

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR  
MESTRADO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**APLICAÇÃO DO CORRENTÔMETRO  
ACÚSTICO ADCP  
EM AMBIENTES MARINHOS  
E ESTUARINOS  
DO CEARÁ E PARAÍBA - NORDESTE DO BRASIL**

**MANUEL BENSI**

**FORTALEZA - CE  
março de 2006**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR  
MESTRADO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**APLICAÇÃO DO CORRENTÔMETRO  
ACÚSTICO ADCP  
EM AMBIENTES MARINHOS  
E ESTUARINOS  
DO CEARÁ E PARAÍBA - NORDESTE DO BRASIL**

**MANUEL BENSI**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ciências  
Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do  
Mar da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luís Parente Maia

**FORTALEZA- CE  
2006**

Dedico esta dissertação de mestrado  
ao meu pai, minha mãe,  
meus irmãos, meus avós...  
sempre comigo em qualquer  
momento e lugar.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Luis Parente Maia, atual Diretor do Labomar, pela confiança depositada em mim durante o desenvolvimento do trabalho, pela amizade demonstrada e por fim pelas orientações que foram de fundamental importância para a realização desta dissertação.

A FUNCAP, Fundação Cearense de Apoio e Desenvolvimento Científico e tecnológico, pelo apoio financeiro durante os 24 meses de trabalho entre aulas, estudos e pesquisas.

Ao amigo e Mestre Reynaldo, que foi um grande companheiro durante a maioria dos campos no mar, sobre o barco de pesquisa Prof. Martins Filho e a lancha do Labomar. Agradeço também pela paciência e dedicação na revisão da dissertação e pelas sugestões citadas por ele para a melhoria do trabalho.

Ao amigo e Mestre Reginaldo, pela amizade construída durante os vários meses de trabalho juntos e pelos ótimos conselhos e ajuda que sempre me deu mostrando grande disponibilidade a qualquer momento. Obrigado a ele também pelo interesse demonstrado na correção e revisão da dissertação.

Ao meu pai, que logo quando iniciei esta aventura, me deu apoio mesmo em uma situação difícil e sempre me ajuda mesmo não estando mais aqui.

Obrigado a minha mãe, que teve a paciência de suportar juntos a distância, que nunca deixou de me apoiar e dar força a cada dia, aos meus queridos irmãos Luca e Michele e meus avós, obrigado de coração.

A Rogenia, que sempre acreditou em mim, que sempre foi companheira, que sem nenhuma dúvida faz parte da minha vida agora e sempre.

Um obrigado especial também para os amigos Val, Marizete, Leo, Buda, André, Eduardo, Silvânia e também aos “vizinhos” de sala, Miguel, Rodrigo, Nonato, Franzé, que fizeram o dia a dia bem mais prazeroso e divertido, e sempre ajudaram nos trabalhos de alguma forma. A turma do mestrado, companhia agradável das aulas, saídas de campo e estudo. Ao querido LABOMAR.

Ao oceano, este maravilhoso que adoro, e ao vento, que melhora cada momento meu de liberdade.

## Resumo

O conhecimento dos agentes que atuam sobre a dinâmica costeira é de fundamental importância no gerenciamento e no uso adequado da zona litorânea. O ADCP (*Acoustic Doppler Profiler*) é uma ferramenta que, há algum tempo (década de 80), vem sendo utilizada com sucesso para medições de corrente no mar e em estuários. Neste trabalho o ADCP foi aplicado em regiões costeiras (entre Fortaleza e Pecém) e duas regiões estuarinas, no rio Jaguaribe (Estado do Ceará) e no rio Mamanguape (Estado da Paraíba). Para a região metropolitana de Fortaleza as correntes revelaram, para as duas campanhas de medições, um fluxo mais orientado para o litoral no mês de maio de 2005 e um fluxo com direção praticamente paralela à costa para o mês de julho de 2005. No Pecém as medições de corrente permitiram evidenciar o efeito de proteção da estrutura do porto, pois as velocidades a sotavento do mesmo foram entre 0,04 e 0,15 m/s, enquanto fora da proteção do molhe, os valores de velocidade variaram entre 0,17 e 0,41 m/s. A utilização do ADCP em estuário, permitiu evidenciar a presença de estratificação ao longo da coluna d'água para o rio Mamanguape, permitindo comparar o perfil vertical da corrente entre as condições de estuário com cunha salina e bem misturado como o rio Jaguaribe.

**Palavras-chave:** ADCP, Dinâmica costeira, Vazão de rio.

## Abstract

The knowledge of the agents acting on coastal dynamics is very important for the management and the adequate use of the littoral zone. The ADCP is an instrument that was using successfully since some years (decade of '80) for water current measurements in ocean and estuarine areas. In this work, the ADCP was applied in coastal areas (between Fortaleza and Pecém) and two estuarine areas, in the Jaguaribe river (Cearà State) and Mamanguape river (Paraíba State). In the metropolitan region of Fortaleza, the two current surveys made in two different periods, showed a flux directed to the beach in May 2005, and a flux parallel to the littoral in July 2005. In Pecém currents measurements showed the protection effect of the harbour, where current speed was between 0,04 and 0,15 m/s, while offshore it was between 0,17 and 0,41 m/s. The ADCP use in estuarine zone, showed the stratification of Mamanguape river, and allowed a comparison between vertical current profile of salt wedge and well mixture estuaries.

**Key-words:** ADCP, Coastal dynamics, River discharge.

Após a finalização do trabalho da defesa de dissertação de Mestrado de Manuel Bensi, intitulada **APLICAÇÃO DO CORRENTÔMETRO ACÚSTICO ADCP EM AMBIENTES MARINHOS E ESTUARINOS DO CEARÁ E PARAÍBA - NORDESTE DO BRASIL**, a Banca Examinadora, considerando o conteúdo do trabalho e a apresentação realizada, considera a tese aprovada.

Prof. Dr. Luis Parente Maia \_\_\_\_\_  
(Orientador)

Prof. Dr. Erasmo da Silva Pitombeira \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Lima Conceição \_\_\_\_\_

Fortaleza, 17 de março de 2006

LISTA DE SIGLAS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE QUADROS	vii

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	8
1.1	Objetivos .....	11
1.2	Justificativa .....	11
2	Áreas de estudo .....	13
2.1	Estado do Ceará .....	13
2.2	Porto de Mucuripe .....	16
2.3	Porto do Pecém .....	18
2.4	Rio Jaguaribe.....	19
2.5	Rio Mamanguape.....	19
3	Referencial Teórico.....	20
3.1	O clima no nordeste do Brasil.....	20
3.2	Sistema das correntes no Brasil .....	21
3.3	Marés astronômicas .....	23
3.4	Efeitos das ondas e dos ventos na zona litorânea .....	24
3.5	Estimativa da altura das ondas em função do <i>fetch</i> e da intensidade do vento.....	25
3.6	Formação e Dinâmica das ondas .....	26
3.7	Instrumentos para medidas de ondas e correntes.....	27
3.8	Medição direta de correntes no mar.....	28
3.8.1.	Medições eulerianas de correntes.....	28
3.8.2.	Correntômetros mecânicos.....	28
3.8.3.	Correntômetro não-mecânicos.....	29
3.8.4.	Medições lagrangeanas de correntes .....	31
3.9	Evaporação .....	32
3.10	O <i>software</i> MIKE 21 .....	33
4	Metodologia.....	34
4.1	Medições de corrente.....	34
4.2	Processamento dos dados coletados em campo .....	38
4.3	Simulação de Correntes e Ondas: Compilação e Preparação da Base Cartográfica.....	38
4.4	Modelo numérico.....	39
4.5	Sensoriamento remoto .....	41
4.6	Automated Coastal Engineering System - ACES.....	42
5	Dados oceanográficos relativos ao litoral cearense .....	43
5.1	Dados correntométricos relativos ao ano 1999 (VBA CONSULTORES) .....	43
5.2	Dados de vento.....	45
5.3	Dados de ondas .....	48

5.4	Dados de marés .....	51
6	Resultados e discussões .....	52
6.1	Hidrodinâmica Litorânea.....	52
6.2	Clima de onda .....	56
6.3	Trabalho de campo com sonda ADCP .....	60
6.3.1.	Software utilizado na medição.....	60
6.3.2.	Primeira campanha de medição das correntes .....	60
6.3.3.	Perfil de corrente no canal de acesso ao Porto do Mucuripe .....	63
6.3.4.	Perfis de corrente nas proximidades do SDOES .....	66
6.3.5.	Campanha de medição de correntes em julho 2005 .....	71
6.3.6.	Interação ondas-correntes com o fundo .....	77
6.3.7.	Campanha de medições das correntes no Porto do Pecém .....	80
6.3.8.	Campanha de medição das correntes em Cumbuco e Iparana.....	88
6.3.9.	Análise das correntes marinhas .....	91
6.3.10.	Estudo sobre a vazão e as correntes no rio Jaguaribe .....	94
6.3.11.	Efeito da evaporação .....	102
6.3.12.	Análise das curvas de maré e de vazão .....	104
6.3.13.	Estudo sobre a vazão e as correntes no rio Mamanguape.....	109
6.3.14.	Análise das correntes fluviais /estuarinas .....	115
7	Conclusões.....	117
8	Recomendações.....	119
9	Referencias Bibliográficas.....	121
10	Anexos .....	127

## LISTA DE SIGLAS

ACES - *Automated Coastal Engineering System*

ADCP - *Acoustic Doppler Current Profiler*

APA - Área de Proteção Ambiental.

CERC - *Coastal Engineering Research Center*

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

DHI - *Danish Hydraulic Institute*

DNMET - Departamento Nacional de Meteorologia-Ministério da Agricultura e Reforma Agrária

DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral

FUNCAP - Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico

FUNCEME-Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

FCTH - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - São Paulo.

GPS-*Global Positioning System*

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPH - Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária

LABOMAR - Instituto de Ciências do Mar, UFC

NBC - Corrente Norte do Brasil

NECC - *North Equatorial Countercurrent.*

NEB - Região Nordeste do Brasil

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NSW – *Near Shore Waves*

PMS - *Parabolic Mild Slope*

SEMACE - Superintendência Estadual do Meio Ambiente

SEC – *South equatorial current*

SDOES - Sistema de Depuração dos Esgotos Sanitários de Fortaleza

SUDEMA - Superintendência de Administração do Meio Ambiente

UFC - Universidade Federal do Ceará

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1-Localização da área de estudo.....	15
Figura 2 - Vista aérea do terminal portuário do Pecém. ....	18
Figura 3 - Circulação geral ao longo do litoral brasileiro.....	22
Figura 4-Efeito da refração do fundo e transporte litorâneo devido às ondas.....	27
Figura 5- Modulação versus tempo de plotagem para muitas partículas. (Fonte: Thiago Filho <i>et al.</i> 1999).....	30
Figura 6- Modulação versus tempo e plotagem.....	30
Figura 7-Esquema de funcionamento do ADCP ( $BD=blanking\ distance$ ; $CS=cell\ size$ ; $NC=number\ of\ cells$ ). ....	35
Figuras 8- 9- Barco de pesquisa Prof. Martins Filho. À direita a instalação do ADCP (sontek/YSI) no barco.....	36
Figuras 10- 11- Cilindro amarelo do ADCP contendo bateria e processador. A figura à direita mostra o ADCP instalado sobre um barco pequeno. ....	36
Figuras 12- 13 -Posicionamento da bateria do ADCP a bordo e à direita o <i>Laptop</i> para visualização dos dados.....	36
Figura 14-Exemplo de perfil de corrente dentro de um rio. O ADCP na medição de perfis transversais permite calcular a vazão de um rio.....	37
Figura 15-Batimetria do Ceará elaborada com o <i>MIKE 21</i> . ....	39
Figura 16-Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2000 (setembro/dezembro). ....	46
Figura 17 - Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2001.....	46
Figura 18 - Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2002.....	46
Figura 19 - Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2003 (janeiro e fevereiro). ....	47
Figura 20— Localização do ondógrafo e anemógrafo do Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária (INPH). ....	48
Figura 21-Gráfico das direções mais freqüentes de ondas nos anos 1997-2000.....	49
Figura 22 - Altura e direção das ondas medidas pelo ondógrafo do porto do Pecém em janeiro, fevereiro e março de 2005. ....	50
Figura 23- Localização do marógrafo do Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária (INPH).....	51
Figura 24 - Hidrodinâmica costeira do litoral extremo oeste. ....	53
Figura 25-Hidrodinâmica costeira do litoral oeste. ....	54
Figura 26-Hidrodinâmica costeira do litoral de Caucaia na imagem <i>LANDSAT 7 ETM+</i> . ....	54
Figura 27-Hidrodinâmica costeira do litoral leste.....	55
Figura 32-Mapa dos perfis de corrente, sobre imagem <i>Landsat ETM 7+</i> , da região metropolitana de Fortaleza, maio de 2005.....	62
Figura 33 – <i>Layout</i> do <i>Software currentsurveyor</i> , mostrando o perfil 18-19, correspondente à entrada do porto do Mucuripe. ....	63
Figura 34 – Velocidade da corrente (cm/s) no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe.....	64
Figura 35 - Direção da corrente (graus) no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe. ....	64
Figura 36 - Velocidade e direção da corrente ao longo do perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe. A linha vermelha é uma linha de tendência dos valores de direção. ....	65
Figura 37 - Direção (graus) da corrente no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe. ....	65

Figura 38 - Velocidade da corrente (cm/s) no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe.....	66
Figura 39 - Valores médios ao longo da coluna de água de velocidade e direção da corrente no perfil 14-13. A linha vermelha é a linha de tendência da direção ao longo do perfil.....	66
Figura 40 (a,b)- Valores médios da direção e velocidade da corrente ao longo do perfil 14-13 em função da profundidade. ....	67
Figura 41 - Valores médios ao longo da coluna de água de velocidade e direção da corrente no perfil 15-16. A linha vermelha representa a linha de tendência da direção ao longo do perfil. ....	67
Figura 42 (a,b)-Valores médios da direção e velocidade da corrente ao longo do perfil 15-16 em função da profundidade. ....	68
Figura 43 - Valores médios ao longo da coluna de água de velocidade e direção da corrente no perfil 15-17. A linha vermelha é a linha de tendência da direção ao longo do perfil.....	68
Figura 44 (a,b)-Valores médios da direção e velocidade da corrente ao longo do perfil 15-17 em função da profundidade. ....	68
Figura 45 – Perfil de corrente e batimetria entre os pontos 15 e 17 extraído do <i>software Currentsurveyor</i> . ....	69
Figura 46 – Rosa das correntes dos dados da tabela 2. ....	70
Figura 47 - Variação da velocidade da corrente (em cm/s) em função da profundidade (metros) ao longo dos 4 perfis estudados na segunda campanha de medições da corrente em proximidade do SDOES.....	72
Figura 48 - Variação da direção (em graus) da corrente em função da profundidade ao longo dos 4 perfis estudados na segunda campanha de medições da corrente em proximidade do SDOES.....	73
Figura 49 - Variação da velocidade (m/s) e direção da corrente (graus) em função da profundidade.registrados para o perfil 1 em proximidade do porto do Mucuripe. ....	74
Figura 50- Mapa, sobre imagem LANDSAT ETM 7+, dos perfis de corrente registrados na região metropolitana de Fortaleza.no dia 7 de julho de 2005 com a sonda ADCP. ....	75
Figura 51 - Rosa das correntes dos dados da tabela 3.....	76
Figura 52 – Mapa das correntes para a área do SDOES com os dados medidos em julho de 2005, plotados em forma de vetores e as estações de coleta de água, sedimento, monitoradas pelo projeto SDOES (LABOMAR/UFC). ....	77
Figura 53 – Mapa sobre imagem Landsat 7 ETM+ da região metropolitana de Fortaleza ressaltando a deriva litorânea de sedimento. ....	78
Figura 54 – Mapa sobre fotografia aérea do porto do Pecém com os perfis registrados com a sonda ADCP. ....	80
Figura 55 – Seção do Perfil 1 registrada na área do Porto do Pecém, ilustrando velocidade (cm/s) e direção (graus) da corrente. ....	81
Figura 56 - Seção do Perfil 10 registrada na área do Porto do Pecém, ilustrando velocidade (cm/s) e direção (graus) da corrente. ....	81
Figura 57 - Seção do Perfil 5 registrada na área do Porto do Pecém, ilustrando velocidade (cm/s) e direção (graus) da corrente. ....	82
Figura 58 – Variação da direção (graus) e velocidade (m/s) das correntes (valores médios ao longo da coluna de água em cada ponto) para todos os perfis traçados na área do porto do Pecém.....	86

Figura 59 – Mapa sobre Fotografia aérea do Porto do Pecém, com os vetores das correntes medidas com o ADCP no dia 16 de fevereiro de 2006.....	87
Figura 60 – Campo de ondas simulado para condições médias de marés baixas. Condições ao largo: $H_{m0} = 1,7$ m, $T_p=7$ s, $MWD = 70-90^\circ$ N).....	88
Figura 61 – Direção (graus) e velocidade (m/s) da corrente no perfil registrado em frente à praia do Cumbuco, no dia 16 de fevereiro de 2006.....	89
Figura 62 – Direção (graus) e velocidade (m/s) da corrente no perfil registrado em frente à praia de Iparana, no dia 16 de fevereiro de 2006. ....	89
Figura 63 – Seção dos perfis registrados na praia de Iparana e Cumbuco, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.....	90
Figura 64 – Perfil vertical da corrente medido em proximidade do SDOES, e a direita, o perfil vertical da velocidade levando em conta somente o efeito do atrito entre as camadas e de fundo. ....	92
Figura 65 – Seção do Perfil 21-20 (SDOES-julho 2005) mostrando a velocidade da corrente (cm/s). ....	93
Figura 66-Mapa do rio Jaguaribe com os 4 perfis monitorados em outubro de 2005. ....	95
Figura 67 – Seção do perfil registrado no rio Mamanguape (Paraíba) durante a fase de maré vazante, que mostra a inversão da direção do fluxo devido a estratificação da coluna d'água (o fluxo de fundo é a água do mar) .....	96
Figura 68 - Mapa batimétrico do rio Jaguaribe (Fonte Semace\Labomar, 2005). ....	99
Figura 69 – Gráficos de chuva mensal ao longo do ano 2004 e 2005 para a estação de Aracati. Fonte dos dados: Funceme ( <a href="http://www.funceme.br">www.funceme.br</a> ).....	101
Figura 70 – Imagens do satélite CBERS referentes ao ano 2004 obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).....	102
Figura 71 - Dados de evaporação real no município de Aracati para o ano de 2004 e 2005 (fonte: PROCLIMA, 2006, <a href="http://www.cptec.inpe.br/proclima/maps.shtml">www.cptec.inpe.br/proclima/maps.shtml</a> ).....	103
Figura 72 - Climatologia anual da Evaporação (mm), para o litoral do Estado do Ceará. Período: 1961 a 1990. segundo INMET, 1992 . Fonte: SEMACE/LABOMAR, 2005.....	104
Figura 73 – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no perfil 2 no rio Jaguaribe.....	105
Figura 74 – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no perfil 1 no rio Jaguaribe.....	105
Figura 75 – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no perfil 3 no rio Jaguaribe.....	106
Figura 76 – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no perfil 4 no rio Jaguaribe.....	106
Figura 77 – Seção do Perfil 2 (hora 11:24, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.....	107
Figura 78 – Seção do Perfil 1 (hora 11:08, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.....	107
Figura 79 - Seção do Perfil 3 (hora 10:42, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.....	107
Figura 80 – Seção do Perfil 4 (hora 11:07, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.....	108
Figura 81 - Perfis de corrente e vazão percorridos no estuário do rio Mamanguape, setembro de 2005.....	111
Figura 82 – Mapa batimétrico do estuário do rio Mamanguape, outubro de 2005. ....	112
Figura 83 – Seção dos perfis no rio Mamanguape, mostrando a direção (graus) do fluxo medido, durante a maré vazante (perfil 2 e 3), o ponto de estofa (5) e a fase de enchente (5C). ....	114

Figura 84 - Perfil vertical da velocidade da corrente no rio Mamanguape (estuário com cunha salina) - perfil 2, e perfil vertical de corrente no rio Jaguaribe, estuário bem misturado (perfil 10:42 -zona 3).....116

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Eventos de ondas selecionados para a modelagem 2D. ....56  
Tabela 2 - Valores médios de velocidade e direção da corrente ao longo dos perfis registrados na região metropolitana de Fortaleza, maio de 2005. ....70  
Tabela 3 - Valores médios de intensidade e direção da corrente ao longo dos perfis registrados no dia 7 de julho de 2005 na região metropolitana de Fortaleza.....76  
Tabela 4 - Valores de vazão medidos com ADCP no rio Jaguaribe. A maré corrigida representa os valores da maré no ponto de medição levando em consideração o atraso de maré do estuário.....97  
Tabela 5 - Tábua de maré do porto do Mucuripe (25-26 de outubro de 2005) .....98  
Tabela 6 - Resultados das medições com o ADCP no rio Mamanguape (Paraíba), no dia 19 de setembro de 2005. ....109

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipologia de sensores disponíveis para o ADCP, evidenciando aquela do aparelho utilizado neste estudo. ....35  
Quadro 2 - Pontos de medição de corrente no estudo da VBA (coordenadas UTM). ....44  
Quadro 3 - Classificação dos ventos segundo a escala de *Beaufort*.....47

## 1 INTRODUÇÃO

A zona litorânea é uma faixa de transição entre o ambiente terrestre e marinho, e representa normalmente um ambiente muito rico em recursos naturais e, por isso, extremamente urbanizado. A gestão e o uso adequado desta área implicam necessariamente no conhecimento dos agentes que atuam sobre ela e que determinam os processos costeiros, que em última análise controlam a sua evolução ao longo do tempo. Este requerimento básico permite prever a dinâmica costeira, tanto em condições naturais quanto sob a influência humana.

As praias representam formas de acumulação litoral em equilíbrio, enquanto que o processo de erosão representa uma modificação deste equilíbrio, que de positivo passa a ser negativo. É esta inversão de tendência que sofrem as praias, em escala planetária, que é preciso compreender.

O primeiro fato que chamou a atenção dos pesquisadores foi o grande contraste existente entre a grande acumulação de areia nas praias e a pequena quantidade de areia transportada atualmente pelos rios, que são os principais fornecedores de sedimento (areia) para as praias. Os rios no Ceará, praticamente só transportam lama (silte + argila), que fica retida nos estuários, constituindo os substratos dos manguezais tão comuns no estado e em todo o Norte-Nordeste do Brasil.

Dominguez (1993, *apud* Brandão, 1998) advoga que a erosão da costa é, mais adequadamente, caracterizada como recuo da linha de costa. Isto se deve o fato de que as praias não estão, na realidade, sendo erodidas, mas simplesmente mudando sua posição no espaço e este fato não causa danos ao ambiente praial, que se ajusta continuamente á evolução do traçado litorâneo. Segundo o autor, a “crise” da erosão costeira é, em certo sentido, criada pelo homem, pois se ninguém ocupasse as áreas próximas à costa, não haveria problema algum.

Esse fato leva à conclusão de que a grande quantidade de areia acumulada nas praias constitui uma herança de quando as condições geológicas e climáticas eram mais favoráveis.

O nível do mar, ao se estabilizar, por volta de 7.000 anos A.P. (Antes do Presente), apresentou ligeiras oscilações em relação a sua posição atual, possibilitando a acumulação de grande quantidade de material no ambiente de praia, com formação de amplas praias e vastos

campos de dunas. Esse período de acumulação abundante dura até que o equilíbrio litoral seja atingido, às expensas da reserva submarina de sedimento.

Começa em seguida o período de déficit de material uma vez que os aportes limitaram-se apenas aos materiais resultantes do produto da erosão marinha e continental. Esta situação é caracterizada pela deficiência de sedimento para alimentar as praias.

Os estudos maregráficos, em escala global, têm mostrado através de modelagem numérica (*WETLANDS model*) que o nível relativo do mar, apresentaria uma tendência de elevação da ordem de 15 cm (mínimo) nos próximos cem anos (Doyle *et al.*, 2003). Foi constatado que uma elevação do nível do mar pode interferir no estado de equilíbrio das praias, através da perda de sedimento e recuo das mesmas.

Tem que se lembrar que o processo de erosão inicia na faixa de ante-praia (parte submersa) e quando chega a ser visível no pós-praia, significa que o processo já está em uma fase avançada, ou seja, em condições notáveis de degradação.

Um lento crescimento da frequência e da força das ondas tem sido invocado por alguns autores como agentes que favorecem a erosão das praias. Embora relativamente lenta quando comparada com a escala humana, esta transgressão provoca dois efeitos, que se conjugam para estimular uma tendência erosiva costeira: a migração de cordões litorâneos, lagunas e praias, em direção ao continente, e a deposição dos sedimentos fluviais nos estuários e nas lagunas formadas pelo afogamento de vales fluviais baixos. Esta última ação agrava o efeito de erosão, pois compromete o aporte de sedimentos transportados pelo rio para a costa, desequilibrando negativamente o balanço sedimentar das praias.

Uma nítida diminuição da quantidade de sedimento (areia) sobre a costa, uma lenta elevação do nível do mar e um possível aumento do poder destruidor das ondas são, isoladamente, sem dúvida, insuficientes para explicar a erosão generalizada que sofrem atualmente as praias. Mas, agindo conjuntamente, elas podem criar condições desfavoráveis que ameacem a estabilidade, permitindo um recuo das praias, muitas vezes acelerado pelos efeitos das intervenções humanas.

Os parâmetros modeladores da morfologia recente da costa do Estado do Ceará foram responsáveis pelo sistema de praias vulneráveis à erosão. O fornecimento de sedimento pelos rios não é muito expressivo, pelo menos a partir do Holoceno, e esta pequena quantidade de material transportada ficou retida nos estuários formando os substratos dos manguezais. Outro fator que

contribui para acentuar a erosão costeira é a presença marcante de grandes campos de dunas formados a partir da retirada de sedimentos das praias pela ação dos ventos.

As zonas costeiras representam cerca de 1,6% da superfície das terras emersas, abrigando aproximadamente 40% da população mundial, constituindo-se nas áreas mais afetadas pela ação do homem. Estas zonas apresentam uma grande fragilidade e vulnerabilidade às intervenções antrópicas, decorrentes da complexidade de ambientes resultantes da interação terra/mar (fonte: <http://www.cprh.pe.gov.br>).

A erosão marinha, nas zonas costeiras, é um problema que está intimamente associado à ocupação desordenada e à falta de um planejamento urbano. Outros fatores de ordem ambiental atuam fortemente para agravar este problema, dentre os quais, aterros indiscriminados dos mangues e "obras de engenharia". Estas últimas, quando executadas sem critérios globais, podem agravar ou provocar erosão nas áreas adjacentes (Maia e Morais, 1995; Maia, 1998).

Os trabalhos realizados nos rios geralmente reduzem consideravelmente seu papel de principal fornecedor de sedimento à costa. Neste sentido, as barragens representam armadilhas eficazes na retenção de sedimentos.

A exploração indiscriminada de areia das dunas, pós-praia e antepraia, para construção civil e aterros, é outro fator que agrava seriamente o déficit de sedimentos nas praias e acelera seu processo de "emagrecimento". Grande concentração de construções, tais como: obras portuárias, edifícios, passeios, estradas, diques, entre outros, no domínio do litoral, sobre as dunas e a pós-praia, além de agredir a paisagem, contribuem para aumentar o déficit de sedimentos e, conseqüentemente, a erosão das praias.

As praias ficam amputadas de setores responsáveis pelo seu equilíbrio. Já foi dito que as dunas frontais e a pós-praia constituem importantes reservas de areia e funcionam como anteparo contra a arrebentação das ondas mais fortes (ressacas).

Por outro lado, reduzindo-se a largura do estirâncio, diminui-se o poder dissipador das ondas, o que vai acarretar maior erosão. Deste modo, torna-se necessário proteger do ataque do mar as construções imprudentemente implantadas muito próximas da linha de praia. Isso tudo vai criar um círculo vicioso que leva á uma degradação geral da faixa costeira com conseqüências negativas para o ambiente, o homem e a qualidade de vida.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste projeto é fornecer informações para o estudo das zonas litorâneas, a partir da análise dos processos hidrodinâmicos da costa cearense devido principalmente as ondas e as correntes induzidas pelos ventos.

Neste contexto, e querendo contribuir com soluções, ferramentas ou aportando novos conhecimentos sobre o sistema litorâneo para que possam ser utilizados na gestão e planejamento costeiro, é que foi elaborado este projeto cujos objetivos específicos são:

- Analisar de forma detalhada os principais agentes dinâmicos (vento, ondas, marés e corrente);
- Obter, a partir dos mapas batimétricos, outros produtos com vista à análise, por simulação, do clima de ondas e de correntes na zona costeira;
- Avaliar e quantificar os principais processos costeiros que atuam na região.
- Fazer medições de corrente através o uso de um correntômetro ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) e verificar a aplicabilidade deste tipo de instrumento em ambientes costeiros e estuarinos.
- Integrar os resultados e definir o funcionamento do sistema costeiro analisado.

## 1.2 Justificativa

Os processos costeiros são o resultado das interações dos agentes dinâmicos ou fatores impulsores (vento, ondas, correntes, marés e outros fenômenos) com a zona litorânea; por este motivo, o conhecimento dos agentes, desde o ponto de vista de sua descrição e magnitude de variação a curto e médio prazos, é fundamental para a avaliação dos processos e funcionamento do sistema litorâneo.

O funcionamento do sistema ou balanço sedimentário de uma unidade fisiográficas se define pela quantificação das taxas de transporte, erosão e deposição presente em cada célula. A partir desta avaliação são determinados as fontes e sumidouros de material e, em consequência, os processos sedimentares mais relevantes para a evolução desta zona. O balanço sedimentar é composto por três elementos principais:

- a) Fontes, qualquer processo que fornece material à célula costeira.
- b) Sumidouros, são os processos que extraem materiais.
- c) Processos convectivos ou de transporte, que redistribuem o material na célula.

As principais fontes naturais de material para a zona costeira são os rios, erosão das praias e falésias, aporte de material eólico, transporte transversal na direção da praia e a produção de carbonatos; as fontes artificiais são principalmente as regenerações de praias. Os sumidouros naturais estão formados pela deflação eólica, transporte transversal para o mar, “*inlets*”, “*overwash*” e “*canyons submarinos*”; e os artificiais, a exploração do material da praia. O principal processo convectivo é o transporte longitudinal de sedimentos, aparecendo em segundo plano as correntes de maré, transporte eólico na direção da deriva litorânea e as correntes induzidas pelas ondas em águas profundas.

Ou seja, o transporte litorâneo induzido pelas ondas participa nos três elementos principais do balanço sedimentar, sendo, no caso do Estado do Ceará, o principal responsável pelo equilíbrio das células costeiras.

Observa-se um grande número de trabalhos que ressaltam a influência da batimetria no clima de ondas da zona costeira (Calliari *et al.*, 1996; Bittencourt *et al.*, 2003), na característica dos sedimentos de praia (Maia *et al.*, 1998b; Souza *et al.*, 1999) ou como principal agente responsável pela erosão costeira (Maia, 1998a).

Por outro lado, os levantamentos batimétricos, que tem sido realizados desde a década de setenta por navios da Marinha do Brasil, sob encargo da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), forneceram dados fundamentais para o avanço do conhecimento geológico da plataforma continental em seu trecho cearense.

A implementação destas informações com dados de correntes detalhados de áreas sensíveis à erosão, e também afetadas por mudanças, induzidas pela antropização das últimas décadas, irá permitir criar uma base de dados considerável no gerenciamento da faixa costeira.

O ADCP é uma ferramenta que, há algum tempo (década de 80), vem sendo utilizada com sucesso no mar e em estuários. Em grandes rios as experiências ainda são poucas. Este equipamento vem sendo utilizado no Brasil de modo contínuo em algumas localidades. O marco inicial do uso do ADCP se deu na Bacia Amazônica, em 1994, através da equipe Franco-Brasileira do projeto HiBAm (Hidrologia e geoquímica da Bacia Amazonica), na época composta

por técnicos do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE – e o Instituto Francês para a Pesquisa e o Desenvolvimento em Cooperação – ORSTOM (Filizola *et al.*, 1998).

A aplicação deste tipo de instrumentação no Ceará é um avanço na pesquisa oceanográfica para a região, e irá permitir recolher muitas informações novas sobre a zona costeira.

Assim, este trabalho irá contribuir com as informações básicas necessárias para a compreensão da dinâmica do sistema litorâneo e suas interações com o sistema climático regional e influências no sistema local, com ênfase para os parâmetros climáticos e dinâmicos que influem com maior intensidade nos processos costeiros.

## **2 ÁREAS DE ESTUDO**

A análise do clima de onda e das correntes simuladas através de modelo numérico foi realizada na plataforma continental de todo o litoral do estado do Ceará. As medições de corrente foram feitas na área dos portos do Mucuripe e do Pecém, em frente às praias do Icarai e Cumbuco (litoral oeste do Ceará) e nos estuários do rio Jaguaribe (Ceará) e do rio Mamanguape (Paraíba). Estas áreas foram escolhidas, para a aplicação do ADCP, para acompanhar projetos de pesquisa ou monitoramento desenvolvidos pelo Instituto de Ciências Marinhas Tropicais – LABOMAR. As medições no rio Mamanguape foram requeridas pela SUDEMA - Superintendência de Administração do Meio Ambiente; as medições na região metropolitana de Fortaleza acompanharam o projeto de Monitoramento do SDOES e as medições no porto do Pecém acompanharam o Programa de Monitoramento do Sistema de Descarga de Efluentes da usina Termoelétrica.

### **2.1 Estado do Ceará**

O Estado do Ceará, localizado na região nordeste entre as latitudes 02° S e 07° S e a longitudes 037° W e 041°W é caracterizado por uma faixa de litoral de cerca 573km, caracterizada por uma morfologia bem diferenciada entre a parte Leste e a parte Oeste, onde o divisor geográfico é localizado na cidade de Fortaleza, a Capital do Estado; o litoral oeste

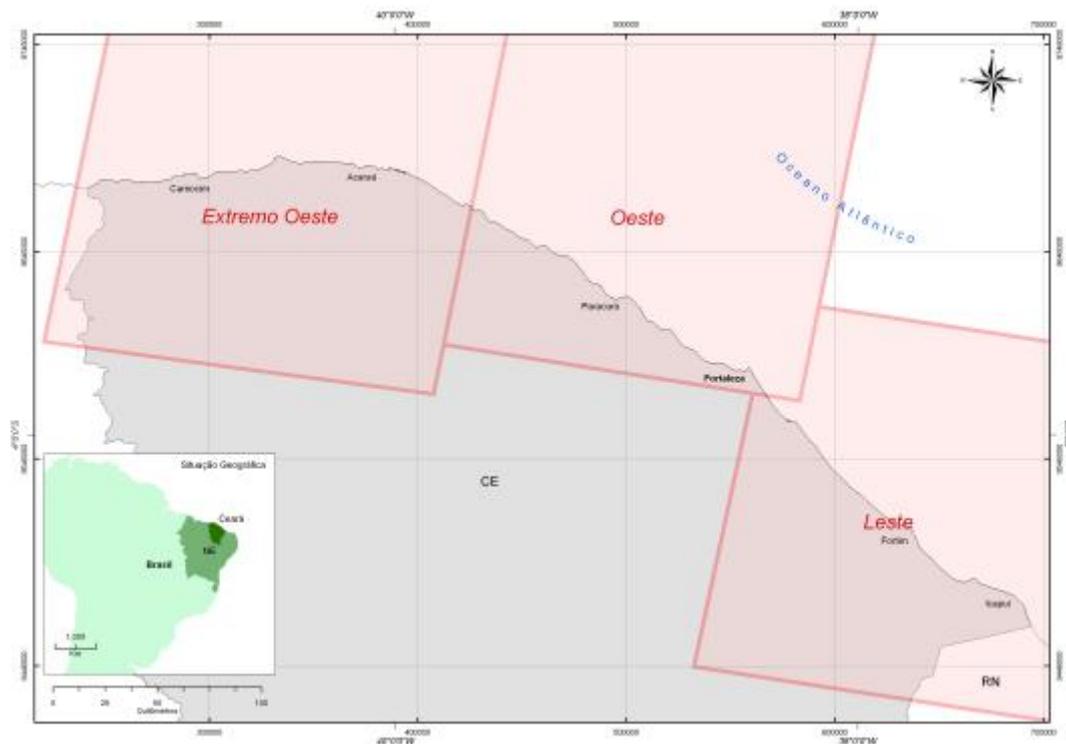
apresenta uma planície rasa e caracterizada pela presença de dunas e vastas áreas de mangues, enquanto a parte leste apresenta uma costa mais rochosa caracterizada por um extenso tabuleiro costeiro que chega até a linha de costa com falésias e paleofalésias.

Estudos das feições morfológicas realizados ao longo do litoral demonstram que a linha de costa encontra-se, de maneira geral, em recuo, causado por mecanismos naturais e agravado pela ação degradativa do homem (Maia & Morais, 1995). A linha de costa apresenta uma direção SE-NW, e é submetida à ação contínua dos ventos alísios oriundos de sudeste. Esta ação unidirecional orienta as ondas, que passam a atingir a costa com um ângulo característico, gerando um mecanismo de deriva litorânea, responsável pelo transporte das areias do litoral de leste para oeste. Este fenômeno é uma constante ao longo do ano.

Para a análise o litoral foi dividido, em três áreas de grande dimensão, respeitando as quadriculas das cenas do satélite *Landsat 7 ETM+* (figura 1), para poder confrontar as mesmas imagens com as simulações de onda e corrente aplicadas sobre a batimetria. O *software* para processamento digital das imagens foi o ENVI (*The Environment for Visualizing Images*) ver 3.5 para as composições *RGB (red-green-blue)* das bandas espectrais 3 2 1. Esta composição permite a visualização das dinâmicas do sedimento de fundo e das hidrodinâmicas ao longo do litoral.

Os três setores principais são:

- | Leste (entre Icapuí e Fortaleza);
- | Oeste (entre Fortaleza e Itarema);
- | Extremo oeste (entre Itarema e a fronteira com o Estado do Piauí);



**Figura 1**-Localização da área de estudo.

O Estado do Ceará é caracterizado por um clima de ondas diferente no Verão e no Inverno. Ao longo do ano ocorrem dois climas de ondas principais, ou seja, um formado pelas ondas geradas no Atlântico Norte (*swell*), com direção entre  $15^\circ$  a  $70^\circ$ , e, o outro, formado por ondas geradas próximas à costa (*sea*), com direção entre  $70^\circ$  e  $120^\circ$ . Entre dezembro e abril a incidência do clima de ondas gerada no Atlântico Norte (*swell*) é mais intensa, decaindo sua intensidade nos meses seguintes.

Em toda a região de estudo as planícies costeiras são delimitadas interiormente por tabuleiros acompanhando a linha de costa, que recobrem até 50 km continente adentro (DNPM 1974), com 20 a 40m de altitude, localmente formando as falésias como entre Ponta Grossa e Morro Branco (Litoral Leste). Estes tabuleiros são constituídos de sedimentos continentais inconsolidados de idade pliocênica (Mabessoone *et al.* 1972, Bigarella 1975).

O regime de marés na região pode ser caracterizado como de meso-marés de periodicidade semi-diúrna, ou seja, com um intervalo de 12 horas e 25 minutos entre dois níveis de maré.

A amplitude média registrada pelo marégrafo (porto do Pecém e porto do Mucuripe) tem oscilações aproximadas entre -20 e 320 cm em referência ao M.S.L. (*mean sea level*) com valores médios da ordem de 155 cm.

As duas grandes áreas portuárias do Estado do Ceará são a do porto do Mucuripe e do complexo portuário e industrial do Pecém.

## 2.2 Porto de Mucuripe

Segundo Morais (1981), o município de Fortaleza e área adjacente apresentam três feições geológicas distintas: os terrenos cristalinos, o vulcanismo alcalino em torno do paralelo 4° Sul e a faixa sedimentar costeira.

Desde 1807 com as primeiras tentativas de construção do porto em Fortaleza foram discutidos muitos projetos até 1866 levando em consideração uma linha de arenitos ferruginosos a 100 m de distancia da praia (atual poço da draga) com direção WNW, em uma profundidade média de 3 m.

O primeiro quebra-mar que foi construído foi projetado em 1874 por *Sir John Hawkshaw* e causou problemas de assoreamento que provocaram inviabilidade do porto. A construção deste quebra-mar causou intenso assoreamento e conseqüente recuo da linha de quebra-mar, o que provocou a inviabilidade do porto naquele local.

Depois de muitos anos, no período de 1940-45, foi realizada a estrutura atual do porto de Mucuripe, essa também causou assoreamento, tanto que nos anos seguintes foi necessário providenciar algumas modificações para evitar acúmulo de areia a sotamar do molhe, efetuar contínuas dragagens para permitir a entrada dos navios maiores no cais do porto.

A implantação do espigão na praia do Futuro permitiu reduzir o forte assoreamento na parte interna do molhe do porto, porque interrompeu de maneira mais eficaz o transporte de sedimento devido à corrente *longshore* da praia do Futuro.

Precisa-se pensar que a enseada do Mucuripe já, por natureza, foi formada devido à erosão, pela ação continuada das ondas, cuja evidencia são as rochas isoladas que ocorrem nas isobatas dos 5m (Morais, 1980). Estas rochas são sedimentos terciários consolidados e cimentados pelo óxido de ferro e/ou carbonato de cálcio oriundo da própria água do mar.

Os construtores do porto do Mucuripe aproveitaram da morfologia do fundo e da costa para criar uma proteção artificial para os barcos de pescadores e os navios comercias e

turísticos de passagem pela cidade. Mas qualquer obra artificial modifica os fenômenos naturais presentes em uma determinada área, no caso um litoral, aportando ou acentuando fenômenos destrutivos como a erosão costeira.

O molhe do Mucuripe provocou um movimento de difração das ondas que trouxe muitas modificações na conformação da linha de costa. Em poucos anos, a linha de costa da praia de Iracema avançou de muitos metros. A erosão da praia aumentou também mesmo por causa do assoreamento ao redor do molhe do Mucuripe, porque a corrente destituída de material em suspensão, e dotada por isso de maior potencial erosivo, reflete-se na direção da praia de Iracema e adjacências (Morais, 1972), que hoje experimenta um preocupante nível de degradação.

As obras de engenharia ao longo das praias de Fortaleza, objetivando conter o avanço acelerado da erosão, intensificado com a implantação do porto do Mucuripe e posterior molhe do Titã, gerou uma dinâmica litorânea peculiar, interagindo com uma bateria de 14 espigões, muros de arrimo, enrocamentos, marinas e expansão portuária. As interferências desses equipamentos, principalmente com as consequências da construção do porto do Mucuripe, foram inicialmente estudadas por Moraes & Pitombeira (1974) e Moraes (1980), *apud* Meireles *et al.*, (2001), tratando-se das primeiras referências que aportaram discussões sobre a dinâmica sedimentar e os impactos ambientais derivados dessas estruturas.

### 2.3 Porto do Pecém

O terminal portuário do Pecém é constituído de 02 (dois) *piers* marítimos, sendo o píer 1, para insumos e produtos siderúrgicos e carga geral e o píer 2, para granéis líquidos e gases liquefeitos, em especial óleo cru e derivados de petróleo (figura 2).



Fonte: Rabelo, 2004

**Figura 2** - Vista aérea do terminal portuário do Pecém.

O terminal portuário do Pecém alcançou um aumento de 98% na movimentação total de carga no primeiro semestre de 2005 em comparação ao mesmo período de 2004. Apenas no mês de junho, foram 138.177 toneladas de mercadorias diversas, atingindo a marca de 563.396 toneladas movimentadas nos primeiros seis meses do ano. Neste mesmo período do ano passado, haviam sido movimentadas 284.971 toneladas.

No mês de junho, 37 embarcações atracaram no terminal, sendo 26 de grande porte, com calado superior a dez metros. Trinta navios desse total eram do tipo porta-contêiner, dois de carga geral e cinco de granel líquido. Se comparado com as 22 atracações registradas durante o mês de junho de 2004, esse número demonstra crescimento de 68% em atracações no terminal portuário do Pecém, segundo a CEARÁPORTOS (<http://www.cearaportos.ce.gov.br>).

## 2.4 Rio Jaguaribe

O rio Jaguaribe nasce na serra da Joanhina, no município de Tauá, drena uma área de aproximadamente 75.669 km<sup>2</sup>, correspondendo a praticamente 51,9% do Estado do Ceará. O rio percorre um trajeto aproximado de 610 km desde sua nascente até sua desembocadura no oceano Atlântico, na cidade de Fortim (IBGE, 1999).

A bacia do rio Jaguaribe tem uma forma bastante irregular, apresentando nos altos e médios cursos uma largura média de 220 Km, enquanto que no baixo curso passa a ter uma largura de 80 km, diminuindo gradativamente até sua foz. Grosseiramente, poderia ser considerada como sendo triangular (Christofolletti, 1974).

## 2.5 Rio Mamanguape

O estuário do rio Mamanguape encontra-se no nordeste do Brasil, precisamente no Estado da Paraíba, localizado entre a latitude 06°43' S e 06°51' S e longitude 35°07' e 34°54' W. Este estuário tem um comprimento de cerca 24 km e uma largura perto da barra (onde o rio encontra o oceano Atlântico) de cerca 2,5 km (Alves *et al.*, 2005).

Toda a área de influencia do rio Mamanguape, é protegida por uma Área de Proteção Ambiental (APA) instituída pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), formada também pelos estuários dos rios Miriri e Estivas, cobrindo no total uma área de 14.460 ha.

No estuário do rio Mamanguape é encontrada uma grande extensão de mangue, e de barras de areia na embocadura do rio. A área é inteiramente localizada nos municípios de rio Tinto, Marcação e Lucena. O estuário desta APA inclui cerca 6.000 ha de floresta de mangue bem preservada, a maior deste tipo no Estado da Paraíba. Infelizmente, uma parte deste mangue é afetada pela presença do homem, por urbanização e atividades econômicas, muitas vezes derivadas do cultivo de cana de açúcar.

Segundo os pescadores locais, um aumento da contaminação da água nestes últimos anos ocasionou uma diminuição do pescado, devido ao aumento de agrotóxicos utilizados nas plantações ao longo das margens do rio (Alves *et al.*, 2005).

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 O clima no nordeste do Brasil

A região do nordeste do Brasil (NEB) é constituída por amplas planícies, (baixadas litorâneas), por vales baixos, geralmente inferiores a 500 m, entre superfícies que alcançam cotas de 800- 1200 m (como Araripe e Diamantina). Toda esta região é caracterizada por um clima semi-árido.

Essa área, em relação ao regime térmico, apresenta temperaturas elevadas cuja média anual varia de 26° a 28°C. Apenas nas áreas situadas acima de 200m e no litoral oriental as temperaturas variam de 24° a 26°C. As médias anuais inferiores a 20°C encontram-se nas áreas mais elevadas da chapada Diamantina e da Borborema. A distribuição da pluviosidade da região nordeste é muito complexa, não só em relação ao período de ocorrência (três meses, podendo às vezes nem existir), como em seu total anual, que varia de 300 a 2.000 mm (IBGE, 1989). Quanto ao período de ocorrência, no caso do Ceará, o máximo ocorre no período de verão entre os meses de fevereiro e maio. Durante este período, a zona de convergência intertropical (ZCIT) encontra-se em uma posição mais ao sul do equador, determinando a existência da comumente chamada “quadra chuvosa”.

A circulação atmosférica sobre a região tropical é fortemente modulada e modificada pelos padrões termodinâmicos sobre as bacias dos oceanos Pacífico e Atlântico tropical. Um dos fenômenos globais que afeta sobremaneira esta área é o fenômeno El Niño.

Este acontece quando as águas do Pacífico equatorial aquecem acima do normal causando mudanças climáticas importantes como períodos secos ou muitos secos principalmente quando ocorre conjuntamente com o dipolo positivo do Atlântico (diferença entre anomalia de temperatura da superfície do mar Atlântico norte e sul).

O dipolo negativo do Atlântico, ocorrendo conjuntamente o fenômeno La-Niña (resfriamento acima do normal da águas do oceano Pacífico equatorial), é normalmente responsável por anos considerados normais, chuvosos ou muito chuvosos no NEB.

No Ceará a temperatura média anual, para localidades próximas às faxias costeiras litorânea do Estado do Ceará, varia aproximadamente entre 25,2°C e 27,2°C embora existam localidades onde a temperatura mínima absoluta alcança valores próximos de 16°C, e a

temperatura máxima absoluta, valores próximos de 38°C em alguns dias do ano (SEMACE/LABOMAR, 2005); a umidade relativa média anual do ar atinge valores acima de 70%.

A quantidade de insolação total anual é acima de 2600 horas e apresenta céu com boa cobertura de nuvens durante todo o ano.

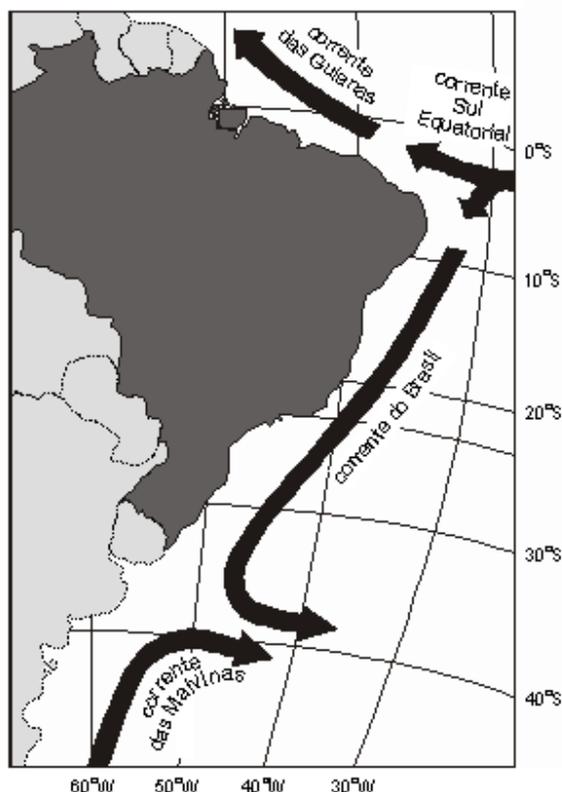
Durante todo o ano, nas regiões tropicais do Brasil, à exceção do oeste da Amazônia, sopram frequentemente ventos do quadrante E, oriundos das altas pressões subtropicais, ou seja, do anticiclone semi-fixo do Atlântico Sul (IBGE, 1989).

### **3.2 Sistema das correntes no Brasil**

O Atlântico sul é caracterizado pela presença de uma grande massa de alta pressão que determina a grande circulação oceânica deste oceano no sentido anti-horário.

O sistema geral de circulação dos oceanos é causado pela interação do sistema atmosfera-oceano, e principalmente pelo princípio de formação dos ventos globais (Brown *et al.*, 1989).

No caso do Atlântico Sul, mais precisamente na costa brasileira, que o constitui pela maior parte dele, encontram-se os ventos alísios de sudeste, que alimentam o sistema de correntes ao longo da costa do Brasil (figura 3).



**Figura 3** - Circulação geral ao longo do litoral brasileiro

(fonte: [http://cursos.unisantabr/oceanografia/correntes\\_marinhas.htm](http://cursos.unisantabr/oceanografia/correntes_marinhas.htm)).

A Corrente Equatorial Sul (SEC) movimenta-se no sentido leste-oeste na altura do Equador, deslocando-se entre os paralelos de 2° ou 3°N e 10° S, no sentido de oriente para o ocidente, isto é, das proximidades da costa africana para o Brasil. Embora sua velocidade seja bastante variável, quer em função da latitude, quer em relação à longitude, é maior nas proximidades do Equador, durante o inverno austral, quando alcança 1,5 e até 2,0 nós<sup>1</sup>. Ela bifurca-se aproximadamente na longitude da ilha de Fernando de Noronha, em latitudes variáveis com a época do ano, mas sempre fronteira à saliência oriental correspondente aos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, entre os paralelos 5°S e 8° S. A corrente que se desvia para o norte é denominada Corrente das Guianas (ou também Corrente Norte do Brasil, NBC), e a que se volta para o sul, é chamada, Corrente do Brasil, que em razão de sua posição geográfica, recebe esse nome.

<sup>1</sup> 1 nó é equivalente a 1852 m/h=1nM/h=0,51 m/s

A NBC, segundo Fratantoni *et al.* (1995), durante o período de fevereiro até junho, acredita-se continuar até o extremo norte da América do sul, enquanto durante o resto do ano, se afasta da costa na latitude 6°-7° N e volta para o sul alimentando a NECC (*North Equatorial Countercurrent*).

A Corrente do Brasil - principal corrente superficial brasileira dirige-se para o quadrante sudoeste, em direção proximamente paralela à costa, e afastado dela de 120 a 150 milhas, com velocidade variável de 0,5 a 1,0 nó. Em outras palavras, a Corrente do Brasil, caminha sobre a plataforma ou próxima, na região da borda. Ela é também conhecida como Água Tropical e ela flui para o sul ao longo da costa leste do continente sul-americano, alcançando em média os paralelo 38° de latitude sul, onde encontra a Corrente das Malvinas, conhecida como Água Subantártica; nessa região que varia conforme a época do ano, as duas correntes afastam-se da costa, fluindo em direção leste ([http://www.nomar.com.br/oceanos\\_03.htm](http://www.nomar.com.br/oceanos_03.htm)).

### 3.3 Marés astronômicas

As variações de maré representam modificações morfológicas de um astro devido as interações entres corpos celestes.

A atração da Lua e do Sol produz, sobre a massa líquida da Terra, deformações regulares com intervalo periódico de 24 horas e 50 minutos correspondente ao dia médio da lua.

Esta deformação produz, por dia, dois fluxos e dois refluxos, a cada 6 horas cerca um do outro, gerando correntes de maré com sentido contrario.

As marés podem ser consideradas como ondas com comprimento igual à circunferência da Terra e período de 12 horas e 25 minutos. A amplitude de maré varia com a posição de Terra-Lua e Sol, sendo as maiores nas fases de lua nova e cheia (maré de sizígia) e as menores nas fases com os três astros formando um angulo de 90 graus (maré de quadratura). Existem três tipos fundamentais de marés:

- Diurnas;
- Semidiurnas;
- Mistas;

As diurnas são caracterizadas por uma alta e uma baixa-mar nas 24 horas, as semidiurnas por duas altas e duas baixas nas 24 horas e com amplitude quase igual, e as mistas são marés com duas altas e duas baixas, mas de amplitude diferente ao longo do dia.

### 3.4 Efeitos das ondas e dos ventos na zona litorânea

Na natureza existem vários tipos de ondas dependendo da causa geradora, as principais são:

- Ondas de maré.
- Tsunami, causados por eventos sísmicos na Terra.
- Ondas de gravidade, cuja causa geradora é o vento (*sea e swell*).

As ondas que ocorrem nos oceanos variam significativamente quanto a comprimento e período. As menores ondas, chamadas de capilares têm comprimento de poucos centímetros e período de frações de segundo. Já as maiores são as marés cujo comprimento pode ser extremamente elevado, assim como as velocidades, com períodos de até 24 horas.

Entre as ondas mais comuns nos oceanos estão as chamadas *swell*. Deslocam-se por milhares de quilômetros a partir dos locais onde foram originadas. Ao se afastarem de seu local de origem tornam-se muito uniformes, com grandes comprimentos de onda e pequenas amplitudes; em oceano aberto, seu período situa-se em torno de 13 segundos. Já outro tipo de onda, a *sea*, é muito irregular, com diversos períodos e várias direções. Encontra-se este tipo de onda em locais onde são geradas, ou seja, onde o vento está soprando. As ondas tendem a ser maiores quando próximas às regiões nas quais os ventos são mais fortes. São geralmente menores na região equatorial e maiores em altas latitudes, como no sul da África e da América do Sul, Austrália e Groenlândia.

A força motriz da maioria dos processos costeiros é devido às ondas. As ondas possuem forma senoidal, um perfil vertical de dois picos sucessivos teóricos (Noemberg, 1997).

O movimento das partículas dentro de uma onda, em águas profundas, é quase circular. No pico da onda, as partículas movem-se na mesma direção da propagação da onda, enquanto que na calha as partículas movem-se em direção oposta à propagação da mesma.

A energia da onda é transferida ao sedimento do fundo marinho quando o movimento circular da onda interfere com o mesmo em águas costeiras, e pode ocorrer um movimento global significativo deste material. As partículas são deslocadas e retornam à sua posição de equilíbrio, depois da passagem da onda. Ondas de superfície ocorrem nas interfaces entre fluidos, devido ao movimento relativo entre eles, ou devido a um distúrbio causado pela ação de uma força externa.

### **3.5 Estimativa da altura das ondas em função do *fetch* e da intensidade do vento**

A teoria da geração das ondas teve uma história muito longa e rica. Existem três situações nas quais pode ser feita uma previsão em condições simplificadas da condição das ondas:

- ı O vento em direção constante sobre um *fetch* com tempo suficiente para atingir um *steady-state*.
- ı O vento que aumenta de intensidade com muita rapidez em uma área sem contornos fechados.
- ı Esta condição é caracterizada por uma altura da onda totalmente desenvolvida.

Informações básicas para previsão de altura e energia das ondas podem ser obtidas com programas tipo *ACES (Automated Coastal Engineering System)* que simplificaram muitos cálculos bastante complexos úteis no projeto de obras de engenharia e estudos de erosão costeira.

A fórmula que governa a formação das ondas segundo o *fetch* e a intensidade do vento é (*US. ARMY Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual, part II-2*):

$$\frac{gH_{m_0}}{u_*^2} = 4.13 \times 10^{-2} * \left( \frac{gX}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

and

$$\frac{gT_p}{u_*} = 0.651 \left( \frac{gX}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_D = \frac{u_*^2}{U_{10}^2}$$

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035 U_{10})$$

Onde:

**X** = comprimento do *fetch*.

**H<sub>m0</sub>** = energia baseada na altura significativa das ondas.

**C<sub>D</sub>** = coeficiente de arrasto.

**U<sub>10</sub>** = velocidade do vento a 10 m de altura.

**u\*** = velocidade de fricção.

No anexo 1 são explicadas as condições locais de ondas (altura e período) que podem ser geradas por fenômenos meteorológicos diferentes, segundo o *Coastal Engineering Manual*.

A tabela expõe a tipologia de ondas que poderia se formar em função de condições diversas de vento, a partir da brisa, até condições induzidas por furacões, com ventos superiores a 70 nós de velocidades.

### 3.6 Formação e Dinâmica das ondas

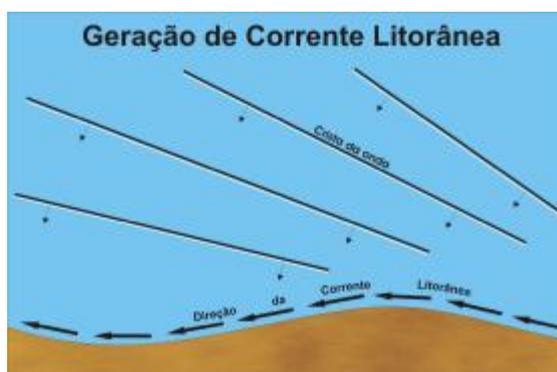
As ondas são geradas pelo vento, que agindo sobre a superfície do mar, transfere energia cinética para a massa de água do oceano, criando assim um movimento rotatório das partículas de água. Durante o movimento das ondas, transfere-se só a forma das ondas, enquanto a água fica parada, pois o movimento de um objeto na superfície e dentro o fluido é devido as correntes marinhas.

O movimento no interior da onda é um movimento circular, cujo diâmetro é equivalente à altura da mesma, e tal diâmetro diminui com a profundidade, até desaparecer a uma profundidade de cerca L/2 (metade do comprimento da onda), que representa a profundidade limite de interferência das ondas na coluna de água.

Mesmo depois do vento parar de soprar, as ondas continuam até acabar a energia cinética acumulada, e desenvolvem uma forma mais longa e arredondada (onda tipo *swell*).

Como foi dito, as ondas não são responsáveis pelo transporte de massa de água, e este fenômeno só acontece em proximidade do litoral, onde as ondas interagem com o fundo do oceano e, por causa do atrito com ele, arrebentam chegando até à praia, assim podem causar um verdadeiro transporte de massa de água.

O processo de interação das ondas com o fundo do mar causa também o fenômeno da refração. A chegada das frentes de ondas com direção inclinada em relação ao litoral, se cria um desvio da direção das ondas, até elas ficarem mais perpendicular à praia, isso devido ao atrito que o fundo causa em pontos e momentos deferentes ao longo do frente de onda. A chegada das frentes de ondas inclinados gera também uma corrente litorânea (figura 4), que determina o transporte de sedimento ao longo das praias, e umas correntes de retorno, que têm direção perpendicular à costa e direção para o largo.



**Figura 4-**Efeito da refração do fundo e transporte litorâneo devido às ondas.

### 3.7 Instrumentos para medidas de ondas e correntes

As medidas de ondas direcionais são freqüentemente utilizadas em varias aplicações incluindo engenharia costeira e dinâmica litorânea, transporte de sedimento, erosão costeira e dispersão de poluentes.

Instrumentos que medem a velocidade e a direção das ondas utilizam um sensor de pressão para medir as variações da coluna de água, quando colocados no fundo, ou de gravidade, para instrumentos colocados na superfície da água (medem as oscilações verticais da bóia no ponto da estação).

Outros mais recentes tipos de medições das ondas, são através o uso de instrumentos que através o sensor de pressão e o efeito *doppler* dos sinais acústicos conseguem determinar as variações da altura da coluna de água e a direção de propagação do fluxo.

### **3.8 Medição direta de correntes no mar**

A observação do campo das correntes e sua variação (temporal e espacial) podem ser feitas através de métodos eulerianos, isto é, usando instrumentos ancorados que medem a corrente ao longo do tempo num determinado local, ou de métodos lagrangeanos, ou seja, quando se utilizam instrumentos que seguem a corrente.

#### **3.8.1. Medições eulerianas de correntes**

Os aparelhos de medição de correntes (correntômetro) são colocados, em geral, numa estrutura ancorada em local pré-determinado e têm capacidade de realizar medições da corrente (intensidade e direção) ao longo de um dado período de tempo e registrar os valores obtidos. Os sensores de intensidade da corrente podem ser de dois tipos: mecânicos (medem o número de rotações de um rotor ou de um hélice provocados pela corrente) e não-mecânicos (medem o efeito da corrente sobre um campo eletromagnético ou sobre um sinal acústico).

#### **3.8.2. Correntômetros mecânicos**

Um dos correntômetros de auto-registo mais vulgarmente usados pela comunidade oceanográfica mundial utiliza o sistema de rotor para a celeridade da corrente. A direção do escoamento em relação ao aparelho é, em geral, determinada por meio de um leme que se orienta segundo a corrente, enquanto que a orientação do aparelho em relação ao campo magnético da Terra é obtida com uma bússola interna. Este aparelho mede também a temperatura (por meio de um termistor) e, opcionalmente, poderá também ter um sensor de pressão (utilizando um oscilador de cristal de quartzo) e um sensor de condutividade do tipo indutivo. Os dados são adquiridos com uma dada cadência pré-estabelecida e vão sendo registrados numa unidade de

memória sólida (colocada no interior do aparelho), a qual, posteriormente, pode ser ligada a um computador para leitura direta desses dados.

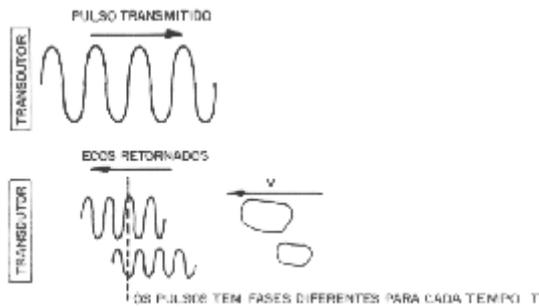
### 3.8.3. Correntômetro não-mecânicos

Existem fundamentalmente dois métodos diferentes para medir as correntes no oceano utilizando meios acústicos: um baseado no efeito *Doppler* e outro baseado na alteração da velocidade de propagação do som devido ao movimento do próprio meio (a água) em que este se propaga.

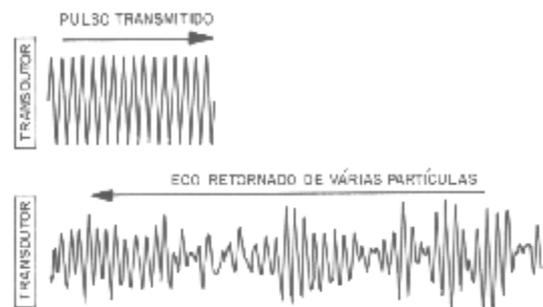
No caso dos aparelhos baseados no efeito *Doppler*, tais como o correntômetro *doppler* ou o perfilador de correntes ADCP, o sinal sonoro que é emitido pelo aparelho é refletido pelas partículas em suspensão que existem na água e que se movem com a corrente; a diferença entre a frequência do sinal refletido por esses alvos em movimento e a frequência do sinal emitido é proporcional à velocidade dos alvos (efeito *doppler*) e, portanto a velocidade da própria corrente (figuras 5 e 6).

Como a pulsação é enviada pela água, o eco recebido, a qualquer instante, é a soma dos ecos individuais das partículas em suspensão atingidas pela pulsação. Na figura 5, pode-se observar que um pulso enviado, ao atingir duas partículas em suspensão na água com velocidade  $V$ , relativa ao ADCP, é devolvido de maneira diferente por cada partícula. Pela figura, observa-se que: as intensidades diminuem (nem toda energia é devolvida); as pulsações de retorno são comprimidas devido ao efeito *doppler*; e as fases das duas pulsações de retorno são diferentes.

No caso de muitas partículas dissolvidas, cada uma terá a pulsação refletida com fase diferente. Estas diferentes fases e amplitudes produzem um registro, como mostrado na figura 6. Como os pulsos percorrem a coluna de água, ocorre uma mudança contínua na modulação porque eles detectam a presença de novas partículas que refletem ecos de uma nova fase de informações, diferente da fase das partículas anteriores que deixaram o feixe de som, causando uma diminuição na correlação dos sinais. A correlação é a comparação do sinal de retorno de uma pulsação com ela mesma. Isso permite deduzir a frequência da pulsação de retorno. (Thiago Filho *et al.* 1999).



**Figura 5-** Modulação versus tempo de plotagem para muitas partículas. (Fonte: Thiago Filho *et al.* 1999)



**Figura 6-** Modulação versus tempo e plotagem para muitas partículas

O efeito *doppler* é portanto baseado na diferença de frequência entre o sinal acústico emitido por um sensor, e a frequência do mesmo, refletido por um objeto em movimento, segundo a fórmula:

$$F_{doppler} = -2 F_{emitido} (V/C)$$

Onde :

**F**= frequência;

**V**= diferença de velocidade entre sensor e objeto;

**C**= velocidade do som no meio de propagação;

Quando a distancia entre o sensor o objeto diminui, a frequência aumenta, e movimentos perpendiculares à linha que une os dois, não criam efeito *doppler*.

O ADCP assume que o campo do fluxo seja uniforme na área de medição de cada impulso acústico do aparelho (área com diâmetro de 0,93 vezes a distancia do sensor), ou seja, que a corrente move-se com a mesma velocidade e direção ao longo dos três eixos (*Sontek manual*, 2005).

No caso do outro tipo de correntômetro acústico, o que se mede é a diferença no tempo de percurso de curtos impulsos sonoros de alta frequência emitidos por uma fonte sonora e

recebidos por um receptor a uma distância fixa. Quanto maior for a celeridade da componente da corrente na direção de propagação do som menor o tempo de percurso do impulso sonoro.

Outro exemplo de instrumento não-mecânico é o correntômetro eletromagnético que usa o princípio de funcionamento baseado na lei de Faraday, da indução de uma força eletromotriz por um condutor em movimento num campo magnético. No caso presente, o condutor corresponde à corrente oceânica e o campo magnético é criado pelo aparelho (Miranda *et al.*, 2002). O que este instrumento mede é a força eletromotriz induzida, a qual é proporcional à velocidade da corrente.

Também podemos mencionar um instrumento descartável que permite obter o perfil vertical da velocidade horizontal das correntes oceânicas: o perfilador de correntes descartável XCP (*Expendable Current Profiler*). O funcionamento do XCP baseia-se também na geração de um campo eléctrico (embora fraco) pelo simples movimento da água do mar no campo magnético terrestre. O sistema XCP inclui uma sonda, uma bóia superficial e o sistema de aquisição (antena mais computador munido de software específico) montado a bordo de um navio. O aparelho com a bóia é lançado à mão para a água, cujo contacto faz acionar de imediato os componentes electrónicos presentes na bóia e o enchimento de um saco de flutuação. A bóia superficial inclui um emissor e uma antena de rádio, baterias e uma bobina de cabo (para transmissão do sinal) que se vai desenrolando à medida que o aparelho afunda. A sonda aloja o termístor, baterias, duas placas de circuitos electrónicos, a bússola e os eletrodos. A diferença no campo eléctrico à medida que a sonda desce, está associada à velocidade relativa da água. Nas latitudes médias, uma diferença de potencial de 50 nV corresponde à uma velocidade relativa de 1 cm/s. As voltagens provenientes dos eléctrodos, da bússola e do termístor são amplificadas e convertidas em frequências.

Os dados destes três sensores são utilizados para modular três frequências rádio diferentes que, uma vez somadas, são enviadas pelo cabo que liga a sonda à bóia de superfície. O emissor rádio encarrega-se de enviar os dados para o navio.

#### **3.8.4. Medições lagrangeanas de correntes**

Nos métodos lagrangeanos, o instrumento (bóia derivante à superfície, flutuador de profundidade) segue o escoamento ao nível em que está imerso e, portanto, é a sua trajetória que

vai permitir reconstituir as correntes que transportaram o instrumento. No caso das bóias derivantes à superfície, é necessário utilizar métodos de posicionamento por satélite para receber os sinais emitidos por transmissores de radiofrequência colocados nas bóias e assim seguir a respectiva trajetória.

No caso dos flutuadores de profundidade, estes são calibrados em termos de peso/impulsão de modo a permanecerem a um dado nível. Os métodos acústicos são os mais utilizados para a respectiva localização. Esta é realizada recorrendo a fontes sonoras, colocadas em amarrações em locais estratégicos, as quais emitem a uma dada cadência sinais acústicos que são recebidos e registrados pelos flutuadores. Terminado o período pré-programado da missão do flutuador, os instrumentos voltam à superfície (ao largarem um peso) e emitem os dados sob a forma de mensagens para o sistema de posicionamento por satélite (sistema ARGOS, por exemplo, que é transportado por satélites de órbita polar da NOAA).

As medições lagrangeanas, sendo uma tipologia rápida e econômica de medir as correntes superficiais, são utilizadas também para medições em rios e estuários, porém valores de velocidades superficiais podem ser afetados pelo efeito do vento que age em uma determinada área e por isso medições lagrangeanas de corrente resultam pouco útil. Em rios rasos e estreitos, corpo de medição atinge rapidamente seus limites (Guimarães & Marone, 1996).

### **3.9 Evaporação**

A evaporação é o processo pelo qual a água passa do estado líquido para o de vapor. Embora o vapor de água possa ser formado diretamente, a partir da fase sólida, o interesse da hidrologia está concentrado nas perdas por evaporação, a partir de superfícies líquidas (transformação de líquido em gás). Além da evaporação, o retorno da água para a atmosfera pode ocorrer através do processo de transpiração, no qual a água absorvida pelos vegetais é evaporada a partir de suas folhas. Evapotranspiração é o total de água perdida para a atmosfera em áreas onde significativas perdas de água ocorrem através da transpiração das superfícies das plantas e evaporação do solo.

A evaporação e a transpiração representam uma porção significativa do movimento da água através do ciclo hidrológico. Pode-se elencar as seguintes definições (Alfonsi, 1995 *apud* CIIAGRO, <<http://ciiagro.iac.sp.gov.br/>>):

- **Evapotranspiração real:** a quantidade de água que nas condições reais se evapora do solo e transpira das plantas.
- **Evapotranspiração potencial (ETP):** máxima capacidade de água capaz de ser perdida como vapor, em uma dada condição climática, por um meio contínuo de vegetação, que cobre toda a superfície do solo estando este na capacidade de campo ou acima desta. Desta maneira, inclui a evaporação do solo e transpiração de uma vegetação de uma região específica em um dado intervalo de tempo.
- **Deficiência hídrica:** diferença entre a evapotranspiração potencial e a real.
- **Excedente hídrico:** diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, quando o solo atinge a sua capacidade máxima de retenção de água.

### 3.10 O software MIKE 21

A ferramenta utilizada para elaboração das simulações foi o *software MIKE 21*, modelo numérico 2D, produzido pelo *Danish Hydraulic Institute (D.H.I.)* e utilizado em estudos de fatores hidrodinâmicos dentro de ambiente costeiro e de mar aberto, que permite elaborar simulações de corrente, de onda e transporte de sedimento utilizando dados oceanográficos como parâmetro de entrada do modelo.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Medições de corrente

O aparelho utilizado para medir as correntes nas áreas de estudo foi um correntômetro modelo ADCP 3D (*Acoustic Doppler Current Profiler*) com sensor acústico de frequência 1,5 MHz, produzido pela *SONTEK/YSI*, capaz de medir perfis contínuos de correntes marinhas ao longo da coluna de água, até uma profundidade média de 25 m identificando com precisão a batimetria do fundo oceânico.

O ADCP é equipado com 3 sensores (*beams*) direcionados com um ângulo de 25 graus em relação à vertical. Os três sensores medem a direção e a intensidade da corrente ao longo dos eixos X, Y, Z. O valor resultante da direção e da intensidade da corrente é calculado pela média dos três valores obtidos ao longo dos três eixos.

Durante as medições de perfis percorridos com uma embarcação, o aparelho é posicionado a boreste do barco (mas isso depende das condições de trabalho e da tipologia do barco) através de uma estrutura de sustentação para permitir a navegação com velocidade moderada, de no máximo, 3-4 nós durante a medição. O ADCP trabalha com os sensores orientados para baixo, imersos na água a uma profundidade de cerca 50-80 cm, dependendo das condições do mar.

Na maioria dos casos, o barco utilizado para o trabalho foi o barco de Pesquisa Prof. Martins Filho de propriedade da UFC (figura 8). Alguns trabalhos em rios ou áreas costeiras, com água muito rasa, necessitaram a utilização de uma outra embarcação mais adaptada às condições de navegação.

Uma vez posicionado e ligado (figuras 9/13), o aparelho envia o sinal acústico, ao longo da coluna de água, por meio dos três sensores. Tal sinal é refletido por partículas presentes dentro da água, isso acontece nas várias células, que podem ser de comprimento mínimo de 25 cm (para sensor de 1,5 MHz utilizado nos campos). Utilizando o princípio do efeito *Doppler*, o aparelho determina a velocidade da corrente em função do tempo de retorno do sinal acústico e da velocidade do mesmo no meio aquático.

O ADCP possui uma *blanking distance* (*BD*, figura 7), ou seja, uma distância dos sensores até a primeira célula de medição onde o aparelho não registra nenhum dado, que no caso

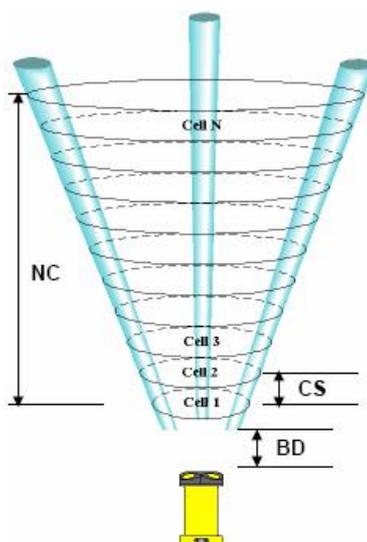
do ADCP com sensor de frequência 1,5 MHz é de 40 cm, no mínimo; essa distancia também é variável em função das informações iniciais enviadas para o ADCP, como os números de células e dimensão das mesmas arbitrariamente decididas antes de qualquer medição (quadro 1).

O ADCP mede, ao mesmo tempo, a batimetria do fundo, as coordenadas geográficas do ponto de medição (quando o GPS é ligado ao computador através do *software* da sonda) e a temperatura da água para as correções referentes à velocidade do sinal acústico na água.

Para calcular a velocidade do sinal no meio, além da temperatura que é medida em maneira contínua, é preciso conhecer também a salinidade da água, pois enquanto uma variação de 12 ppt<sup>2</sup> da mesma determina uma variação da velocidade do som do 1% (*Sontek manual*, 2005).

**Quadro 1** - Tipologia de sensores disponíveis para o ADCP, evidenciando aquela do aparelho utilizado neste estudo.

<i>Frequency</i>	<i>Profiling range (min.-max.)</i>	<i>Cell Size (min.-max.)</i>	<i>Blanking Distance (min.)</i>	<i>Bottom track Depth (max.)</i>
250KHz	5-180 m	2-20 m	1,5 m	200 m
500 KHz	3-120 m	1-12 m	1,0 m	135 m
1.0 MHz	1.2-40 m	0.25-5 m	0,7 m	40 m
1.5 MHz	0.9-25 m	0.25-4 m	0,4 m	30 m
3.0 MHz	0.6- 6 m	0.15-2 m	0,2 m	10 m



Fonte: Sontek/YSI

**Figura 7**-Esquema de funcionamento do ADCP (*BD=blanking distance; CS=cell size; NC=number of cells*).

<sup>2</sup> partes por mil



Fonte: Labomar, 2005



Fonte: Monteiro, L.S.,2005

**Figuras 8- 9-** Barco de pesquisa Prof. Martins Filho. À direita a instalação do ADCP (sondek/YSI) no barco.



Fonte: Bensi, M. 2005



Fonte: Bensi, M. 2005.

**Figuras 10- 11-** Cilindro amarelo do ADCP contendo bateria e processador. A figura à direita mostra o ADCP instalado sobre um barco pequeno.



Fonte: Bensi, M. 2005



Fonte: Bensi, M. 2005.

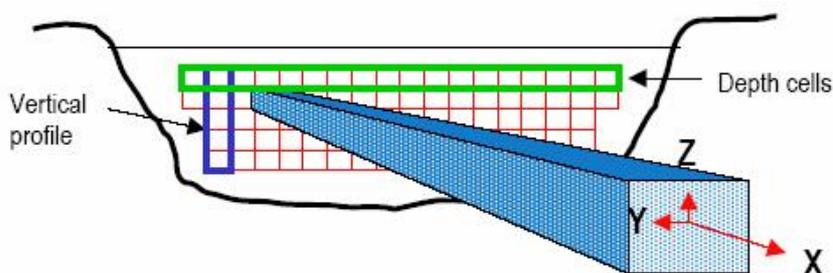
**Figuras 12- 13 -**Posicionamento da bateria do ADCP a bordo e à direita o *Laptop* para visualização dos dados.

O ADCP pode também ser utilizado na medição da corrente e vazão dos rios fornecendo dados importantes sobre capacidade de carga e volumes (figuras 14). Neste caso, os perfis de medição são percorridos ao longo das sessões transversais do rio, permitindo o cálculo da área da seção, a medição das velocidades da corrente, e assim o cálculo da vazão superficial, do meio, de fundo e total (a vazão é o produto da velocidade média da corrente para a área da seção do rio naquele ponto).

A vazão fluvial, ou descarga do rio, representa basicamente o volume (L) transportado na unidade de tempo ( $L^3/T$ ).

Por outro lado, a obtenção de dados de estações fluviométricas e a aplicação em estudos sobre física estuarina podem apresentar limitações devido ao fato que, em geral, a finalidade das medições de vazão, bem como a localização das estações fluviométricas está relacionada a estudos sobre a manutenção do suprimento de água para o abastecimento urbano, industrial e agrícola (Miranda *et al.*, 2002 *apud* SEMACE/LABOMAR, 2005).

O programa *Riversurveyor* (vers.4.30), produzido pela *Sontek*, é o software utilizado para este tipo de medições. Nele são decididos arbitrariamente os parâmetros iniciais, como declinação magnética da área, salinidade da água, dimensão das células de medição, e distância das margens do rio do início e término do perfil.



Fonte: Sontek. 2005

**Figura 14**-Exemplo de perfil de corrente dentro de um rio. O ADCP na medição de perfis transversais permite calcular a vazão de um rio.

## 4.2 Processamento dos dados coletados em campo

Os dados recolhidos no campo são armazenados no computador utilizado para comunicar com o correntômetro (ou aleatoriamente podem ser gravados no *recorder* alojado no tubo amarelo do mesmo aparelho), e posteriormente processados através dos *softwares* de produção da *Sontek*, que permitem a obtenção dos dados gravados em formato ASCII e a representação em formados como *Excel* ou similares, incluindo gráficos para melhor interpretação.

Além disso, as coordenadas geográficas dos pontos de coletas são gravadas em GPS portátil, e utilizadas em ferramentas como *ARCVIEW* para representação de dados de correntes em forma de vetores plotados acima de imagem do satélite da área de estudo.

Esta fase de trabalho de gabinete é importante para uma fácil compreensão e visualização dos dados registrados no campo.

## 4.3 Simulação de Correntes e Ondas: Compilação e Preparação da Base Cartográfica

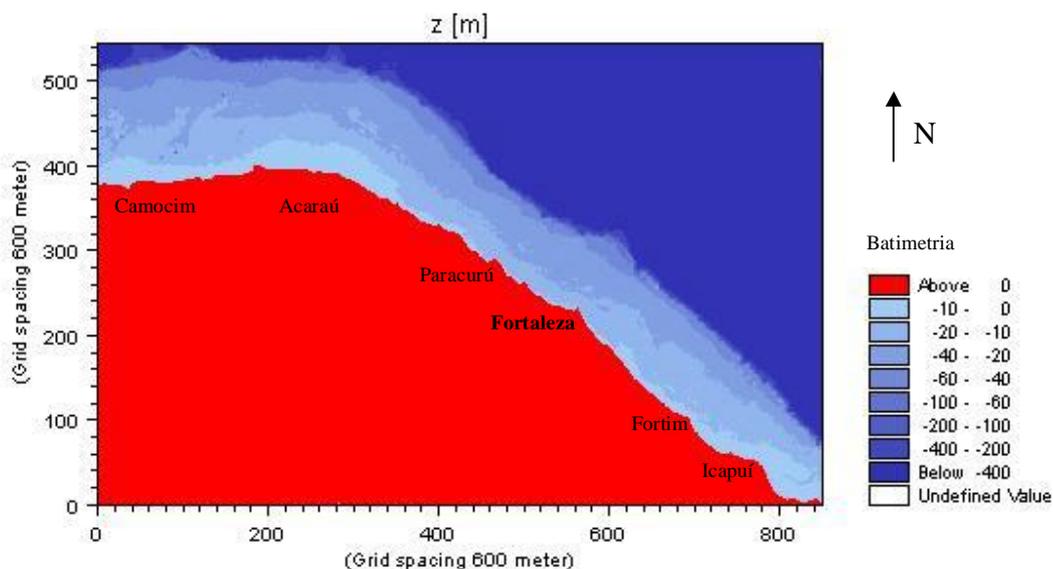
Esta etapa consistiu na compilação das fontes cartográficas, dentre o material da plataforma, através das folhas de bordo produzidas pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação). Foram utilizados os valores de profundidade e as coordenadas UTM dos pontos, digitalizados a partir das folhas de bordo da DHN, gerando tabelas em formato ASCII, que foram exportadas para o *SURFER*, programa modelador de superfícies. Este programa permitiu a interpolação dos dados pontuais ao longo da plataforma continental, criando a superfície de fundo oceânico relativa à plataforma cearense. Assim, foram produzidos mapas de curvas isobatimétricas, com resolução elevada, a partir dos quais foi elaborada a base de entrada morfológica (X,Y,Z) para o programa de simulação das ondas.

Esta fase foi de fundamental importância na preparação do modelo numérico, porque o mapa batimétrico representa a base de utilização do programa. Os dados no formato XYZ foram assim introduzidos no programa *MIKE 21*, dando origem ao mapa batimétrico da área, com uma resolução espacial suficiente a obter a precisão necessária ao estudo.

Como a área apresenta uma extensão elevada (573 Km) foram inicialmente definidas três grandes áreas de maior extensão para a análise das dinâmicas do oceano em mesoescala (figura 15). Dentro destas porções extensas do litoral foram posteriormente extraídas áreas de extensão mais limitadas (até 40-50 Km), para o estudo dos fenômenos em pontos de maior interesse ambiental.

A dimensão do *grid* utilizado para a carta batimétrica e o *grid spacing*, que seria o espaçamento de cada ponto batimétrico interpolado, define a qualidade do mapa, no sentido que um *grid spacing* menor aumenta a resolução e o número de pontos calculados na simulação, mas também deixa o processamento dos dados mais vagaroso e demorado.

A figura 15 mostra a imagem da batimetria do litoral cearense, depois da interpolação feita com o *SURFER* e a elaboração com o *graphical editing* do *MIKE 21*.



**Figura 15-**Batimetria do Ceará elaborada com o *MIKE 21*.

#### 4.4 Modelo numérico

As simulações compreendem o tratamento prévio dos dados de campo, a utilização destes dados de forma integrada, visando a construção do modelo de funcionamento do sistema costeiro através de simulação, utilizando os módulos: Hidrodinâmico, para as correntes e o *Parabolic Mild-Slope* (PMS), o *Nearshore Spectral Waves* (NSW), para as ondas, e o *MIKE 21 ST* e *LITPACK* para quantificação do sedimento transportado pelas correntes e pelas ondas. A

calibração dos modelos matemáticos para as condições reais e sua interpretação posterior representam a primeira etapa para a obtenção dos resultados.

O módulo hidrodinâmico é a ferramenta básica do modelo, que permite simular variações do nível da água e do fluxo oceânico, em resposta às variações das forças introduzidas para calibragem do modelo e definição da área de trabalho. Estas variáveis são:

- *bottom shear stress*;
- *wind shear stress*;
- *barometric pressure gradients*;
- *coriolis force*;
- *momentum dispersion*;
- *sources and sinks*;
- *evaporation*;
- *flooding and drying*;
- *wave radiation stresses*;

Os módulos *Parabolic Mild Slope* e *Nearshore Spectral Waves* permitem a reprodução e análise da propagação das ondas na direção da costa, considerando os processos de refração, difração e *shoaling*. O modelo pode calcular as correntes induzidas pelas ondas, por meio da determinação da tensão de radiação (*radiation stress*), podendo também ser incluídas as variações de nível pelas marés e ventos. Nas áreas costeiras, onde a arrebentação e a difração são importantes, foram utilizados os modelos baseados no conceito de *momentum*.

A aplicação dos dois modelos conjuntamente (ondas + hidrodinâmico) permite incluir a descrição da propagação, *shoaling* e arrebentação das ondas, calculando:

- as forças dirigidas (*driving forces*) em função do gradiente da tensão de radiação;
- o balanço nas direções transversal e longitudinal do *momentum*;
- as modificações do nível médio do mar (*set-up*);
- a velocidade da corrente longitudinal (*longshore drift*);

O módulo de transporte de sedimento, *MIKE 21 ST*, define o transporte do material do fundo oceânico, induzido pela corrente e pelas ondas ao longo da zona de interação com o fundo; é um modelo de cálculo do transporte total de sedimentos, através da soma do transporte de fundo e em suspensão. O transporte de material não-coesivo, como carga de fundo, é calculado pelo modelo apresentado por Engelund & Fredsøe (1976), que foi desenvolvido subsequentemente, para incluir a combinação de ondas e correntes, nas condições da zona de arrebentação.

O transporte de fundo é determinado em função da tensão de cisalha, através do fator adimensional  $\Phi$  :

$$\Phi = U_f^2 / (s-1)gd$$

Onde  $s$  é a densidade relativa do sedimento,  $g$  a aceleração da gravidade,  $d$  o diâmetro do grão e  $U_f$  a velocidade de cisalha. O método considera que o transporte de fundo corresponde à tensão de cisalha instantânea, induzida pela ação das ondas.

O transporte em suspensão é descrito por meio da concentração de sedimentos  $C$ , que é determinado pela equação de difusão turbulenta vertical:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [\hat{\Gamma}_s \frac{\partial C}{\partial z}] + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

$t$  é o tempo,  $z$  a coordenada vertical (zero no fundo),  $\hat{\Gamma}_s$  o coeficiente de difusão turbulenta e  $w$  é a velocidade de sedimentação (“*settling*”) do sedimento. O fator  $\hat{\Gamma}_s$  é considerado como igual à velocidade turbulenta do campo de fluxo. A condição limite próximo ao fundo é assumida como a concentração  $C_b$  no nível  $z = 2d$ .  $C_b$  é determinado como função de  $\Phi$  usando as considerações dinâmicas propostas por Bagnold (1954), que requer uma certa concentração de sedimentos próxima ao fundo para transferir a tensão de cisalha, através da interação entre os grãos.

#### 4.5 Sensoriamento remoto

Neste trabalho foram utilizadas as imagens digitais multiespectrais do satélite *Landsat 7 ETM+* na faixa espectral do visível-infravermelho (*VISIR*, com resolução espacial de

30 m), e pancromática (PAN, com resolução espacial de 15 m), georreferenciadas para o datum horizontal SAD 69.

O *software* para processamento digital das imagens foi o ENVI *The Environment for Visualizing Images* versão 3.5 e para a integração de dados georreferenciados o *software* ArcGIS versão 8.1.

O *Landsat 7 ETM+* é o mais recente satélite em operação do programa *Landsat*, financiado pelo Governo Americano. Este satélite foi lançado em abril de 1999, com um sensor a bordo chamado de ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus* – Mapeador Temático de Maior Realce). As imagens *Landsat 7 ETM+* são compostas por 8 bandas espectrais, que podem ser combinadas, formando diversas composições coloridas a fim de realçar as feições de interesse (Monteiro, 2005).

Neste trabalho, para localização das áreas de estudo, foi utilizada a composição RGB (*red-green-blue*) 321, que corresponde á visualização mais próxima ao natural, permitindo também, e isso foi importante no estudo das dinâmicas de massas oceânicas costeiras, a visualização das feições marinhas submersas rasas e plumas de descarga dos rios.

Utilizando o ENVI 3.5, é possível ressaltar a coloração da composição 321 permitindo evidenciar o transporte de sedimento induzido pelas correntes.

#### **4.6 Automated Coastal Engineering System - ACES**

O ACES é um sistema de *softwares* criado no ano 1986 pelo *Coastal Engineering Research Center* (CERC) com a função de obter uma ferramenta de informática pela gestão de problemáticas ligadas com a engenharia costeira.

Este programa contém vários modelos numéricos capazes de otimizar cálculos relativos à teoria das ondas, troca de energia entre atmosfera e oceano e comportamento de estruturas de proteção costeira.

Neste trabalho esta ferramenta foi utilizada em cálculos relativos à teoria das ondas, oferecendo a possibilidade de comparar dados de campo e dados simulados através do mencionado *software MIKE 21*.

## **5 DADOS OCEANOGRÁFICOS RELATIVOS AO LITORAL CEARENSE**

Os dados oceanográficos utilizados na análise prévia e na calibração do modelo numérico *MIKE 21* são dados coletados pelo INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias) no período de 1997-2003 através da estação anemométrica localizada no Pecém e o ondógrafo *Waverider* posicionado fora do porto em água profunda a uma profundidade aproximada de 18 m para medição dos dados das ondas incidentes na costa e das marés. Aqui serão apresentados os dados analisados para definir as características principais da região e a metodologia para poder utilizar estes dados na calibração da ferramenta de estudo, o modelo hidrodinâmico.

### **5.1 Dados correntométricos relativos ao ano 1999 (VBA CONSULTORES)**

Nos anos 1997-1999, durante a construção do porto do Pecém, foram coletados dados oceanográficos para identificar as características físicas marinhas da área.

Estes dados encontram-se no Relatório dos ESTUDOS OCEANOGRÁFICOS, desenvolvidos pela VBA CONSULTORES, no âmbito do Contrato nº 25/99 – ASJUR – CAGECE para elaboração dos PROJETOS BÁSICOS E EXECUTIVOS DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DA ÁREA DO COMPLEXO INDUSTRIAL DO PECÉM, COM ESTUDOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA E AVALIAÇÃO AMBIENTAL, modificado pela Proposta de Aditivo ao contrato supracitado, a qual prevê ajuste dos prazos dos estudos, serviços e da concepção dos projetos em função das novas condições estabelecidas no Novo Plano Diretor (junho/2000) para a infra-estrutura do Complexo Industrial e Portuário do Pecém – CIPP e do Termo de Referência Complementar Específico para a Elaboração do RTP de Macro e Micro drenagem e Projeto Básico de Macro-drenagem.

O Relatório da VBA CONSULTORES mostrou resultados correntométricos relativos às estações localizadas nos seguintes pontos (quadro 2):

**Quadro 2** - Pontos de medição de corrente no estudo da VBA (coordenadas UTM).

Pontos	Coordenadas		Pontos	Coordenadas	
	Oeste	Norte		Oeste	Norte
<b>A</b>	524821,0988	9610313,1556	<b>G</b>	523631,3576	9612568,0427
<b>B</b>	524433,2260	9609997,6328	<b>H</b>	522855,6119	9611936,9971
<b>C</b>	524893,4489	9611016,5513	<b>I</b>	522467,7390	9611621,4743
<b>D</b>	524262,4032	9611792,2970	<b>J</b>	523000,3120	9613343,7884
<b>E</b>	523486,6575	9611161,2514	<b>K</b>	522224,5663	9612712,7428
<b>F</b>	523098,7847	9610845,7286	<b>L</b>	521836,6930	9612397,2200

Os referidos pontos foram locados na área de lançamento dos efluentes, procurando-se, com os dados registrados, representar satisfatoriamente as condições de mar locais. As medidas se efetivaram a partir de dois metros do fundo, no sentido do fundo para a superfície, sendo realizadas a cada dois metros.

Foram feitas medidas em campanhas de inverno e de verão para as marés de quadratura e de sizígia. Na maré de quadratura a distribuição das direções de correntes máximas se encerra no quadrante entre 254° e 336° W-N, em relação ao Norte verdadeiro. Considerando-se o alinhamento da praia e a situação física do segmento marítimo adjacente à água costeira do Pecém, há uma tendência do regime de correntes se desenvolvendo acompanhando as batimétricas.

Para as marés de sizígia, a distribuição das direções de correntes máxima também se localiza no quadrante W-N. As profundidades onde aconteceram valores menores do que o ângulo de direção de desenvolvimento das correntes foi exatamente nos valores de 18m (quadratura) e 20m (sizígia) do fundo, demonstrando a extrema influência do vento sobre o sistema de correntes local. As velocidades das correntes medidas foram, nas diversas profundidades, com valores entre 0,04 e 0,5 m/s.

Sempre segundo a VBA CONSULTORES, tomando como base as informações entre os 2 e 6 m do fundo de todos os pontos de medições, é notável que ocorre numa concentração de velocidades entre 0,08 e 0,20 m/s, tanto nas marés de sizígia, quanto nas marés de quadratura.

A 8-10 m do fundo, houve um aumento da velocidade da corrente, com valores entre 0,12 e 0,28 m/s na situação de quadratura, enquanto que mantendo valores de 0,08-0,20 m/s para maré de sizígia.

A 12 m do fundo, apresenta-se um aumento das velocidades das correntes durante a maré de quadratura, com valores 0,28-0,32 m/s, enquanto que durante a fase de sizígia, tal ocorrência não se observa, mantendo-se as concentrações de frequência entre 0,08 e 0,20 m/s.

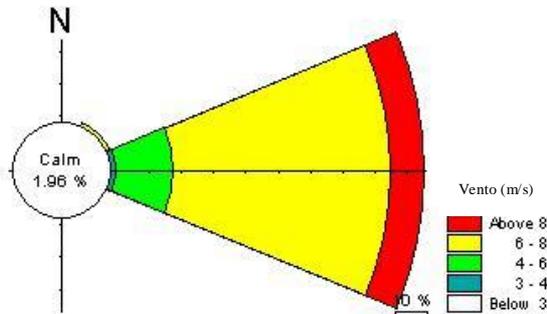
Na parte mais superficial, de 14 m do fundo até a superfície, se verifica a tendência de aumento das velocidades, mostrando fisicamente a influência do vento sobre o deslocamento das massas d'água com valores mais elevados (até 0,52 m/s) na superfície.

## **5.2 Dados de vento**

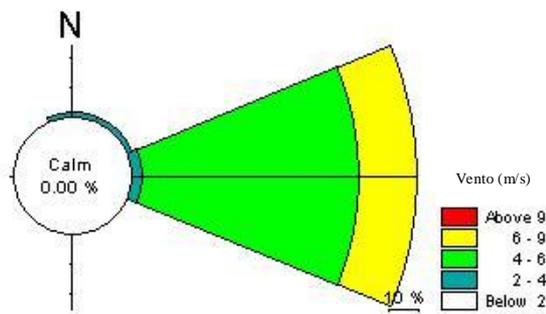
O local do projeto é caracterizado por um clima de ventos estável. A velocidade e as direções dos ventos são bastante constantes ao longo do ano e a direção principal do vento esta entre as diretrizes NE-SE (figuras 16, 17, 18, 19), as velocidades mais frequentes estão entre 6-9 m/s de ESE e normalmente caracterizam os meses de inverno austral, a partir de maio até dezembro.

O vento é responsável pela geração de vagas na região, as quais têm um papel importante no balanço litorâneo de sedimentos. Além disso, a geração nas áreas rasas de correntes provocadas pelos ventos, e o transporte de sedimentos a elas associadas, podem ser importantes para o balanço anual de sedimentos.

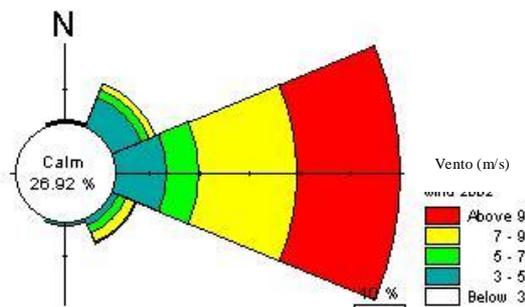
Os dados de vento utilizados pela análise prévia da área mostraram a periodicidade dos valores de medição, direção e intensidade. As rosas dos ventos anuais baseadas em medições diárias e relativas aos anos 2000, 2001, 2002, 2003 (INPH), com valores expressos em m/s são apresentadas nas figuras 16, 17, 18 e 19.



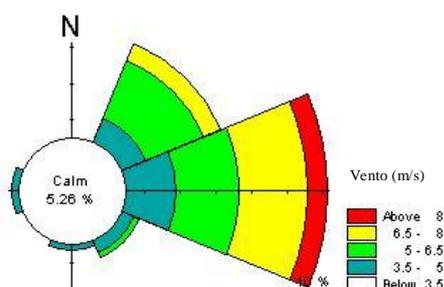
**Figura 16-**Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2000 (setembro/dezembro).



**Figura 17 -** Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2001.



**Figura 18 -** Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2002.



**Figura 19** - Rosa dos ventos (m/s) relativa ao ano 2003 (janeiro e fevereiro).

A intensidade do vento é classificada segundo a escala de *Beaufort* (Quadro 3), segundo a qual é possível identificar a sua velocidade e os efeitos resultantes das ventanias no mar e em terra. Foi desenhada pelo meteorologista britânico Francis Beaufort no início do século XIX. Na década de 1830, a escala de *Beaufort* já era amplamente utilizada pela *Royal Navy* do Reino Unido.

**Quadro 3** - Classificação dos ventos segundo a escala de *Beaufort*

Grau	Designação	km/h	Aspecto do mar	Efeitos em terra
0	<i>Calmaria</i>	0 a 1	Espelhado	Fumo sobe na vertical
1	<i>Bafagem</i>	2 a 6	Pequenas rugas na superfície do mar	Fumo indica direção do vento
2	<i>Aragem</i>	7 a 12	Ligeira ondulação sem rebentação	As folhas das árvores movem; os moinhos começam a trabalhar
3	<i>Fraco</i>	13 a 18	Ondulação até 60 cm, com alguns <i>carneiros</i>	As folhas agitam-se e as bandeiras desfraldam ao vento
4	<i>Moderado</i>	19 a 26	Ondulação até 1.5 m, <i>carneiros</i> frequentes	Poeira e pequenos papéis levantados; movem-se os galhos das árvores
5	<i>Fresco</i>	27 a 35	Ondulação até 2.5 m, muitos <i>carneiros</i>	Movimentação de árvores pequenas; superfície dos lagos ondula
6	<i>Muito Fresco</i>	36 a 44	Ondas grandes até 3.5 m; borrifos	Movem-se os ramos das árvores; dificuldade em manter um guarda chuva aberto
7	<i>Forte</i>	45 a 54	Mar revolto até 4.5 m com espuma e borrifos	Movem-se as árvores grandes; dificuldade em andar contra o vento
8	<i>Muito Forte</i>	55 a 65	Mar revolto até 7.5 m com rebentação e faixas de espuma	Quebram-se galhos de árvores; circulação de pessoas difícil
9	<i>Duro</i>	66 a 77	Mar revolto até 9 m; borrifos afetam visibilidade	Danos em árvores; impossível andar contra o vento
10	<i>Muito Duro</i>	78 a 90	Mar revolto até 12 m; superfície do mar branca	Árvores arrancadas; danos na estrutura de construções

11	Tempestade	91 a 104	Mar revolto até 14 m; pequenos navios sobem nas vagas	Estragos abundantes em telhados e árvores
12	Furacão	> 105	Mar todo de espuma; visibilidade nula	Grandes estragos

Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Escala\\_de\\_Beaufort](http://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Beaufort)

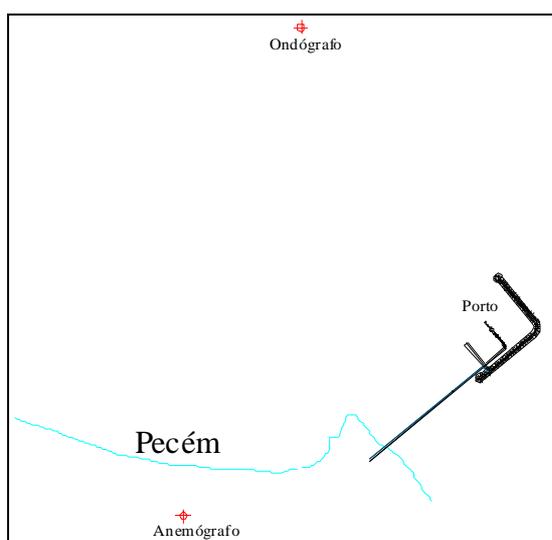
### 5.3 Dados de ondas

As características do regime de ondas atuantes na área são baseadas no monitoramento realizado no período de 1997 a 2003, realizado por o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH), na estação do Pecém.

O ondógrafo está localizado na profundidade de 18 m em um ponto ao largo da ponta do Pecém (figura 20) nas seguintes coordenadas:

**Latitude:** 03° 29' 31" S.

**Longitude:** 38° 49' 03" W.



Fonte Rabelo, 2004

**Figura 20**— Localização do ondógrafo e anemógrafo do Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária (INPH).

Para o período acima citado, pode-se concluir que ao longo do ano ocorrem dois climas de ondas principais, ou seja, um formado pelas ondas geradas no Atlântico norte (*swell*), com direção D entre 15° a 70°, e, o outro, formado por ondas geradas próximas à costa (*sea*), com

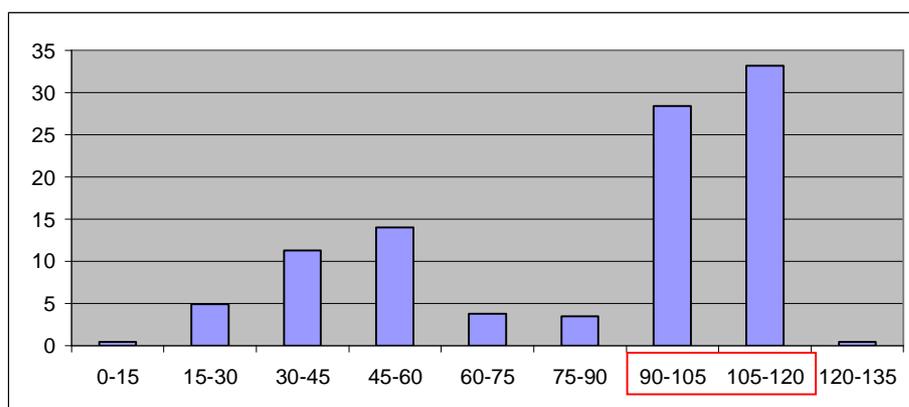
direção entre 70° e 120°. Entre dezembro e abril a incidência do clima de ondas gerada no Atlântico norte (*swell*) é mais intensa, decaindo sua intensidade nos meses seguintes.

No mês de agosto do período monitorado normalmente não ocorreu nenhuma onda de *swell*, com direção entre 15° e 70°, e toda a incidência se concentra entre 90° a 120° caracterizando bem o único clima de *sea* nesse mês.

A altura significativa de onda, com frequência dominante, foi de 1,25 a 1,50 m e raramente excede 2m. A frequência acumulada de altura de onda que não excede 1,0m foi de 7,2%, 1,5m foi de 66,3% e 2,0m foi de 96,8%. O período de onda dominante foi de cerca de 5 a 6 segundos. Porém, ondas de longo período (mais de 10 s) apareceram com a frequência de cerca de 20%.

Os dados do INPH analisados no porto do Pecém foram considerados constantes e válidos para a inteira área de estudo, porque atualmente não existem medidas de longo prazo e pontuais ao longo de todo o litoral do Ceará.

Para a calibração do modelo numérico foi extraído um gráfico com os eventos significativos de onda com altura significativa, período e direção mais freqüente (figura 21), que foram inseridos no modulo PMS e NSW do MIKE 21 para a elaboração das simulações.

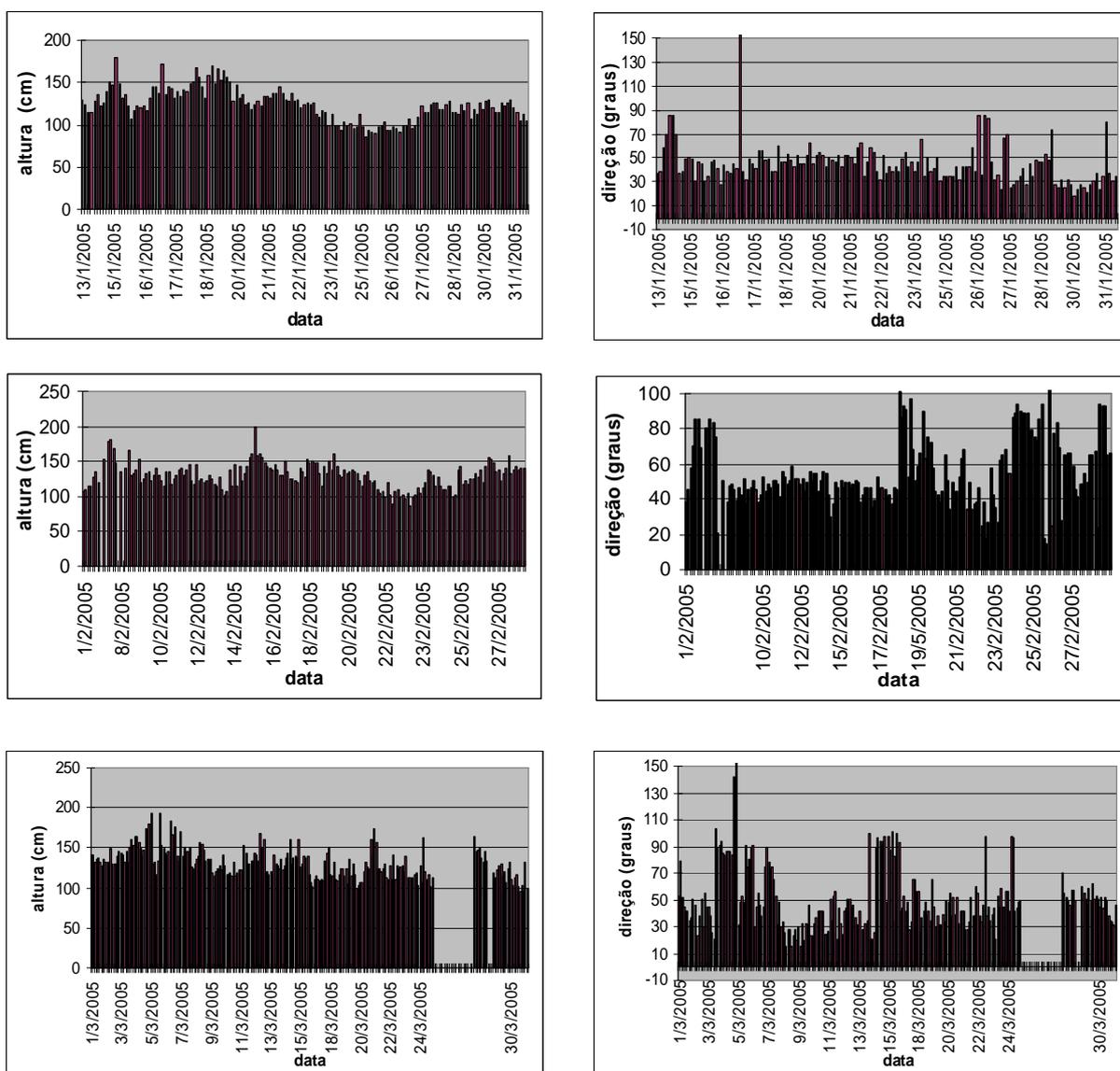


Fonte: Rabelo, 2004

**Figura 21**-Gráfico das direções mais freqüentes de ondas nos anos 1997-2000.

Na figura 22 são resumidos os dados de onda medidos pelo ondógrafo do porto do Pecém, nos meses de janeiro/março de 2005.

Tendo em consideração que a intensidade dos ventos alísios no período mencionado é mais baixa que no inverno austral (junho-dezembro), pode-se notar como a altura das ondas medidas nos três meses ficou entre 1 m e 1,5 m, e a direção variável entre 40°-70° para janeiro, 50°-100° para fevereiro e 30°-90° para março. Este último mês de medição mostra umas condições de tipo *swell* evidenciado por ondas maiores e com direção média mais próxima ao norte e portanto menos influenciadas por ventos alísios, como na temporada invernal.

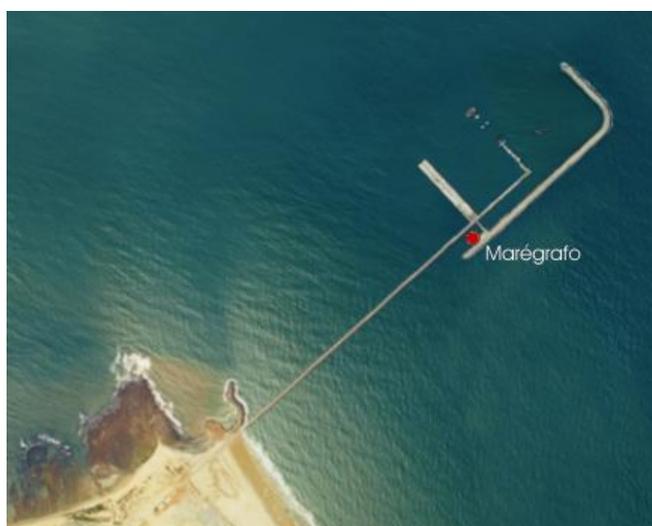


**Figura 22** - Altura e direção das ondas medidas pelo ondógrafo do porto do Pecém em janeiro, fevereiro e março de 2005.

#### 5.4 Dados de marés

As medidas de marés foram obtidas através do marégrafo do tipo linigrafo LNG-15M instalado no Pecém pertencente ao INPH. O marégrafo encontra-se localizado no lado esquerdo à estrutura de acesso ao quebra-mar (figura 23) com as seguintes coordenadas:

- Latitude: 3° 32' 8.24'' S
- Longitude: 38° 47' 52.98'' W



Fonte: Rabelo, 2004

**Figura 23-** Localização do marégrafo do Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária (INPH)..

O marégrafo utilizado pelas medições no porto do Pecém é do tipo digital, os dados são registrados de 2 em 2 minutos a 5 em 5, de forma que os dados em um mês atingem cerca de 16.981.

O regime de marés na região pode ser caracterizado como de meso-marés de periodicidade semi-diúrna; a amplitude média registrada pelo marégrafo tem oscilações aproximadas entre -20 e 320 cm em referimento ao M.S.L. (*mean sea level*) com valores médios da ordem de 155 cm.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Hidrodinâmica Litorânea

A dinâmica das correntes para o litoral cearense, imposta por os ventos alísios com intensidade entre 5 e 8 m/s, tem uma direção resultante concordante com aquela dos ventos, que é cerca de 90-100 graus com relação ao norte e constante ao longo do ano.

Como evidenciado pelas simulações feitas nas três grandes áreas da costa cearense, extremo oeste, oeste e leste, o fluxo de água tem uma direção praticamente paralela à costa nos três grandes setores evidenciados, criando fluxos mais intensos em proximidade da costa pela junção de dois efeitos: as linhas batimétricas mais aproximadas e as correntes litorâneas induzidas pelas correntes longitudinais (*longshore drift*).

As simulações usaram como forçante apenas o efeito do vento sobre a superfície do oceano, sem considerar o efeito conjunto do vento e do “*radiation stress*” pelas ondas.

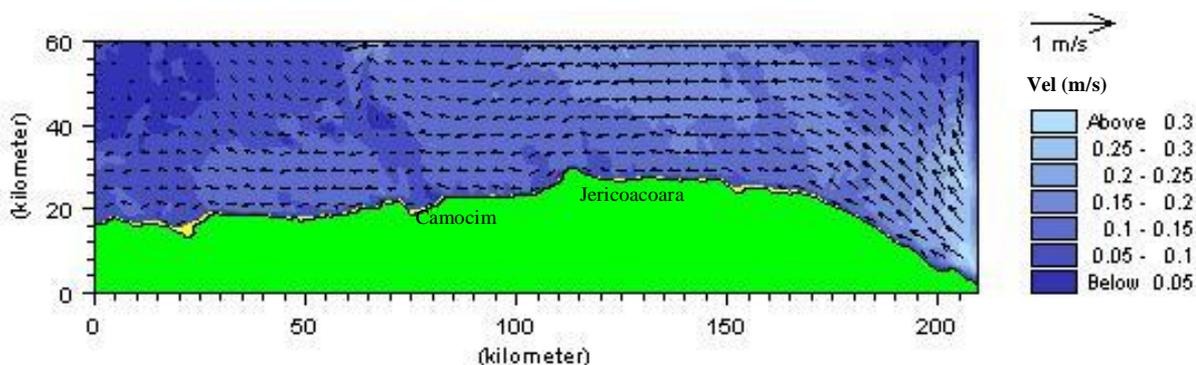
As simulações foram realizadas sob a hipótese de condições permanentes, ou seja, o nível de água foi considerado constante ao longo do tempo para cada simulação; a resistência do fluxo foi definida através do número de *Manning* M.

A rugosidade de fundo foi tomada como  $33 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ , nas áreas arenosas, com base na experiência de outros estudos semelhantes realizados pelo INPH/DHI (1997).

A própria conformação do litoral na porção do extremo oeste, onde, nas proximidades de Acaraú a linha de costa tem uma direção leste-oeste, o vento assume uma componente mais terral, e o fluxo da água também tem uma tendência de se afastar da costa, sobretudo na zona “*offshore*”, onde a profundidade tem menos influência sobre o fluxo.

Na simulação relativa a esta porção do litoral, a corrente se dispõe paralela às isóbatas, diminuindo a intensidade do fluxo; a figura 24 mostra uma componente no sentido do mar aberto, gerando condições ótimas para a sedimentação (a plataforma continental aparece mais extensa devido aos processos sedimentares) e a dispersão de poluentes em alto mar. Na figura nota-se também o comportamento pouco verdadeiro do fluxo nas proximidades da “*west open boundary*”, onde tem uma leve tendência a se direcionar para o norte, devido ao efeito da mesma. Algumas irregularidades no comportamento do fluxo ao longo das “*open boundaries*”

leste e oeste (derivações para o norte do fluxo) evidenciadas nas simulações são devidas às condições de contorno, definidas na calibração do modelo, onde se assume o fluxo localmente como 1D ao invés de 2D; as “*open boundaries*” são consideradas como fechadas e não se considera água entrando ou saindo por elas.



**Figura 24** - Hidrodinâmica costeira do litoral extremo oeste.

A figura 25 mostra a dinâmica e a intensidade do fluxo ao longo do litoral oeste, de Fortaleza até Flexeiras – Mundaú - Praia da Baleia, evidenciando a direção paralela à costa na zona mais próxima ao litoral, enquanto que se nota uma dispersão e uma redução de intensidade no mar aberto.

Na figura 26 é representada uma imagem do satélite *LANDSAT* (bandas 3-2-1) da barra do Ceará (extremo oeste de Fortaleza) que evidencia a saída de sedimento da barra do rio e o sentido do transporte litorâneo induzido por ventos e ondas.

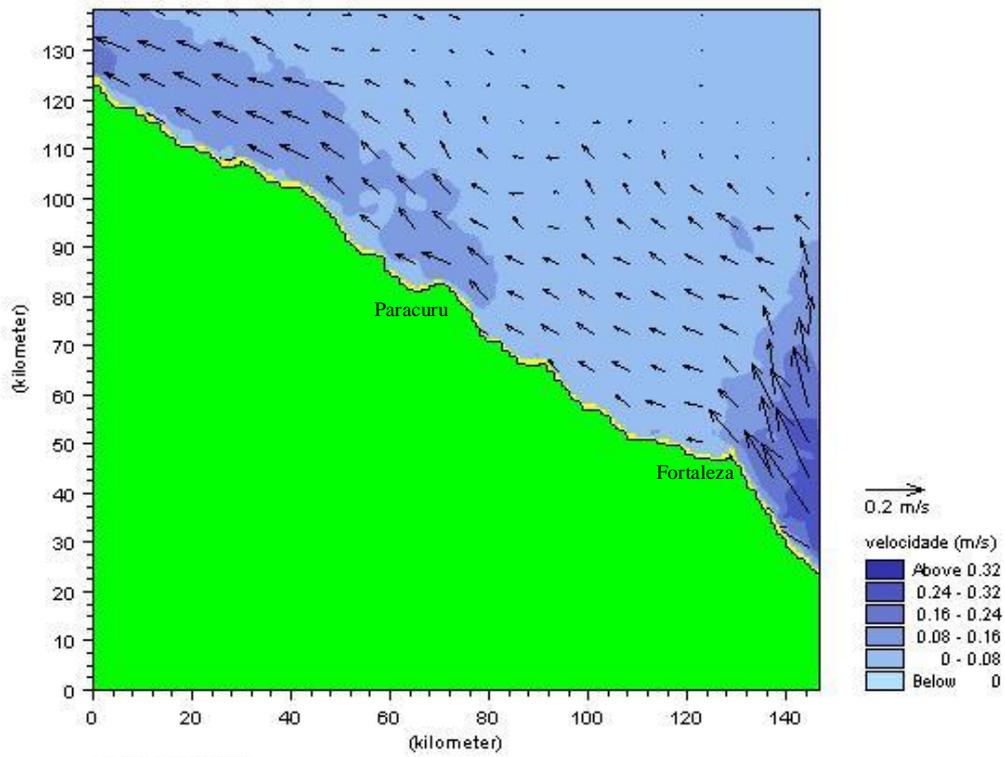


Figura 25-Hidrodinâmica costeira do litoral oeste.



Figura 26-Hidrodinâmica costeira do litoral de Caucaia na imagem LANDSAT 7 ETM+.

A figura 27, que mostra a simulação das correntes para o litoral leste, evidencia um fluxo com intensidade maior na parte mais meridional do trecho de litoral, enquanto os valores médios das velocidades estão entre 0,15-0,20 m/s para o resto do trecho analisado. Os resultados mostram vetores localizados na faixa da plataforma, isso porque o tempo utilizado nas simulações (2-3 dias) demonstrou-se relativamente curto para evidenciar a dinâmica do fluxo no mar aberto, devido às altas profundidades, mas suficiente para evidenciar o efeito do vento sobre a superfície do oceano, para a parte de plataforma continental.

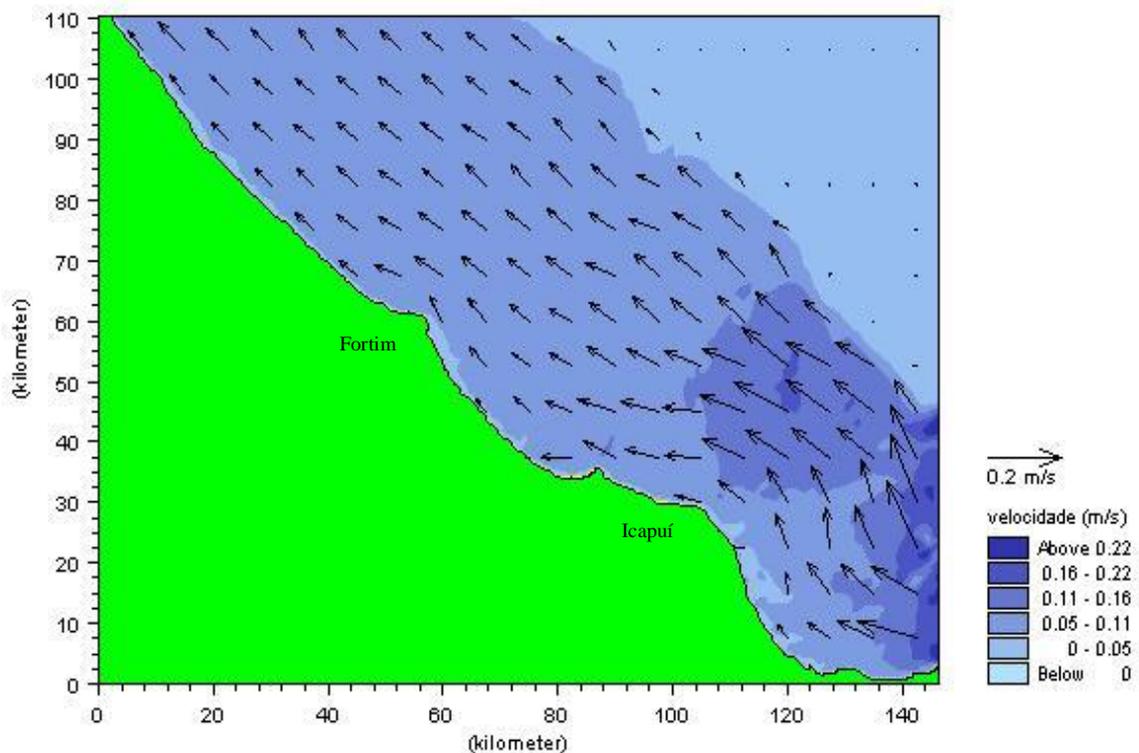


Figura 27-Hidrodinâmica costeira do litoral leste.

## 6.2 Clima de onda

Na elaboração das simulações das ondas foram introduzidos no modelo numérico, os parâmetros básicos das ondas como altura quadrática média ( $H_{rms}$ ), período de pico ( $T_{peak}$ ) e direção (MWD), que entram pelo limite aberto do mapa (*offshore boundaries*).

Aqui é reportada uma tabela (tabela 1) das condições mais significativas utilizadas na calibração do modelo de simulações de clima de onda, na área de estudo:

**Tabela 1** - Eventos de ondas selecionados para a modelagem 2D.

Evento No.	$H_{significativa}$ (m)	$T_{peak}$ (sec)	MWD (deg)	Data do registro
<b>1</b>	<b>1,5-1-6</b>	<b>5-7</b>	<b>90-105</b>	<b>Ago-Set '97</b>
2	1,8-1,9	4-7	0-60	Jan-Fev '98
<b>3</b>	<b>2,0</b>	<b>5-6</b>	<b>105-120</b>	<b>Julho '00</b>
4	2,1	13-14	30-45	Dez '00
5	1,9	9-10	45-60	Abril '01

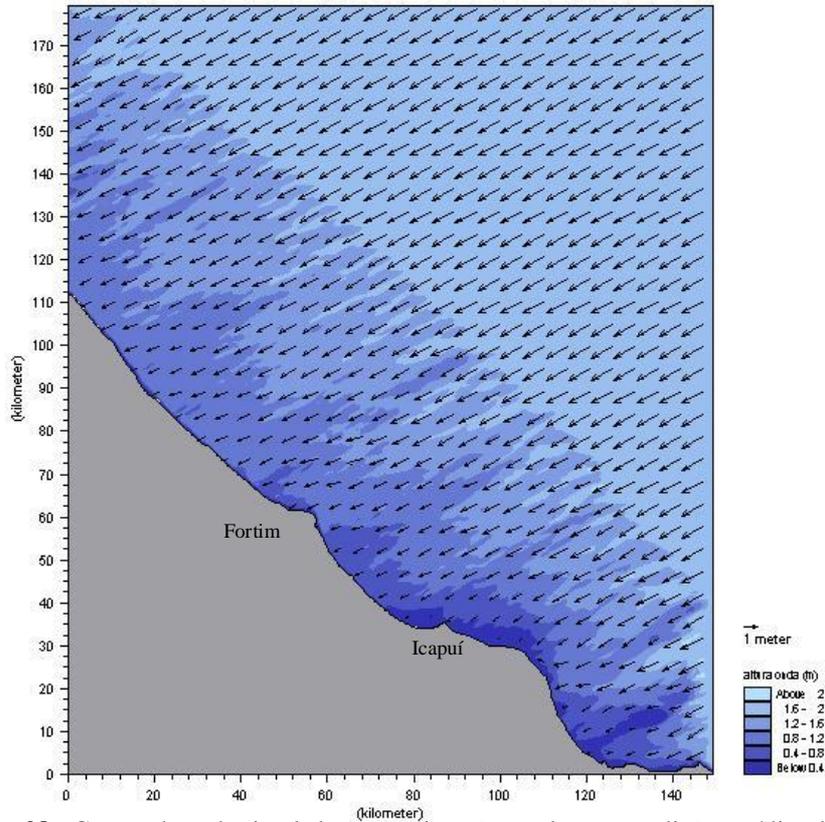
*Fonte: Dados do INPH relativos ao Porto de Pecém*

A tabela 1 mostra 5 eventos significativos, selecionados no período de 1997-2003, relativos aos dados do INPH. Dois eventos correspondem às condições de *sea* (casos 1 e 2), três aquelas de *swell* (casos 2, 3 e 4), que possuem menor frequência, porém maior intensidade e maior impacto ao longo da costa.

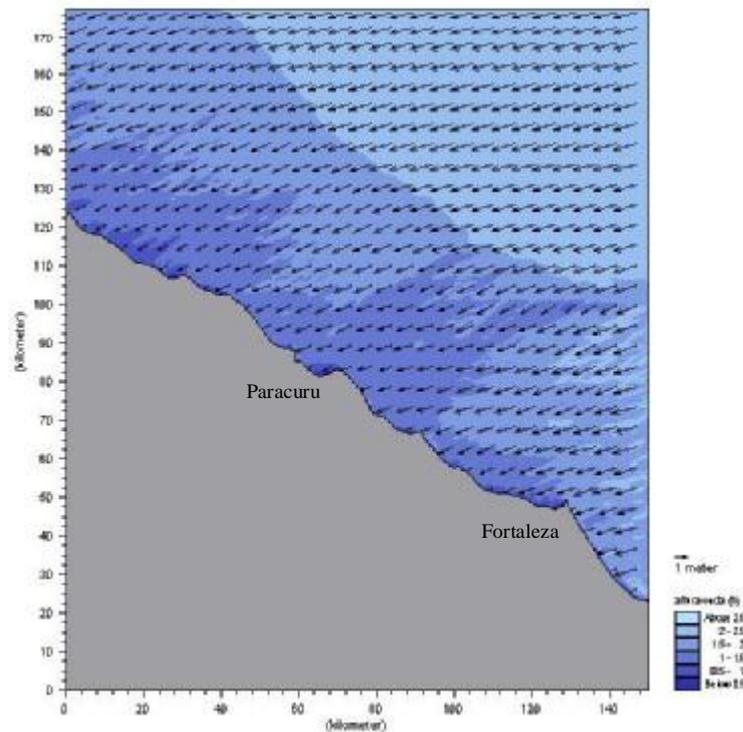
O modelo numérico calculou a variação espacial destes dados, fornecendo a resultante elaborada para o mapa batimétrico da área. O campo de tensões de radiação, associado com a arrebentação da onda, pode ser usado como um termo forçante nas simulações numéricas das correntes litorâneas. Para os outros parâmetros específicos do modelo foram dados valores *default*, baseados na experiência do DHI em outros estudos semelhantes.

Analisando o clima de onda geral nos três setores principais do litoral cearense (figuras 28-29-30), aparece bastante claro o fenômeno da refração, que se verifica para as frentes de onda provenientes do mar aberto e chegando próximo à costa. Assim, na profundidade que é da ordem de 20 m, a uma distancia aproximada de 15-25 km da costa, a interferência das ondas de altura média de 2 m, com o fundo, começa a ser importante, determinando mudanças na altura e na direção das mesmas. As figuras mostram as condições de *swell* com direção das ondas de

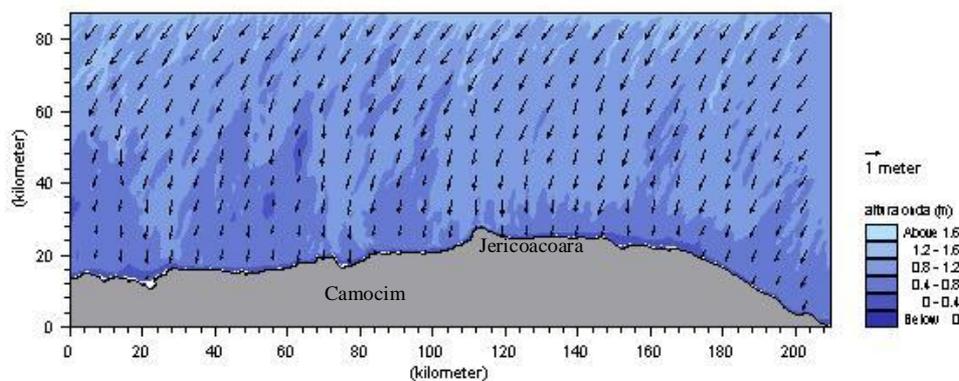
cerca 30-45 graus; estas condições verificam-se nos meses de verão austral por serem de intensidade maior e de menor duração ao longo do ano.



**Figura 28** - Campo de onda simulado para a situação atual, para condições médias de marés baixas. Condições ao largo:  $H_{m0} = 2,1$  m,  $T_p = 13-14$ s,  $MWD = 30-45^\circ$  N (caso 4).



**Figura 29**-Campo de ondas simulado para condições médias de marés baixas. Condições ao largo:  $H_{m0} = 2,1$  m,  $T_p=13-14$ s,  $MWD = 30-45^\circ$  N (caso 4).

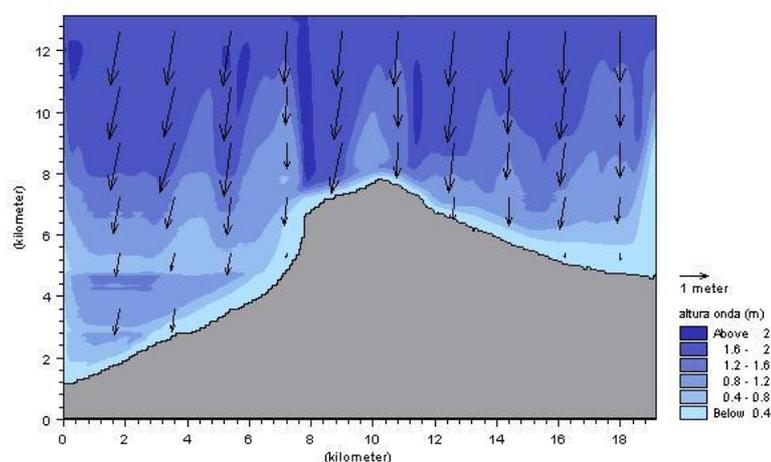


**Figura 30**-Campo de ondas simulado para condições médias de marés baixas. Condições ao largo:  $H_{m0} = 2,1$  m,  $T_p=13-14$ s,  $MWD = 15-30^\circ$  N .

Para evidenciar fenômenos que ocorrem em pontos específicos, é necessário preparar mapas mais detalhados dentro das três grandes porções (extremo oeste, oeste e leste). Assim, a largura do *grid* utilizado na preparação dos mapas batimétricos sendo da ordem de 50-60 m permite uma resolução maior, levando a um grau de semelhança mais próximo à realidade local. A figura 31 mostra um exemplo do campo de ondas simulado com o mapa de batimetria relativo

à ponta de Jericoacoara (334.764 E, 9.688.112 N). A altura significativa da onda na fronteira ao largo era 2,1 m, o período de pico, 14 segundos e a direção média da onda, ao largo, 30° N (onda tipo *swell*).

Na figura é visível o fenômeno da refração das ondas ao redor da ponta, mesmo sendo as ondas de pequena dimensão, não causam um fenômeno muito acentuado. As frentes de onda que convergem nas proximidades da ponta aumentam o potencial erosivo localizado, enquanto que se afastando da ponta, é visível o efeito contrário, pois os vetores têm direções divergentes.



**Figura 31**-Campo de onda simulado para a ponta de Jericoacoara (caso 4)

As simulações de onda para o litoral cearense, ofereceram um quadro geral dos parâmetros de ondas para a área de estudo, que possui somente dados de onda medidos no porto do Pecém. O trabalho permite identificar um dos processos que têm mais importância na estabilidade do litoral. Este processo de interação do oceano com o litoral, é responsável pela dinâmica do sedimento na plataforma continental.

## **6.3 Trabalho de campo com sonda ADCP**

### **6.3.1. Software utilizado na medição**

Durante a medição o ADCP foi conectado no computador de bordo para transmissão e recepção de dados em tempo real.

Os softwares utilizados para as medições (*Currentsurveyor e Riversurveyor*) são produzidos pela *Sontek*, fabricante do correntômetro, e permitem a visualização dos seguintes dados:

- Rumo do barco (a calibragem da bússola do ADCP é feita antes de qualquer medição);
- Direção da corrente (referente ao norte magnético ou ao sensor);
- Velocidade da corrente (no intervalo de 0,1 até 1000 cm/s  $\pm$  1,0%);
- Temperatura da água na profundidade do sensor ( $\pm$  0,1°C);
- Intensidade do sinal acústico;
- Batimetria detalhada ao longo do perfil navegado;
- Numero do perfil traçado;
- Data e hora da medição;
- Coordenadas geográficas do ponto de medição e do perfil (GPS ligado ao *ADCP* através do computador).

### **6.3.2. Primeira campanha de medição das correntes**

Nos dias 17 e 18 de maio de 2005 foram efetuadas duas campanhas de medição das correntes na Região Metropolitana de Fortaleza com o objetivo de coletar dados correntométricos relativos à área portuária do Mucuripe e do SDOES (Sistema de Depuração dos Esgotos Sanitários de Fortaleza).

No trabalho de campo foi registrado também um perfil de corrente na área ao longo do canal de acesso e no entorno do porto do Mucuripe, como evidenciado na figura 32.

Ainda de acordo com a figura 32, observam-se todos os perfis estudados neste trabalho de campo. O ponto 2 indica a saída do emissário submarino do SDOES (LABOMAR, 2005).

Os perfis estudados foram previamente desenhados sobre uma imagem *LANDSAT* ETM 7+. Durante a medição, as coordenadas geográficas dos pontos foram marcadas através de GPS portátil, modelo *Garmin* 76S, para, em seguida, serem plotados, propiciando melhor visualização no mapa.

As condições meteorológicas nos dias das medições indicaram um vento com velocidade entre 12 e 18 nós e com direção predominante de 100-120°.

As condições do mar apresentaram ondas de cerca 1,5 m de altura fora do porto no primeiro dia, e de 1,5-2,0 m no segundo, enquanto a sotavento do porto, o mar estava protegido pelo molhe do Mucuripe.

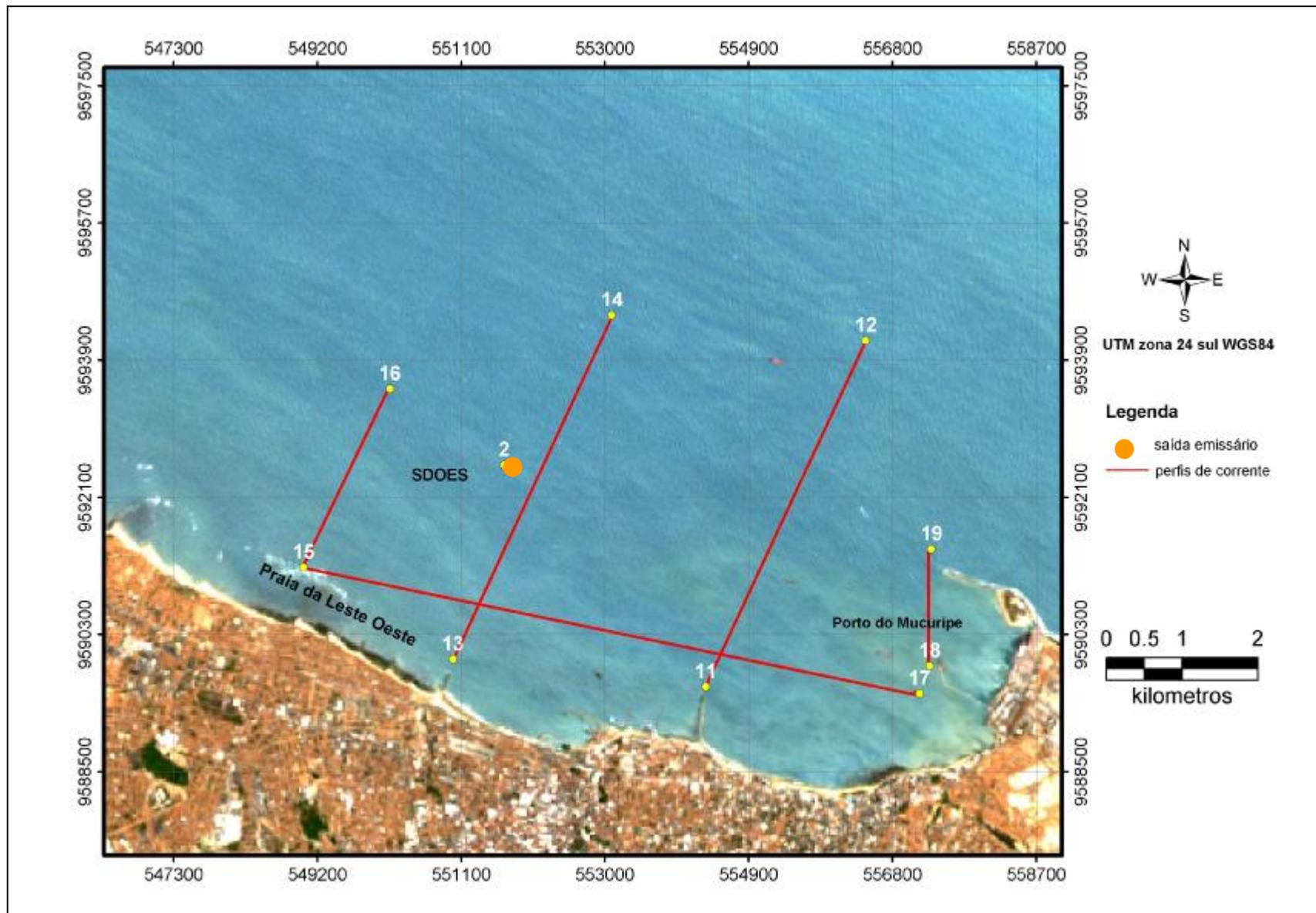


Figura 32-Mapa dos perfis de corrente, sobre imagem *Landsat ETM 7+*, da região metropolitana de Fortaleza, maio de 2005.

### 6.3.3. Perfil de corrente no canal de acesso ao Porto do Mucuripe

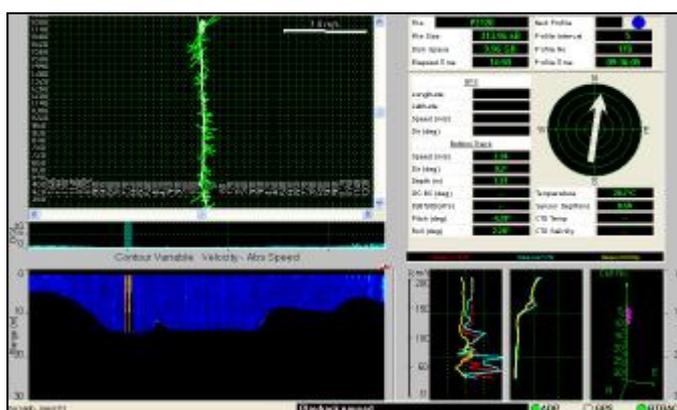
A figura 33 mostra o *layout* do software durante a medição ao longo do perfil feito a partir do ponto 18 até à altura do molhe do porto do Mucuripe (ponto 19).

A imagem evidencia a batimetria da entrada do Porto, o rumo do barco durante a medição, e a direita os dados obtidos, incluindo número do perfil, direção e intensidade da corrente, profundidade do fundo, temperatura da água, entre outros.

O perfil batimétrico apresenta um “*spike*” (falta de sinal ou pico fora do normal) nos dados devido à perda do sinal refletido pelo fundo marinho.

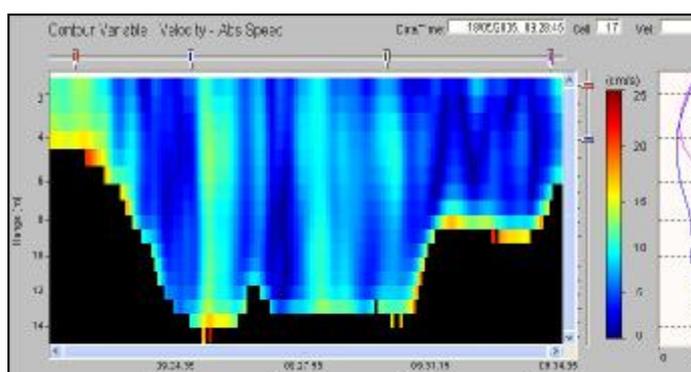
Este *spike* foi atribuído ao fato do barco ter passado muito próximo a uma embarcação de grande porte ancorada no porto nas proximidades do ponto 18. A presença deste barco pode ter afetado o funcionamento do aparelho devido as interferências magnéticas. Na figura 33, é possível notar o *layout* do *Software Currentsurveyor*, que evidencia o rumo do barco em relação às coordenadas geográficas, já corrigidas com a declinação magnética de 22° W para a área de estudo.

No perfil batimétrico da entrada do porto nota-se a parte de fundo dragada para alcançar uma profundidade maior e permitir a entrada dos grandes navios.

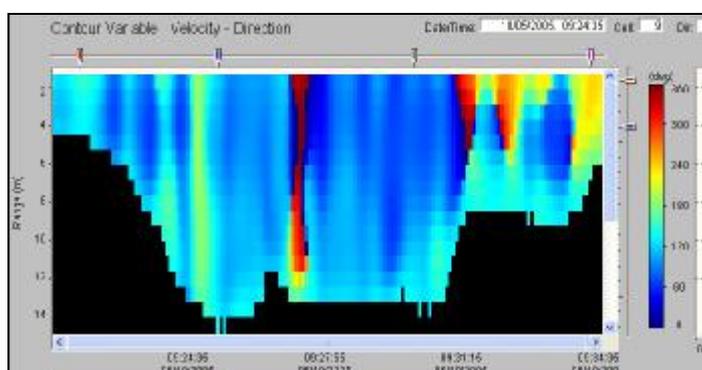


**Figura 33** – *Layout* do *Software currentsurveyor*, mostrando o perfil 18-19, correspondente à entrada do porto do Mucuripe.

Na tabulação dos dados, foi utilizado um outro software (*ViewADCP v.4.0*) para visualização dos resultados correntométricos, evidenciando os valores de direção e intensidade da corrente ao longo do perfil extraído (figuras 34-35).



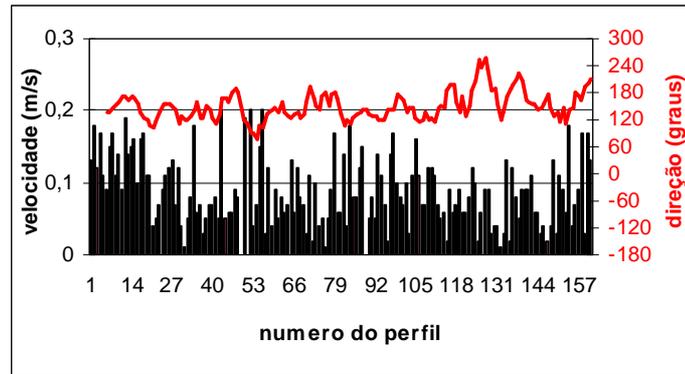
**Figura 34** – Velocidade da corrente (cm/s) no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe.



**Figura 35** - Direção da corrente (graus) no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe.

As figuras 36, 37 e 38 representam os dados do perfil percorrido no canal de acesso ao porto do Mucuripe, extraídos do arquivo gravado no ADCP e em seguida elaborados em planilhas eletrônicas tipo Excel.

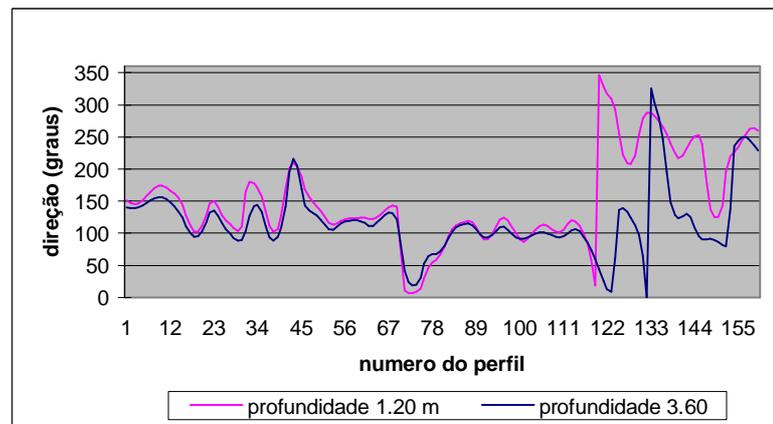
A figura 36 evidencia as variações, ao longo do perfil, da direção e da intensidade da corrente: os valores representam as médias calculadas ao longo da coluna d'água.



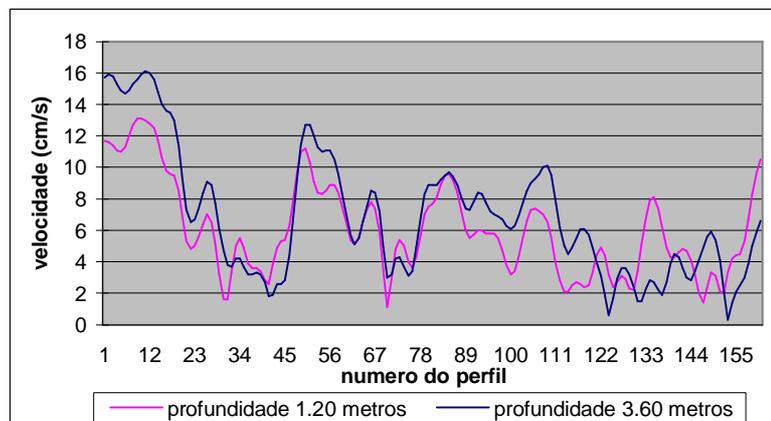
**Figura 36** - Velocidade e direção da corrente ao longo do perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe. A linha vermelha é uma linha de tendência dos valores de direção.

É interessante observar como os valores das velocidades variaram entre 0,04 m/s até 0,20 m/s com direção prevalecente no sentido S e SE.

As figuras 37 e 38 mostram a variação dos valores de direção e velocidade das correntes superficiais (referente à profundidade do sensor) e de fundo no perfil 18-19.



**Figura 37** - Direção (graus) da corrente no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe.



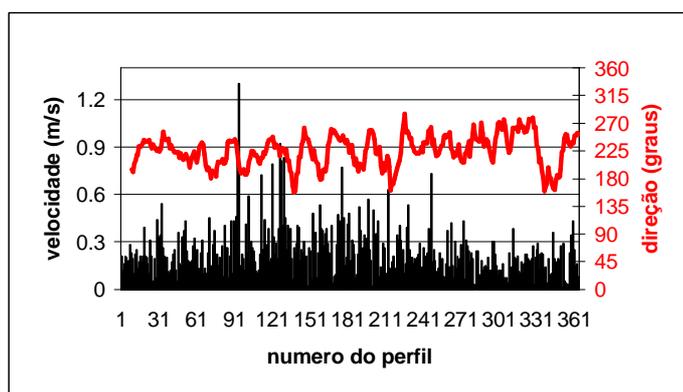
**Figura 38** - Velocidade da corrente (cm/s) no perfil 18-19, no canal de acesso ao porto do Mucuripe.

### 6.3.4. Perfis de corrente nas proximidades do SDOES

No dia 17 de maio de 2005 foram executados dois perfis nas proximidades do SDOES, em frente à Praia da Leste Oeste. Os perfis correspondem, na figura 32, aos pontos 14-13 e 15-16, e o ponto 2 representa a saída do emissário submarino de Fortaleza.

As condições oceanográficas, no dia de medição, eram de vento entres os 10 e 16 nós (4º grau da escala de *Beaufort*), com onda com altura de até 1,0-1,5 m.

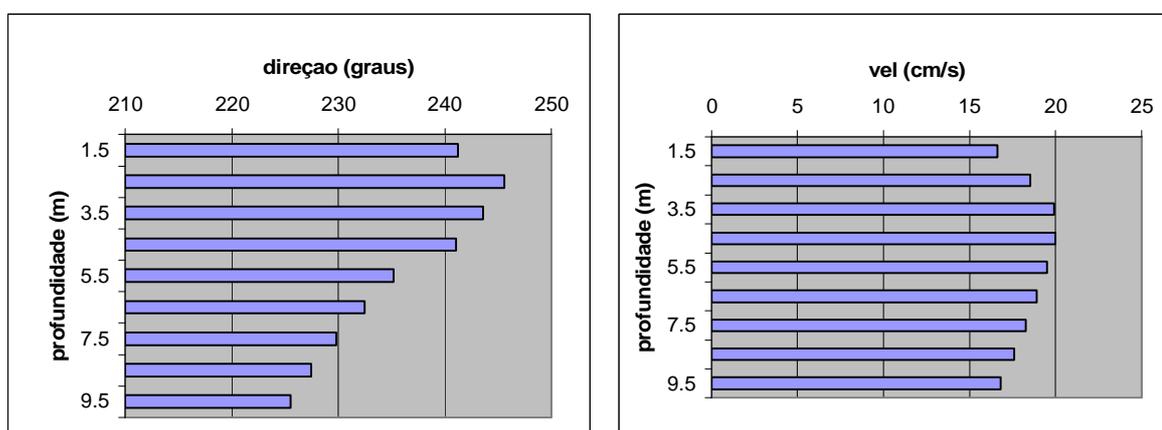
O trabalho de campo foi efetuado pela manhã, executando-se inicialmente o perfil do ponto 14 para o ponto 13 (figuras 39, 40); em seguida do ponto 15 para o 16 (figura 41, 42) e na volta para o porto do Mucuripe foi registrado o perfil 15-21 (figuras 43, 44 e 45).



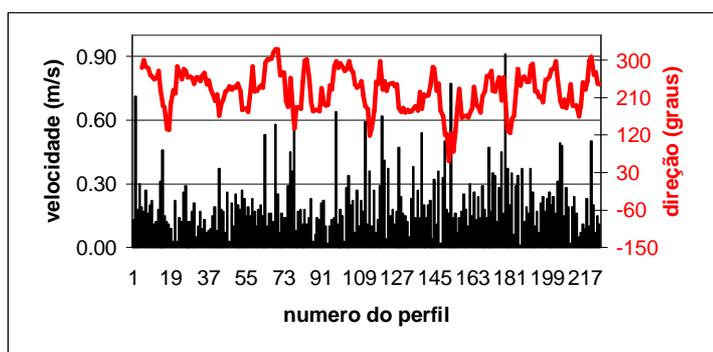
**Figura 39** - Valores médios ao longo da coluna de água de velocidade e direção da corrente no perfil 14-13. A linha vermelha é a linha de tendência da direção ao longo do perfil.

Através o *software* de processamento, foram extraídos, dos dados primários, os valores da direção e das intensidades das correntes nos diversos perfis, para a elaboração de gráficos.

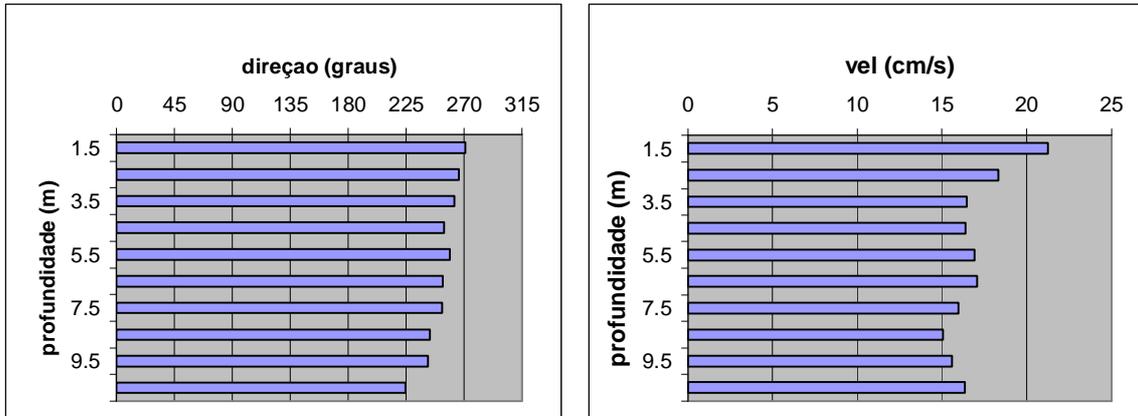
As figuras 40a, 40b, 42a, 42b e 44a e 44b, mostram a variação dos valores médios de direção e velocidade da corrente em função da profundidade, ao longo do perfil de cada célula de medição da sonda.



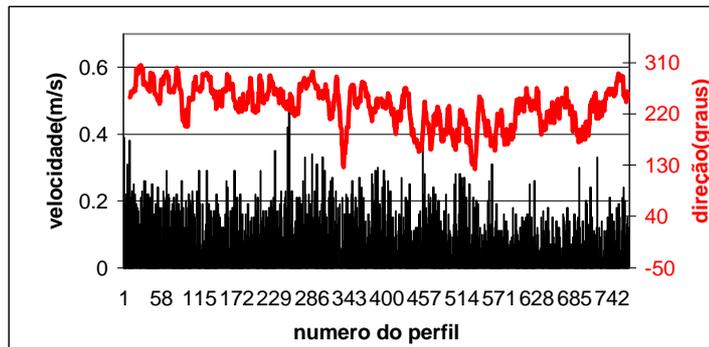
**Figura 40** (a,b)- Valores médios da direção e velocidade da corrente ao longo do perfil 14-13 em função da profundidade.



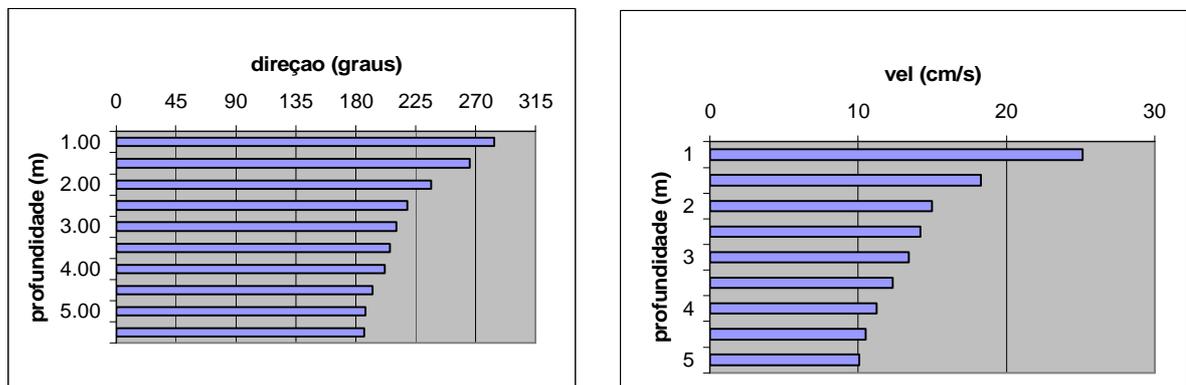
**Figura 41** - Valores médios ao longo da coluna de água de velocidade e direção da corrente no perfil 15-16. A linha vermelha representa a linha de tendência da direção ao longo do perfil.



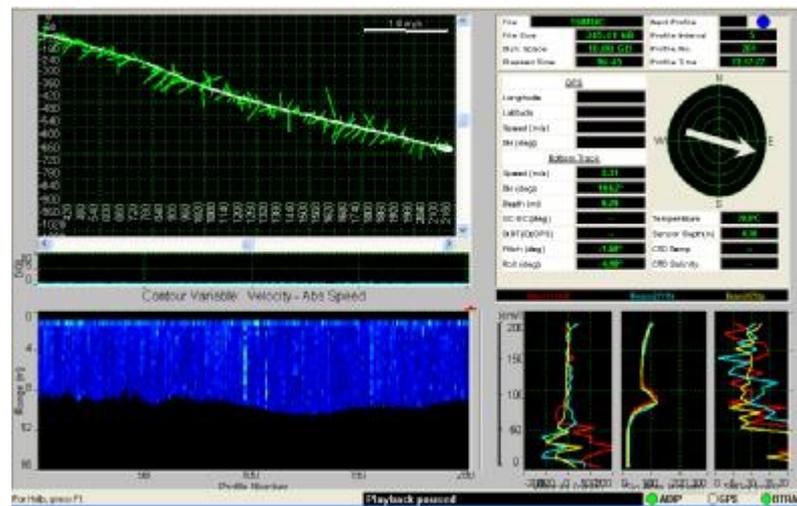
**Figura 42** (a,b)-Valores médios da direção e velocidade da corrente ao longo do perfil 15-16 em função da profundidade.



**Figura 43** - Valores médios ao longo da coluna de água de velocidade e direção da corrente no perfil 15-17. A linha vermelha é a linha de tendência da direção ao longo do perfil.



**Figura 44** (a,b)-Valores médios da direção e velocidade da corrente ao longo do perfil 15-17 em função da profundidade.

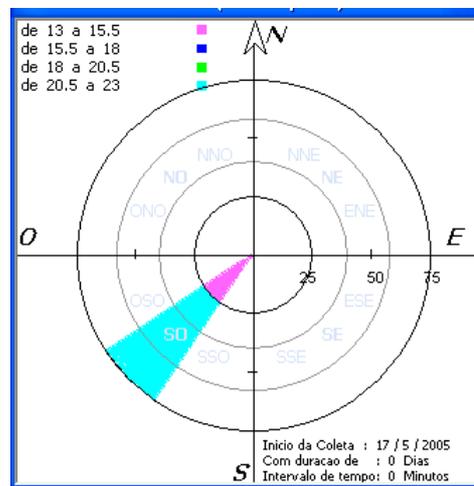


**Figura 45** – Perfil de corrente e batimetria entre os pontos 15 e 17 extraído do *software Currentsurveyor*.

A tabela 2 apresenta os valores médios da corrente ao longo dos perfis. As velocidades e as direções foram calculadas fazendo a média dos valores de cada célula ao longo da coluna de água, para a obtenção da média ao longo do perfil. Estes valores foram representados também em uma rosa das correntes (figura 46) para melhor visualização.

**Tabela 2** - Valores médios de velocidade e direção da corrente ao longo dos perfis registrados na região metropolitana de Fortaleza, maio de 2005.

<b>Perfil</b>	<b>Dia</b>	<b>Hora inicio</b>	<b>Hora termino</b>	<b>Vel. média corrente (m/s)</b>	<b>Dir. média corrente (graus)</b>
<b>18-19</b>	18	9:20	10:15	<b>0,09</b>	<b>150,26</b>
<b>12-11</b>	18	10:25	11:10	<b>0,21</b>	<b>232,72</b>
<b>14-13</b>	17	10:45	11:29	<b>0,23</b>	<b>225,40</b>
<b>16-15</b>	17	11:50	12:30	<b>0,21</b>	<b>226,75</b>
<b>15-17</b>	17	12:35	13:39	<b>0,13</b>	<b>234,55</b>



**Figura 46** – Rosa das correntes dos dados da tabela 2.

### **6.3.5. Campanha de medição de correntes em julho 2005**

No dia 7 de julho de 2005 foi efetuada a segunda campanha de medição das correntes na área do porto do Mucuripe e do SDOES. As condições meteorológicas apresentaram ventos com intensidade 8-12 nós e direção prevalecente de 90-100°. O trabalho começou pela manhã com condições de maré vazante. A baixa mar foi as 11:36, com altura de 0,4 m (fonte DHN, 2005).

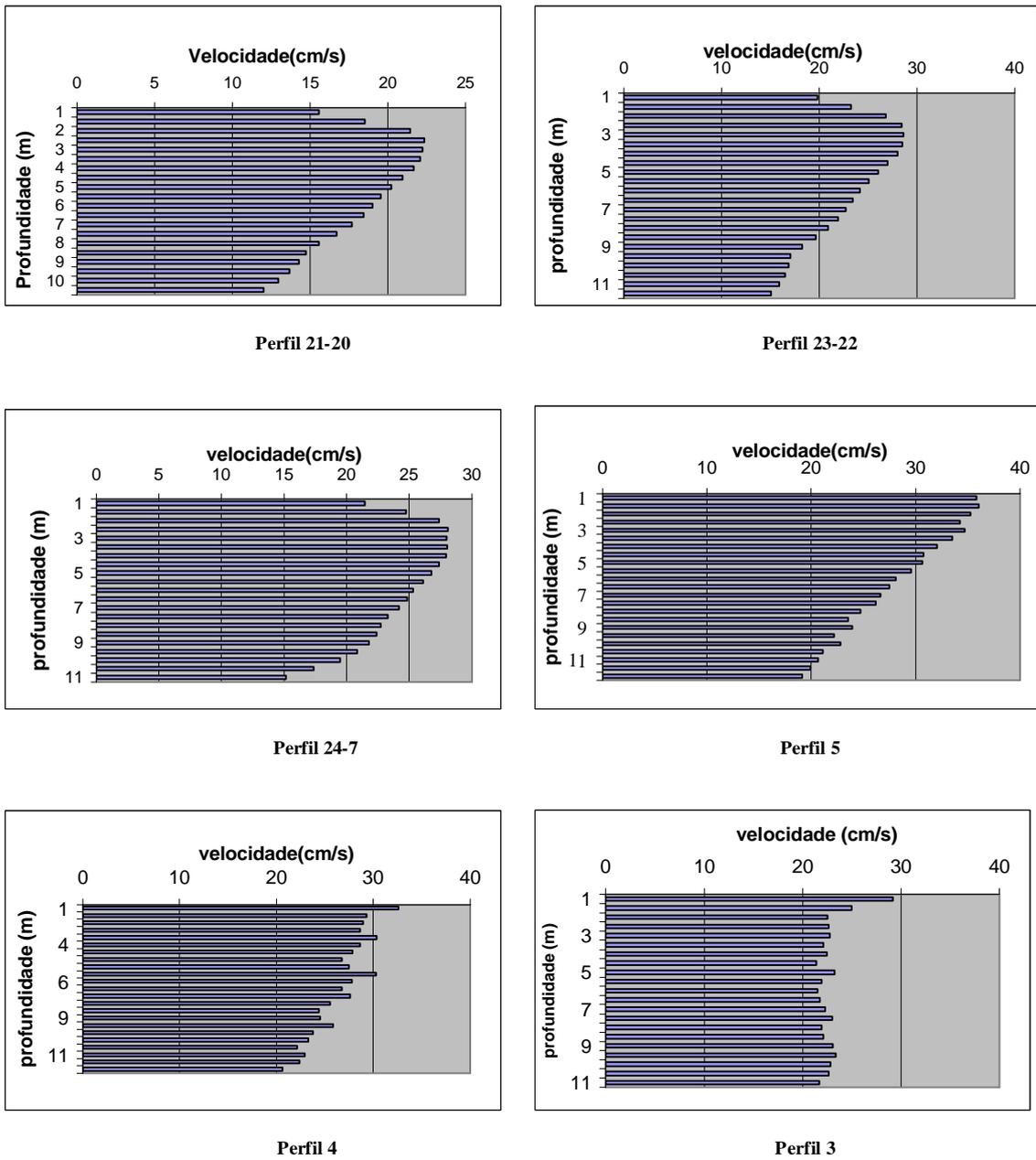
Os perfis obtidos com o ADCP mostraram velocidades das correntes mais altas nos perfis acima do SDOES, sendo estes pontos localizados fora da proteção do molhe do Mucuripe.

Os valores médios de velocidade observados ao longo dos perfis foram de 0,14 m/s, 0,18 m/s, 0,21 m/s, e 0,19 m/s para os perfis 1, 3, 4 e 21-20 respectivamente. Os outros perfis revelaram uma velocidade média de 0,24-0,25 m/s. Os dados obtidos no perfil 2 não foram utilizados para a análise final em virtude do intenso deslocamento lateral da embarcação, pois geraram dados imprecisos ou incorretos em relação aos demais pontos observados.

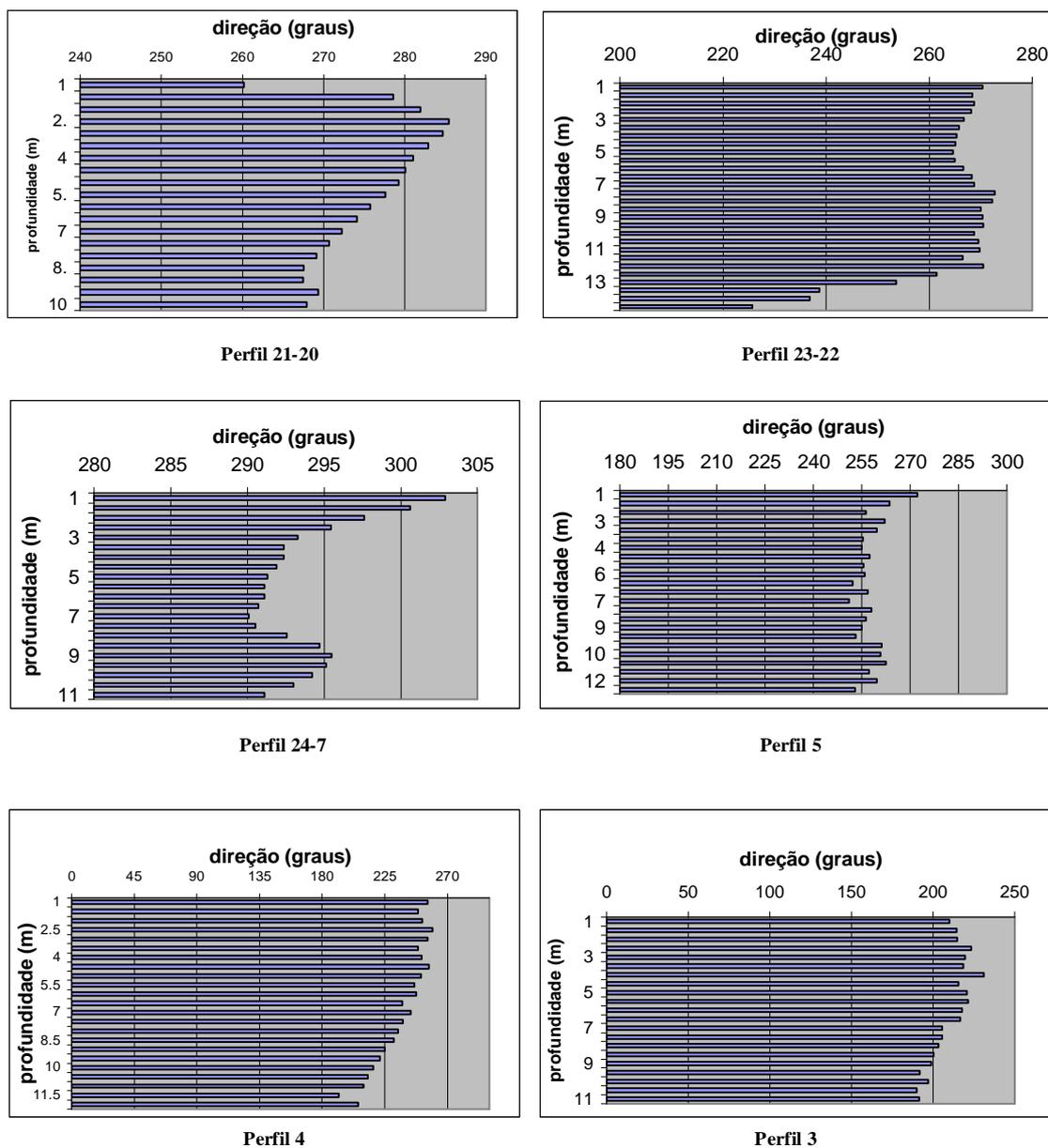
Em relação às variações de velocidade em função da profundidade, os resultados revelaram em todos os perfis uma diminuição da velocidade com o aumento da profundidade, com valores de fundo até 0,15 m/s no perfil 1 e de 0,15-0,20 m/s nos outros perfis.

Os perfis 21-20, 23-22 e 24-07, mostraram também um aumento na velocidade do fluxo entre os 3 e 6 m de profundidade, enquanto na superfície as velocidades apresentaram valores mais baixos, de até 0,16 m/s (figura 47). Esta relação entre velocidade e profundidade ocorreu também nas medições de correntes de maio 2005.

A direção prevalecente da corrente foi de 260-300° para as maiorias dos perfis registrados (figura 47). Somente no perfil 3 foi observada a direção da corrente variando entre 200° e 250°.

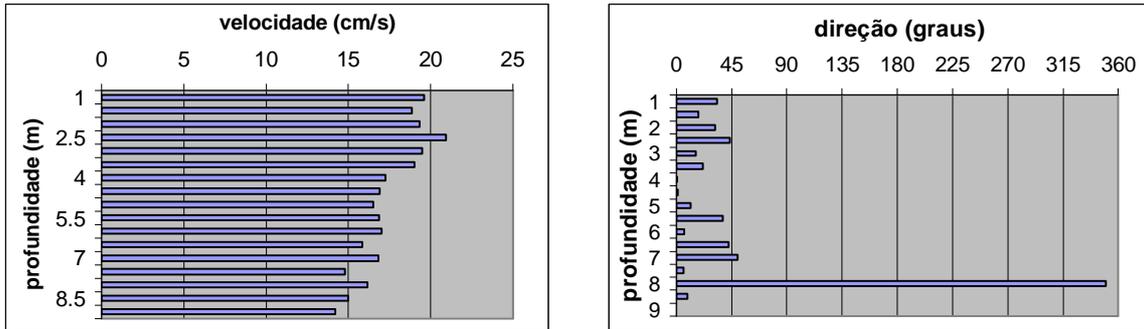


**Figura 47** - Variação da velocidade da corrente (em cm/s) em função da profundidade (metros) ao longo dos 4 perfis estudados na segunda campanha de medições da corrente em proximidade do SDOES.



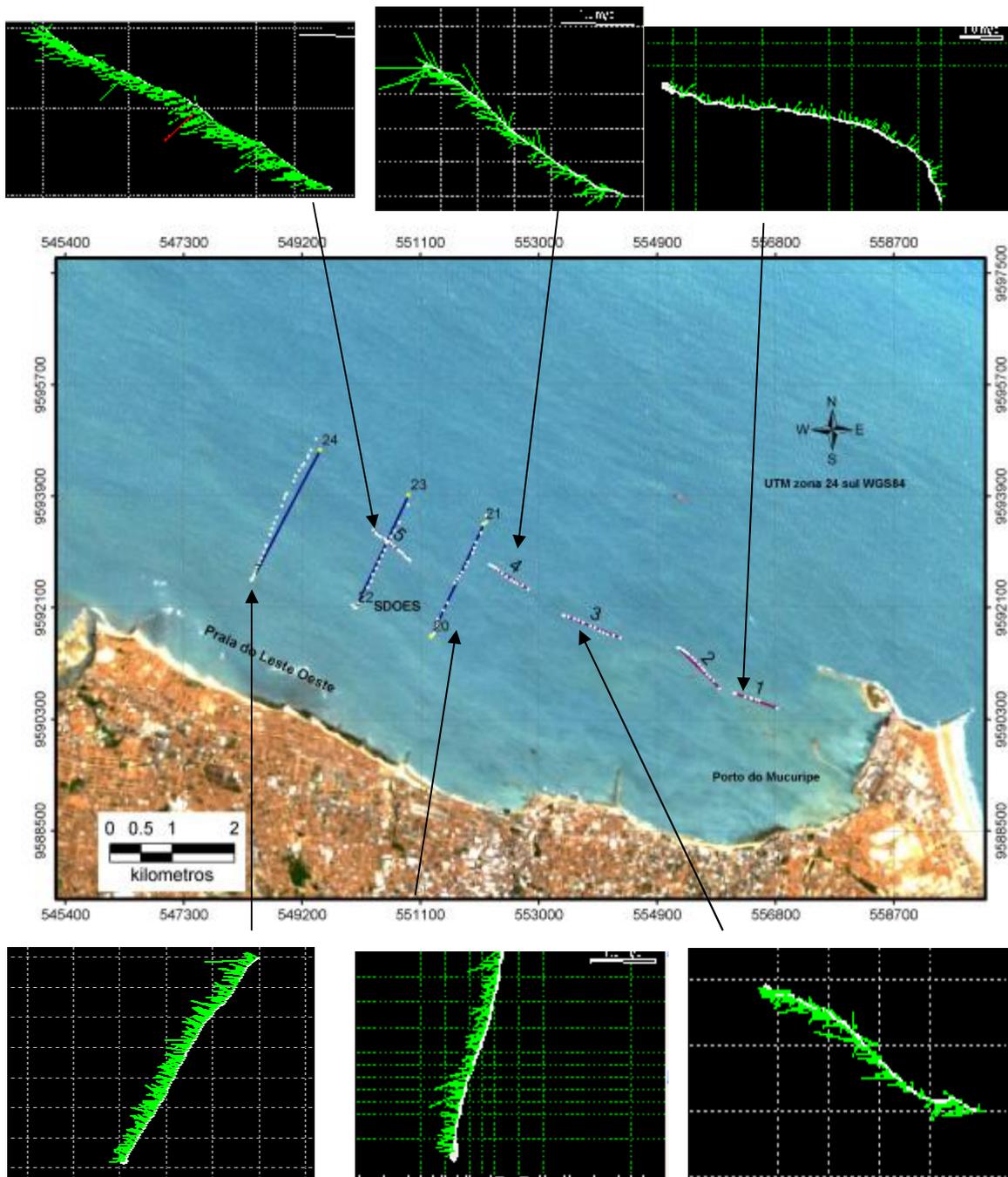
**Figura 48** - Variação da direção (em graus) da corrente em função da profundidade ao longo dos 4 perfis estudados na segunda campanha de medições da corrente em proximidade do SDOES.

No perfil 1 (figura 49) direção principal foi entre  $350^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ , devido provavelmente às condições de maré vazante durante as medidas, pois o perfil foi registrado às 9:30 da manhã.



**Figura 49** - Variação da velocidade (m/s) e direção da corrente (graus) em função da profundidade, registrados para o perfil 1 em proximidade do porto do Mucuripe.

A figura 50 mostra o mapa da área de trabalho sobre a imagem *LANDSAT* e retalha os perfis desenhados durante a medição com a sonda ADCP.

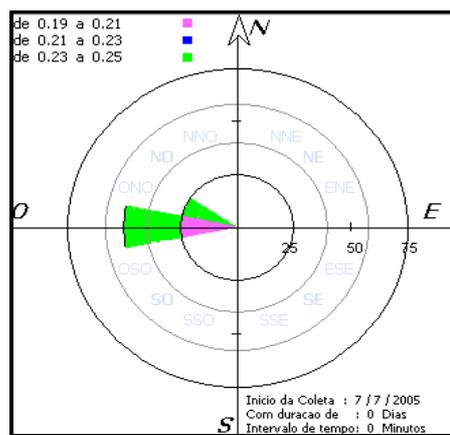


**Figura 50-** Mapa, sobre imagem LANDSAT ETM 7+, dos perfis de corrente registrados na região metropolitana de Fortaleza, no dia 7 de julho de 2005 com a sonda ADCP.

A tabela 3 apresenta os valores médios ao longo dos perfis, sintetizando os dados coletados na área de estudo em julho de 2005. Portanto as velocidades e as direções são calculadas obtendo a média dos valores de cada célula ao longo da coluna d'água, e a média ao longo de todo o perfil.

**Tabela 3** - Valores médios de intensidade e direção da corrente ao longo dos perfis registrados no dia 7 de julho de 2005 na região metropolitana de Fortaleza.

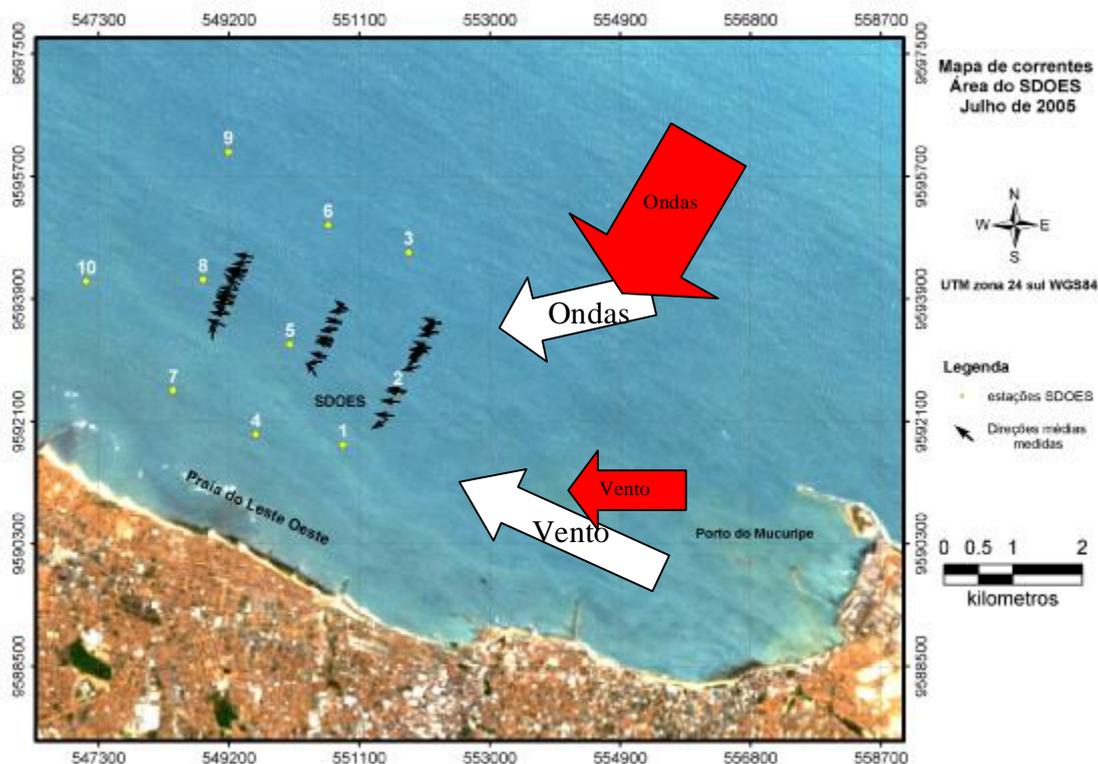
Perfil	Vel. média corrente (m/s)	Dir. média corrente (graus)
5	0,25	261
20-21	0,19	274
22-23	0,24	277
24-7	0,24	288



**Figura 51** - Rosa das correntes dos dados da tabela 3.

### 6.3.6. Interação ondas-correntes com o fundo

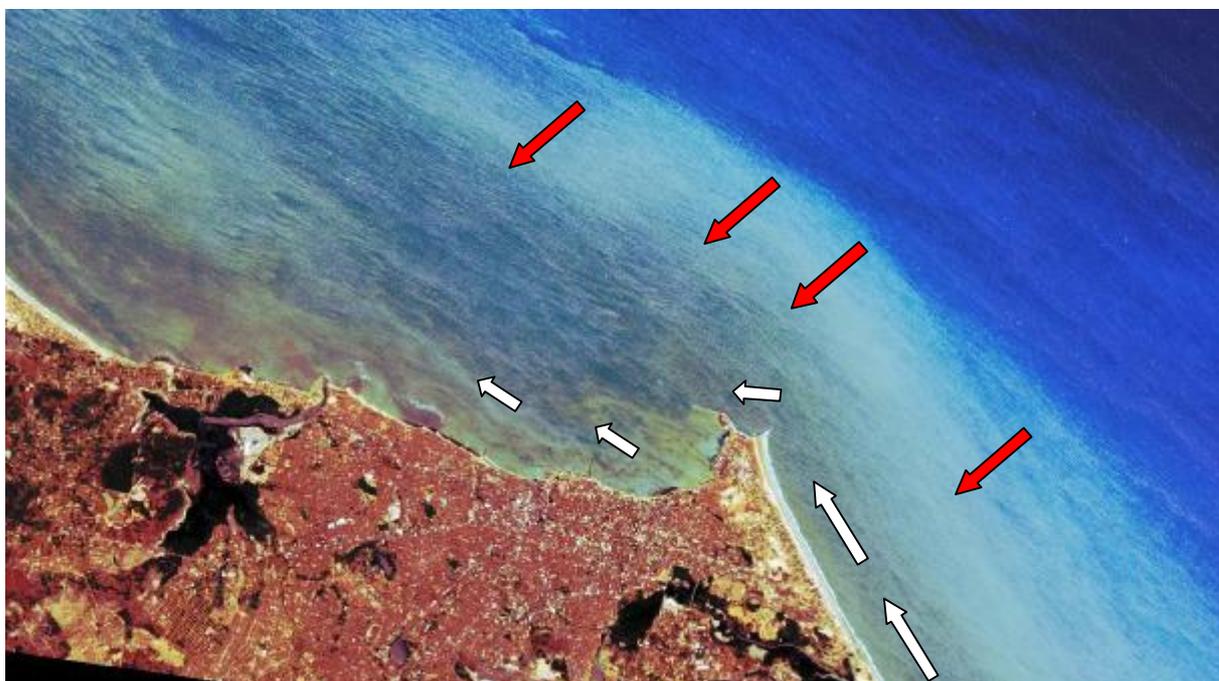
Na figura 52, evidenciou-se os resultados das medições das correntes medidas na área do SDOES, mostrando as duas componentes principais que contribuem para a dinâmica das correntes ao longo do litoral. Dependendo da época do ano no local estudado, estação chuvosa ou seca, estes dois componentes podem ter intensidade e direção um pouco diferentes. As setas brancas representam o período invernal (com ventos mais fortes e ondas de *sea*) e as setas vermelhas correspondentes á época de verão.



**Figura 52** – Mapa das correntes para a área do SDOES com os dados medidos em julho de 2005, plotados em forma de vetores e as estações de coleta de água, sedimento, monitoradas pelo projeto SDOES (LABOMAR/UFC).

Observando a figura 53, referente à área metropolitana de Fortaleza, realçada com um efeito Gaussiano através do *software* ENVI 3.2, foi possível observar de maneira mais evidente a dinâmica do transporte do sedimento costeiro e a morfologia do fundo marinho na porção de plataforma continental evidenciada pela imagem *Landsat*.

Na figura as setas vermelhas representam a direção das frentes de onda chegando ao litoral, e as setas brancas, de maneira geral, mostram a direção da corrente na praia do Futuro e na praia de Iracema. A imagem ressalta também a pluma de descarga em saída da foz do rio Ceará, e banco de areia presente a oeste do molhe do porto do Mucuripe. Esta barra arenosa tem comprimento de cerca 7500 m e largura média de 500 m e teve origem entre o 1950 e o 1983 durante a segunda fase de construção do porto do Mucuripe. A barra submersa tem profundidade média de 10 m e um volume total calculado em 12.300.000 m<sup>3</sup> no ano de 1996 (Maia, 1998).



**Figura 53** – Mapa sobre imagem Landsat 7 ETM+ da região metropolitana de Fortaleza ressaltando a deriva litorânea de sedimento.

A faixa mais clara próxima ao litoral tem uma largura que varia entre 11 e 13 km e evidencia o transporte de material de fundo em suspensão devido às correntes de deriva litorânea. A batimetria nesta faixa variou de zero para 20 m de profundidade.

Ondas tipo *sea*, com comprimento  $L$  de mínimo 40 m, começam a interagir com o fundo do oceano a partir de uma profundidade de 20 m ( $L/2$ ). A energia das ondas remobiliza o

sedimento de fundo, e as correntes, geradas pelo vento, originam um transporte na direção leste-oeste.

Segundo os cálculos realizados com o auxílio do *ACES*, uma onda de altura de 1,5 m, com um período médio de 5s até 7 s, chegaria a uma profundidade de 10 m com um comprimento *L* de 37 até 60 m, e uma velocidade de cerca 8,5 m/s.

Uma onda tipo *swell* com período de cerca 13 s, e altura de 2,5 m, atingiria uma velocidade de 9,5 m/s e um comprimento de onda de 120m sobre um fundo marinho de cerca 10m de profundidade.

Para o estudo realizado, uma onda de tipo *sea*, com as características médias do clima de onda cearense, começou a interagir com o sedimento de fundo a partir de uma profundidade mínima de 15m, para as ondas menores.

Devido à extensão da plataforma continental associada a uma profundidade relativamente baixa, supõe-se a origem da grande movimentação de material de fundo e material em suspensão que pode ser visualizado nas imagens do satélite *LANDSAT*.

Outra consideração relevante que pode ser feita em relação às ondas no litoral cearense, é que quando ondas e correntes ocorrem na mesma direção, a velocidade média da corrente (no caso 0,25 m/s) pode ser somada à das ondas, obtendo um aumento do comprimento destas últimas. Uma onda com velocidade de 8,5 m/s e período de 7s, portanto, atingiria um comprimento máximo de 61,25m.

### 6.3.7. Campanha de medições das correntes no Porto do Pecém

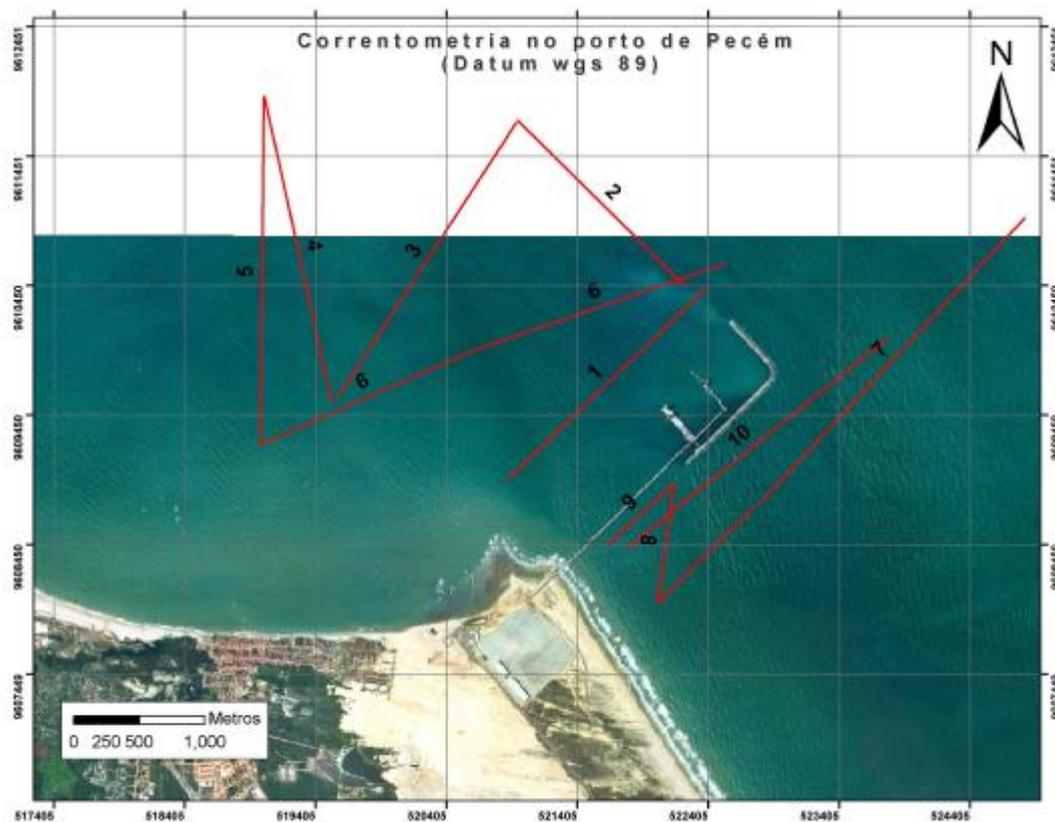
No dia 16 de fevereiro de 2006 foram registrados 10 perfis de corrente com a sonda *ADCP* na área do complexo industrial do porto do Pecém.

As condições meteorológicas apresentaram ventos com intensidade bastante fraca, entre 5 e 6 m/s, e direção prevalecente NE. As condições do mar apresentaram ondas com alturas de cerca 1,5 m.

O trabalho começou pela manhã, a partir das 6:00 h, com duração de 5 horas, em condições de maré vazante. A baixa mar foi as 12:36, com altura de 0,5 m (fonte DHN, 2006).

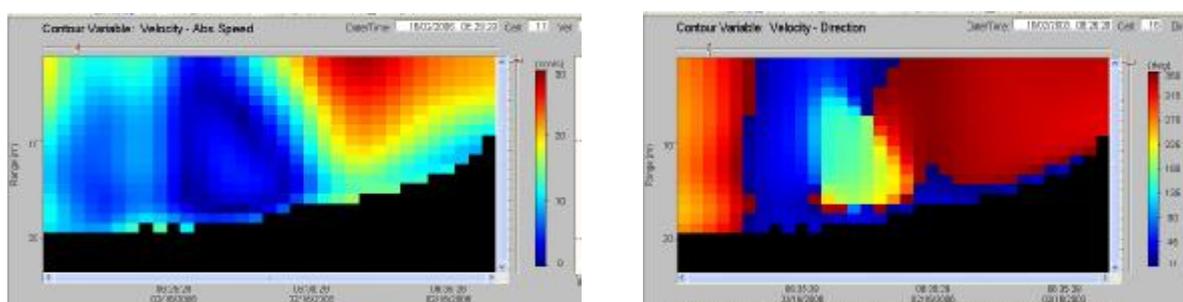
Durante as medições foram registrados perfis a oeste e a leste da estrutura portuária e isso permitiu evidenciar o efeito que a mesma tem sobre a dinâmica das correntes na área.

A figura 54 ilustra a área de trabalho com os perfis registrados com o correntômetro.



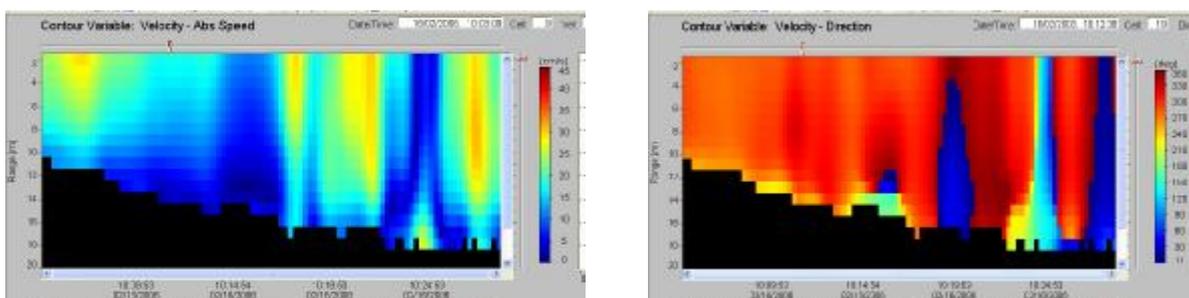
**Figura 54** – Mapa sobre fotografia aérea do porto do Pecém com os perfis registrados com a sonda ADCP.

A figura 55 mostra os perfis traçados e executados na entrada do porto (perfil 1) do ponto 1 para o ponto 2. As velocidades da corrente evidenciaram valores baixos a sotavento do molhe do porto (0,04 – 0,15 m/s) e valores maiores (0,15-0,40 m/s) no trecho incluído entre a estrutura e o porto do Pecém.



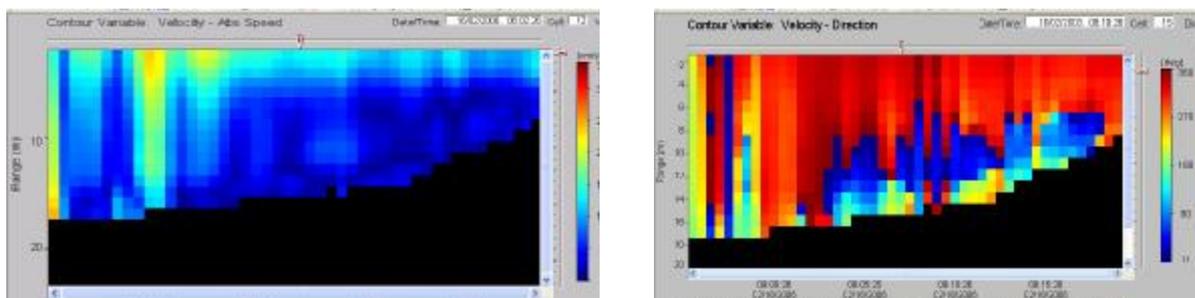
**Figura 55** – Seção do Perfil 1 registrada na área do Porto do Pecém, ilustrando velocidade (cm/s) e direção (graus) da corrente.

Os valores médios das correntes, ao longo da coluna de água, a leste da estrutura (figura 56), foram de 0,16-0,24 m/s na parte entre a praia e o píer (Perfil 10), de 0,08 – 0,15 m/s na parte de perfil atrás da estrutura e aumenta de intensidade com valores de 0,30-0,50 m/s fora da estrutura para o largo, onde foram registrados os valores máximos.



**Figura 56** - Seção do Perfil 10 registrada na área do Porto do Pecém, ilustrando velocidade (cm/s) e direção (graus) da corrente.

Na zona oeste da área onde o porto induz o efeito de proteção às ondas e às correntes, as velocidades apresentaram valores entre 0,06 e 0,20 m/s (figura 57).



**Figura 57** - Seção do Perfil 5 registrada na área do Porto do Pecém, ilustrando velocidade (cm/s) e direção (graus) da corrente.

As direções da corrente parecem seguir a batimetria, com direções entre 290-320° onde não é presente a influencia do porto, enquanto no perfil 1, no canal de acesso ao mesmo, as direções são afetadas pelo efeito da difração da estrutura, e apareceram desviadas, com direções entre 90° e 180°.

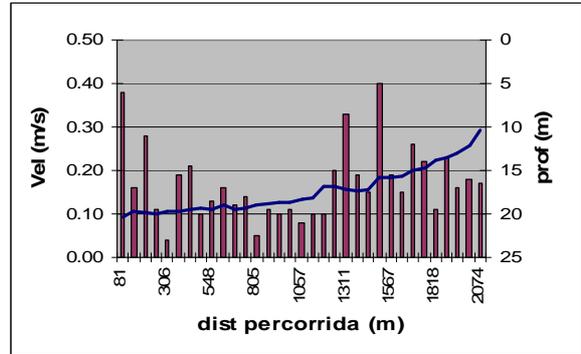
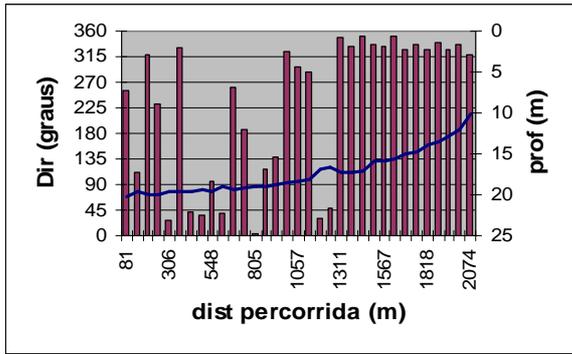
As variações das correntes com a profundidade mostraram que as velocidades diminuem com o aumento da profundidade chegando a valores de até 0,04 m/s para profundidades maiores de 12 m.

As direções sofrem um leve desvio para esquerda com o aumento da profundidade, mas em média sempre são incluídas no intervalo SW-N.

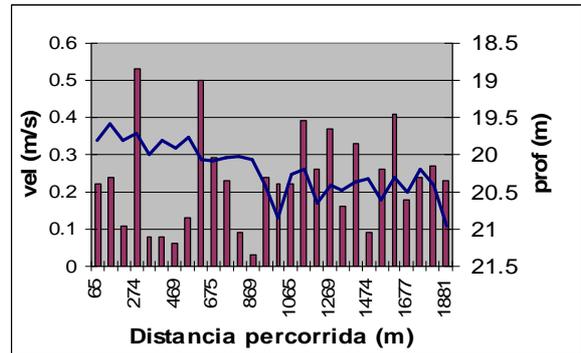
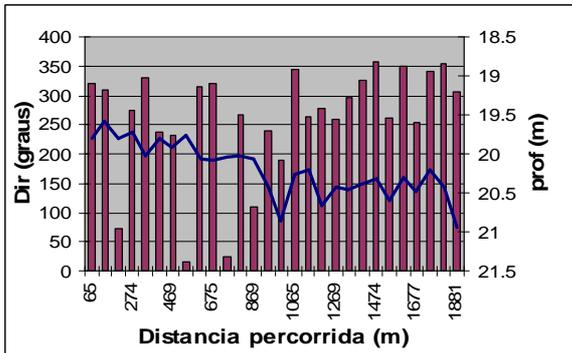
O emissário da termoeletrica do porto do Pecém está localizado a cerca de 400 m do litoral abaixo da ponte que liga o litoral com os *piers*, a uma profundidade de 11,5 m.

Na regisração do perfil 9 foi possível estimar o volume de água (através o calculo feito pelo software *Currentsurveyor*) que passa entre a praia e a estrutura de proteção do porto, induzida pela corrente litorânea, obtendo valores acima de 2100 m<sup>3</sup>/s. Considerada a vazão do emissário, que nos dias de funcionamento tem valores médios de 0,022 m<sup>3</sup>/s (fonte USINA, CGTF *apud* LABOMAR, 2005) pode-se deduzir como a intensidade da corrente e a sua direção, prevalecente para 290°-330°, permitem uma ótima dispersão dos poluentes do emissário.

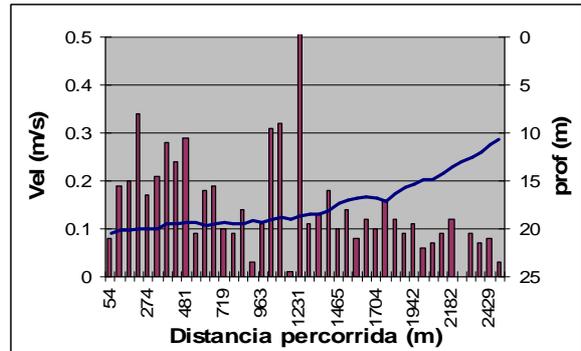
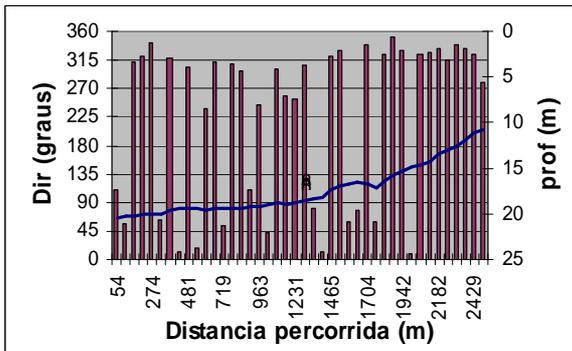
A figura 58 resume os valores das correntes medidas ao longo dos 10 perfis percorridos na área, mostrando em cada um deles, a batimetria do perfil, a direção e a velocidade da corrente em cada ponto do mesmo, e a distância percorrida ao longo do trecho, podendo-se observar os efeitos da estrutura do porto sobre as dinâmicas costeiras.



Perfil 1



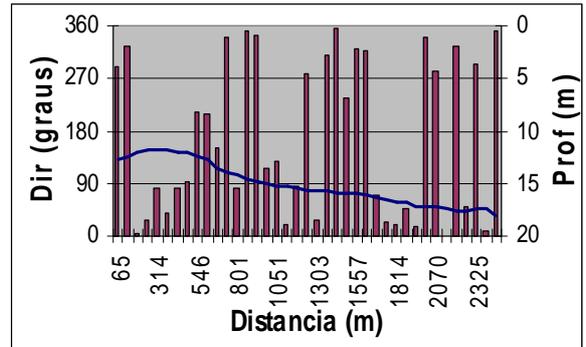
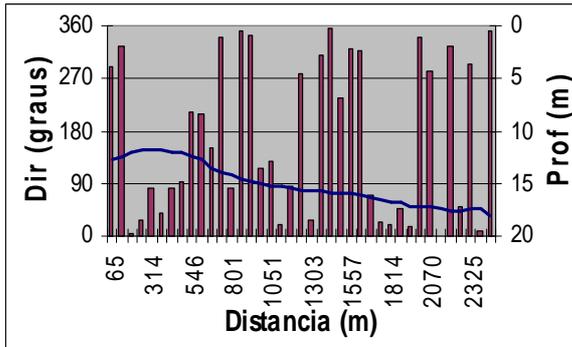
Perfil 2



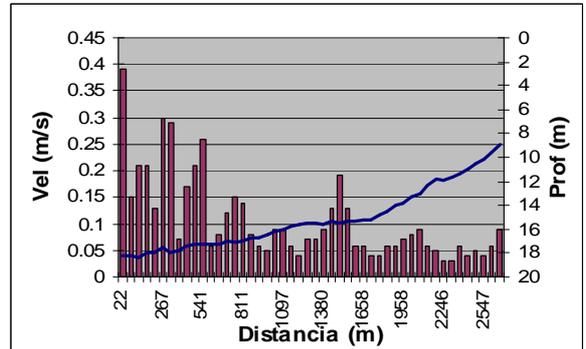
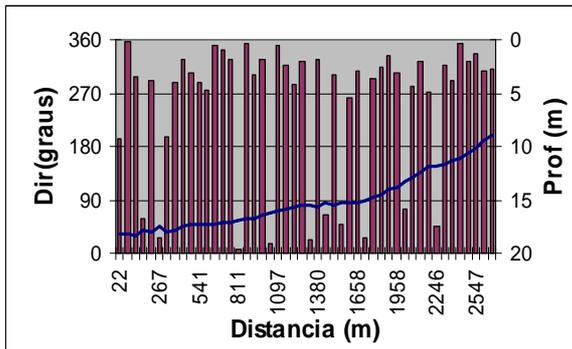
Perfil 3

Figura 58 (continua)

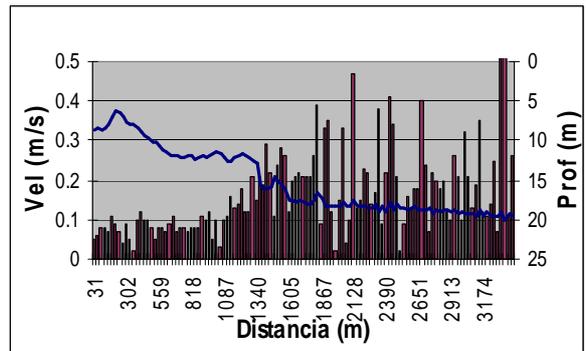
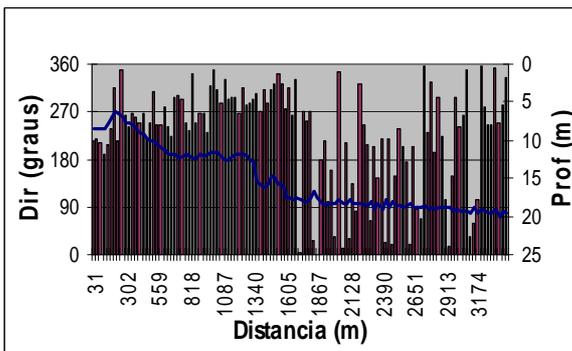
Figura 58 (continua)



Perfil 4

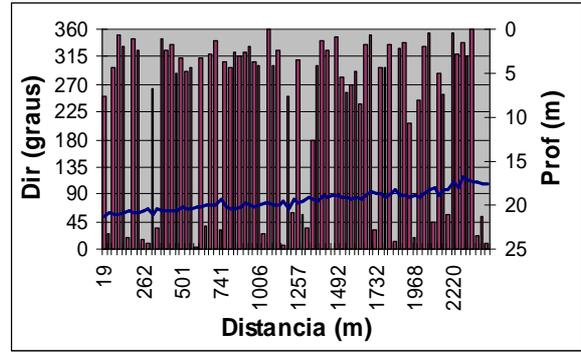
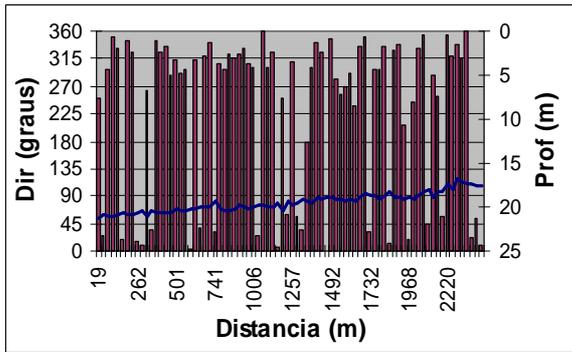


Perfil 5

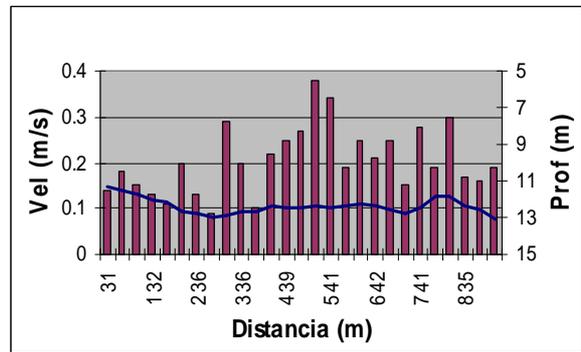
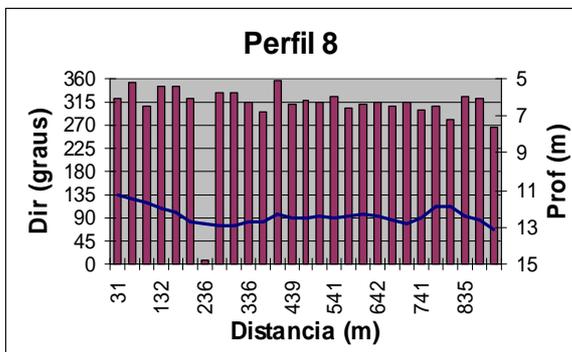


Perfil 6

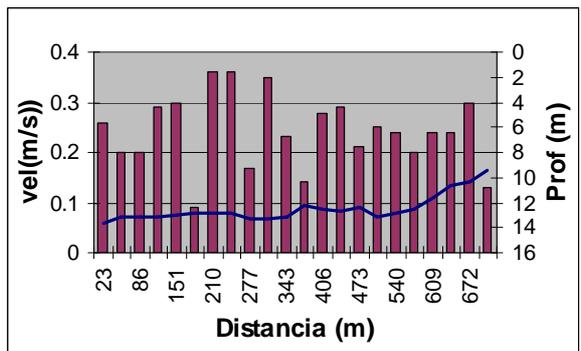
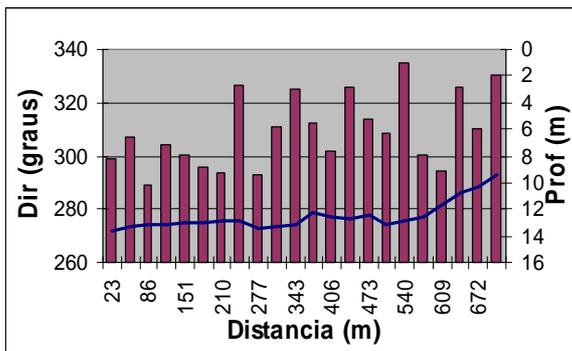
Figura 58 (continua)



Perfil 7

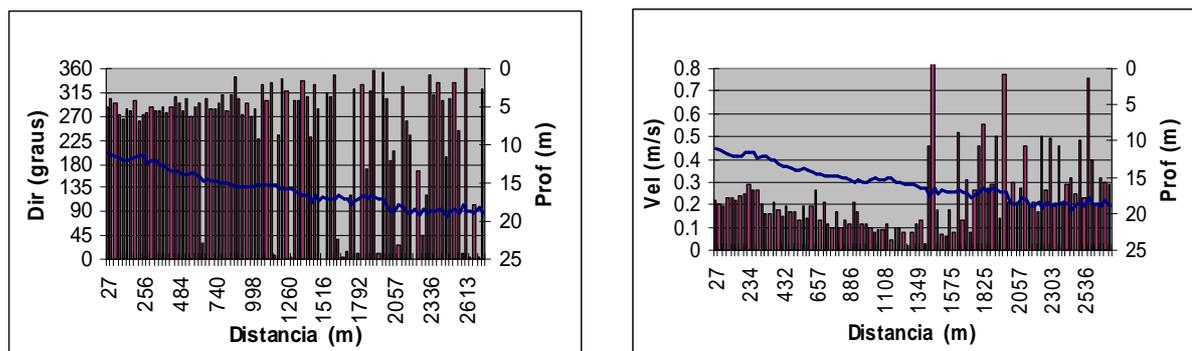


Perfil 8



Perfil 9

Figura 58 (continua)



Perfil 10

**Figura 58** – Variação da direção (graus) e velocidade (m/s) das correntes (valores médios ao longo da coluna de água em cada ponto) para todos os perfis traçados na área do porto do Pecém.

A figura 59 mostra os vetores das correntes plotados sobre fotografia aérea (georeferenciada) com a utilização do *Arcview 8.1*, podendo evidenciar em maneira mais fácil as correntes mais fortes na zona a norte do porto, e no trecho entre a ponta do Pecém e o primeiro *pier*.

As correntes mais fracas (vetores vermelhos) com valores até 0,16 m/s, foram encontradas a sotavento da estrutura, e a leste da mesma em proximidade do molhe, onde o efeito de reflexão impede a dinâmica do fluxo em maneira livre.

A figura 60 mostra o campo de ondas simulado com o modulo PMS do *MIKE 21* na área do porto do Pecém, mostrando claramente o efeito da difração que a estrutura do porto induz nas frentes de onda, que no caso são representados por condições de tipo *sea* ( $H_{m0} = 1,5$  m,  $T = 7$  s, Dir. 70-90°).

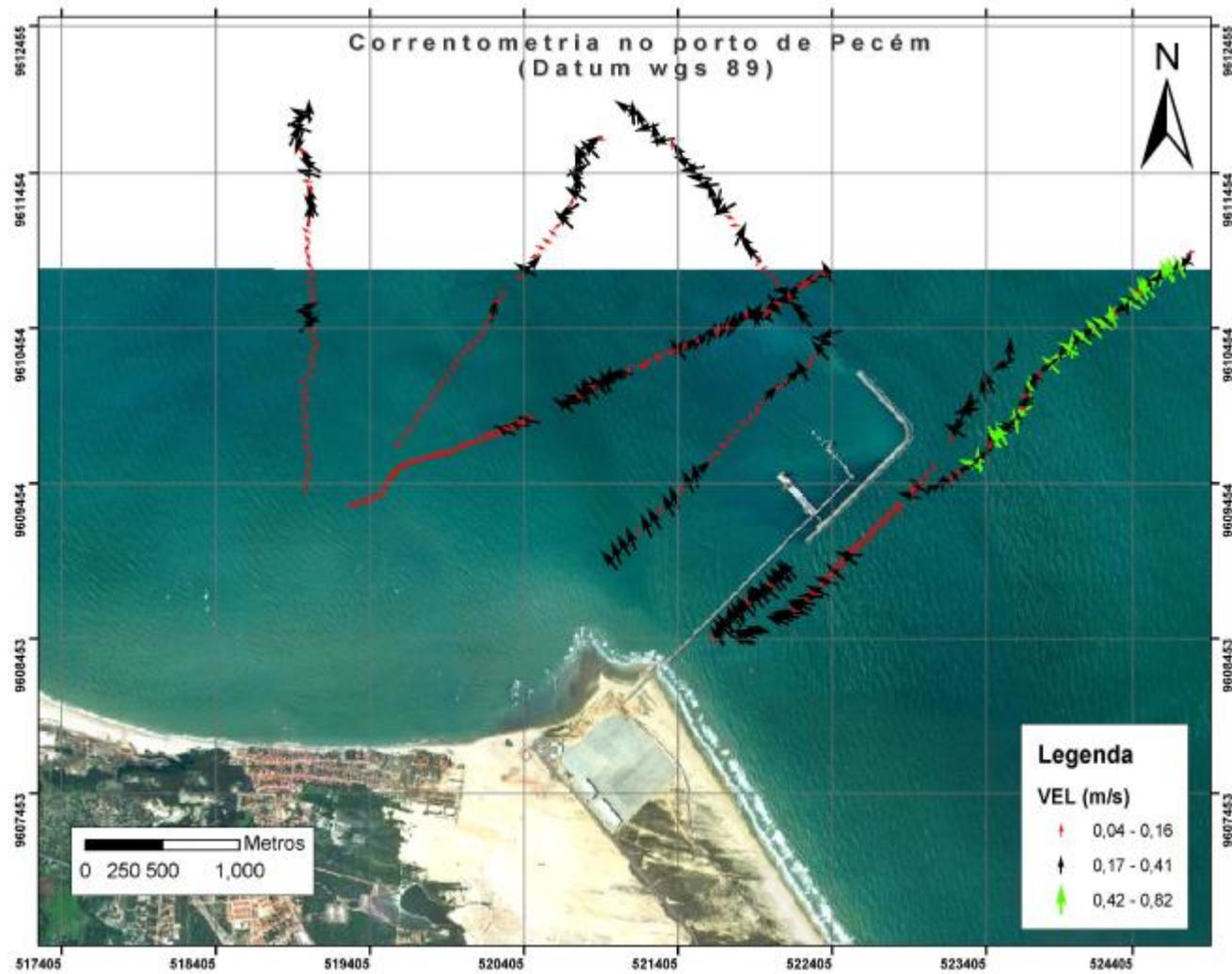
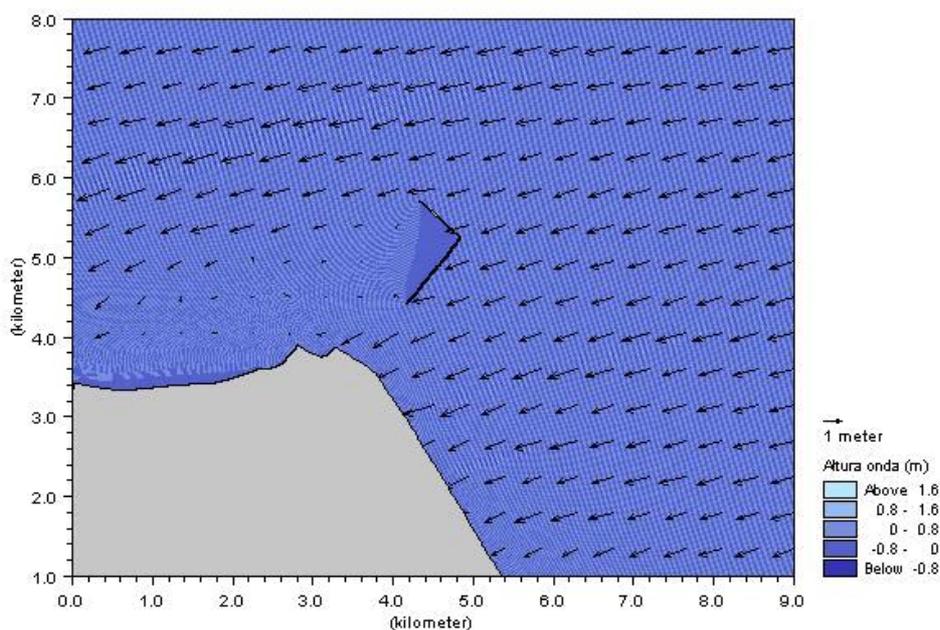


Figura 59 – Mapa sobre Fotografia aérea do Porto do Pecém, com os vetores das correntes medidas com o ADCP no dia 16 de fevereiro de 2006.



**Figura 60** – Campo de ondas simulado para condições médias de marés baixas. Condições ao largo:  $H_{m0} = 1,7$  m,  $T_p = 7$ s, MWD = 70-90 ° N).

### 6.3.8. Campanha de medição das correntes em Cumbuco e Iparana

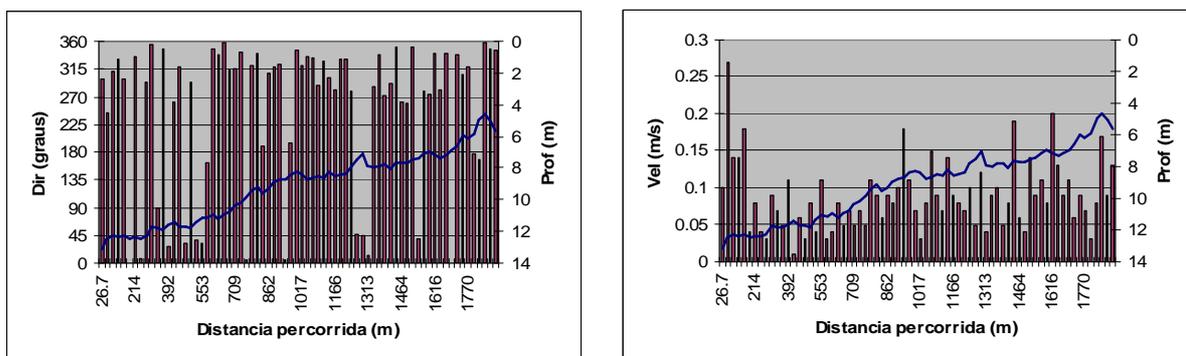
No dia 16 de fevereiro de 2006 foram registrados 2 perfis de corrente transversais a praia do Cumbuco (coordenadas UTM: 530269 E, 9601956 N) e de Iparana (coordenadas UTM: 542244 E 9596904 N), no litoral oeste do Estado do Ceará, respectivamente 30 km e 15 km a oeste da cidade de Fortaleza.

As condições meteorológicas apresentaram ventos com intensidade entre 3 e 5 m/s, e direção prevalecente NE-E. As condições do mar apresentaram ondas com alturas de até 1,5 m.

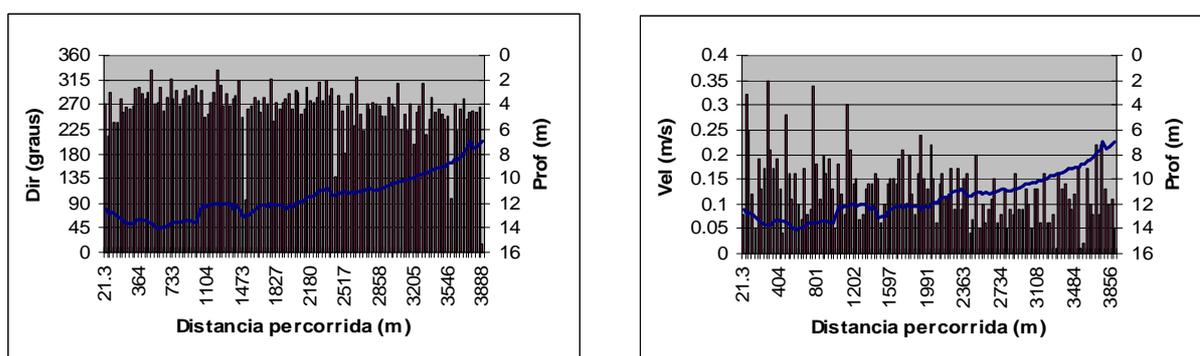
O perfil no Cumbuco foi registrado às 11:40, em condições de maré vazante e o perfil em Iparana às 13:30, já em condições de maré enchente.

A baixa mar foi às 12:36, com altura de 0,5 m, referente ao porto do Pecém (fonte DHN, 2006).

As figuras 61 e 62 ilustram os valores das correntes medidas ao longo dos 2 perfis percorridos, mostrando em cada um deles, a batimetria do perfil, a direção e a velocidade da corrente em cada ponto do mesmo e a distância percorrida ao longo do trecho.



**Figura 61** – Direção (graus) e velocidade (m/s) da corrente no perfil registrado em frente à praia do Cumbuco, no dia 16 de fevereiro de 2006.



**Figura 62** – Direção (graus) e velocidade (m/s) da corrente no perfil registrado em frente à praia de Iparana, no dia 16 de fevereiro de 2006.

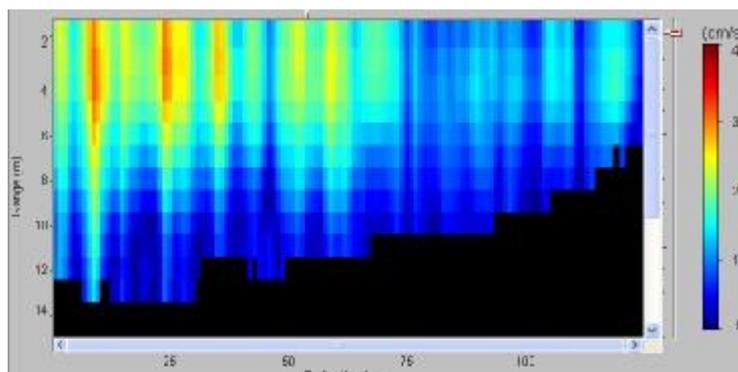
Nas figuras, é possível notar como a direção da corrente prevalecente ao longo dos perfis foi entre  $290^\circ$  e  $340^\circ$  na praia do Cumbuco e entre  $250^\circ$  e  $300^\circ$  na praia de Iparana.

As direções predominantes são determinadas pela conformação da costa e da batimetria, e as correntes seguem as linhas batimétricas nos dois perfis.

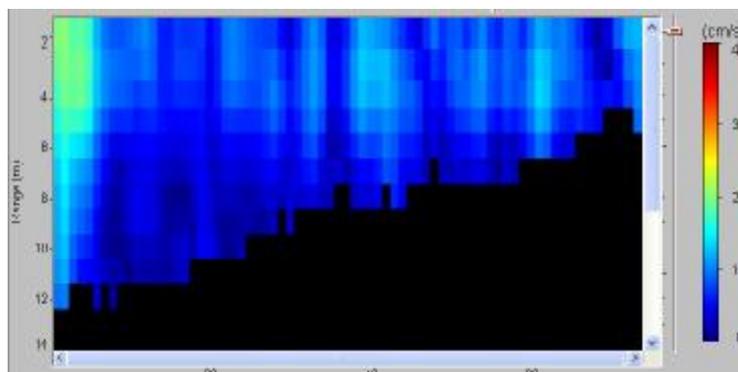
As velocidades, cúmplice a baixa intensidade do vento, revelaram valores entre 0,03 e 0,27 m/s no Cumbuco (valores mais freqüentes entre 0,04 e 0,12 m/s) e 0,03 e 0,35 m/s em Iparana (valores mais freqüentes entre 0,05 e 0,20 m/s).

Portanto, comparando os dois perfis, pode-se evidenciar que, nas mesmas condições de vento, a corrente apareceu mais forte em Iparana, e menos na praia do Cumbuco (figura 63). Isso pode ser explicado pelo fato que a componente da corrente litorânea induzida pelas ondas, que é proporcional ao ângulo de inclinação das frentes de onda com o litoral, é mais forte na praia

de Iparana que no Cumbuco, cuja praia é caracterizada por um menor ângulo de inclinação as frentes de ondas de NE-E.



Iparana



Cumbuco

**Figura 63** – Seção dos perfis registrados na praia de Iparana e Cumbuco, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.

### 6.3.9. Análise das correntes marinhas

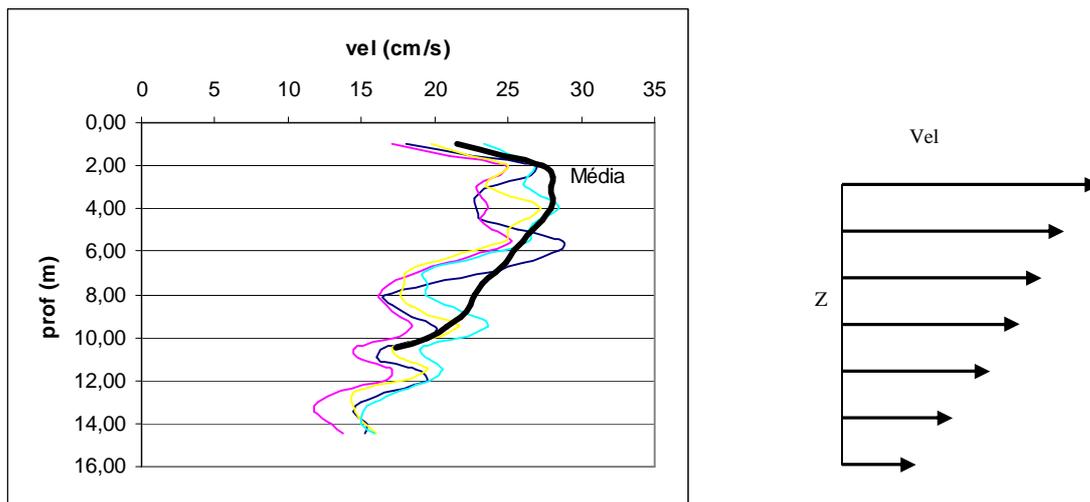
As duas campanhas oceanográficas efetuadas em Fortaleza, em condições meteorológicas parecidas, mostraram resultados finais diferentes ressaltando a importância de um monitoramento constante para uma área de grande impacto ambiental como aquela do emissário submarino (SDOES). As correntes revelaram um fluxo mais orientado para o litoral no mês de maio de 2005 com velocidades médias entre 0,13 e 0,23 m/s e um fluxo com direção praticamente paralela à costa para o mês de julho de 2005, com velocidades médias entre 0,19 e 0,25 m/s; este resultado é coerente com dados pretéritos da área de estudo. A partir desses resultados supõe-se que os poluentes, saindo do emissário submarino aproximadamente a uma distância de 3 km da costa e sofrendo os efeitos de ondas e correntes, possam alcançar com maior concentração as praias a sotavento em determinadas épocas do ano (verão austral), enquanto no período de ventos alísios mais fortes (inverno) a dispersão para o mar aberto é mais intensa com benefício geral para o ambiente costeiro.

As medições de corrente no Pecém permitiram evidenciar o efeito de proteção da estrutura do porto, pois as velocidades a sotavento do mesmo foram de 0,04-0,15 m/s, enquanto fora da proteção do molhe, os valores de velocidade variaram entre 0,17 e 0,41 m/s alcançando valores maiores, até 0,80 m/s a norte da estrutura.

Os dados de correntes medidos mostraram um efeito interessante em relação à variação da velocidade e direção da mesma ao longo da coluna d'água.

Alguns dos perfis obtidos com a sonda ADCP, sobretudo em proximidade do SDOES, mostraram um aumento da velocidade da corrente na camada entre 2 e 5m cerca de profundidade. Observado a figura 64, é possível evidenciar tal anomalia do perfil vertical, comparando o mesmo com o perfil teórico de velocidade. Na verdade, o perfil teórico, se compõe de duas camadas, uma logarítmica, na qual as flutuações turbulentas transmitem o cisalhamento interno (cisalhamento de *Reynolds*) e uma subcamada viscosa, que é adjacente ao limite do fundo e tem andamento linear (Miranda, 2002). No gráfico, são reportados alguns dos demais perfis verticais que o ADCP registra a cada sinal acústico enviado para o fundo marinho, e em preto, a linha que representa a média dos valores adquiridos durante todo o perfil. De acordo com a teoria de Longuet-Higgins (1953), este amortecimento superficial da corrente poderia ser

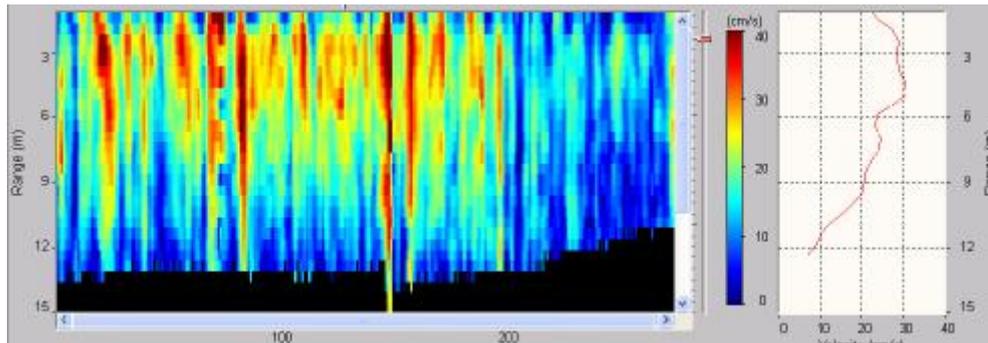
determinado pelo fluxo superficial induzido pelas ondas segundo a direção SW, que se soma vetorialmente com a direção preferencial W da corrente induzida pelos ventos.



**Figura 64** – Perfil vertical da corrente medido em proximidade do SDOES, e a direita, o perfil vertical da velocidade levando em conta somente o efeito do atrito entre as camadas e de fundo.

Correntes oceânicas nos primeiros 150m de profundidade são diretamente afetadas pelo vento, que transfere energia a superfície do mar. O movimento gerado pelo vento, se transmite para as camadas de fundo, diminuindo a intensidade por causa da tensão de cisalhamento na coluna de água..

A figura 65 mostra o perfil 21-20, registrado em proximidade do SDOES, em julho de 2005, evidenciando a camada sub-superficial caracterizada por um fluxo com maior velocidade.



**Figura 65** – Seção do Perfil 21-20 (SDOES-julho 2005) mostrando a velocidade da corrente (cm/s).

Além da diminuição da velocidade com a profundidade, existe outro efeito provocado por outras forças. O efeito conjunto da fricção do fundo, da força de Coriolis e do vento na superfície da água, determina um desvio a esquerda (no hemisfério Sul) do fluxo da corrente. Este efeito foi verificado nos perfis registrados nas áreas de estudo, onde a direção no fundo chegava a desviar de até 70-80° para esquerda em relação a superfície, isso em zonas não afetadas por estruturas portuária, onde prevalece o efeito da difração do porto.

### **6.3.10. Estudo sobre a vazão e as correntes no rio Jaguaribe**

O correntômetro acústico a efeito *doppler* pode ter uma aplicabilidade interessante nos rios, onde, além da medição da intensidade do fluxo ao longo da coluna de água, pode ser utilizado para calcular de maneira rápida e precisa a vazão do mesmo, com finalidades importantes nos estudos de casos sobre dispersão de poluentes e capacidade de suporte.

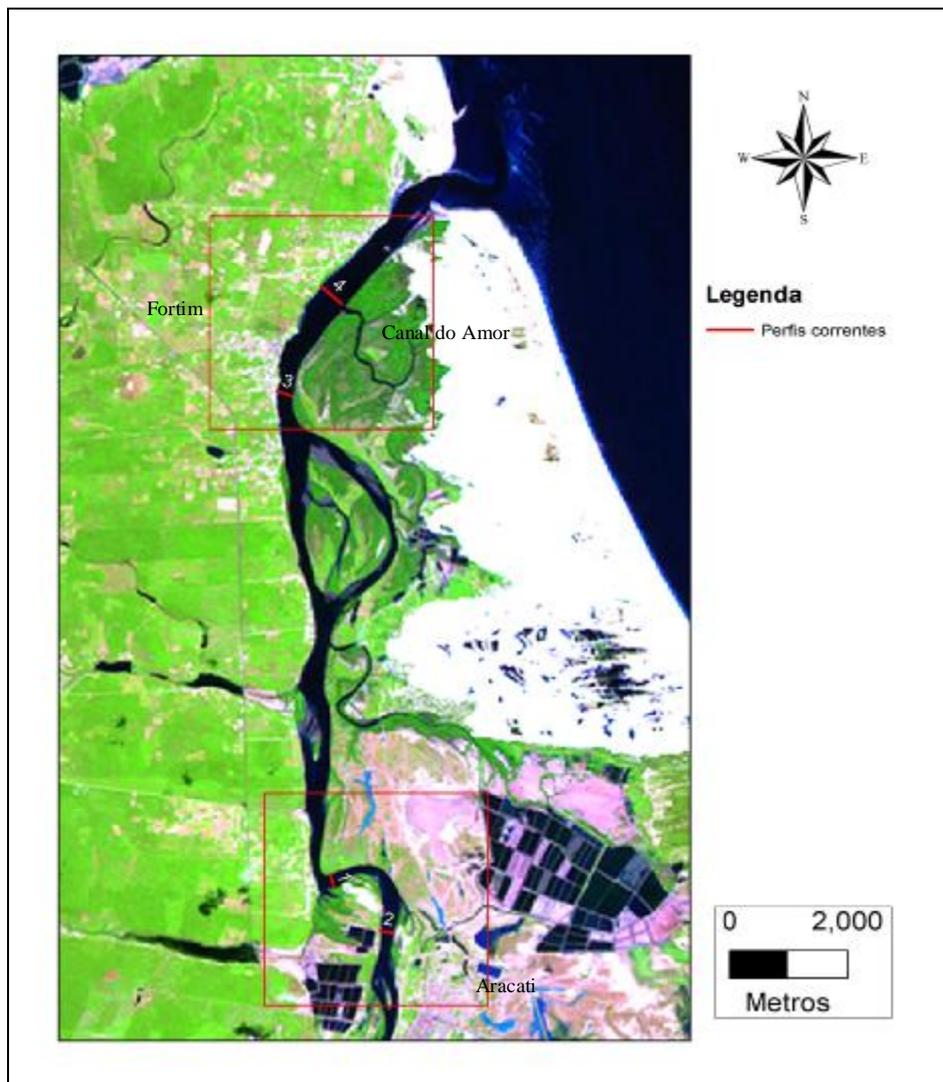
Neste estudo foi verificada esta aplicabilidade através de um monitoramento, ao longo de quase um ciclo de maré, de duas áreas no estuário do rio Jaguaribe, no município de Aracati, litoral leste do Ceará.

Durante as medições no rio, assim como nos trabalhos efetuados no mar, foi importante manter a velocidade do barco a mais baixa possível. O ideal seria uma velocidade próxima aquela da corrente medida, para obter mais precisão nos dados. Foi observado que uma velocidade muito baixa (abaixo de 1 m/s), em condições de muito vento ou de onda formada pelo mesmo, não foi possível manter a velocidade do barco nos padrões desejados.

Durante o trabalho no rio Jaguaribe (25 e 26 de outubro de 2005), a velocidade média do barco ao longo dos perfis foi mantida entre 1 e 1,5 m/s, que se demonstrou uma velocidade suficientemente baixa para permitir a navegação no rumo estabelecido e obter uma boa qualidade dos dados registrados.

O trabalho consistiu em um monitoramento das variações de vazão ao longo do mesmo perfil, com duração de até 8 horas de variação da maré, em duas áreas na bacia do rio.

As duas áreas objeto de estudo, foram localizadas uma em proximidade da barra e a outra nas proximidades da cidade de Aracati. No mapa do rio Jaguaribe (figura 66) são evidenciadas as duas áreas, e os 4 perfis que foram monitorados.



**Figura 66-**Mapa do rio Jaguaribe com os 4 perfis monitorados em outubro de 2005.

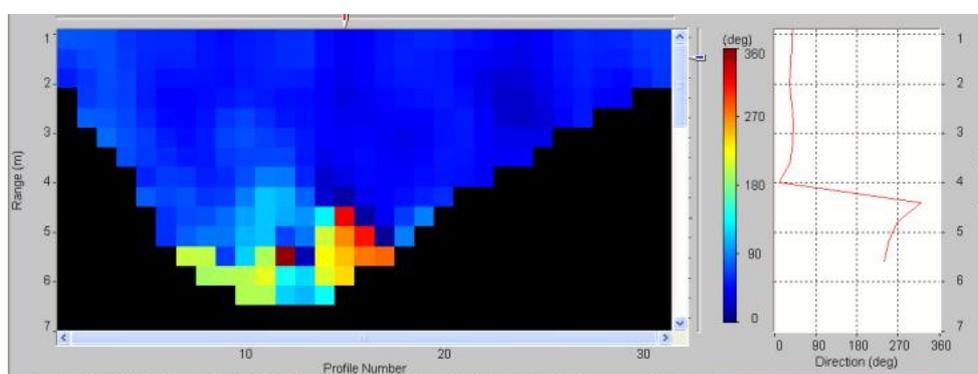
No caso do estudo da vazão com o ADCP no rio Jaguaribe, a análise dos dados coletados feita depois do trabalho de campo, incluiu uma comparação entre as oscilações do nível de maré (calculando o atraso de maré em função dos dados da DHN, referentes ao porto do Mucuripe) e as oscilações da vazão ao longo do período da coleta, além de uma análise do fluxo das correntes que caracterizam este estuário.

Esta análise revelou que o rio Jaguaribe tem características típicas dos estuários cearenses, pois não tem estratificação da coluna de água, ou seja, não evidencia gradiente de salinidade entre superfície e fundo durante os ciclos de maré. O rio Jaguaribe apresenta um

estuário extremamente influenciado pela intrusão de águas marinhas, e pode ser definido estuário de tipo bem misturado.

No caso dos perfis de correntes, a presença de estratificação salina seria visível observando o fluxo contrário que se apresentaria durante o processo de enchente ou vazante do mesmo rio.

Na figura 67, por exemplo, é visível tal efeito para um perfil de corrente, no rio Mamanguape, estado da Paraíba, registrado em setembro de 2005.



**Figura 67** – Seção do perfil registrado no rio Mamanguape (Paraíba) durante a fase de maré vazante, que mostra a inversão da direção do fluxo devido a estratificação da coluna d'água (o fluxo de fundo é a água do mar)

Durante os dois dias de trabalho no rio Jaguaribe, a salinidade, medida com um salinômetro a difração portátil, mostrou valores de 30-33 ppt nas zonas 1 e 2 enquanto apresentou valores de 35-36 ppt nas zonas 3 e 4, mais próximas ao delta do rio e ao mar.

Foi importante a medição da salinidade, porque o ADCP necessita de uma calibragem em função da salinidade do meio dentro o qual esta trabalhando, e salinidades diferentes determinam velocidades diferentes de propagação dos sinais acústicos emitidos pelo sensor.

A tabela 4 evidencia os valores das vazões médias medidas com o ADCP nas quatro zonas estudadas no rio Jaguaribe, a áreas das sessões e o horário da medição, para ser comparados com a tabua de maré relativa ao porto do Mucuripe.

**Tabela 4** - Valores de vazão medidos com ADCP no rio Jaguaribe. A maré corrigida representa os valores da maré no ponto de medição levando em consideração o atraso de maré do estuário.

<b>Zona 1</b>					<b>Zona 2</b>				
Maré corrigida	Hora	Vel média corrente (m/s)	Área (m <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Maré corrigida	Hora	Vel média corrente (m/s)	Área (m <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
0,9	5:30				0,9	5:30			
	9:13	-0,25	516	-129		9:37	-0,25	496	-124
	9:57	-0,27	539	-143		10:14	-0,23	554	-129
	10:33	-0,34	550	-187		10:49	-0,26	569	-148
	11:08	-0,31	611	-189		11:24	-0,25	641	-163
	11:46	-0,29	631	-181		12:04	-0,22	632	-138
	12:25	-0,19	660	-128		12:46	-0,14	643	-92
1,8	13:06	0	709	-0,1	1,8	13:26	0,11	682	78
	13:45	0,19	665	127	14:04	0,15	647	98	
	14:20	0,2	631	127	14:39	0,18	590	105	
	14:56	0,17	630	104	15:15	0,17	599	103	
	15:35	0,12	582	67	15:50	0,16	571	90	
1,3	17:30				1,3	17:30			

<b>Zona 3</b>					<b>Zona 4</b>				
Maré corrigida	Hora	Vel média corrente (m/s)	Área(m <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Maré corrigida	Hora	Vel média corrente (m/s)	Área(m <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
0,9	6:50				0,9	6:50			
	8:17	-0,16	1207	-199		8:40	-0,23	1641	-374
	9:07	-0,28	1255	-354		9:31	-0,29	1729	-503
	9:53	-0,35	1357	-471		10:19	-0,31	1828	-569
	10:42	-0,37	1426	-531		11:07	-0,29	1973	-569
	11:30	-0,32	1504	-474		11:55	-0,25	2005	-491
	12:17	-0,26	1483	-386		12:39	-0,12	2045	-247
2,0	13:07	0	1492	-4	2,0	13:27	0,08	2025	157
	13:48	0,13	1457	191	14:08	0,15	1974	295	
	14:32	0,23	1407	320	14:51	0,2	1892	370	
	15:12	0,26	1460	374	15:32	0,22	1840	400	
	15:58	0,28	1407	387					
1,10	19:10				1,10	19:10			

A zona 1 e 2 foram analisadas o dia 25 de outubro, enquanto as zonas 3 e 4 o dia 26 do mesmo mês. Observando a tabua de maré (tabela 5) relativa ao porto do Mucuripe para os dias de trabalho (fonte DHN, 2005), é possível observar como nas áreas 1 e 2 o atraso de maré do rio é de cerca uma hora e meia, e nas zonas mais próximas a barra do rio o atraso é de cerca meia hora.

**Tabela 5** - Tábua de maré do porto do Mucuripe (25-26 de outubro de 2005)

<b>Dia</b>	<b>Hora</b>	<b>Altura (m)</b>
<b>TER</b> 25/10/05	04:58	0,9
	11:24	1,8
	16:58	1,3
	23:17	2,0
<b>QUA</b> 26/10/05	6:19	0,9
	12:41	2,0
	18:39	1,1
	00:45	2,0

Fonte DHN, 2005

Os dados reportados nas tabelas evidenciam a vazão média de cada perfil ao longo do monitoramento, mostrando como o volume de água transportado pelo rio durante a fase de maré enchente foi maior que durante a fase de maré vazante, e que na parte mais larga do rio a vazão máxima alcançada foi de 569 m<sup>3</sup>/s.

Ressalta-se que as condições de maré durante os dias de trabalho eram de maré de quadratura, ou seja, não em condições de amplitude máxima. Outro fator importante que condicionou a vazão e a capacidade de suporte do rio é a época de estiagem em que foram realizadas as coletas, pois o rio recebia uma quantidade muito reduzida de água doce.

Isso deixa supor que a vazão do rio Jaguaribe, em época de chuva e com maré de sizígia (lua cheia ou lua nova) deve ser mais elevada devido ao maior aporte de água doce da planície fluvial e de água salgada do mar.

As velocidades das correntes medidas revelaram um valor médio de 0,15 m/s durante a fase de maré vazante e 0,22-0,26 m/s durante a maré enchente na zona 1-2.

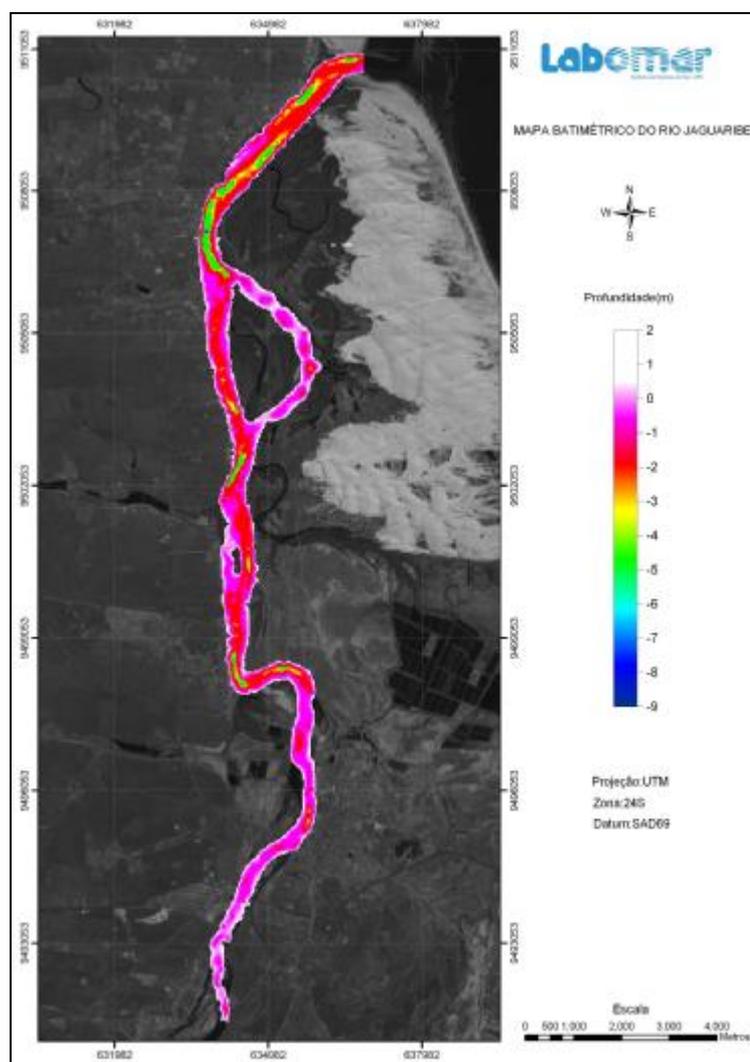
Nas zonas 3 e 4, que tem uma seção maior do rio e vazão também maior, os valores de velocidades médias da corrente foram de 0,25-0,29 m/s durante a maré enchente e 0,17-0,22 m/s durante a maré vazante.

As velocidades máximas encontradas durante as medições, na parte central do canal de cada perfil (ponto de maior vazão), tiveram valores entre 0,5 e 0,7 m/s.

O estudo batimétrico do rio Jaguaribe, revelou uma profundidade máxima, na hora de preamar, de cerca 5 m na zona 1, de 3 m na zona 2, de 9,60 m na zona 3 e de 6 m na zona 4.

A figura 68 apresenta o resultado da batimetria do Rio sobre a imagem *Landsat*, depois de um levantamento feito em dezembro de 2004 (Semace/Labomar, 2005), na qual é possível observar as áreas mais rasas do estuário, onde no caso a vazão seria claramente menor.

Esses dados batimétricos foram corrigidos para o nível reduzidos segundo a DHN - Marinha do Brasil, para eliminar o efeito da maré.



**Figura 68** - Mapa batimétrico do rio Jaguaribe (Fonte Semace\Labomar, 2005).

Analisando a vazão de maré enchente, observou-se como na zona 4, o pico da vazão torna-se  $569 \text{ m}^3/\text{s}$  e na zona 3, logo depois entrando no estuário, de  $531 \text{ m}^3/\text{s}$ , identificando uma perda teórica de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  (7%) em um traço de rio de 2 km de comprimento. Esta diferença pode

ser atribuída a água que entra na gamboa “Canal do Amor” na margem direita do rio, ao absorvimento de água pelo mangue e a evaporação.

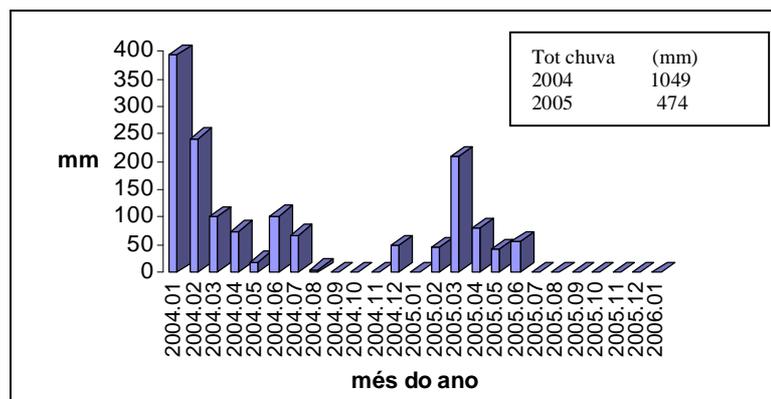
Entre as zonas 1 e 2, foi calculada uma diferença entre volume total de água do rio, com fluxo entrante, de  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ , com uma perda teórica dos 14 % em um traço de rio de cerca 2 km.

O fato que o volume de água entrante pelo mar seja maior daquele em saída, durante a fase de maré vazante, poderia encontrar uma explicação no fato que o período da medição, caracterizado por uma quase total ausência de chuva na região, determina valores mínimos de descarga do rio, rendendo o estuário um ambiente completamente controlado pelas oscilações da maré.

Quando a seção transversal do estuário é pequena, a velocidade de cisalhamento no fundo pode ser grande o suficiente para misturar completamente a coluna d'água, homogeneizando verticalmente o estuário. Quando não existe gradiente vertical de salinidade, não existe fluxo vertical de sal, só ocorrendo mistura na direção horizontal. Nestes estuários, definido como verticalmente homogêneos, o fluxo da maré será bem maior que o fluxo do rio (Guimarães & Marone 1996).

Tendo em consideração esta afirmação, seria possível explicar o maior volume de água em entrada do que aquele em saída.

A figura 69, de acordo com a Funceme, mostra os valores de chuva mensal para os anos 2004 e 2005 enfatizando como o ano 2004 foi caracterizado por grande chuva com valores acima da média histórica. Outra característica do clima regional é a diferença entre pluviosidade registrada a pouco mais de 30 km da foz do Jaguaribe. Em Aracati, por exemplo, chove em média 982,6 mm por ano, enquanto em Itaiçaba, a 34 km da foz do rio, a média (736,9 mm) caracteriza um clima semi-árido (Rozane *et al*, 2003).



**Figura 69** – Gráficos de chuva mensal ao longo do ano 2004 e 2005 para a estação de Aracati. Fonte dos dados: Funceme (www.funceme.br).

Observando as imagens do satélite CBERS (figura 70) obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referente ao estuário do Jaguaribe para o ano 2004, é possível notar a diferença da descarga do rio em diferentes épocas do ano.

No mês de janeiro e fevereiro de 2004, quando a precipitação alcançou valores de 400mm e 250mm, a descarga do rio aumentou de maneira considerável, elevando a quantidade de material em suspensão e gerando uma pluma muito extensa com largura de até 10 km do litoral.

No dia 11 de fevereiro de 2004, dia da imagem do satélite, as medições da maré na zona da ponte de Aracati, mostraram que a quantidade de água doce devida a chuva era tanta que impediu evidenciar a curva de maré medindo um nível constante de 4,6-4,7 m de altura na régua ao longo de 12 horas de medição (Dias, 2005).

Nos estuários verticalmente homogêneos o espalhamento em direção às águas costeiras ocorre principalmente por mistura horizontal turbulenta. Ainda é possível a ocorrência de frentes entre águas costeiras e as mais distantes da costa. Em todos os casos, o movimento e dispersão das plumas à medida que se afastam da desembocadura do estuário depende em grande parte dos ventos e correntes presentes na plataforma continental. Além disso, se a descarga do rio for suficientemente intensa, a pluma se forma fora do estuário, penetrando em mar aberto, como ocorre com o rio Amazonas, onde a mistura se dá na desembocadura, sobre a plataforma, pois o fluxo do rio é de  $175 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ , não permitindo a entrada da água do mar, apesar da maré ser forte. A pluma do rio Amazonas se estende ao Norte (paralela à costa) por 1000 km, somando-se à Corrente da Guiana (Guimarães & Marone, 1996).



Imagem do 11-02-2004

Imagem do 03-04-2004

Imagem do 06-09-2004

**Figura 70** – Imagens do satélite CBERS referentes ao ano 2004 obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

### 6.3.11. Efeito da evaporação

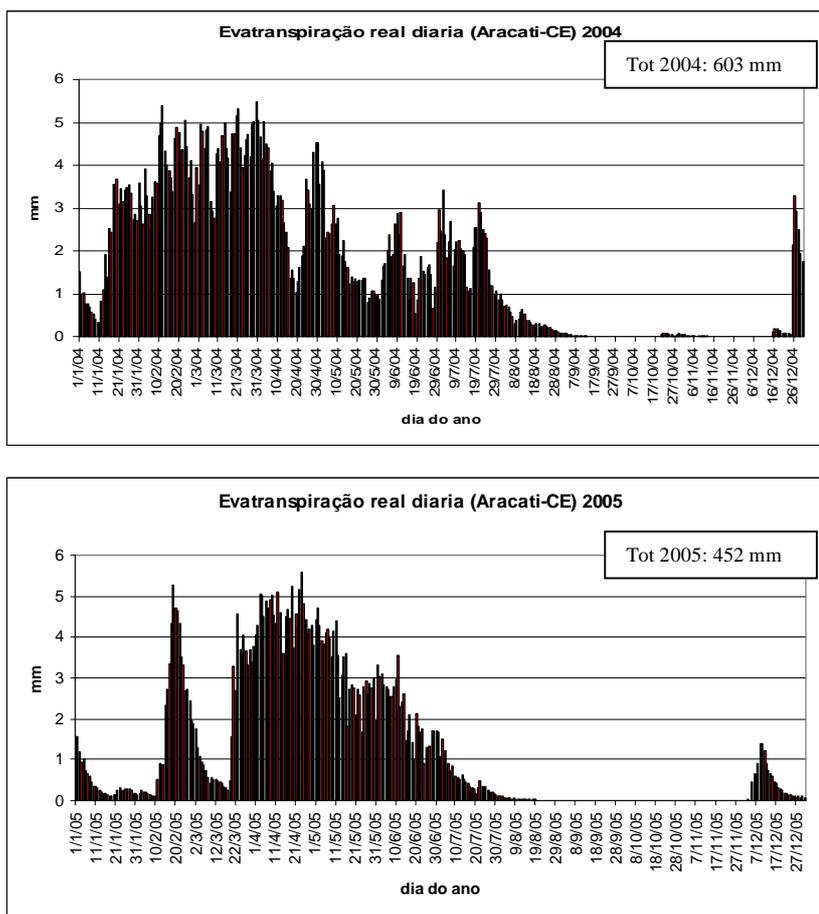
Para o cálculo da evaporação do estuário do rio Jaguaribe, foi preciso determinar a área total do mesmo, através do *software* ARCVIEW, obtendo-se um valor de 7,02 km<sup>2</sup> (700 ha), considerando a área da calha principal do rio, iniciando da foz até depois a cidade de Aracati.

O clima semi-árido na bacia do rio Jaguaribe apresenta uma pluviosidade média anual de 700 mm a 800 mm (1609 m<sup>3</sup>/s), temperatura média anual entre 26°C e 27°C, uma deficiência hídrica de 700 a 800 mm anuais (com oito a nove meses de déficit) e excedente hídrico de 0 mm anual (IBGE,1999).

O estuário e a bacia de drenagem do rio Jaguaribe vem sendo objeto de muitos estudos devido à dimensão da bacia de drenagem (área total de 72500 km<sup>2</sup>), que engloba aproximadamente metade da área do Estado do Ceará, além do fato que ao longo da bacia de drenagem muitos açudes foram formados para abastecimento hídrico da região. Deste modo considerando a complexidade da bacia de drenagem que possui em torno de 11 grandes açudes e outros tantos menores, muitos deles não tendo a afluência monitorada, o presente estudo optou pela utilização de dados secundários (Campos *et al*, 2000, *apud* SEMACE/LABOMAR, ZEE, 2005) que estimaram a descarga líquida para o estuário para uma série temporal de longo prazo. Portanto até a década de 60 o estuário do rio Jaguaribe recebia uma descarga líquida média de 112 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, porém devido à construção de alguns açudes, a descarga líquida para o estuário foi reduzida para 48 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, sendo este o fluxo médio anual para o estuário do rio Jaguaribe.

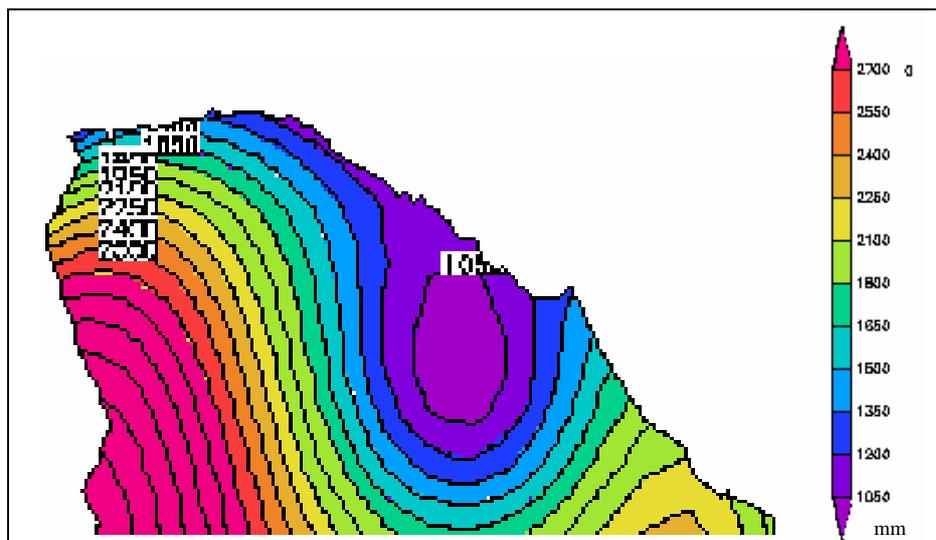
Na figura 71 observa-se os gráficos dos valores diários de evapotranspiração real no município de Aracati nos anos de 2004 e 2005, evidenciando como este fator é elevado nos meses

de chuva enquanto nos meses de seca é praticamente nulo, em virtude do fato que a evapotranspiração real depende da quantidade de água presente no solo para ocorrer a transformação em vapor por efeito da radiação solar.



**Figura 71** - Dados de evaporação real no município de Aracati para o ano de 2004 e 2005 (fonte: PROCLIMA, 2006, [www.cptec.inpe.br/proclima/maps.shtml](http://www.cptec.inpe.br/proclima/maps.shtml)).

As taxas de evaporação potencial média anual para as cidades e distritos localizados na faixa litorânea do litoral do Ceará variam, aproximadamente, entre 1050 mm a 2250 mm conforme o gráfico da Figura 72.



**Figura 72** - Climatologia anual da Evaporação (mm), para o litoral do Estado do Ceará. Período: 1961 a 1990. segundo INMET, 1992 . Fonte: SEMACE/LABOMAR, 2005.

Para o município de Jaguaruana-CE a evaporação média mensal mais significativa ocorre nos meses de setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro, atingindo valores menores em março, abril e maio, que correspondem ao período chuvoso dessa localidade. A média anual foi de cerca 1800-2000 mm/ano (INMET, 1992 *apud* ZEE, 2005).

Levando em conta o valor da evaporação potencial para a área do rio Jaguaribe (valor entre 1800 e 2000 mm/ano) obteve-se, na conversão de unidade de  $m^3/s$  para mm, valores entre 0,40 e 0,44  $m^3/s$  (área do estuário de cerca 7  $km^2$ ). Levando em consideração a área total de manguezal do estuário do rio Jaguaribe, de 11,64  $Km^2$  para o ano 2002 (Monteiro, 2005), pode se considerar uma evapotranspiração total de 1,0 – 1,2  $m^3/s$ . Neste caso a evaporação tem um valor muito baixo para influenciar o balanço hídrico do rio através a perda de água.

### 6.3.12. Análise das curvas de maré e de vazão

Na análise dos dados de vazão, foram geradas as curvas de variação dos valores da mesma, e depois comparadas com as curvas da maré referente ao porto do Mucuripe. As figuras 73, 74, 75 e 76 representam esta relação entre as curvas, mostrando o atraso da maré nas 4 zonas

a partir da zona mais longe da foz (perfil 2). A curva de vazão mostra uma irregularidade porque foi construída com os dados medidos ao longo do perfil, e sendo os dados a cada 30-40 minutos, a curva resultou pouco curvilínea. Além disso, os perfis percorridos com o barco apresentaram um deslocamento de posição devido ao erro visual, e assim uma batimetria um pouco diferente de um perfil para o outro.

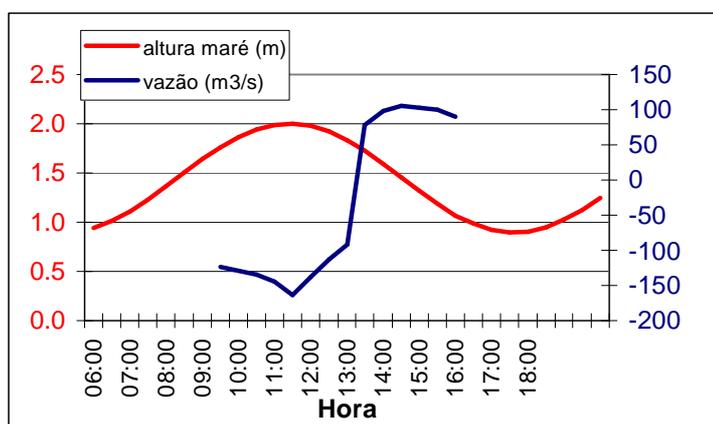


Figura 73 – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no **perfil 2** no rio Jaguaribe..

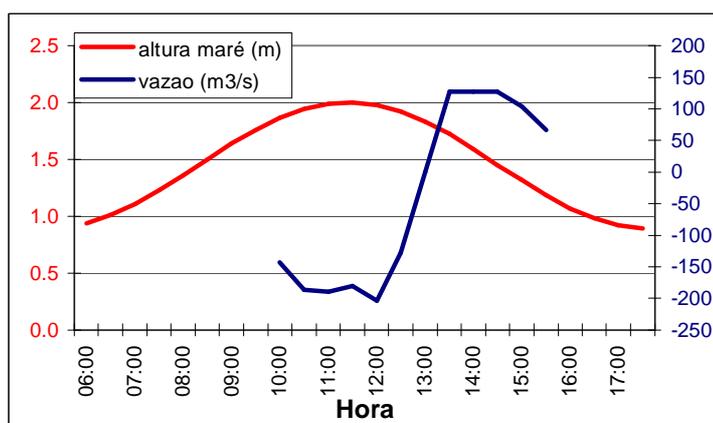
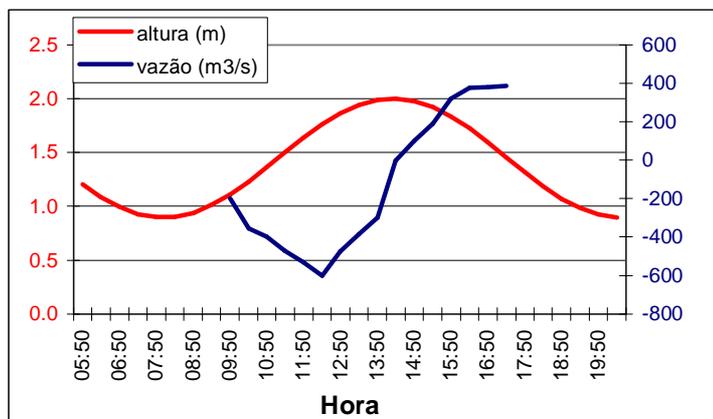
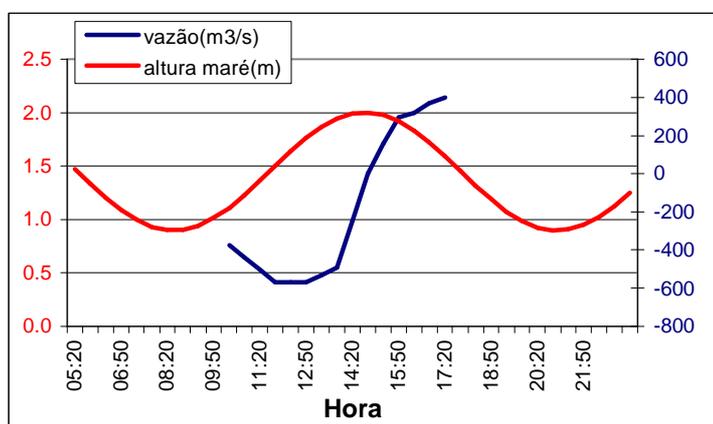


Figura 74 – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no **perfil 1** no rio Jaguaribe..



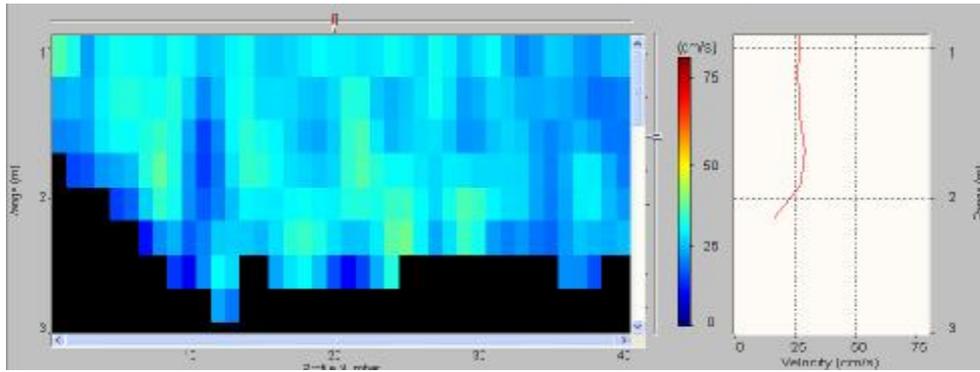
**Figura 75** – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no **perfil 3** no rio Jaguaribe..



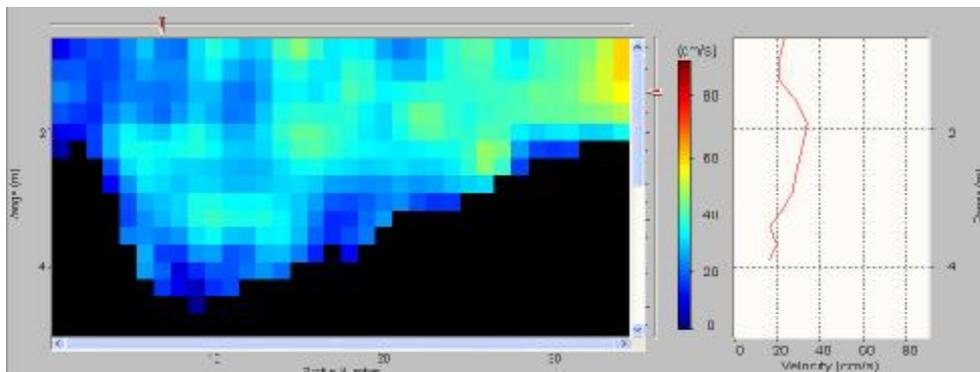
**Figura 76** – Relação curva maré-vazão ao longo da medição no **perfil 4** no rio Jaguaribe.

Nos gráficos, é possível observar como a curva de vazão fica mais paralela e parecida com a curva de maré nos perfis próximos a foz (zona 3 e 4). Nestes dois perfis, portanto, o estuário resulta caracterizado fortemente por condições marinhas. Nos perfis 2 e 1, em proximidade da cidade de Aracati, a curva de vazão resulta mais vertical, indicando uma fase de enchente e vazante mais rápida.

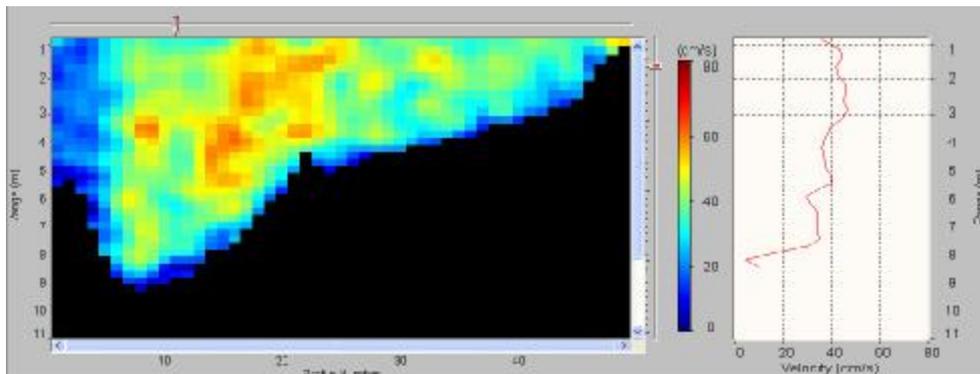
As figuras 77, 78, 79 e 80 mostram as sessões do rio com as velocidades da corrente nos 4 perfis, durante a máxima vazão de cada um deles. As velocidades foram expressas em cm/s. As maiores velocidades foram evidenciadas nos perfis 3 e 4, com valores até 60 cm/s.



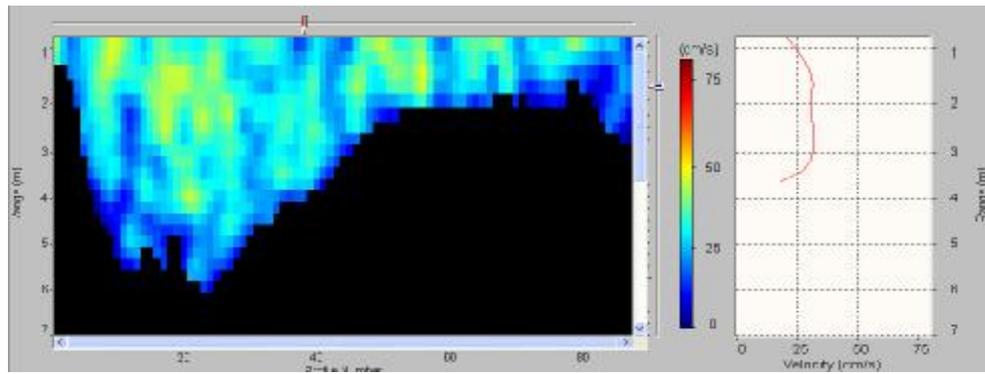
**Figura 77** – Seção do Perfil 2 (hora 11:24, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.



**Figura 78** – Seção do Perfil 1 (hora 11:08, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.



**Figura 79** - Seção do Perfil 3 (hora 10:42, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.



**Figura 80** – Seção do Perfil 4 (hora 11:07, vazão máxima) registrado no rio Jaguaribe, ilustrando a velocidade (cm/s) da corrente.

### 6.3.13. Estudo sobre a vazão e as correntes no rio Mamanguape

Entre os dias 17 e 19 de setembro de 2005 foram efetuadas medições das correntes no estuário do rio Mamanguape, localizado cerca 150 km ao norte de João Pessoa, capital do estado da Paraíba.

O barco utilizado para o trabalho foi um barco de cerca 6 m de comprimento, de madeira, utilizado na pesca local com um calado de 1m, que permitiu a navegação em águas rasas.

A figura 81 mostra a área de trabalho com os perfis registrados. Evidenciando-se a grande extensão de mangue que acompanha o estuário do rio.

Os perfis 1, 2, 3 e 4 foram registrados em condições de maré vazante; o perfil 5 foi registrado no momento da estufa, em seguida, foram realizadas medições do mesmo perfil para 2 horas a partir do momento de inversão do fluxo no perfil 5, com mais 3 perfis (5A-5B-5C) registrados a cada 30 minutos para observar o aumento do fluxo próximo a barra do rio com a maré enchente.

Na tabela 6 são resumidos os dados de vazão e velocidade média da corrente nos perfis, estudados ao longo do estuário do rio Mamanguape.

**Tabela 6** - Resultados das medições com o ADCP no rio Mamanguape (Paraíba), no dia 19 de setembro de 2005.

Numero do perfil	1	2	3	4	5	5A	5B	5C
Hora	12.15	12.30	12.40	12.55	13.15	13.55	14.40	15.20
Vel. Média (m/s)	0,14	0,19	0,2	0,17	0,01	-0,35	-0,49	-0,55
Area Seção (m <sup>2</sup> )	1142	894	915	929	-	1358	1751	1914
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	160	170	183	158	-35	-465	-858	-1053

Foi possível observar que o perfil 5 foi caracterizado, sendo ponto de estufa, ou seja, a inversão do fluxo de maré vazante para maré enchente.

Os três perfis que seguintes, 5A, 5B e 5C, mostraram o aumento da intensidade do fluxo nos intervalos de cerca 30 minutos.

A vazão máxima que foi medida foi de 1053 m<sup>3</sup>/s (em condições de maré enchente) no perfil 5, onde a profundidade máxima do rio variou entre os 2,5 e 6 m e a largura é de cerca 400 m.

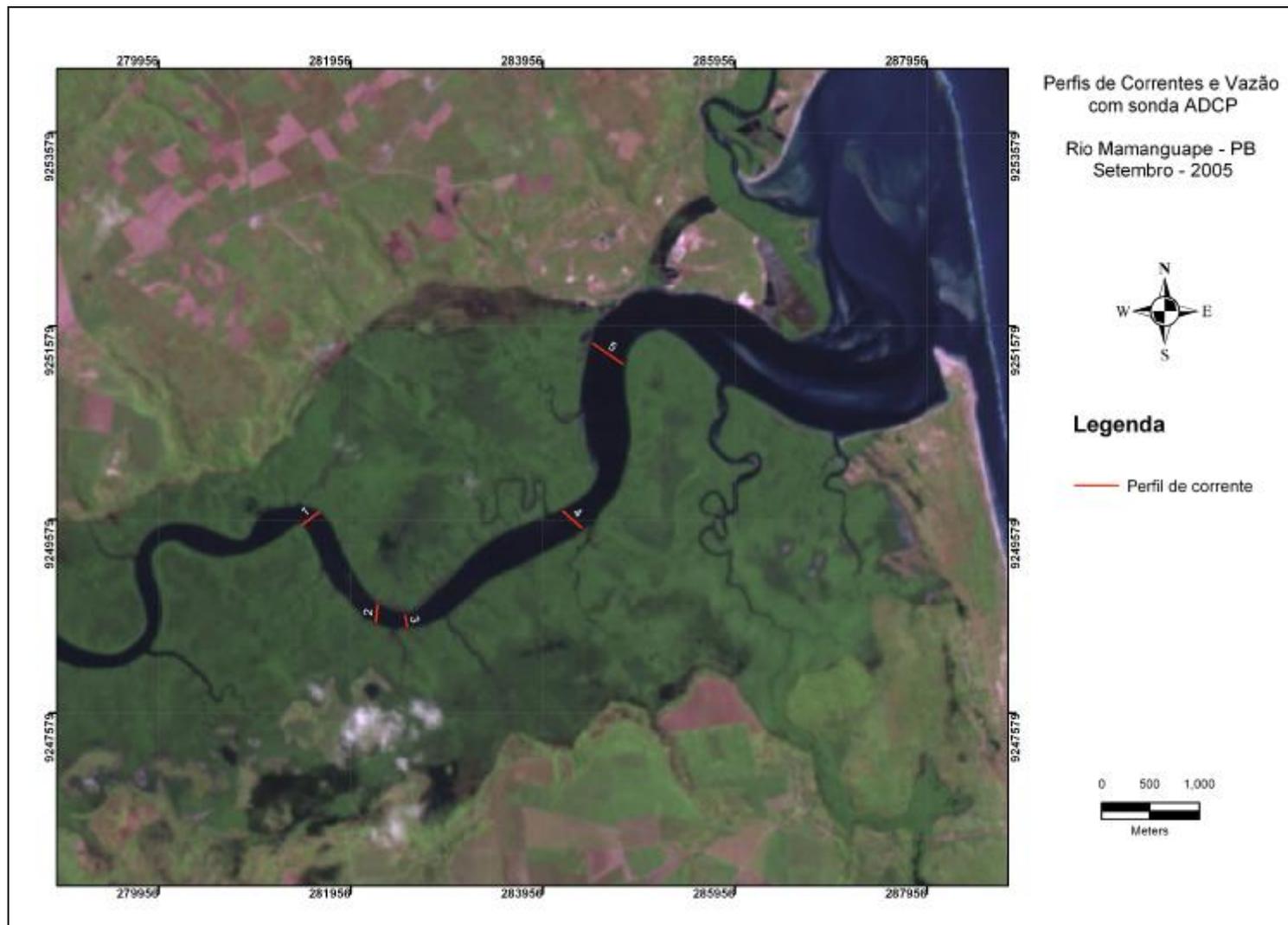
A velocidade da corrente observada no perfil 5 foi bastante elevada, alcançando valores médios de 0,55 m/s, que provavelmente devem ser maiores em condições de maré cheia e época de chuva.

Os valores máximos da velocidade da corrente foram de 0,75 m/s, na parte central do canal onde foram registradas as maiores profundidades e o maior fluxo de água.

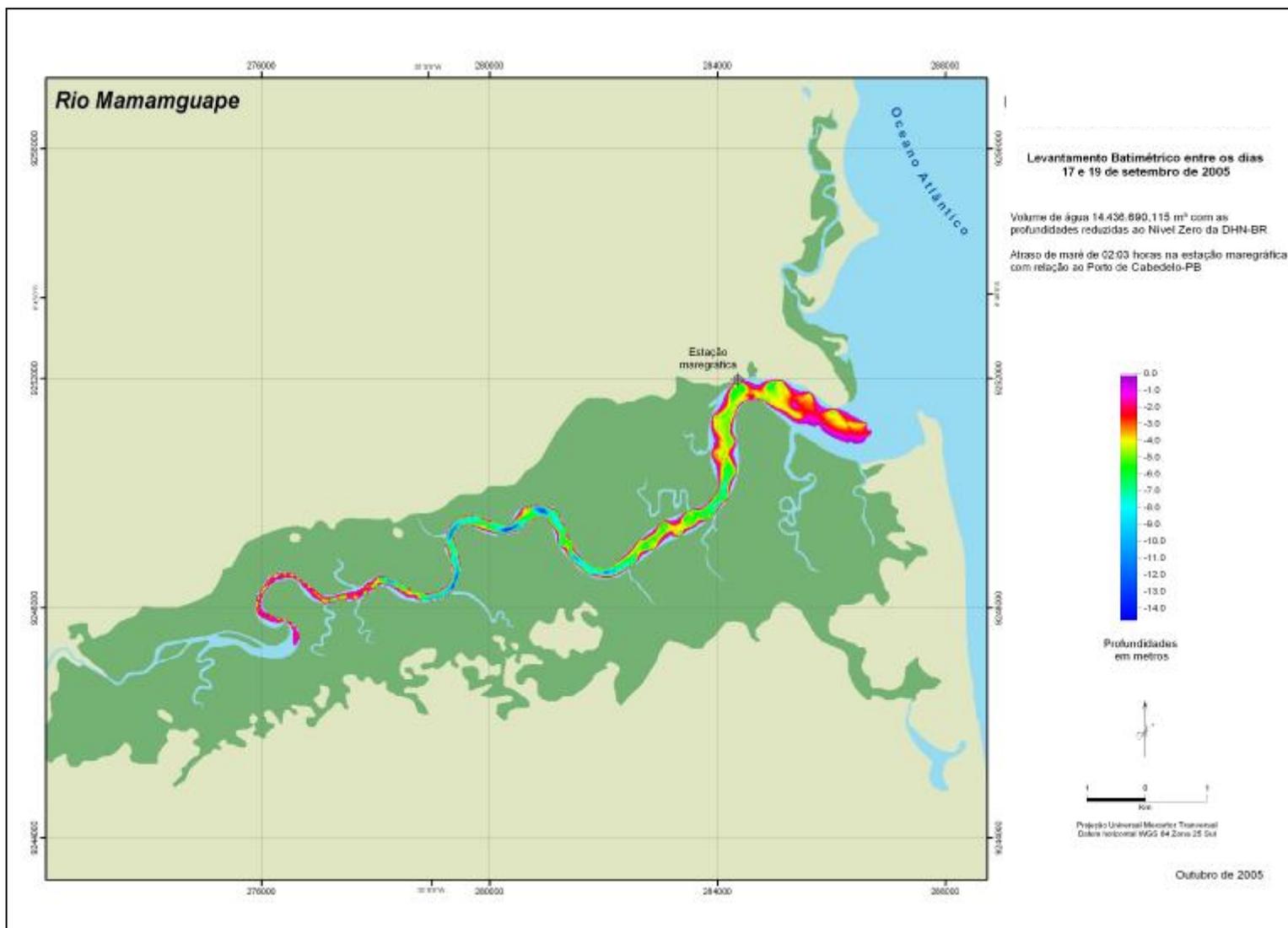
A figura 82 mostra o levantamento batimétrico feito durante os dias de medição da vazão do rio Mamanguape, evidenciando o atraso de maré de cerca 2 horas no ponto da estação maregráfica, próximo ao perfil 5.

A tábua de maré do porto de Cabedelo foi utilizada como referência para calcular o atraso da maré dentro do estuário. No dia das medições a preamar foi as 04:58 (2.8m) e a baixa as 11:04 (0.1m), segundo o DHN , 2005.

O rio Mamanguape demonstrou ter estratificação na coluna de água, evidenciando, nas medições de corrente, o fluxo estratificado em saída e em entrada durante a fase de maré enchente e vazante.



**Figura 81** - Perfis de corrente e vazão percorridos no estuário do rio Mamanguape, setembro de 2005.



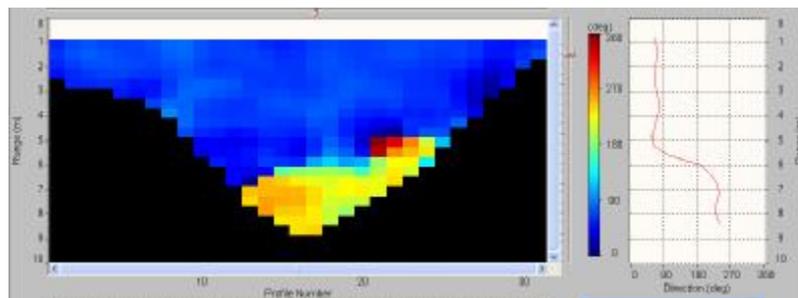
**Figura 82** – Mapa batimétrico do estuário do rio Mamanguape, outubro de 2005.

A figura 83 mostra as direções do fluxo em alguns perfis de medição com o ADCP, evidenciando a estratificação da coluna de água. Os perfis 2 e 3 mostram a vazão do rio, com o fluxo de água doce na superfície e o fluxo de água salgada nos últimos 3 m de profundidade.

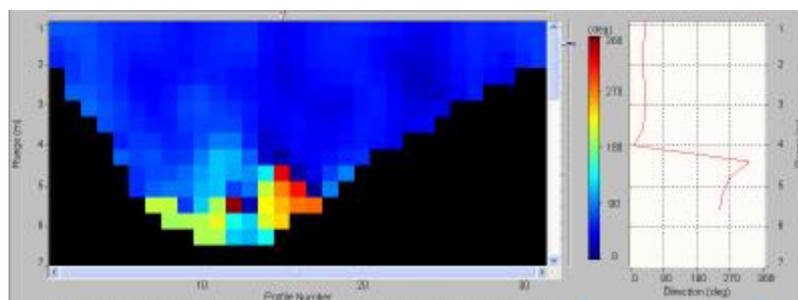
O perfil 5, registrado a partir da margem direita para a esquerda, mostra o fluxo em saída na margem direita do rio e o fluxo de água do oceano em entrada na margem esquerda (direção aproximada 220°), isso devido à conformação do rio no ponto de medição, onde a curva faz assim que o fluxo entrante seja mais forte na margem esquerda.

O perfil 5C, medido durante a fase de enchente, cerca 2 horas depois o ponto da estofa, mostra como na proximidade da barra do rio, o fluxo apareça completamente homogêneo.

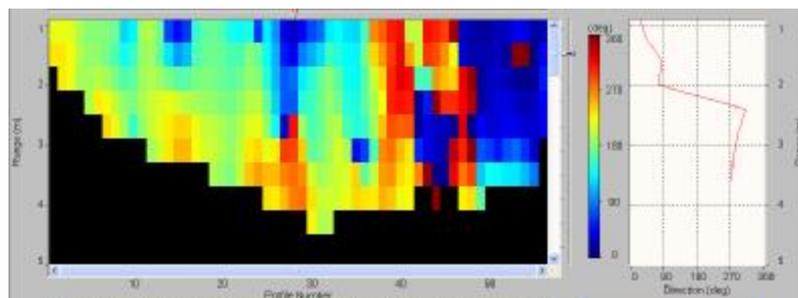
Isso poderia ser devido a grande força do fluxo entrante pelo mar, que no começo do processo de enchente, mistura completamente a água doce do rio.



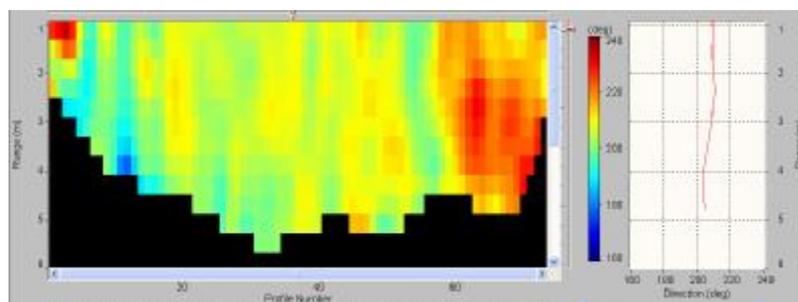
**Perfil 2**



**Perfil 3**



**Perfil 5 (ponto de estofa)**



**Perfil 5C**

**Figura 83** – Seção dos perfis no rio Mamanguape, mostrando a direção (graus) do fluxo medido, durante a maré vazante (perfil 2 e 3), o ponto de estofa (5) e a fase de enchente (5C).

#### 6.3.14. Análise das correntes fluviais /estuarinas

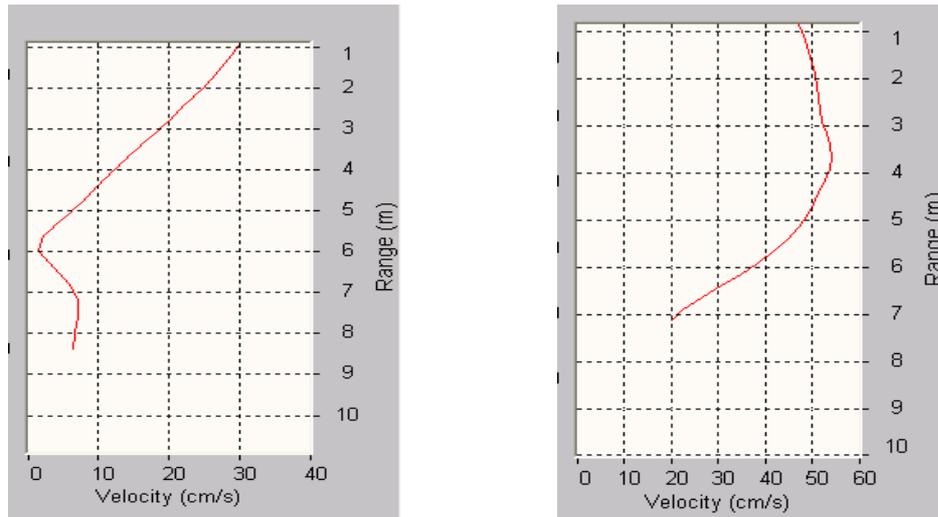
O estuário revelou-se um ambiente extremamente rico em variáveis que gerenciam a hidrodinâmica do mesmo. A análise das correntes representa uma das variáveis mais importantes que permitem estudar a vazão e a capacidade de suporte de um rio. O rio Jaguaribe foi caracterizado por valores médios das correntes incluídos entre 0,15 e 0,26 m/s entre a fase de maré vazante e maré enchente respectivamente, com valores máximos até 0,70 m/s. Os valores de vazão máxima medidos foram de 127 m<sup>3</sup>/s na parte de estuário mais próxima à cidade de Aracati e de 400 m<sup>3</sup>/s na foz do estuário, durante a fase de maré vazante, enquanto durante a fase de maré enchente, a vazão máxima resultou de 569 m<sup>3</sup>/s próximo à foz e de 189 m<sup>3</sup>/s próximo a Aracati. No estuário do rio Jaguaribe, as correntes durante a fase de maré enchente foram maiores que durante a fase de maré vazante.

O rio Mamanguape evidenciou valores de corrente entre 0,14 e 0,20 m/s durante a fase de maré vazante observada, e entre 0,35 e 0,55 m/s durante a fase de maré enchente. A vazão máxima medida foi de 1053 m<sup>3</sup>/s durante a maré enchente em proximidade da foz do rio, onde a largura do rio é de 400 m e a profundidade varia entre 2,5 e 6 m.

Este trabalho permitiu evidenciar a diferenças entre o perfil vertical da velocidade do fluxo em estuários com cunha salina e bem misturados.

A figura 84 mostra esta diferença, no estuário com cunha salina a velocidade diminui rapidamente com a profundidade por efeito da fricção, e no ponto de inversão da corrente por efeito da cunha salina, a velocidade aumenta de novo até o fundo do rio.

De acordo com a teoria (Miranda *et al*, 2002), o perfil mostra que a velocidade na cunha salina é muito menor que na camada superior, e o transporte de volume resultante na cunha salina é considerado desprezível.



**Figura 84** - Perfil vertical da velocidade da corrente no rio Mamanguape (estuário com cunha salina) - perfil 2, e perfil vertical de corrente no rio Jaguaribe, estuário bem misturado (perfil 10:42 -zona 3).

No estuário bem misturado como o rio Jaguaribe, o perfil da velocidade è mais parecido com aquele no mar. Sendo a coluna d'água homogênea em salinidade e temperatura, o perfil diminui com a profundidade até alcançar valores próximos ao zero no fundo do rio. A velocidade superficial, sofrendo o efeito do vento, pode ter velocidades levemente inferiores devido a direção contraria do vento, como no caso de alguns perfis no Jaguaribe.

## 7 CONCLUSÕES

- As simulações de corrente elaboradas com o *MIKE 21* representaram de maneira satisfatória a dinâmica litorânea induzida pelos ventos ao longo do litoral cearense. A plataforma continental do Estado do Ceará, devido aos processos ao longo dos séculos resulta numa maior extensão (em largura) na porção norte, onde o litoral tem uma direção leste-oeste, pois as correntes e o conseqüente transporte litorâneo diminuem de intensidade determinando sedimentação mais intensa.
- A utilização do ADCP mostrou-se muito importante para estudos de correntes, permitindo medidas rápidas e precisas, com a possibilidade de coletar uma quantidade de informações que com outros instrumentos, como o correntômetro a hélice, requeria mais tempo, com conseqüentes gastos maiores para as saídas de campo.
- O ADCP se demonstrou também muito eficaz nos estudos em áreas portuárias, permitindo identificar de maneira rápida e precisa a dinâmica do fluxo evidenciando efeitos da refração do fundo e difração das estruturas de proteção.
- As análises de campo na região metropolitana de Fortaleza, as comparações dos dados medidos com o ADCP e as simulações elaboradas com o *MIKE 21*, mostraram resultados semelhantes e comparáveis, permitindo verificar a confiabilidade da ferramenta informática.
- O correntômetro acústico ADCP, teve grande aplicabilidade mesmo em áreas costeiras, como que em áreas estuarinas, mas evidenciou algumas implicações durante a utilização em espelhos de água caracterizados por muitas ondas, onde o forte balanço do barco pode afetar a qualidade na recepção do sinal acústico e conseqüentemente dos dados a serem gravados. Também no caso de medições em águas muito rasas, o ADCP revelou uma deficiência na aquisição dos dados. Devido a presença da *blanking distance* (de 0,40 cm), e da profundidade em que o aparelho é colocado durante a instalação (cerca de 0,50 cm abaixo da linha d'água),

a primeira célula da coluna d'água a ser medida pode ser somente a uma profundidade mínima de 1,10 m; precisando de pelo menos 2 ou 3 células válidas para ter uma qualidade boa do sinal, a medição da corrente vai ter um resultado bom em uma coluna d'água de, no mínimo, 2 metros de profundidade.

- A qualidade dos resultados aumentou quando, ao longo do perfil navegado, foi mantida uma velocidade do barco muito baixa, da ordem de 1 m/s, e o aparelho foi instalado na borda do barco a sotavento, permitindo uma proteção maior a chegada das ondas.

## 8 RECOMENDAÇÕES

Este trabalho de dissertação permitiu recolher dados de corrente referente à região costeira do Estado do Ceará, que podem ser base de dados importantes para estudos futuros sobre transporte de sedimento de fundo, em suspensão e análise do balanço sedimentar da região litorânea do Estado do Ceará.

O estudo se propôs definir de maneira geral a hidrodinâmica para o litoral cearense. No entanto, uma análise mais detalhada poderia ser desenvolvida a partir dos dados de clima de ondas, para áreas com extensão menor, mas de grande importância ambiental, podendo evidenciar pontos afetados por erosão e permitir elaborar soluções de engenharia costeira com intuito de reduzir o problema.

No caso dos dois ambientes estuarinos estudados, outras medições precisariam ser feitas ao longo do ano, para justificar o balanço hídrico do estuário e obter informações completas em relação aos valores de vazão.

Os métodos eulerianos como correntômetros a hélice, ou acústicos como no caso do ADCP, são preferivelmente os melhores para ter informações eficazes sobre o fluxo de um estuário ou de um rio. Observando os dados medidos no rio Jaguaribe, no caso dos perfis de velocidade da seção transversal, ficou clara a importância de ter medições em todos os níveis da coluna de água e da seção inteira para disponibilizar de um número de dados suficiente para o estudo de caso. No caso da impossibilidade de utilizar um instrumento mais completo como o ADCP, o uso de um correntômetro a hélice mais simples pode fornecer informações importantes para estimar a vazão e a dinâmica das marés em um estuário. Vale ressaltar que as medições pontuais de velocidade e direção da corrente deveriam ser efetuadas pelo menos a cada metro de profundidade, ou pelo menos na superfície, meio e fundo para rios com profundidades muito elevadas, na impossibilidade de fazer muitas medições. A velocidade da água foi maior, nas medições, na parte central ou mais profunda do rio do que junto às margens. Da mesma forma, a velocidade é mais baixa junto ao fundo do rio do que junto à superfície. Em função desta variação da velocidade nos diferentes pontos da seção transversal, utilizar apenas uma medição de velocidade pode resultar em uma estimativa errada da velocidade média. Por exemplo, a

velocidade medida junto à margem é inferior à velocidade média e a velocidade medida junto à superfície, no centro da seção, é superior à velocidade média.

Para obter uma boa estimativa da velocidade média de uma seção do rio em ausência de um perfilador acústico, portanto, é preciso fazer várias medições ao longo da coluna d'água e em várias verticais ao longo da seção.

A experiência de campo que foi adquirida desenvolvendo este estudo mostrou que as medidas de corrente nos estuários devem ser feitas em intervalos constantes de tempo ( $\Delta t$ ) durante pelo menos um período da maré predominante na região em estudo. Se os intervalos não forem constantes, teria que ser feita uma interpolação dos dados a fim de obtê-los dessa forma. Seria também importante que o instante inicial ( $t=0$ ) da série temporal das medidas fosse quando a corrente é praticamente nula, condição esta que para a maioria dos estuários ocorre no ponto de inversão do fluxo entre maré alta e baixa (ponto de estofa). Em estuários com regime semi-diurno como nos casos analisados, o período da maré  $T$  é igual a 12,42 hs; logo, se forem amostrados um total de 12 perfis verticais, o intervalo médio de amostragem,  $\Delta t$  será igual a 1,035h. Uma quantidade de dados deste tipo seria suficiente para descrever o comportamento do estuário em relação ao fluxo de maré, a vazão e a intensidade da corrente. Com isso, estudos de descarga do rio, avaliação da capacidade de suporte e estudos de química sobre poluentes que afetam o ambiente, poderiam ser estudados no detalhe.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACES, *Technical reference*, Leenknecht A.David, Szuwalski Andre, Sherlock R. Ann. *Coastal Engineering Research Center, Departament of the Army*. 1992

Alves R. RN., Nishida A. K and Hernández M. IM. 2005. *Environmental perception of gatherers of the crab 'caranguejo-uçá' (Ucides cordatus, Decapoda, Brachyura) affecting their collection attitudes*. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine.

Bagnold, R. A. 1954. Experiments on gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. Roy. Soc. London (A) 225pp.

Bigarella J.J. 1975. *The Barreiras Group in northeastern Brazil*. An. Acad.Bras. Ciências, 47:365- 393.

Bittencourt A.C.S.P., José M.L. Dominguez, Martin L. & Iracema R. Silva. Uma aproximação de primeira ordem entre o clima de onda e a localização, de longa duração, de regiões de acumulação fluvio-marinha e de erosão na costa norte do Brasil. Revista Brasileira de Geociências 33(2):159-166, junho de 2003.

Bittencourt Abilio C.S.P., Louis Martin, José M.L. Dominguez, Iracema R. Silva e Diana L. Sousa. 2002. *A significant longshore transport divergence zone at the Northeastern Brazilian Coast: implication on coastal quaternary evolution*.

Brandão, R.L. Diagnostico Geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza. P. 57-62. 1998.

Brown J., Colling A., *et al.* (Open University), 1989. *Ocean Circulation*. Oxford, Pergamon, 238 pp.

CAGECE, VBA CONSULTORES, 2000. Projetos básicos e executivos dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário da área do complexo industrial do Pecém, com estudos de viabilidade econômica e avaliação ambiental (documento eletrônico).

Calliari, L. J. ; Klein, A. H. F. ; Barros, F. . Beach Differentiation along the Rio Grande do Sul coastline (Southern-Brazil). Revista chilena de historia natural, Valdivia, Chile, v. 69, p. 485-493, 1996.

Christofolletti, A. Geomorfologia. São Paulo: E. Bücher; Ed. da Universidade, 1974. 149p.

CIIAGRO, Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. Definições sobre balanço hídrico, disponível no site <<http://ciiagro.iac.sp.gov.br/>>, acessado no dia 14 de fevereiro de 2006.

Departamento de Hidrografia e Navegação. 2004, 2005, 2006. Tábuas de Maré. Disponível em: <[www.dhn.mar.mil.br](http://www.dhn.mar.mil.br)>.

Dias, F. J. S. 2005. Avaliação da descarga e geoquímica do material em suspensão no estuário do rio Jaguaribe - CE. Monografia. Universidade Federal do Ceará. 107p.

D.H.I. *Reference Manual*, 1997-2002.

DNPM - Ministério da Agricultura e Reforma Agrária - 1974. Carta geológica do Brasil ao milionésimo; folha Jaguaribe – SB24, folha Fortaleza – SA24. Texto Explicativo. Brasília, 95p.

Doyle T. W., Richard H. Day, and Janelda M. Biagas U. *Integrated assessment of the climate change impacts on the gulf coast region, Chapter 11*, p.206-209.

Engelund, F.& Fredsøe, J. (1976) *A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. Nordic Hydrology*, Vol 7, p. 296-306.

Filizola N. P., Guimarães, S. V., Guyot J.L. (1998). Medição de vazão em grandes rios. Uso do Perfilador Doppler-Acústico de Corrente. ANEEL. Documento eletrônico disponível em <www.mma.gov.br>

Fratantoni M. D., Johns E. W. , Townsend L. T. (1995). *Rings of the North Brazilian Current: their structure inferred from observations and a numerical simulation. Journal of Geophysical research*, vol 100, 10 p, 633-10, 654.

Guimarães F. R. M., Marone E. 1996. Oceanografia Física com ênfase em ambientes estuários 149p.

IBGE - Diagnostico ambiental da bacia do rio Jaguaribe, diretrizes gerais para a ordenação territorial, Salvador 1999, 77p.

IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estados Ambientais. Climatologia do Brasil, 2º Ed.- R.J., 1989, 422 p.

INMET, 1992. *Normais Climatológicas 1961-1990*. Brasília, DF. 84 p.

INPH/DHI/UFC 1997. Avaliação dos impactos na morfologia costeira, através de modelagem numérica, proveniente da implantação do porto do PÉCEM-CE. 80 p.

INPH, Monitoramento ambiental da área marítima adjacente a Pecém – CE. Medições de onda, 1996-2001, e 2005 (janeiro - março).

INPH, Relatório de medições de vento realizadas na ponta do Pecém – CE, 2000 – 2003.

Labomar, Relatório SDOES-Março 2005.

Labomar, Programa de monitoramento do sistema de descarga de efluentes da USINA Termoelétrica – Complexo Industrial e Portuário do Pecém – Estado do Ceará. Relatório de Atividades, 2005.

Longuet-Higgins MS (1953) *Mass transport in water waves. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 245, No. 903 (Mar. 31, 1953) , pp. 535-581

Mabesoone J.M, Campos Silva A., Beurlen K. 1972. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, *Rev. Bras. Geoc.*, 2:173-188.

Meireles A. J. de A., Silva E. V., Raventos J. S., 2001. Geomorfologia e dinâmica ambiental da planície litorânea entre as desembocaduras dos rios pacotí e ceará, Fortaleza – Ceará. Revista GeoNotas Vol. 5-1, Dep. de Geografia, Universidade Estadual do Maringá.

Morais, J. O. –1980- *Aspectos da geología ambiental costeira do município de Fortaleza*. Tese de Professor Titular. Universidade Federal do Ceará-UFC, Departamento de Geologia.

Morais, J. O. 1981, Evolução sedimentológica da enseada do Mucuripe. Arquivo de Ciências do Mar 21(1/2), p.19-49. LABOMAR/UFC. Fortaleza.

Morais, J. O. 1972. Processos de Assoreamento do Porto no Mucuripe. Arquivo de Ciências do Mar 12(2), p.139-149. LABOMAR/UFC. Fortaleza.

Maia, L. P., Moraes, Jader Onofre de. Aspectos históricos e evolução a médio prazo da costa de Fortaleza. In: I Simpósio de Processos Sedimentares e Problemas Ambientais na Zona Costeira Nordeste do Brasil, 1995, Recife-PE. Anais do I Simpósio de Processos Sedimentares e Problemas Ambientais na Zona Costeira Nordeste do Brasil. , 1995.

Maia, L P..1998a. *Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral. Tese de Doutorado. Universidade de Barcelona. 256p.*

Maia, L P. ; Serra, J.; Jimenez, J. & Morais, J.O..1998b. Field observations of cyclic changes in sediment distribution at Fortaleza, Brazil. From unimodal to bimodal distribution as result of beach changes. 15<sup>th</sup> International Sedimentological Congress (IAS). Alicante, Spain.

Miranda, L.B., Castro, B.M., Kjerfve, B. 2002. Princípios de Oceanografia física de Estuários. São Paulo. 413p.

Monteiro, L.H.U. Estudo das Áreas de Mangues entre os Estados Piauí e Pernambuco com Enfoque para o Estado do Ceará nos anos 1978 e 1999/2004 utilizando sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, 2005.

Noernberg, M. A. 1997. Uma Introdução à Geomorfologia Costeira e seus Processos, 28p.

PROCLIMA, Programa de monitoramento climático em tempo real na região nordeste. 2006, Análise Municipal das Componentes do Balanço Hídrico. Disponível em <[www.cptec.inpe.br/proclima/maps.shtml](http://www.cptec.inpe.br/proclima/maps.shtml)>.

Rabelo, M. R., 2004. Caracterização geoambiental da região costeira entre Fortaleza e Paracuru- subsídios para a elaboração do mapa de sensibilidade ambiental. Monografia, Universidade Federal do Ceará.

Rozane, V. M., Lacerda, L. D., Abreu, I. M., Dias, F. J. S, 2003. Efeitos da açudagem no rio Jaguaribe, Ciência Hoje, vol 33, p 66-70.

Semace/Labomar – ZEE, Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Ceará, 2005.

Sontek/YSI. *ADCP Manual* v710. 2005.

Souza, D.L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Martin, L. & Dominguez, J.M.L.1999. Clima de ondas e variação das características texturais dos sedimentos durante a evolução da planície costeira associada à foz do Rio Jequitinhonha-Ba. VII Congresso da ABEQUA.

Thiago Filho, G.S., Carvalho A. N. V., Caetano G. T., dos Santos R. M.. O USO DO ADCP EM PEQUENOS E MÉDIOS CURSOS D'ÁGUA, 1999. *Grupo de trabajo sobre hidromecánica, Montevideo*, Uruguay, 11-14 de maio1999.

U.S. Army Corps of Engineers. 2002. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (vol 2-6).*Meteorology and wave climate*.

## 10 ANEXOS

1. Tabela das Condições locais de onda geradas por vários fenômenos meteorológicos.(Fonte: *Coastal Engineering Manual, U.S. ARMY, Capítulo 2*).

Type of Wind System	Wave Characteristics	Characteristic Height and Period
<u>Individual thunderstorm</u> No significant horizontal rotation. Size, 1-10 km	Very steep waves. Waves can become relatively large if storm speed and group velocity of spectral peak are nearly equal. Can be a threat to some operations in open-ocean, coastal, and inland waters.	H 0.5 - 1.5 m T 1.5 - 3 sec
<u>Supercell thunderstorms</u> Begins to exhibit some rotation. Size, 5-20 km	Very steep waves. Waves can become relatively large if storm speed and group velocity of spectral peak are nearly equal. Can pose a serious threat to some operations in open-ocean, coastal, and inland waters.	H 2 - 3 m T 3 - 6 sec
<u>Sea breeze</u> Thermally driven near-coast winds. Size, 10-100 km	Waves of intermediate steepness. Can modify local wave conditions when superposed on synoptic systems. Can affect some coastal operations.	H 0.5 - 1.5 m T 3 - 5 sec
<u>Coastal fronts</u> Results from juxtaposition of cold air and warm water. Size, 10 km across and 100 km long	Can modify local wave conditions near coasts. Minimal effects on wave conditions due to orientation of winds and fetches.	H 0.5 - 1.0 m T 3 - 4 sec
<u>Lee waves</u> "Spin-off" eddies due to interactions between synoptic winds and coastal topography Size, 10's of km	Generates waves that can deviate significantly in direction from synoptic conditions. Can affect coastal wave climates.	H 0.5 - 1.5 m T 2 - 5 sec
<u>Frontal squall lines</u> Organized lines of thunderstorms moving within a frontal area. Size, 100's of km long and 10 km across	Can create severe hazards to coastal and offshore operations. Can generate extreme wave conditions for inland waters. Waves can become quite large if frontal area becomes stationary or if rate of frontal movement matches wave velocity of spectral peak. Can create significant addition to existing synoptic-scale waves.	H 1 - 5 m T 4 - 7 sec

<u>Mesoscale Convective Complex (MCC)</u>	Important in interior regions of U.S.	H fetch-limited T fetch-limited
Large, almost circular system of thunderstorms with rotation around a central point (2-3 form in the U.S. per year).	Can generate extreme waves for short-fetch and intermediate-fetch inland areas.	U = 20 m/s
Size, 100-400 km in diameter		
<u>Tropical depression</u>	Squall lines superposed on background winds can produce confused, steep waves.	H 1 - 4 m T 4 - 8 sec
Weakly circulating tropical system with winds under 45 mph.		
<u>Tropical storm</u>	Very steep seas.	H 5 - 8 m T 5 - 9 sec
Circulating tropical system with winds over 45 mph and less than 75 mph.	Highest waves in squall lines.	
<u>Hurricane</u>	Can produce large wave heights.	Saffir Simpson Hurricane Scale
Intense circulating storm of tropical origin with wind speeds over 75 mph.	Directions near storm center are very short-crested and confused.	SS H(m) T(sec) 1 4-8 7-11
Shape is usually roughly circular.	Highest waves are typically found in the right rear quadrant of a storm.	2 6-10 9-12 3 8-12 11-13 4 10-14 12-15 5 12-17 13-17
	Wave conditions are primarily affected by storm intensity, size, and forward speed, and in weaker storms by interactions with other synoptic scale and large-scale features.	(see Table IV-1-4)
<u>Extratropical cyclones</u>	Extreme waves in most open-ocean areas north of 35° are produced by these systems.	Weak: H 3-5m T 5-10 sec
Low pressure system formed outside of tropics.	Large waves tend to lie in region of storm with winds parallel to direction of storm movement.	Moderate: H 5-8m T 9-13 sec
Shapes are variable for weak and moderate strength storms, with intense storms tending to be elliptical or circular.	Predominant source of swell for most U.S. east coast and west coast areas.	Intense: H 8-12m T 12-17sec Extreme: H 13-18m T 15-20sec
<u>Migratory highs</u>	Produce moderate storm conditions along U.S. east coast south of 30° latitude when pressure gradients become steep.	H 1 - 4 m T 4 - 10 sec
Slowly moving high-pressure systems.		
<u>Stationary highs</u>	Produce low swell-like waves due to long fetches.	H 1 - 3 m T 5 - 10 sec
Permanent systems located in subtropical ocean areas.	Can interact with synoptic-scale and large-scale weather systems to produce moderately intense wave generation.	
Southern portions constitute the trade winds.	Very persistent wave regime.	
<u>Monsoonal winds</u>	Episodic wave generation can generate large wave conditions.	H 4 - 7 m T 6 - 11 sec
Biannual outbursts of air from continental land masses.	Very important in the Indian Ocean, part of the Gulf of Mexico, and some U.S. east coast areas.	
<u>Long-wave generation</u>	Long waves can be generated by moving pressure/wind anomalies (such as can be associated with fronts and squall lines) and can resonate with long waves if the speed of frontal or squall line motion is approximately $\sqrt{gd}$ .	
	Examples of this phenomenon have been linked to inundations of piers and beach areas in Lake Michigan and Daytona Beach in recent years.	
<u>Gap winds</u>	These winds may be extremely important in generating waves in many U.S. west coast areas not exposed to open-ocean waves.	U = 40 m/s
Wind acceleration due to local topographic funneling.		

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)