfis espaciais de nível de cinza (no aplicativo ENVI) de imagem com perfis batimétricos, obtidos por navio, permitiu verificar que os primeiros têm grande potencial para análise de corpos arenosos submarinos e suas caracterização, tais como a propriedade simétrica ou não de uma duna e suas dimensões.

A utilização do algoritmo da Transformada de Fourier, desenvolvido pelo DPI/ENPE, mostrou-se muito útil na eliminação de ruídos como o "striping", sendo recomendável seu uso para tal processamento.

O esforço realizado neste trabalho de forma a se inferir qualitativamente as características das feições presentes na área de estudo, mostra que é possível, através desta caracterização, delinear áreas de interesse pesqueiro via sensoriamento remoto, uma vez que se possa conhecer as feições submarinas que possibilitam ou não o processo de fixação, adaptação e desenvolvimento do bentos. Onde há o desenvolvimento do bentos, há um local disponível para a pesca.

A utilização de sensores com melhor resolução possibilitará inferir sobre um possível deslocamento das dunas, como as da região de Guamaré, usando imagens multitemporais com um bom registro de campo.

Com relação aos processos de sedimentação, sabe-se que é um assunto complexo, tanto em experimentação de campo quanto em laboratório (Allen, 1968). O sistema natural grão-fluxo muda com o tempo e a distância, tornando as medidas das propriedades envolvidas dificultosa. Portanto, tornam-se necessários maiores, e mais detalhados estudos na interpretação física da origem de estruturas submarinas como os bancos de areia, dunas e os processos de erosão e deposição. Para isso, é necessário o conhecimento da geometria e da geomorfologia das feições, sua textura (grãos), da relação entre suas propriedades (formas, escala, tamanho dos grãos), os parâmetros do fluxo e o mecanismo de transporte e deposição associado a elas. Portanto, em futuros trabalhos, nos quais haverá a necessidade do conhecimento da dinâmica de interação fluxo e sedimentos, será necessário levar em considerações este sistema através de coletas de dados em campo.

Solewicz (1989) estimou a velocidade de corrente sobre um campo de dunas transversais na Plataforma Continental em frente a região de Touros - Cabo Calcanhar, numa área mais ao leste da região de estudo deste trabalho. A velocidade estimada foi de 51 cm/s, o que está bem próximo daquela medida recentemente com um correntógrafo (40 cm/s) fundeado na área de estudo no período de agosto a novembro de 1997. Esta velocidade está de acordo com uma possível presença de campos de dunas ou "sand waves". De modo inverso, pode-se, a partir do conhecimento da existência destas feições, estimar-se a velocidade de corrente em um determinado local. Assim, para a região na qual foi realizada

uma sondagem ecobatimétrica e a presença de dunas assimétricas foi observada, com dimensões correspondentes àquelas citadas por Belderson et al (1982), pode-se inferir que ali se encontra uma corrente de cerca de 50 cm/s. Uma verificação de campo é necessário para consolidar o fato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, J. R. L. **Corrent ripples**: their relation to patterns of water and sediment motion. Amsterdam: North-Holland, 1968. 433 p.
- Ashley, G. M. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at na old problem. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 60, n. 1, p. 160-172, Jan. 1990.
- Bagnoli, E.; Oliveira, W. J. Ponta do Tubarão, um exemplo de incorporação de áreas marinhas ao continente, pela migração lateral de um sistema ilha de barreira/laguna, no litoral norte do Rio Grande do Norte. In: Simpósio sobre Processos Sedimentares e Problemas Ambientais na Zona Costeira Nordeste do Brasil, 1., Recife, 1995. **Anais**. Recife: UFPE, 1995. v.1, p. 129-131.
- Banon, G. J. F. **Análise por componentes principais**: notas de aula dadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São Jose dos Campos, 03 de junho, 1992. 14 p. Datilografado.
- Barreto, H. T.; Summerhayes, C. P. Oceanography and suspended matter of northeastern Brazil. In: Projeto REMARC. **Coletânea de trabalhos (1971-1975)**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES/DINTEP, 1977, 507 p. (Série Projeto REMARC, 1).
- Belderson, R. H.; Johnson, M. A.; Kenyon, N. H. In: Stride, A H. ed. **Offshore tide sands**: processes and deposits. London: Chapman and Hall, 1982. cap. 3, p. 27-57.
- Bierwirth, P. N.; Lee, T. J.; Burne, R. V. Shallow sea-floor reflectance and water depth derived by unmixing multispectral imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 59, n. 3, p. 331-338, Mar. 1993.
- Cabral, A. P. **Extração da batimetria e dos tipos de substrato de um setor da plataforma continental do Rio Grande do Norte utilizando imagens TM Landsat**. São José dos Campos. 106 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.
- Chandrasekhar, S. **Radiative transfer**. New York: Dover, 1960. 393 p.

- Chaves Jr., P. S. An improved darck-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n.3, p. 459-479, Apr. 1988.
- Clark, R. K.; Fay, T. H.; Walker, C. L. Bathymetry calculations with Landsat 4 TM imagery under a generalized ratio assumptom. **Applied Optics**, v. 26, n.19, p. 4036-4038, Oct. 1987.
- Cornaglia, P. On beaches. In: Fisher, J. S.; Dolan, R. ed. **Beach processes and coastal hydrodynamics**. Stroudsburg: Dower, 1977. v. 39, cap. 1, p. 11-26.
- Crosta, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Unicamp, 1993. 170 p.
- Curray, J. R. Modes of emplacement of prospective hydrocarbon reservoid rocks of outer continental marine enviroments. In: Curray et al. ed. **Geology continental margins**. 2.ed. Washington, DC.: AAPG Departmente of Education, 1977. p. E1-E14. (Course note series, 5).
- Dolan, R.; Vincent, L. Coastal processes. **Photogrammetric Enginnering**, v. 39, n. 3, p. 255-260, Mar. 1973.
- França, A. M. C.; Coutinho, P. N.; Summerhayes, C. P. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileiro. In: Projeto REMARC. **Coletânea de trabalhos (1974-1977)**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES/DINTEP, 1979, 392 p. (Série Projeto REMARC, 5).
- Gemael, C. **Geodésia geométrica**: notas de aula dadas na Universidade Federal do Paraná. Curitiba: 1982. Apostila.
- Gordon, H. R.; McCluney, W. R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. **Applied Optics**, v. 14, n. 2, p. 413-416, Feb. 1975.
- Howarth, A H. Tidal currents of the continental shelf. In: Stride, A H. ed. **Offshore tide sands: processes and deposits**. London: Chapman and Hall, 1982. Cap. 2, p. 10-26.

- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) **Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas**: sistema de ajuda on-line do SPRING. [online] <<http://sputnik.dpi.inpe.br/spring/usuario/indice.htm>>. 1997a.
- Lyzenga, D. R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. **Applied Optics**, v. 17, n. 3, p. 379-383, Feb. 1978.
- Lyzenga, D. R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water aircraft and Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2, n. 1, p. 71-82, Jan-Mar. 1981.
- Lyzenga, D. R. Shallow water reflectance modeling with applications to remote sensing of the ocean floor. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 13., Ann Arbor, 1979. **Proceedings**: Ann Arbor: ERIM, 1979. v. 1, p. 580-602.
- Malaret, E. *et al.* Landsat-4 and Landsat-5 thematic mapper data quality analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 9, p. 1407-1416, Sept. 1985.
- Maritorena, S. Remote sensing of the water attenuation in coral reefs: a case study in French Polynesia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 1, p. 155-166, Jan. 1996.
- Maritorena, S.; Morel, A.; Gentili, B. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo. **Limnology and Oceanography**, v. 39, n. 7, p. 1689-1703, Nov. 1994.
- Mascarenhas, N. D. A.; Velasco, F. R. D. **Processamento digital de imagens**. São Paulo: USP / Instituto de Matemática e Estatística, 1984.
- Meireles, D. S. **Aplicação de técnica de sensores remotos na hidrografia, com ênfase à batimetria**. São José dos Campos. (INPE, 1673-TDL/013). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1980.
- Mobley, C. D. **Light and water: radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press, 1994. 592 p.

- OCEANSAT. **Caracterização oceânica, diagnóstico do meio físico e modelagem probabilística de derrame de óleo**: empreendimento Pescada/Arabaiana - Guamaré, RN. São José dos Campos, fev. 1998. (OCEANSAT/PETROBRAS, 182.3.002.97-6).
- Paredes, J. M.; Spero, R. E. Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ratio assumption. **Applied Optics**, v. 22, n. 8, p. 1134-1135, Apr. 1983.
- Philpot, W. D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. **Applied Optics**, v. 28, n. 8, p. 1569-1578, Apr. 1989.
- Polcyn, F. C.; Brown, W. L. ; Sattinger, I. J. **The measurement of water depth remote sensing techniques**. Ann Arbor: Willow Run Laboratories, 1970. 37 p. (WRL, 8973-26-F).
- Polcyn, F. C.; Lyzenga, D. R. **Remote bathymetry and shoal detection with ERTS**. Ann Arbor: ERIM, 1975. 53 p. (ERIM, 193300-51-F).
- Polcyn, F. C.; Rollin, R. A. **Remote sensing techniques for the location and measurement of shallow-water features**. Ann Arbor: Willow run Laboratories, 1969. 72 p. (WRL, 8973-10-P).
- Prewett, O. E.; Lyzenga, D. R.; Polcyn, F. C.; Brown, W. L. **Techniques for measuring light absorption, scattering, and particle concentrations in water**. Ann Arbor: ERIM, 1973. 32 p. (ERIM, 190500-1-F).
- Richards, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 281 p.
- Schwartz, M. Laboratory study of sea-level rise as a cause of shore erosion. In: Fisher, J. S.; Dolan, R. ed. **Beach processes and coastal hydrodynamics**. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., 1977. v. 39, Cap. 1, p. 342-348.
- Singh, A. Postlaunch corrections for thematic mapper 5 (TM-5) radiometry in the thematic mapper image processing system (TIPS). **Photogrammetric Engineering**, v. 51, n. 9, p. 1379-1383, Sept. 1985a.

- Singh, A. Thematic mapper radiometric correction research and development results and performance. **Photogrammetric Engineering**, v. 51, n. 9, p. 1385-1390, Sept. 1985b.
- Slater, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. London: Addison-Wesley Publishing, 1980. 575 p.
- Slater, P. N. **Spectroradiometric calibration of the thematic mapper and multispectral scanner system**. Greenbelt: NASA, 1985. 25 p. (NASA CR-176008).
- Soares, P. C.; Fiori, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografia aérea em Geologia. **Not. Geomorf**, v. 16, n. 32, p. 71-104, 1976.
- Solewicz, R. **Feições fisiográficas submarinas da plataforma continental do Rio Grande do Norte visíveis por imagens de satélite**. São José dos Campos. 126 p. (INPE, 4964-TDL/392). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.
- Souza Filho, C. R.; Dinniss, A. Métodos para supressão de ruídos periódicos em imagens de sensoriamento remoto. **Boletim IG-USP, Série Científica**, v. 28, p. 23-61, 1997.
- Spitzer, D.; Dirks, R. W. Bottom influence on the reflectance of the sea. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 279-290, Mar. 1987.
- Stafford, D. B.; Langfelder, J. Air photo survey of coastal erosion. **Photogrammetric Engineering**, v. 37, n. 6, p. 565-575, June. 1971.
- Stride, A. H. Background and outline. In: Stride, A H. ed. **Offshore tide sands: processes and deposits**. London: Chapman and Hall, 1982. Cap. 1, p. 1-9.
- Summerhayes, C. P.; Coutinho, P. N.; França, A M. C.; Ellis, J. P. Salvador to Fortaleza Northeastern Brazil. In: Projeto REMARC. **Coletânea de trabalhos (1971-1975)**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES/DINTEP, 1977, 507 p. (Série Projeto REMARC, 1).

- Szekiela, Karl-Heinz. **Satellite monitoring of the Earth**. New York: Wiley, 1988. 326 p.
- Tanis, F. J.; Hallada, W. A. Evaluation of Landsat thematic mapper data for shallow water bathymetry. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 8., Paris, 1984. **Proceedings**. Ann Arbor: ERIM, 1984. v. 2, p. 629-643.
- Testa, V. **Quaternary sediments of the shelf, Rio Grande do Norte, NE Brazil**. London: 411 p. Thesis dissertation in Geology – Royal Holloway University of London, 1996.
- Universidade Federal da Paraíba / Departamento da Ciências Atmosféricas / Centro de Ciências e Tecnologia - CAMPOS II. **Dados mensais médios de precipitação do Estado do Rio Grande do Norte..** Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1982-1991. 1disquete 3 ½. Excel.
- Vianna, M. L. **Dados de sondagem batimétrica pontual**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997). Comunicação pessoal.
- Vianna, M. L. **Projeto TOPSUB/89**. São José dos Campos: INPE, 1989. 3 p.
- Vianna, M. L.; Cabral, A. P.; Gherardi, D. F. M. TM-Landsat imagery applied to the study of the impact of global climate change on a tropical coastal environment during the last deglaciation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 16, p 2971-2983, 1993.
- Vianna, M. L.; Solewicz, R. Large scale underwater sand on the northeast brazilian shelf. In: International Symposium on Global Changes in South America During the Quaternary Past - Present – Furure, São Paulo, 1989. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 1989. v. 1, p. 255-259.
- Vianna, M. L.; Solewicz, R.; Cabral, A. P. Early holocene sea-level stillstand in the brazilian northeast mapper by satellite. In: International Symposium on Global Changes in South America During the Quaternary Past - Present – Furure, São Paulo, 1989. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 1989. v. 1, p. 250-251.

Vianna, M. L.; Solewicz, R.; Cabral, A. P.; Testa, V. Sandstream on the Northeast brazilian shelf. **Continental Shelf Research**, v. 11, n. 6, p. 509-524, 1991.

Woods et al. **48-Inch Lidar aerosol measurements taken at the Langley Research Center**. Hampton: NASA, 1994. 68 p. (NASA-RP-1331).

Zenkovich, V. P. **Processes of coastal development**. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1967. 738 p.

APÊNDICE A

ECOGRAMA

As figuras abaixo mostram as feições submarinas presentes entre os intervalos de marcação da sondagem ecobatimétrica. As linhas mais largas denotam intervalos de profundidades de 5 m. Entre elas, as linhas denotam variações de profundidades de 1 m. Os números marcados sobre as feições representam as posições que foram selecionadas para serem observados na imagem TM.

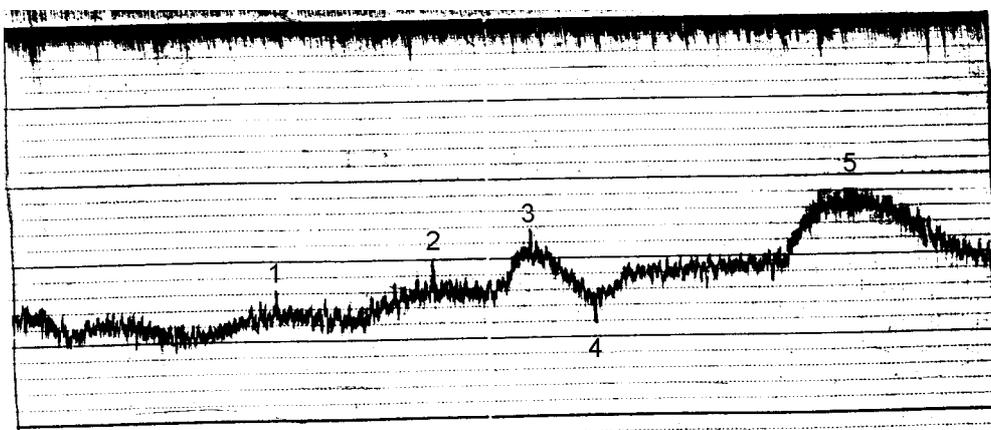


Fig. A.1 - Feições presentes no trajeto entre as posições D1-D2.

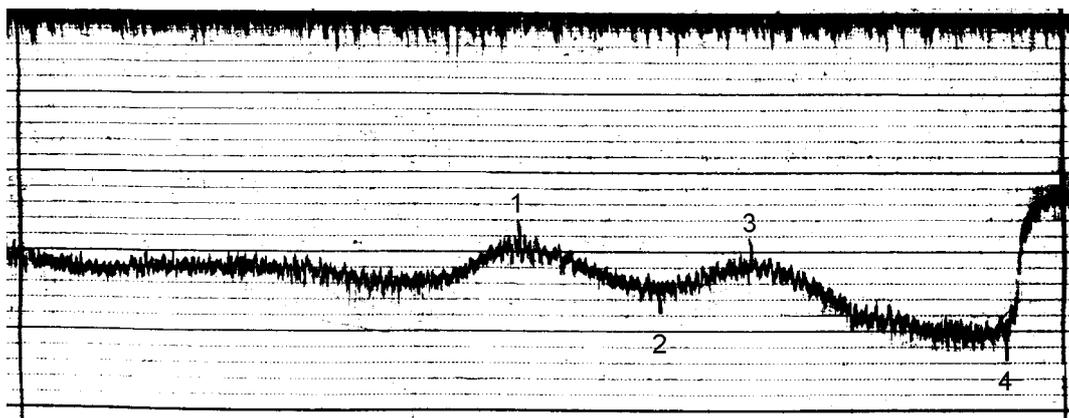


Fig. A.2 - Feições presentes no trajeto entre as posições D2-D3.

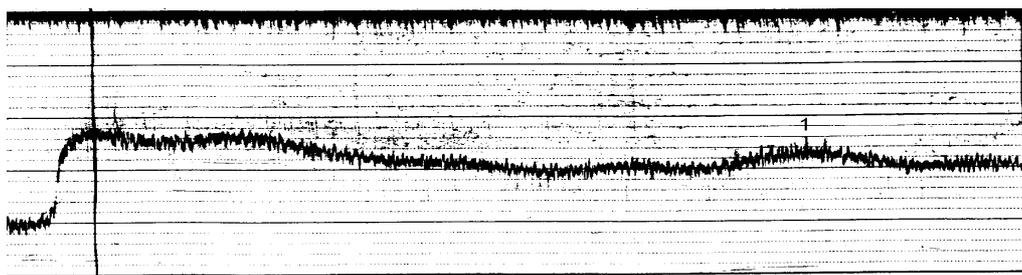


Fig. A.3 - Feições presentes no trajeto entre as posições D3-D4.

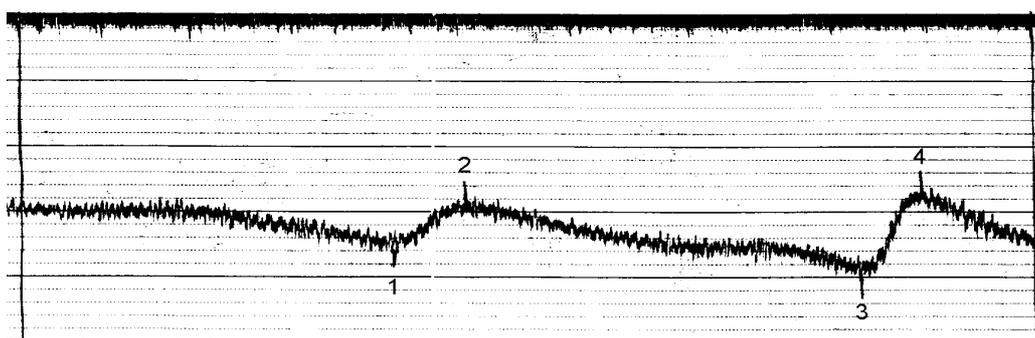


Fig. A.4 - Feições presentes no trajeto entre as posições D4-D5.

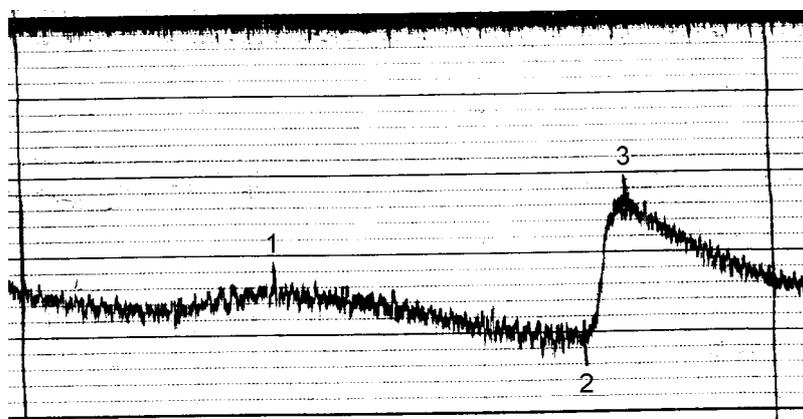


Fig. A.5 - Feições presentes no trajeto entre as posições D5-D6.

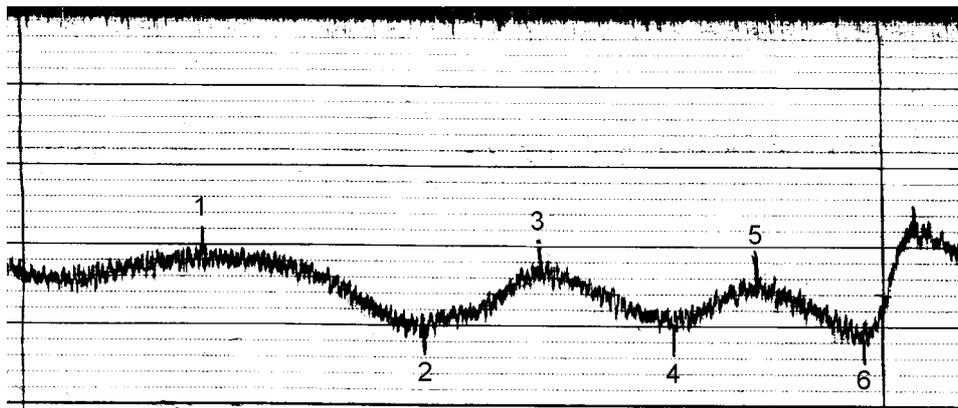


Fig. A.6 - Feições presentes no trajeto entre as posições D6-D7.

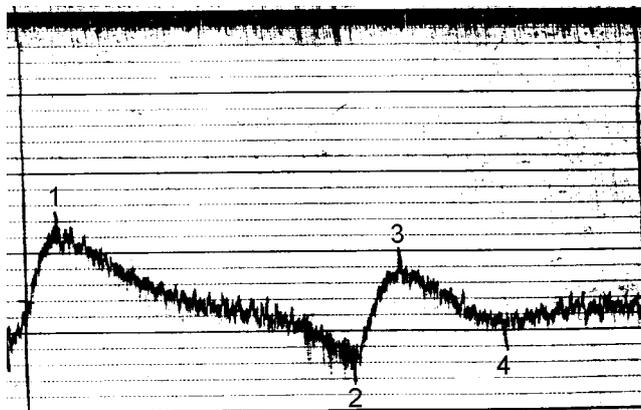


Fig. A.7 - Feições presentes no trajeto entre as posições D7-D8.

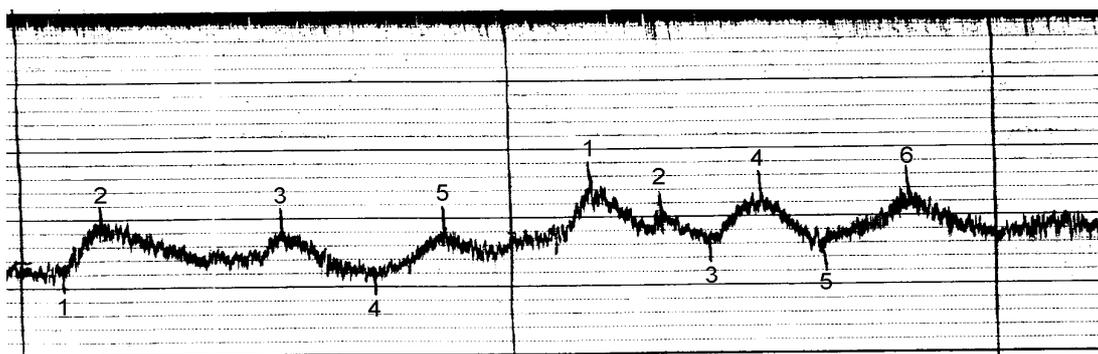


Fig. A.8 - Feições presentes no trajeto entre as posições D8-D9 e D9-D10.

APÊNDICE B

CORREÇÃO DAS PROFUNDIDADES LIDAS NO ECOGRAMA

TABELA B.1 - PROFUNDIDADES A PARTIR DO ECOGRAMA COM
CORREÇÃO E SEM CORREÇÃO

| Posições | Profundidade (m) corrigida | Profundidade (m) sem correção |
|----------|----------------------------|-------------------------------|
| D1 | 19,7 | 18,5 |
| D2 | 16,7 | 15,5 |
| D3 | 12,8 | 11,5 |
| D4 | 15,8 | 15,0 |
| D5 | 18,9 | 17,0 |
| D6 | 18,0 | 17,0 |
| D7 | 20,1 | 19,0 |
| D8 | 20,2 | 19,0 |
| D9 | 18,3 | 17,0 |
| D10 | 18,4 | 16,5 |

TABELA B.2 – ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO PARA CORREÇÃO DAS
PROFUNDIDADES

| Estatística de regressão | |
|--------------------------|------|
| R múltiplo | 0,99 |
| R-quadrado | 0,98 |
| R-quadrado ajustado | 0,97 |
| Erro padrão | 0,38 |
| Observações | 10 |

TABELA B.3 – COEFICIENTES ADQUIRIDOS NA REGRESSÃO

| | Coefficientes | Erro padrão | "Start" t | valor-P | 95% inferior | 95% superior |
|--------------|---------------|-------------|-----------|----------|--------------|--------------|
| Interseção | 1,27 | 0,93 | 1,36 | 0,21121 | -0,88 | 3,42 |
| Variável X 1 | 1,00 | 0,06 | 17,96 | 9,50E-08 | 0,87 | 1,13 |

O fator utilizado para a correção das profundidades foi o coeficiente de interseção de 1,27.