



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO NO ESTUÁRIO
DO RIO CAETÉ (NE DO PARÁ)**

Dissertação apresentada por:

MARCELO WANDERLEY MATOS DE ABREU

**BELÉM
2008**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

- A162a Abreu, Marcelo Wanderley Matos de
Aplicação do modelo hidrodinâmico no estuário do rio
Caeté (NE do Pará) / Marcelo Wanderley Matos de Abreu –
2008
149 f. : il.
Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-
Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
Orientador; Maamar El-Robrini.
1. Circulação Hidrodinâmica. 2. Modelagem. 3. Estuário
do rio Caeté. I. Universidade Federal do Pará. II. El-Robrini,
Maamar, Orient. III. Título.

CDD 20. ed.:551.47098115



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

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO NO
ESTUÁRIO DO RIO CAETÉ (NE DO PARÁ).**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

MARCELO WANDERLEY MATOS DE ABREU


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

Data de Aprovação: **17/10/2007**


Comitê de Dissertação:



MAAMAR EL-ROBRINI (Orientador-UFPA)



JOÃO BAPTISTA DE CARVALHO (UNIVALI)



PAULO CÉSAR COLONNA ROSMAN (UFRRJ)

Belém

*Dedico esta dissertação aos meus pais
Francisco Matos e Gilka Wanderley Matos,
e aos meus irmãos Danilo, Felipe e Thiago pelo
incentivo, apoio e companheirismo que me oferecem.
Verdadeiros alicerces da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A dificuldade enfrentada para a finalização desta dissertação foi muito grande, a realização foi possível graças ao apoio recebido de algumas pessoas e instituições. Esta é uma das partes mais importantes de um trabalho, na qual posso expressar minha gratidão àqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a sua finalização.

Desta maneira agradeço:

À Universidade Federal do Pará, através do Instituto de Geociências, do Laboratório de Modelagem de Estuários e Oceano Atlântico (MODELAZ) e do Grupo de Estudos Marinhos Costeiros (GEMC).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por todo o incentivo na forma de bolsa de estudo, comprovando assim o comprometimento com o desenvolvimento técnico/científico.

Ao Prof. Dr. Maâmar El-Robrini, pela coragem de ousar numa nova linha de pesquisa, pela orientação, pelo incentivo e apoio, principalmente nos momentos difíceis e pela oportunidade de desenvolver e aperfeiçoar o meu conhecimento científico. As cobranças foram muitas, mas sei que foi pensando no que seria melhor para meu desenvolvimento e êxito acadêmico.

Ao Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho, da UNIVALI/SC, pela orientação, pelos questionamentos, pela estadia e pela oportunidade de aperfeiçoar meu conhecimento quando estive em Itajaí/SC.

Ao Prof. Leandro Franklin (LELO), também da UNIVALI/SC, pelo companheirismo, pela ajuda e pelas discussões científicas estabelecidas no Laboratório de Oceanografia Física.

Ao Prof. Ph.D. Paulo César Colonna Rosman pela oportunidade que me deu de aprender, durante o período que passei na UFRJ/COPPE, pelos questionamentos e orientações à respeito da modelagem.

Ao Prof. Dr. Pedro Walfir M. Souza Filho e a Profa. Msc. Susane Rabelo de Souza pelo fornecimento dos dados batimétricos que foram de grande importância para a realização desta tese.

Aos meus pais Francisco Matos e Gilka Wanderley Matos, pelo apoio que nunca me faltou, pelo incentivo e pela confiança depositada durante mais esta etapa da minha vida. Também aos meus irmãos Danilo, Felipe e Thiago pelo companheirismo e apoio.

À Juliana Martins, pelo incentivo, companheirismo, confiança e pela paciência quando estive ausente em alguns momentos.

À Elvira e Jaime Pitaluga por tornarem possível minha estadia no Rio de Janeiro, bem como proporcionarem momentos de lazer e descontração.

À tia Celeste pelo carinho, atenção e disposição durante minha estadia no Rio de Janeiro.

Ao Leandro Patrick, pela amizade e parceria nas viagens, nos campos e pelas discussões acerca da modelagem estuarina e muitas outras histórias.

Não poderia deixar de expressar meus sinceros agradecimentos aos meus amigos do Laboratório de Modelagem pelas discussões científicas, pelas diversas histórias contadas no laboratório e nos corredores, pelos momentos de descontração e desconcentração também, que foram inesquecíveis, e principalmente pela amizade verdadeira estabelecida durante esse ciclo de minha vida. Agradeço a todos do laboratório e em especial aos amigos: Ismaily Bastos, Gheisa Oliveira, Leandro Patrick, Paulo Henrique, Juliana Guerreiro e Charles Carvalho.

Agradeço aos pescadores de Ajuruteua: Binho, Japão, Ted e Baixinho pela ajuda no fundeio e instalação dos equipamentos, bem como ao Sr. Alvacir por ceder o trapiche da fábrica de gelo para instalação do marógrafo.

Enfim, agradeço sinceramente à todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização da mesma.

*Somente os fortes sobrevivem, pois os fracos
logo se deixam vencer pelo cansaço*

RESUMO

A costa norte do Brasil é recortada por uma grande e complexa rede hidrográfica, onde o principal rio é o Amazonas. Este rio, assim como outros menores, desembocam no Oceano Atlântico formando os estuários, que são freqüentemente definidos como um trecho do rio, onde ocorre a interação das águas fluviais e oceânicas (zona de transição). No NE do Pará está inserido o estuário do rio Caeté (00°43'18" – 00°04'17" S e 46°32'16" – 46°55'11" W) que sofre influência de macro-marés semi-diurnas com amplitude média de 5,6 m, correntes costeiras (aproximadamente 0,75 m/s de velocidade média), ondas de 0,7 m e ventos alísios, que possuem direção preferencialmente NE com velocidade média de 6 m/s. Esse estuário situa-se numa região tropical de clima úmido, com temperatura média anual de 27°C e elevada pluviosidade com média anual de 2500 mm/ano. Na região, observa-se também, a existência de épocas com características distintas: chuvosa (dezembro a maio), seca (junho a novembro) e intermediária. O estuário do rio Caeté se enquadra num estuário dominado por marés (quanto aos processos físicos), do tipo formado em planície costeira (quanto à geomorfologia) e do tipo bem misturado (quanto à circulação das águas). A circulação hidrodinâmica em estuários é considerada como um importante processo que vem sendo continuamente estudado, porém na região Norte do Brasil, ainda são poucos os estudos de modelagem estuarina. Sendo assim, adotou-se para este trabalho o uso do modelo hidrodinâmico do programa de Modelagem SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), visando observar os aspectos gerais da circulação hidrodinâmica em diferentes fases de maré (preamar, baixamar, enchente e vazante) no estuário do rio Caeté (PA) e assim validar, através da modelagem, os dados (correntes, marés e amplitude de maré) coletados no estuário do rio Caeté. A metodologia foi executada em duas etapas (campo e laboratório). A etapa de campo consistiu em: (1) levantamento ecobatimétrico, vinculado ao Projeto de Pesquisa do PROGRAMA SET/CT-Hidro que utilizou uma base cartográfica georeferenciada previamente digitalizada, tendo como base uma imagem de radar LANDSAT-ETM+7, além de uma sonda ecobatimétrica analógico-digital/ODEC e um DGPS (*Differential Global Positioning System*); (2) registros de elevação do mar, através da fixação de

dois marégrafos digitais Orphimedes da marca OTT-Hidrometrie, localizados na vila de Bacuriteua e na ponte sobre o Furo do Maguary, onde se obtiveram valores diários a cada 20 minutos durante 7 dias consecutivos com resultados variando de um mínimo de 0,01 m a um máximo de 5,08 m e de 0,42 a 5,18 no ponto situado na ponte sobre o furo do Maguary e na vila de Bacuriteua, respectivamente; e (3) medir a velocidade das correntes utilizando um correntógrafo Falmouth 2D ACM em um ponto do estuário dentro do domínio do modelo, que ficou acoplado ao barco durante sete dias consecutivos e que apresentou valores para as correntes variando de um mínimo de 2,95 cm/s a um máximo de 154,59 cm/s. Na etapa de laboratório, foi realizado o processo de calibração entre os dados do modelo e os medidos no campo. Foram geradas simulações das condições hidrodinâmicas durante a enchente, vazante, meia maré enchente, meia maré vazante, estofas de preamar e baixamar, para marés de quadratura e sizígia. Através dessas simulações foram gerados mapas superficiais de correntes para observar os diferentes padrões de circulação.

PALAVRAS-CHAVE: Estuário do rio Caeté, Modelagem, Circulação Hidrodinâmica.

ABSTRACT

The northern coast of Brazil is trimmed by a big and complex hydrographic net, where the main river is the Amazon. This river, as well as others smaller, flow into in the Atlantic Ocean finalist the estuaries, that are frequently defined like a stretch of the river, where occurs the interaction of the ocean and fluvial waters (transition zone). The Caeté estuary is inserted at the northeast of Pará ($00^{\circ}43'18'' - 00^{\circ}04'17''$ S and $46^{\circ}32'16'' - 46^{\circ}55'11''$ W) that suffers influence of macro-tides and semi-diurnal with medium amplitude of 5,6 m, coastal currents (mean velocity approximately 0,75 m/s), waves of 0,7 m and Trade winds that possess NE preferential direction with medium speed of 6 m/s. That estuary is situated in a tropical region of humid climate, with annual medium temperature of 27°C and elevated precipitation with annual medium of 2500 mm/year. In this area, are also showed, the existence of seasons with distinct characteristics: rainy (December to May), dry (June to November) and intermediate. The estuary of the Caeté river is a tide-dominated estuary (as regards the physical process), that forms an extensive coastal plain (as regards the coastal geomorphology) and well mixed (as regards waters circulation).The hydrodynamic circulation in estuary is considered as an important trial and it has a lack of studies in this area until today, principally in the North's region of Brazil, where still have a few the studies of estuarine modeling. So, for this work were adopted the use of the hydrodynamic model with the Modeling program called SisBAHIA (Environmental Hydrodynamics Base System), aiming the observation of the general aspects of the hydrodynamic circulation in different phases of tide (high tide, low tide, flood and ebb tide) in the Caeté estuary (PA) and like this validate, through the modeling, the facts (current, tides and amplitude of tide) collected in the estuary. The methodology was performed in two phases,(fieldwork and laboratory). The phase of fieldwork consisted of: (1) hoist bathymetric, linked to the Research's Project of the SET PROGRAM/ CT-Hidro that utilized a cartographic base previously digitalized, having like base a satellite image LANDSAT-ETM+7, beyond a digital ecobatymetric and a DGPS (Differential Global Positioning System); (2) records of elevation of the sea level, through the fixation of two digital tide predictors Orphimedes OTT-Hydrometric, located in the Maguary city, where was observed daily values to each 20 minutes during 7 consecutive

days with results varying of a minimum of 0,01 m to a maximum one of 5,08 m and of 0,42 to 5,18 in the point situated in the bridge about the hole of the Maguary and in the Bacuriteua city, respectively; and (3) measure the speed of the shackles utilizing a current predictor Falmouth 2D YMCA in a point inside the model, that stayed coupled to the boat during seven consecutive days and that presented values for the currents varying of a minimum of 2,95 cm/s to a maximum one of 154,59 cm/s. In the laboratory's phase, was carried out the trial of calibration between the facts of the model with the measurements taken in the fieldwork. They were generated simulations of the hydrodynamics conditions during the flood, ebb tide, half tide flood, half tide ebb tide, and the high value of high tide and low tide, and in the neap and spring tides. Through those simulations were generated superficial maps of currents to see the different standards of circulation.

Key-words: Estuary of the Caeté River, Modeling, Hydrodynamic Circulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa de localização e acesso à área de estudo (linha azul). Observar a área a ser modelada em destaque (cor amarela).....	27
Figura 2: Distribuição da precipitação total e temperatura média da região Nordeste do Pará para o ano de 2003	29
Figura 3: Distribuição da precipitação total e temperatura média da região Nordeste do Pará para o ano de 2002.....	29
Figura 4: Variação anual da precipitação no estado do Pará.....	30
Figura 5: Número de dias com chuva e chuva acumulada mensal no Nordeste do Pará, para o ano de 2006.	30
Figura 6: Número de dias com chuva e chuva acumulada mensal no Nordeste do Pará, para o ano de 2007..	31
Figura 7: Direção mensal dos ventos em Bragança/PA, para o ano de 2004.	32
Figura 8: Intensidade média mensal dos ventos (m/s), em Bragança-PA, para o ano de 2004.	33
Figura 9: Unidades morfoestruturais de parte da região NE do Pará.....	37
Figura 10: Coluna estratigráfica do nordeste do Pará.....	39
Figura 11: Arcabouço neotectônico mostrando os sistemas de falhas. Falhas transcorrentes: linhas com ou sem par de setas, estas indicando o movimento relativo. Falhas normais: linhas com pequenos traços perpendiculares. Falhas inversas ou de cavalgamentos: linhas denteadas.	41
Figura 12: Mapa Tectônico do nordeste do Pará.	42
Figura 13: Quadro estrutural do Quaternário (Pleistoceno Médio-Holoceno).....	42
Figura 14: Planície costeira de Bragança (tom vermelho) e Planalto Costeiro (tom amarelo).	43
Figura 15: Pântano salino, localizado na margem da estrada que dá acesso à praia de Ajuruteua (julho de 2005).	47
Figura 16: Manguezal nas margens do estuário do rio Caeté (junho de 2006).....	48

Figura 17: Praia situada na Vila dos Pescadores, formada por cordões arenosos (setas brancas) (junho de 2006).	50
Figura 18: Praias formadas por cordões arenosos (setas brancas)	51
Figura 19: Mapa geomorfológico da Planície Costeira Bragantina. 1 – Planície Arenosa; 2 – Dunas Costeiras; 3 – Manguezal de Supramaré; 4 – Manguezal de Interamaré; 5 – Chenier; 6 – Pântano Salino Interno; 7 – Pântano Salino Externo; 8 – Planície de Inundação; 9 – Planície Estuarina; 10 – Planície Aluvial; 11 – Baixo Planalto Costeiro. A – Funil Estuarino; B – Segmento Reto; C – Segmento Meandrante; D – Canal de Curso Superior.....	52
Figura 20: Manguezal, campos naturais (Ponte sobre o furo do meio, julho de 2005)...	53
Figura 21: Manguezal recortado por canais (Ponte sobre o furo do meio, julho de 2005).	54
Figura 22: Estuários segundo a classificação adotada por Pritchard (1952).....	61
Figura 23: Estuários segundo a classificação adotada por Davies (1964).	62
Figura 24: Desenho esquemático de um estuário dominado por onda e sua energia relativa.....	63
Figura 25: Desenho esquemático de um estuário dominado por maré	65
Figura 26: Esquema simplificado de um estuário altamente estratificado.	68
Figura 27: Estratificação de um estuário tipo cunha salina em condições de alta (a) e baixa (b) descarga fluvial	70
Figura 28: Esquema simplificado de um estuário bem misturado	71
Figura 29: Diagrama esquemático da circulação e distribuição de salinidade num estuário bem misturado: (a) distribuição longitudinal de salinidade, (b) perfil de salinidade e (c) da média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água, considerando o ponto de vista no sentido da cabeceira para a boca do estuário.	72
Figura 30: Esquema de um estuário parcialmente estratificado.....	73
Figura 31: Principais tipos de estuário.	75
Figura 32: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D e 2DH), onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, U_i , representa a velocidade integrada na vertical. Note que as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como $(x,y) \equiv (x_1,x_2)$ e $(u,v) \equiv (u_1,u_2)$ utilizando o índice $i = 1,2$	79

Figura 33: Diagrama do processo de modelagem em recursos hídricos, tendo a parte realçada como rota usual.	84
Figura 34: Correntógrafo da marca Falmouth Scientific Inc. modelo 2D ACM.	93
Figura 35: Barco de pequeno porte utilizado para coleta dos dados de corrente (seta vermelha indica o local que foi amarrado o correntógrafo).	94
Figura 36: Mapa de localização dos equipamentos, M1 (marégrafo na Pesqueira Maguary), M2 (marégrafo na Vila dos Pescadores) e C (correntógrafo no canal do estuário).	95
Figura 37: Marégrafo de Pressão utilizado na determinação dos níveis de água nas estações maregráficas M1 e M2.	96
Figura 38: Marégrafo M1 (seta vermelha) instalado no trapiche da fábrica de gelo Pesqueira Maguary.	97
Figura 39: Marégrafo M2 (seta vermelha) instalado na Vila dos Pescadores sob a ponte do Furo Maguary.	97
Figura 40: Ficha do Catálogo das Estações Maregráficas Brasileiras, para a baía do Caeté no trapiche da Cidade de Bragança.	100
Figura 41: Curva de maré típica da região da Baía de Caeté gerada a partir das constantes harmônicas desta área, ao longo de 30 dias, sendo estas condições adotadas na modelagem do Estuário do Caeté. As marés foram geradas no Sisbahia entre os dias 01 a 30 de janeiro.	101
Figura 42: Dados de vazão obtidos no ano de 2005 e 2006	102
Figura 43: Imagem Landsat R3G2B1 do estuário do Caeté utilizada como principal base para delimitação dos contornos do domínio de modelagem (Coordenadas: Universal Transverse Mercator – UTM). Imagem cedida pelo Laboratório de Análises e Imagens do Trópico Úmido (LAIT).	104
Figura 44: Mapa base (*.srf) gerado no programa Surfer onde serão apresentados os cenários de simulação (Coordenadas UTM).	105
Figura 45: Domínio modelado do Estuário do Caeté, indicando a malha de discretização em elementos e nós. Os eixos representam distâncias em UTM (“Universal Transverse Mercator”).	107
Figura 46: Elevação da maré na Pesqueira Maguary (M1) e na ponte sobre o Furo do Maguary (M2).	114

Figura 47: Curva das marés obtidas pelos dados coletados em campo (Ponte - M2) e geradas pelas constantes harmônicas inseridas no modelo.	115
Figura 48: Defasagem da maré nos dados coletados em campo.	115
Figura 49: Comparação dos valores de elevação obtidos no campo (Pesqueira Maguary – M1) e no modelo hidrodinâmico.	116
Figura 50: Comparação dos valores de elevação obtidos no campo (Ponte – M2) e no modelo hidrodinâmico.	116
Figura 51: Velocidade das correntes longitudinal e transversal ao canal principal.....	117
Figura 52: Relação entre as velocidades longitudinal e transversal ao canal principal.	118
Figura 53: Velocidade absoluta das correntes longitudinal e transversal ao canal principal.....	118
Figura 54: Comparação dos valores de velocidade e altura de maré.	119
Figura 55: Valores máximos, mínimos e médios de vazão para o ano de 2005.	120
Figura 56: Distribuição dos valores de vazão para os meses de janeiro em diferentes anos.	121
Figura 57: Instantes de maré de quadratura (meia maré vazante, estofa baixamar, meia maré enchente e estofa preamar), representadas pelos círculos pretos e instantes de maré de sizígia (estofa preamar, meia maré vazante, estofa baixamar e meia maré enchente), representadas pelos círculos verdes.	123
Figura 58: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 1 referente ao instante em que foi atingida a velocidade na Estação Meio Estuário (ponto vermelho) Os vetores correspondem às velocidades e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.....	126
Figura 59: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 2 (estofa de baixamar), mostrando em destaque (quadrado branco) a região onde ocorre a inversão das correntes.	127
Figura 60: Mapa de elevação de maré, para o instante de estofa de baixamar, mostrando regiões que possuem bancos de areia em todo o estuário, verificados através dos padrões de cores mais claras.	128
Figura 61: Instante de meia maré enchente com velocidade máxima de 4,75 m/s (quadro branco superior) e velocidade de 1,58 m/s no ponto onde o correntógrafo ficou instalado (quadro branco inferior).....	129

Figura 62: Velocidade das correntes na estofa de preamar durante uma maré de quadratura.....	130
Figura 63: Instante de estofa de preamar (maré de quadratura) onde se observa que, principalmente, os bancos de areia localizados na margem esquerda e direita do estuário estão totalmente cobertos com profundidade mínima de 5,70 m, verificada através do padrão de cor azul.....	131
Figura 64: Velocidade da corrente na estofa de preamar durante uma maré de sizígia.....	132
Figura 65: Instante de estofa de preamar onde se observa que, principalmente, os bancos de areia localizados na margem esquerda e direita do estuário estão totalmente cobertos com profundidade mínima de 6,20 m, verificada através do padrão de cor azul.....	133
Figura 66: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 6, mostrando em destaque a estação Meio Caeté (em vermelho), onde observou-se as velocidades na meia maré vazante, durante uma maré de sizígia.....	134
Figura 67: Velocidade da corrente na estofa de baixamar durante uma maré de sizígia.....	135
Figura 68: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 8 onde se observou as velocidades na meia maré enchente, durante uma maré de sizígia.....	136
Figura 69: Instante de estofa de baixamar durante uma maré de sizígia.....	137
Figura 70: Instante de meia maré vazante durante uma maré de sizígia.....	138

Quadro

Quadro 1: Significado dos termos das equações governantes do módulo 2DH.....	82
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos postos fluviométricos da sub-bacia do rio Caeté.....	34
Tabela 2: Vazão mensal máxima, mínima e média para o ano de 2005, de Nova Mocajuba.....	34
Tabela 3: Catálogo das marés (em m) no litoral do Pará para o ano de 2002	35
Tabela 4: Principais domínios morfológicos, suas unidades e área de abrangência.	44
Tabela 5: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica da Baía de Caeté, listadas pela significância da amplitude.	99
Tabela 6: Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo, ϵ , para uso do modelo 2DH.	108
Tabela 7: Valores máximo, mínimo e médio da vazão (m^3/s) para o ano de 2005 e 2006.	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COPPE – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia

COPPETEC - Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CTTMAR – Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

FEMAR - Fundação para os Estudos do Mar

GEMC – Grupos de Estudos Marinhos e Costeiros

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG – Instituto de Geociências

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LAIT - Laboratório de Análises e Imagens do Trópico Úmido

PA – Estado do Pará

PPGG – Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica

UFPA – Universidade Federal do Pará

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaí

LISTA DE SÍMBOLOS

Fg: Força gravitacional

Fc: Força centrífuga

Fr: Força resultante

P: Precipitação

Qf: Descarga fluvial

E: Evaporação

U_i : velocidade integrada na vertical

$(x,y) \equiv (x_1,x_2)$ e $(u,v) \equiv (u_1,u_2)$: coordenadas e velocidades horizontais

C: Número de Chézy

C': Número de Chézy relativo ao grão

Cr: Número de Courant

h: Profundidade da água

K: coeficiente de Strickler

ks: rugosidade equivalente (m)

M: Coeficiente de Manning

N: Número de Manning

t: Tempo (s)

x,y: Coordenadas

$\zeta(x,y,t)$: Elevação da superfície (m)

$U(x, y, t)$ e $V(x, y, t)$: velocidades médias na vertical, na direção x e y

u, v e w : componentes da velocidade do escoamento respectivamente nas direções x, y e z

g: aceleração da gravidade

ρ : densidade local do fluido

ρ_0 : densidade constante de referência

Φ : velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local. Os termos com Φ são as forças de Coriolis, no qual θ é o ângulo de latitude

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	23
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO	25
1.2.1 Geral	25
1.2.2 Específico	25
1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO AO ESTUÁRIO DO RIO CAETÉ	26
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
2.1 CONDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS E METEOROLÓGICAS.....	28
2.1.1 Climatologia	28
2.1.2 Parâmetro Vento	31
2.2 CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS.....	33
2.2.1 Vazão	33
2.2.2 Amplitude de Marés	34
2.2.3 Correntes de Maré	35
3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E GEOLÓGICOS	36
3.1 PLANALTO SETENTRIONAL DO PARÁ-MARANHÃO	36
3.2 LITORAL DE FALÉSIAS E “RIAS”	36
3.3 ASPECTOS ESTRATIGRÁFICOS.....	38
3.4 ASPECTOS ESTRUTURAIS.....	40
3.5 PLANÍCIE COSTEIRA DE BRAGANÇA.....	43
3.5.1 Planalto Costeiro	44
3.5.2 Planície Aluvial	45
3.5.2.1 Canal Fluvial do rio Caeté	45

3.5.2.2 Planície de Inundação	45
3.5.2.3 Diques Marginais.....	45
3.5.3 Planície Estuarina	46
3.5.3.1 Canal estuarino do rio Caeté.....	46
3.5.3.2 Córregos de Maré	46
3.5.3.3 Planície de Inundação	46
3.5.4 Planície Costeira	47
3.5.4.1 Pântano Salino	47
3.5.4.2 Manguezal.....	48
3.5.4.3 Chenier.....	49
3.5.4.4 Planície Arenosa	49
3.5.4.5 Dunas Costeiras	49
3.5.4.6 Praia	50
3.6 COBERTURA VEGETAL	52
4 CLASSIFICAÇÃO E GÊNESE DO AMBIENTE ESTUARINO.....	56
4.1 DEFINIÇÃO FÍSICA DE ESTUÁRIO	57
4.2 GÊNESE	58
4.3 CLASSIFICAÇÃO.....	60
4.3.1 Classificação quanto aos processos físicos dominantes	63
4.3.1.1 Estuários dominados por ondas	63
4.3.1.2 Estuários dominados por marés.....	64
4.3.2 Classificação quanto a geomorfologia.....	65
4.3.2.1 Estuário de Planície Costeira	65
4.3.2.2 Fjordes	66
4.3.2.3 Construídos por Barras	66

4.3.2.4 Os estuários restantes.....	67
4.3.3 Classificação pela circulação das águas	67
4.3.3.1 Tipo Cunha Salina.....	67
4.3.3.2 Tipo Bem Misturado	70
4.3.3.3 Tipo Parcialmente Misturado.....	72
4. 4 DELTAS	73
5 DESCRIÇÃO DO MODELO SISBAHIA.....	76
5.1 MÓDULO HIDRODINÂMICO DO SisBAHIA	78
5.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES PARA O MÓDULO 2DH DO MODELO HIDRODINÂMICO E SIGNIFICADO DOS TERMOS	79
5.3 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE MODELAGEM.....	83
6 METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	89
6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	89
6.2 CAMPANHAS OCEANOGRÁFICAS.....	91
6.2.1 Ecobatimetria.....	91
6.2.2 Medição das Correntes de Maré	93
6.2.3 Medição das Marés.....	96
6.2.4 Dados de Vento	101
6.2.5 Dados de Vazão.....	102
6.3 LABORATÓRIO	102
6.3.1 Definição dos Contornos e Mapa Base.....	103
6.3.2 Confecção da Malha de Elementos Finitos.....	105
6.3.3 Parâmetros Ambientais	107
6.3.3.1 Análise dos dados ecobatimétricos.....	107
6.3.3.2 Análise dos dados de Marés	109
6.3.3.3 Análise dos dados de Vento.....	109

6.3.3.4 Análise dos dados de Vazão	110
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	111
7.1 CALIBRAÇÃO	111
7.2 DADOS CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO.....	112
7.2.1 Dados de Maré	112
7.2.2 Dados de Correntes de Maré	117
7.2.3 Dados de Vazão	120
8 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS	122
8.1 MARÉ DE QUADRATURA	124
8.2 MARÉ DE SIZÍGIA	132
9 CONCLUSÕES	139
REFERÊNCIAS	141

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A costa norte do Brasil é recortada por uma grande e complexa rede hidrográfica, onde vários rios desembocam no Oceano Atlântico formando os estuários. Os estuários são freqüentemente definidos como um trecho do rio, onde ocorre a interação das águas fluviais e oceânicas com grande variabilidade espacial e temporal das propriedades físicas e químicas (DAY; HALL; KEMP, 1989).

Os estuários possuem águas biologicamente mais produtivas do que as do rio e do oceano adjacente, devido às características hidrodinâmicas que, aprisionando nutrientes, algas e outras plantas, estimulam a produtividade desses corpos de água (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

A hidrodinâmica estuarina condiciona a distribuição e o transporte de materiais no sistema (matéria orgânica particulada, sedimentos, nutrientes, clorofila, larvas). Assim, o seu conhecimento é fundamental para o entendimento dos processos ecológicos, geológicos, físicos, químicos e para o manejo da qualidade da água (KJERFVE, 1990; KJERFVE et al., 1982).

O Nordeste do Pará é recortado por reentrâncias (“rias”), onde se formam baías, estuários, falésias, praias, manguezais, dunas e restingas. As proeminências (pontas) são constituídas por manguezais e praias arenosas nas extremidades. Nesta zona, está inserido o estuário do rio Caeté que sofre influência de macro-marés semi-diurnas com amplitude média de 5,6 m (Departamento de Hidrografia e Navegação - DHN, 2007), correntes costeiras (1,54 m/s), ondas variando de 0,5 m a 1,1 m com direção ENE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC, 2007) e ventos alísios, que possuem direção preferencialmente NE com velocidade média de 7,5 m/s (DHN, 2003). Esse estuário situa-se na região tropical com clima úmido, elevada pluviosidade anual (2300 a 2800 mm/ano) e temperatura média anual de 27°C (MORAES et al., 2005). Existem dois períodos principais: (1) chuvoso, onde as chuvas se caracterizam pela forte intensidade, e um período menos chuvoso, marcado por freqüentes estiagens de duração variável.

Os modelos computacionais têm sido muito utilizados como ferramentas poderosas em simulação hidrodinâmica. Porém, a utilização da modelagem numérica como ferramenta para validar dados referentes à circulação hidrodinâmica em estuários foi considerada como um importante papel ainda pouco estudado até hoje, com alguns trabalhos desenvolvidos na região sul e sudeste do Brasil (ANDRADE 2006; GALLO 2004; MACIEL, 2004; RIBAS 2004; SAMPAIO 2003; SOTO 2004; SOUZA 2006; TOPÁZIO 2003; XAVIER, 2002).

No âmbito do PPGG/CG/UFPA (desde 1990), várias teses em nível de mestrado e doutorado foram desenvolvidas nas áreas emersas e submersas da região norte, envolvendo a morfoestratigrafia holocênica, a morfodinâmica costeira e a geomorfologia costeira: Almeida (2002), Alves (2001), Costa (2004), Farias (2006), Júnior (2002), Pinheiro (1987), Silva (2001), Souza Filho (1995), entre outros. Essas pesquisas foram desenvolvidas com êxito, revelando assim novos conhecimentos sobre uma região tropical.

Os modelos são ferramentas indispensáveis aos estudos e projetos, à gestão e ao gerenciamento de corpos d'água naturais, pois permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar o entendimento da dinâmica de processos, prever situações simulando cenários futuros, etc. (ROSMAN et al., 2001). O crescimento do uso desses modelos é atribuído à possibilidade de prever cenários de interesse que podem ser simulados pelo modelo e fornecer relações causa/efeito; a disponibilidade de computadores pessoais mais baratos, com a capacidade de processamento cada vez maior e mais eficiente; à existência de softwares livres relacionados à modelagem de processos costeiros; e à difusão de técnicas sofisticadas de levantamento de dados em campo associado ao aumento da capacidade de registro de equipamentos.

A elaboração desta dissertação de mestrado partiu da constatação da falta de informações à respeito dos processos hidrodinâmicos no norte do Brasil, principalmente na costa do Pará, em especial no estuário do rio Caeté.

Diante dessa situação, e das condições favoráveis da Cooperação Técnica entre o Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros - GEMC/UFPA, da Coordenação dos

Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), através do Prof. PhD. Paulo César Colonna Rosman e do Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar (CTTMAR/UNIVALI/SC), através do seu diretor, Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho, estimulou o desenvolvimento desta dissertação de mestrado visando a validação de um modelo hidrodinâmico a partir da coleta de dados, utilizando como ferramenta o programa de modelagem numérica SisBAHIA.

Assim, essa dissertação de mestrado, obteve resultados satisfatórios na comparação dos dados coletados em campo com os resultados apresentados pela modelagem computacional, e com isso gerou diferentes cenários de modelagem.

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

1.2.1 Geral

Analisar a circulação hidrodinâmica no estuário do rio Caeté

1.2.2 Específico

- Analisar a variação da maré durante as marés de sizígia e quadratura;
- Analisar a velocidade, intensidade e direções das correntes;
- Analisar a circulação hidrodinâmica em diferentes fases de maré (preamar, baixamar, enchente e vazante) no estuário do rio Caeté (PA).

1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO AO ESTUÁRIO DO RIO CAETÉ

O estuário do rio Caeté está situado na Planície Costeira Bragantina que abrange a faixa costeira do município de Bragança, localizada a 210 km de Belém, capital do Pará. Estende-se desde a Ponta de Maiaú até a foz do rio Caeté (00°43'18" – 00°04'17" S e 46°32'16" – 46°55'11" W). O acesso à área é feito pela Rodovia Federal BR-316 (Belém-Brasília), até a cidade de Capanema. Em seguida, segue-se pela Rodovia Estadual PA-242 (percurso de 36 Km) até a cidade de Bragança. À partir daí, segue-se com barco/motor pelo estuário do rio Caeté até chegar na foz do estuário (Figura 1).

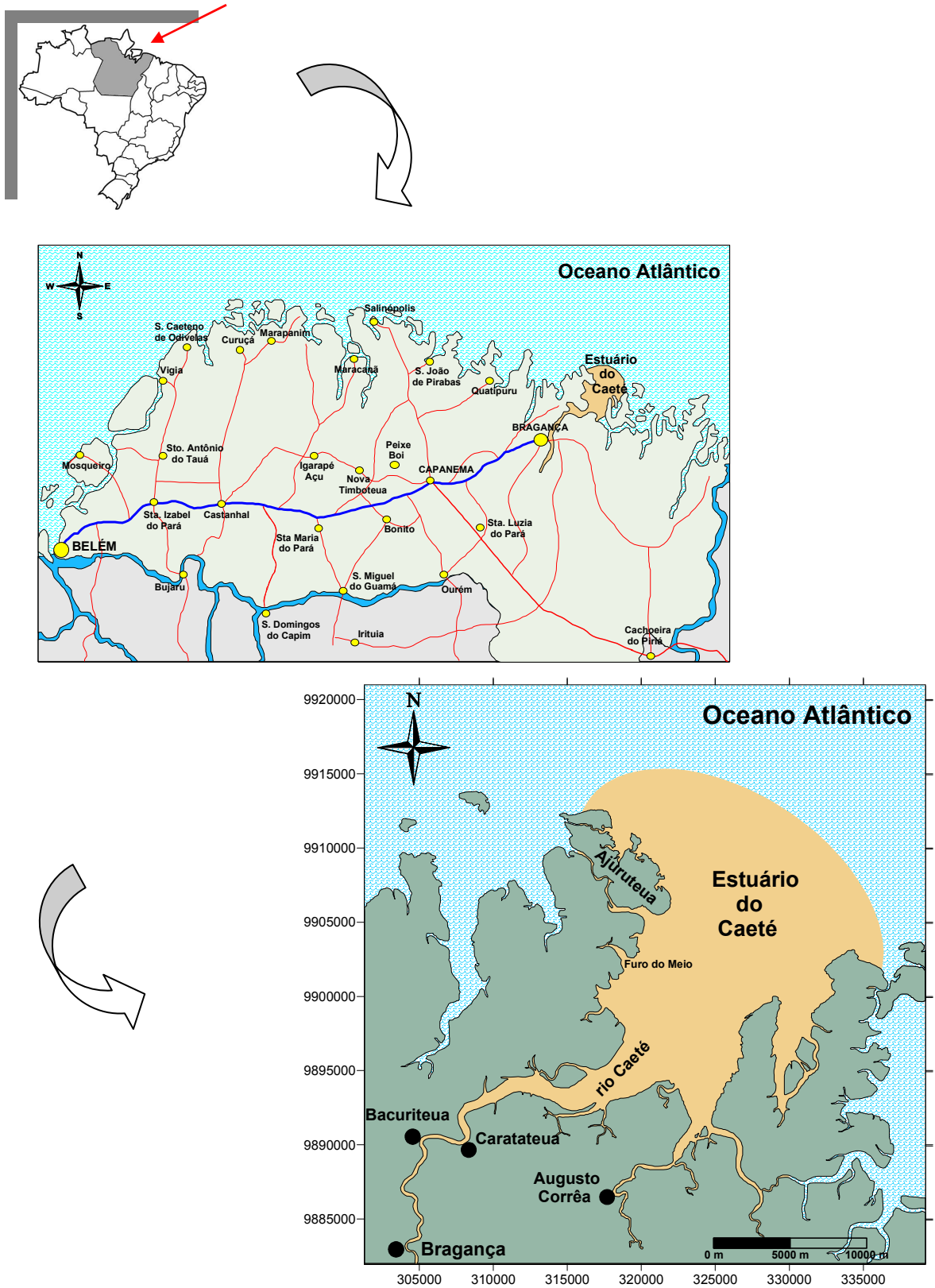


Figura 1: Mapa de localização e acesso à área de estudo (linha azul). A área modelada em destaque (cor amarela).

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

São apresentadas algumas características relativas à área de estudo: condições climatológicas e meteorológicas, oceanográficas e cobertura vegetal.

2.1 CONDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS E METEOROLÓGICAS

2.1.1 Climatologia

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (1992), a temperatura do ar no nordeste do Estado do Pará apresenta pequena variação sazonal, com temperaturas médias acima de 25°C em todos os meses do ano. Porém a temperatura do ar no nordeste do Pará apresenta médias entre 25,2°C e 26,7°C e uma amplitude de variação entre 20,4°C e 32,8°C. Verificam-se variações diárias que podem ser superiores aos 10°C, principalmente no período seco.

As menores temperaturas médias do ar ocorrem em fevereiro, um mês típico da estação chuvosa com elevada nebulosidade. As temperaturas médias do ar mais elevadas ocorrem em outubro, que representa a transição entre o fim do período menos chuvoso e o início do período mais chuvoso. A temperatura máxima do ar aumenta continuamente de fevereiro a outubro, decrescendo em novembro devido ao aumento da nebulosidade e início da estação chuvosa (Figuras 2 e 3). A umidade relativa é elevada, com valores acima de 80% em todos os meses do ano. Os valores mais elevados de umidade relativa ocorrem no trimestre mais chuvoso, aproximadamente 89%, em consequência das temperaturas menores nesse período (MORAES et al., 2005).

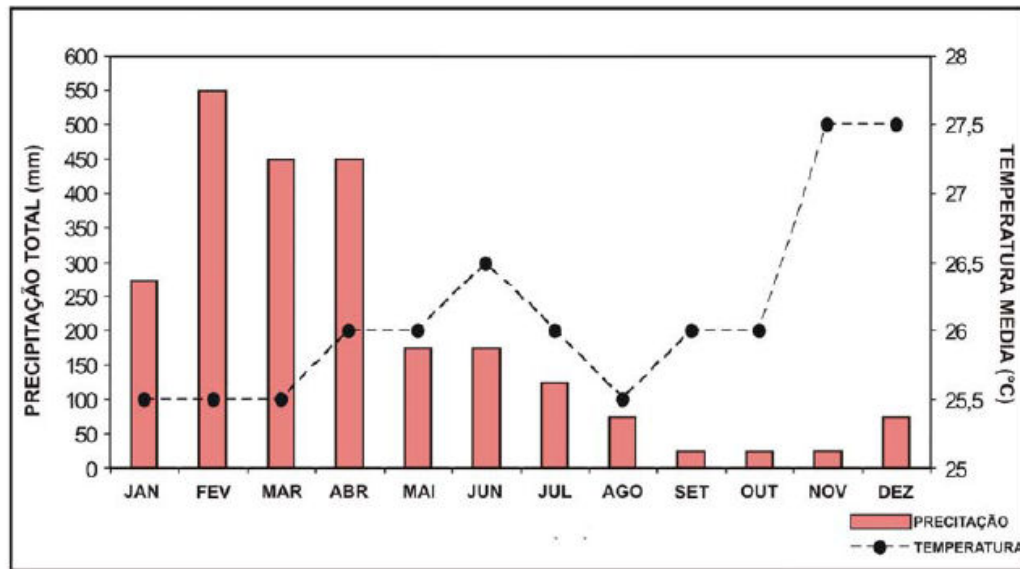


Figura 2: Distribuição da precipitação total e temperatura média da região Nordeste do Pará para o ano de 2003. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); CPTEC, 2003¹ apud COSTA, 2004.

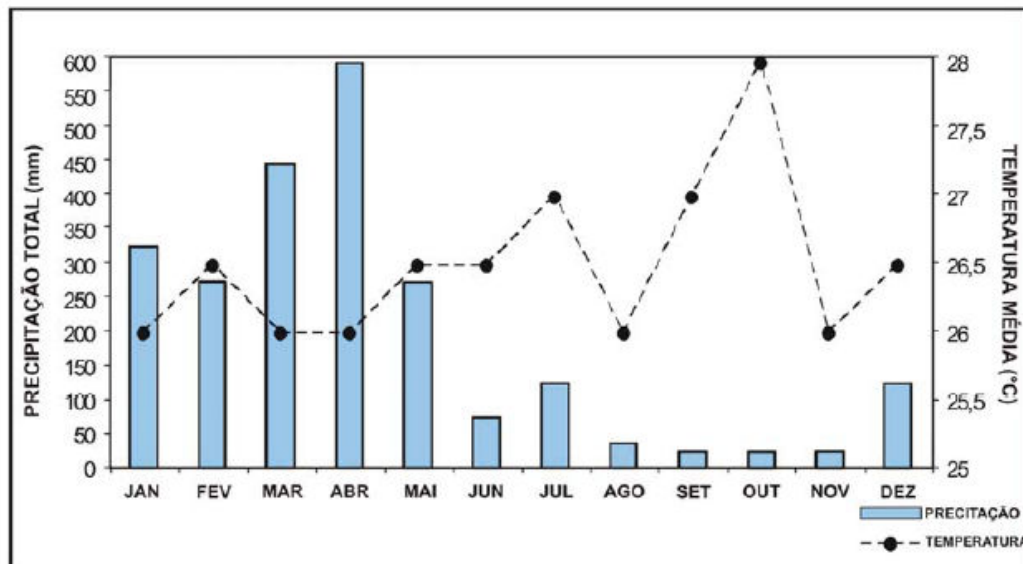


Figura 3: Distribuição da precipitação total e temperatura média da região Nordeste do Pará para o ano de 2002. Fonte: (INPE; CPTEC, op. cit.)

O clima local é do tipo Am (Tropical Úmido e Monções), que segundo a classificação de KÖPPEN é caracterizado por ser quente e úmido (clima equatorial

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); Centro de Prevenção de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). 2003.

amazônico), com pequena amplitude térmica mensal (em torno de 3°C), oscilando entre 25°C a 28°C.

As precipitações são da ordem de 2500 mm/ano (Figura 4). O clima na região é caracterizado por apresentar uma forte e bem definida sazonalidade anual. Possui um período seco, com ocorrência de poucas chuvas, que se estende de junho a novembro e um período chuvoso, no qual ocorrem fortes chuvas entre dezembro e maio (MARTORANO et al., 1993). É possível observar que os meses de fevereiro, março e abril possuem maiores dias com chuva (Figuras 5 e 6).

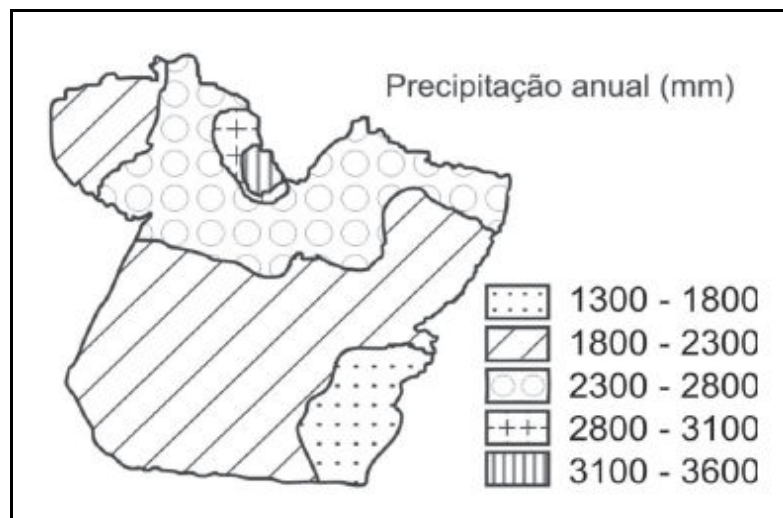


Figura 4: Variação anual da precipitação no estado do Pará. Fonte: (MORAES et al., 2005).

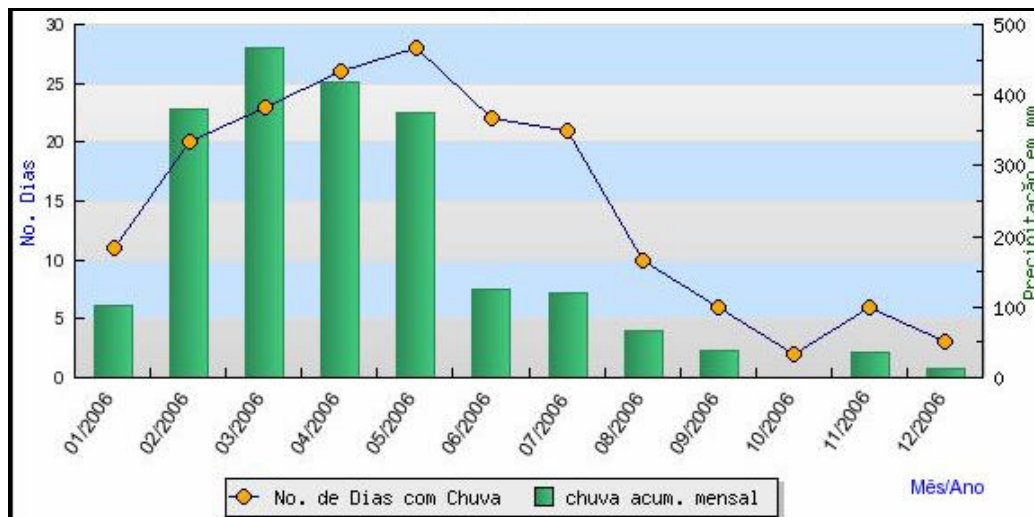


Figura 5: Número de dias com chuva e chuva acumulada mensal no Nordeste do Pará, para o ano de 2006. Fonte: (INMET, 2007).

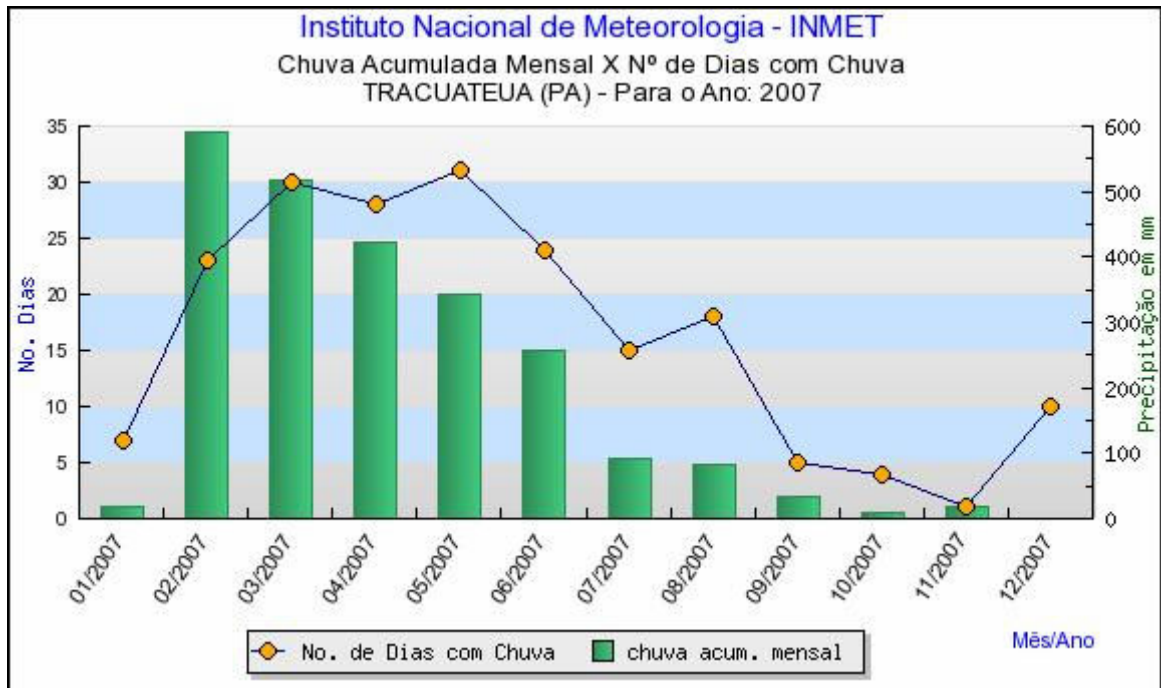


Figura 6: Número de dias com chuva e chuva acumulada mensal no Nordeste do Pará, para o ano de 2007. Fonte: (INMET, 2007).

2.1.2 Parâmetro Vento

O vento no nordeste do Pará segue essencialmente a circulação de grande escala, com predominância de fluxo zonal de leste atingindo uma velocidade média em torno de 5 m/s. Ressalta-se que a velocidade do vento aumenta com a proximidade do litoral, devido ao efeito de brisa acentuado. Com a chegada da primavera e o início do verão, a velocidade do vento aumenta satisfatoriamente, em função da influência dos ventos alísios que passam a soprar mais sobre a região tropical. Normalmente, esses ventos são caracterizados como um presságio ao aumento das precipitações, ficando bem definidos, próximos à superfície (ROCHA; RIBEIRO; EL-ROBRINI, 2002).

Os principais ventos que atingem a Costa Atlântica do Salgado Paraense são os ventos alísios, que possuem direção preferencialmente NE, com variação para N e E. Estes ventos sopram ao nível do solo, sendo originados por dois anticiclones subtropicais: o Anticiclone Tropical Atlântico (ATA) e o Anticiclone Tropical Atlântico Norte (ATAN). O encontro, na linha do Equador, dos ventos alísios gerados por estes

anticiclones, resulta na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que corresponde a uma área de extensão variável, com fracas pressões e poucos contrastes, ventos fracos e de direções variáveis (ALVES, 2001). Monteiro (2006) observou também ventos que sopram predominantemente com direção NE, exceto nos meses de transição entre os períodos chuvoso e seco, que passam a serem, ventos de SE (Figura 7).

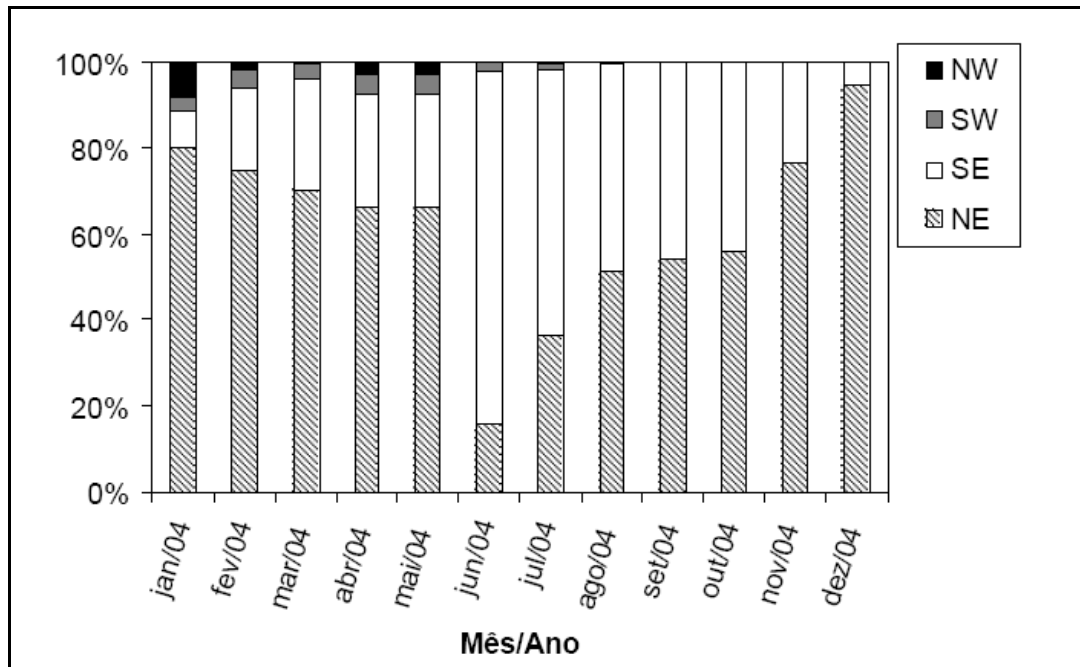


Figura 7: Direção mensal dos ventos em Bragança/PA, para o ano de 2004. Fonte: (MONTEIRO, 2006).

Os ventos caracterizam-se com valores máximos de velocidade da ordem de $6,56 \text{ m.s}^{-1}$ e valor médio em torno de $5,92 \text{ m.s}^{-1}$ (ALVES, 2001). Monteiro (2006) observou para o mês de 2004, intensidade média mensal dos ventos de $3,9 \text{ m/s}$ (Figura 8).

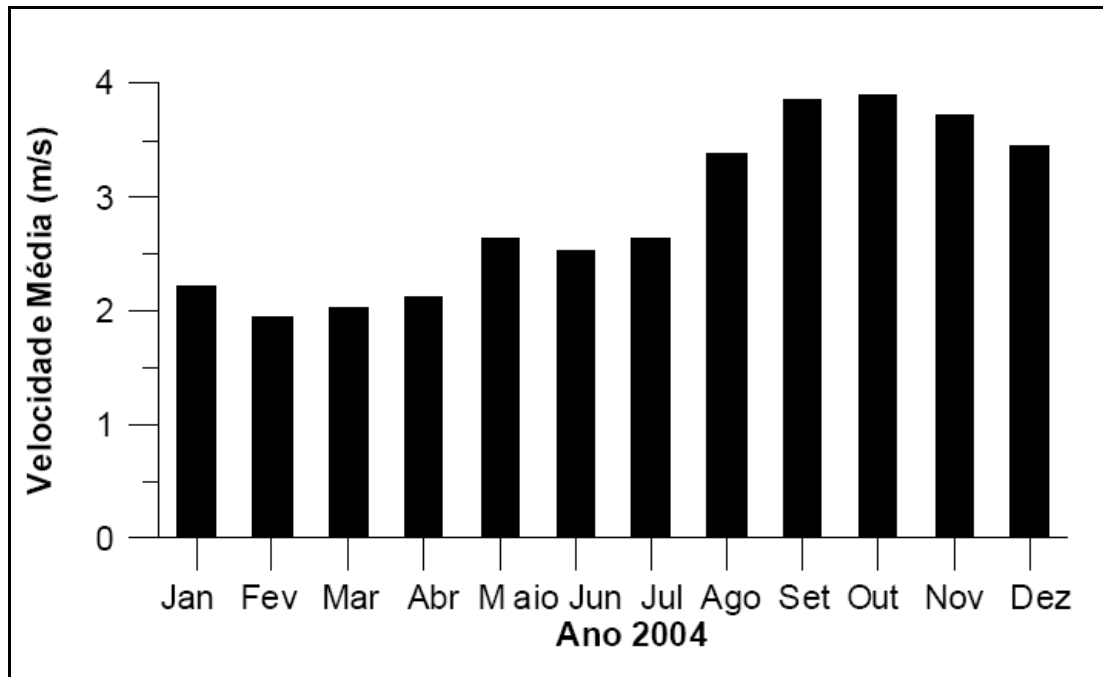


Figura 8: Intensidade média mensal dos ventos (m/s), em Bragança-PA, para o ano de 2004 (Fonte: MONTEIRO, 2006).

2.2 CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS

2.2.1 Vazão

Na área de estudo destacam-se três bacias. Segundo o catálogo das estações fluviométricas (Agência Nacional de águas - ANA, 2006) as bacias são: Arraial (abrangendo uma área de drenagem de 438 km²), Tentugal (com área de drenagem de 683 km²) e Nova Mocajuba (com área de drenagem de 1315 km²) (Tabela 1).

Os valores de vazão observados para o ano de 2005 variaram de um mínimo de 3,78 m³/s em janeiro, máximo de 132 m³/s em abril, e média de 36,34 m³/s (Tabela 2).

Tabela 1: Características dos postos fluviométricos da sub-bacia do rio Caeté.

Código	Nome	Área (km²)	Latitude	Longitude	Período
32300000	Arraial	438 km ²	01° 19' 00"	47° 07' 00"	12/64 – 01/72
32320000	Tentugal	683 Km ²	01° 19' 00"	46° 59' 00"	10/64 – 02/69
32350000	Nova Mocajuba	1315 Km ²	01° 15' 00"	46° 52' 00"	09/64 -

Fonte: (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, 1996).

Tabela 2: Vazão mensal máxima, mínima e média para o ano de 2005, de Nova Mocajuba.

Mês/ano	Máxima (m³/s)	Mínima (m³/s)	Média (m³/s)
Jan/05	26.7	3.78	8.73
Fev/05	46.6	5.81	19.06
Mar/05	95.8	5.88	70.6
Abr/05	132	73.6	90.93
Mai/05	98	55.9	69.7
Jun/05	98.6	41.1	70.92
Jul/05	67.6	26	44.18
Ago/05	48.6	15.9	25.3
Set/05	15.5	8.25	10.22
Out/05	9.62	5.88	7.81
Nov/05	8.55	4.48	5.54
Dez/05	32.9	4.2	13.15

Fonte: (ANA, 2006).

2.2.2 Amplitude de Marés

A média da amplitude de maré medida no ano de 2002 variou próximo a 5 m para o nordeste do Pará, com algumas localidades apresentando valores mais baixos devido a influência do rio Pará (Tabela 3). Com valores acima de 5 m, pode-se citar como

exemplo o estuário do rio Caeté com 5,08 m e Salinópolis com média de 5,03 m para o mesmo ano (Fundação para os Estudos do Mar - FEMAR, 2002).

As marés no nordeste do Pará são de natureza semi-diurna e suas influências ocorrem 8 a 10 milhas costa adentro (DHN, 1986). Apresentam média preamar de sizígia de mais de 5 m caracterizando um regime de macro-maré.

Tabela 3: Catálogo das marés (em m) no litoral do Pará para o ano de 2002.

Est.Maregráfica\ Maré (cm)	MHWS	MLWS	MHWN	MLWN
Machadinho	3,95	0,50	3,24	1,21
Caeté	5,08	0,50	3,98	1,52
Ilha dos Guarás	3,65	0,52	3,14	1,03
Salinópolis	5,03	0,46	3,91	1,58
Vizeu	4,96	0,43	3,90	1,49

MHWS (Média Preamar de Sizígia), MLWS (Média Baixa Mar de Sizígia), MHWN (Média Preamar de Quadratura) e MLWN (Média Baixa Mar de Quadratura). Fonte: (FEMAR, 2002).

2.2.3 Correntes de Maré

As principais correntes que atuam no litoral paraense são as correntes de maré e secundariamente, as correntes litorâneas resultantes da chegada das ondas à costa, sendo estas responsáveis pelo transporte de grandes quantidades de sedimentos da plataforma continental para o litoral. Em regiões de macromaré, ocorrem fundos irregulares e grandes bancos arenosos (ALVES, 2001).

As correntes de maré estão presentes na circulação da plataforma continental interna, até próximo ao litoral, onde, ocorre a predominância de correntes de maré reversas, as quais agem perpendicularmente à costa, com velocidades máximas, superiores em média, a 1,5 nós (0,75 m/s) na plataforma continental interna (ALVES op. cit.).

Na parte central do estuário do rio Caeté, durante o período chuvoso as correntes de maré apresentam valor médio de 0,11 m/s, com um máximo de 1,54 m/s.

3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E GEOLÓGICOS

O litoral do Nordeste do Pará é subdividido em duas unidades geomorfológicas principais: (1) Planalto Setentrional Pará-Maranhão; e (2) Litoral de Falésias e de “Rias” (BARBOSA; PINTO, 1973). Esta área está assentada na bacia de Bragança-Viseu (Cretáceo), no qual sua evolução é controlada por falhamentos normais que alcançam a atual zona costeira. O arcabouço estrutural é responsável pela submersão desta zona costeira (SOUZA FILHO, 2000).

3.1 PLANALTO SETENTRIONAL PARÁ-MARANHÃO

O Planalto Setentrional Pará-Maranhão compreende uma área de relevo fortemente dissecado nos sedimentos do Grupo Barreiras, apresentando superfícies com rebordos erosivos, que se inclina para N, em direção ao litoral, e para NW, em direção ao Golfão Marajoara (Figura 9).

As diversas alterações das direções dos cursos dos grandes rios, o reencaixamento da rede de drenagem, a erosão nos vales e nas margens fluviais, bem como os afloramentos do Pré-Cambriano, indicam uma movimentação neotectônica sucessiva do nordeste do Pará.

3.2 LITORAL DE FALÉSIAS E “RIAS”

As falésias (ativas ou inativas) ocorrem nos tabuleiros das formações cretáceas e terciárias da parte oriental da costa paraense e constituem as bordas do Planalto Costeiro. Este litoral é particularmente caracterizado por “rias” (vales fluviais afogados), que se destacam pelo forte controle estrutural. As “rias” são caracterizadas por profundas endentações, de até 45 km no continente, apresentando nas partes mais abertas, como em Turiaçu, larguras de até 20 km e profundidade inferior a 5 m (EL-ROBRINI et al., 1992). A direção preferencial dessas “rias” é NE-SW (Maracanã). São comuns, nestes sistemas estuarinos, depósitos importantes de areias, que correspondem à faixa de sedimentos holocênicos, que, associadas a uma série de

ilhas, baías e canais, acompanham a linha de costa, sendo esta unidade, interrompida pelo grande recorte do Golfão Maranhense.

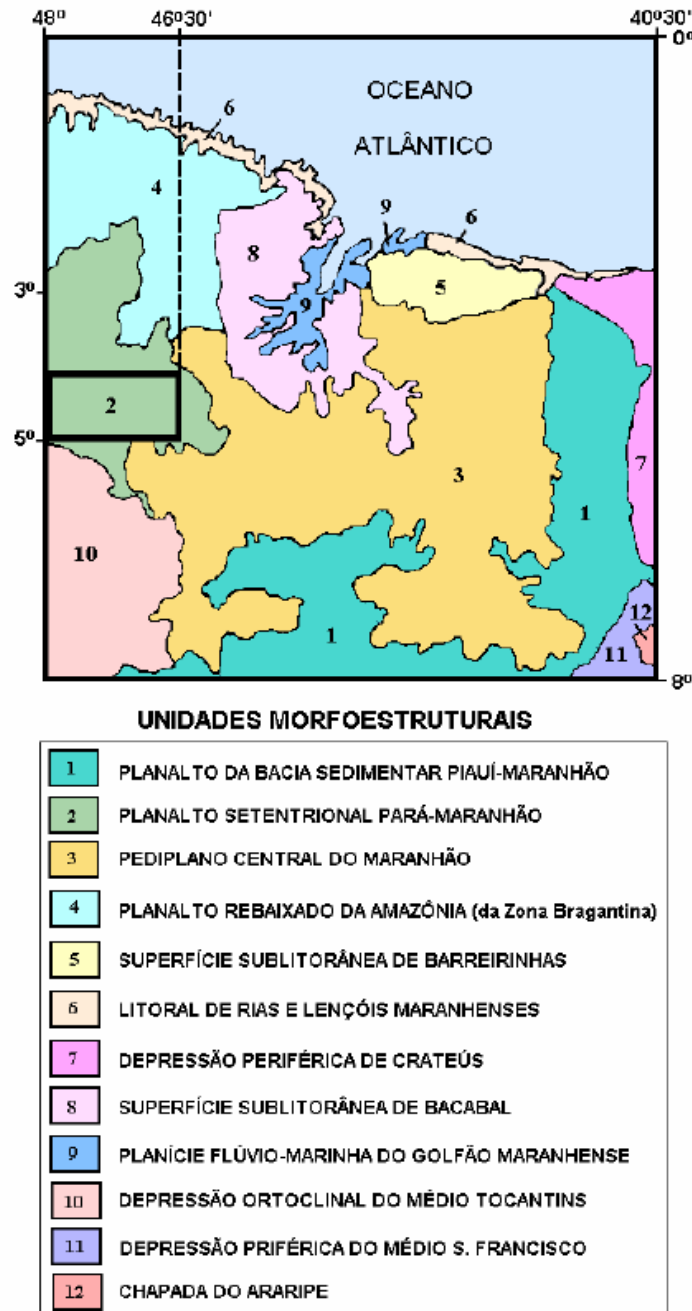


Figura 9: Unidades morfoestruturais de parte da região NE do Pará (Fonte: Modificado de BARBOSA; PINTO, 1973² apud CAVALCANTE, 2000).

² BARBOSA, G. V.; PINTO, M. N. Geomorfologia da Folha SA.23 (São Luiz) e parte da Folha SA.24 (Fortaleza). In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAM. **Folha SA.23 (São Luiz) e parte da Folha SA.24 (Fortaleza)**: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1973. p. II/1-II/26. (Levantamento de Recursos Naturais, 3).

3.3 ASPECTOS ESTRATIGRÁFICOS

As unidades litoestratigráficas aflorantes no nordeste do Estado do Pará incluem rochas ígneas, metamórficas e sedimentares de idade Pré-Cambrianas ao Recente. As unidades litoestratigráficas que ocorrem predominantemente na zona costeira paraense são:

(i) Formação Pirabas, composta por camadas de calcários marinhos incluindo micritos, bioclásticos, dolomicritos, biohermitos e margas intercaladas com folhetos cinza a negros (Mioceno inferior). A Formação Pirabas aflora, principalmente, no nordeste do Pará e é constituída, em geral, por rochas carbonáticas do Mioceno Inferior (FERNANDES, 1984; FERREIRA, 1966; FERREIRA, 1982; GÓES et al., 1990; PETRI, 1957). Ferreira (op. cit.) dividiu a unidade em três fácies: Castelo, Capanema e Baunilha Grande. GÓES et al. (1990), no entanto, definiram sete fácies: biocalcirudito, biocalcarenito não estratificado, biocalcarenito estratificado, margas, folhelhos (negros e verdes), biohermito e calcirudito. (ii) Grupo Barreiras, está dividido em três litofáceis: argilo-arenosa, arenosa e conglomerática (Eoceno ao Mioceno Inferior), (iii) Sedimentos não consolidados do Pós-Barreiras e (iv) Sedimentos do Quaternário.

Os sedimentos da Formação do Grupo Barreiras assentam sobre a Formação Pirabas e são sobrepostos pelos sedimentos Pós-Barreiras. Esta unidade é representada na forma de inúmeras falésias e relevo colinoso comuns na área (Mioceno Inferior) (ARAI et al., 1994). Rossetti, Truckenbrodt e Góes (1989) descrevem a Formação do Grupo Barreiras, como sendo constituída basicamente por conglomerados polimíticos intercalados por areia e argila.

Os Sedimentos do Grupo Barreiras e Pós-Barreiras do NE paraense admitem um modelo deposicional de leques aluviais/planícies de maré areia/planície de lama, com rápidas inundações ocorrentes em clima árido e semi-árido (ROSSETTI op. cit). Os sedimentos Pós-Barreiras apresentam uma espessura média de 5 a 10 m, com depósitos transicionais a continentais (leques aluviais) e influenciados por maré (canais de maré, planície de maré e manguezais) (CARVALHO, 2007).

O Quaternário é representado por sedimentos areno-argilosos pleistocênicos do Pós-Barreiras e pelos depósitos da planície aluvionar estuarina e costeira da cobertura sedimentar recente (Figura 10).

Idade		Unidades Litostratigráficas	Seqüências Depositionais
Plioceno - Quaternário		Pós-Barreiras	C
MIOCENO	Superior	Paleossolo laterítico	Sb3
	Médio	Fm. Barreiras Médio/Superior	B
	Inferior	Fm. Barreiras Inferior	Sb2
Oligoceno Superior	Fm. Pirabas	Paleos. Laterítico Bauxítico	Sb1
Cretácio	Grupo Itapecuru		

Figura 10: Coluna estratigráfica do nordeste do Pará (Fonte: Modificado de ROSSETTI³, 2001 apud CARVALHO, 2007).

³ ROSSETTI, D. F., Late cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, v 14, p. 77-89. 2001.

3.4 ASPECTOS ESTRUTURAIS

O quadro neotectônico da região norte reúne os sistemas estruturais, as seqüências sedimentares, os sistemas de relevo e os elementos das bacias hidrográficas que respondem por movimentos do Terciário Superior (Mioceno-Plioceno) e do Pleistoceno Superior ao recente (BEMERGUY; COSTA 1991; BEMERGUY et al., 1995⁴ apud COSTA, 1996). Assim, reconhecem-se sistemas de falhas transcorrentes dextrais orientadas nas direções E-W, ENE-WSW e NE-SW que geraram extensas áreas transtensivas e transpressivas delineadas através de falhas normais NW-SE e NNW-SSE, e de cavalgamentos e dobras de direções NE-SW e ENE-WSW, respectivamente. Há também vastas áreas formadas por falhas normais orientadas na direção N-S (Figura 11).

O Nordeste do Pará é marcado por movimentação tectônica, que gerou falhas normais de orientações N-S e NW-SE e falhas de transferência NE-SW e ENE-WSW, sendo resultado da reativação de Sul-Atlântica, controlando assim, o desenvolvimento das bacias do Marajó, Bragança-Viseu e Pará-Maranhão, durante o Cretáceo (HASUI, 1990; COSTA et al., 1991) (Figura 12).

⁴ BEMERGUY, R.L. et al., Tectônica e paleogeografia da calha do rio Amazonas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5. 1995. **Anais**. Gramado, RS, 1995. Porto Alegre. SBG, p. 419-420.

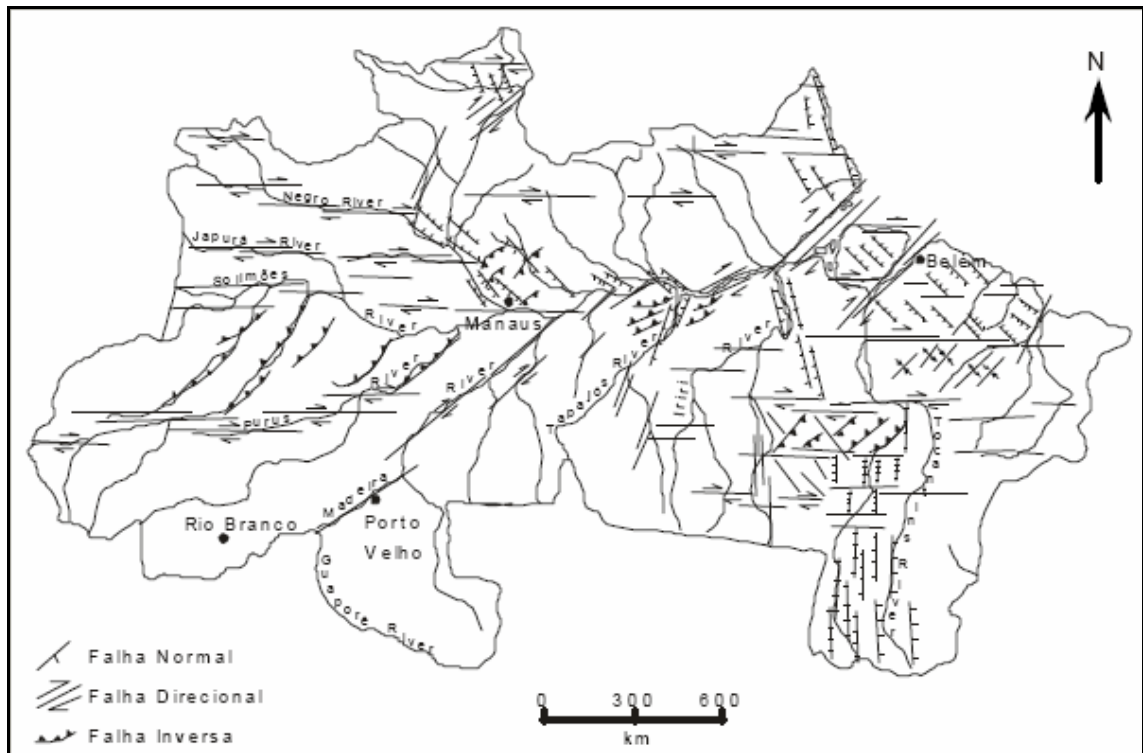


Figura 11: Arcabouço neotectônico mostrando os sistemas de falhas. Falhas transcorrentes: linhas com ou sem par de setas, estas indicando o movimento relativo. Falhas normais: linhas com pequenos traços perpendiculares. Falhas inversas ou de cavalgamentos: linhas denteadas. Fonte: (FELIPE, 2001).

O quadro de estruturas do Quaternário (Pleistoceno Médio-Holoceno) compreende vários feixes de falhas transcorrentes dextrais E-W (Figura 13), que se interligam através de falhas normais de direção NW-SE, NNW-SSE e N-S, definindo várias estruturas romboédricas transtensivas (bacias de afastamento) de dimensões variadas (COSTA et al., 1996).

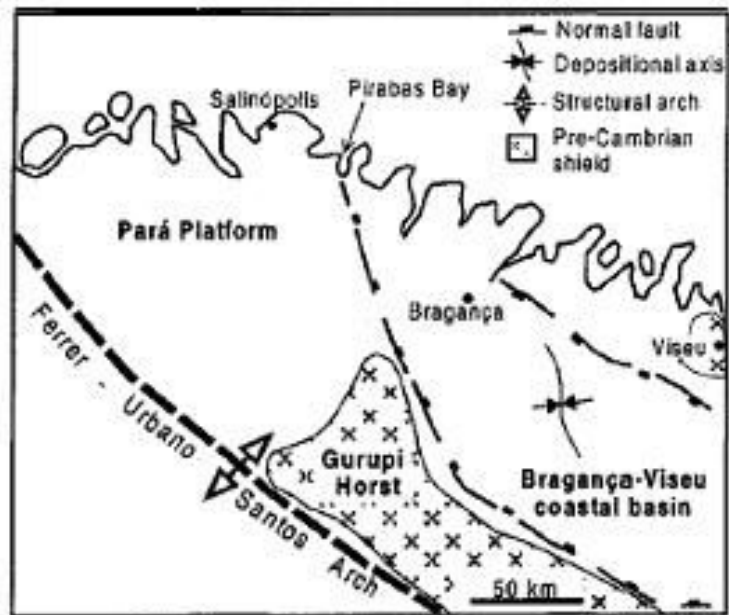


Figura 12: Mapa Tectônico do nordeste do Pará (Fonte: GORINI; BRYAN, 1976).

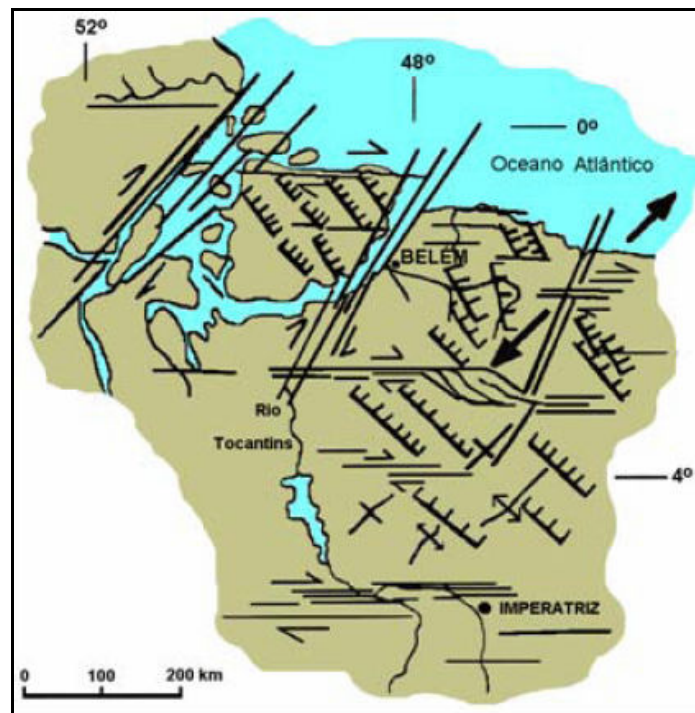


Figura 13: Quadro estrutural do Quaternário (Pleistoceno Médio-Holoceno) (Fonte: COSTA⁵ et al., 1996, apud CAVALCANTE, 2000).

⁵ COSTA, J.B.S. et al., Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. GEONOMOS. **Revista de Geociências**. volume IV, n. 2. p. 23-44. 1996.

3.5 PLANÍCIE COSTEIRA DE BRAGANÇA

A Planície Costeira de Bragança é fortemente influenciada por macromarés (amplitude de 5-6 m) sendo classificada como uma costa transgressiva, incluindo os ambientes de planície de maré, estuários e praias (SOUZA FILHO, 1995), caracterizando, desta forma, um ambiente de sedimentação altamente complexo.

A Planície Costeira de Bragança com uma área de aproximadamente 1.570 km² (Figura 14) possui uma grande variedade de unidades morfológicas. Essa planície foi compartimentada em três domínios morfológicos distintos, segundo sua forma, natureza dos sedimentos, estratigrafia e vegetação dominante: Planície Aluvial, Planície Estuarina e Planície Costeira. Ocorrem ainda ambientes deposicionais como o fluvial estuarino, o pântano salino, a planície de maré, entre outros (tabela 04).

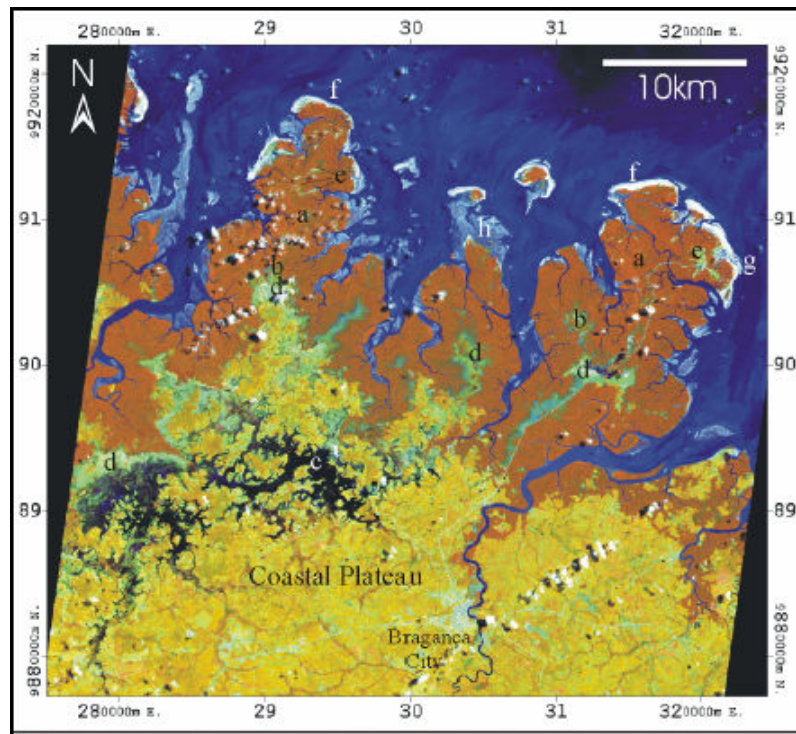


Figura 14: Planície costeira de Bragança (tom vermelho) e Planalto Costeiro (tom amarelo) (Fonte: SOUZA FILHO, 2000).

Tabela 4: Principais domínios morfológicos, suas unidades e área de abrangência.

Domínios Morfológicos	Unidades Morfológicas	Área (km²)	Área %
Planalto Costeiro	-----	493	-----
Planície Aluvial	Canal Meandrante	3,1	0,25
	Planície de Inundação		
	Diques Marginais		
Planície Estuarina	Canal Estuarino	462	42,70
	Córregos de Maré		
	Planície de Inundação		
Planície Costeira	Pântano Salino	82,7	7,70
	Manguezal	471	43,61
	Chenier	5,5	0,50
	Planície Arenosa	49	4,53
	Dunas Costeiras	6,4	0,60
	Praia	-----	-----

(Fonte: SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 1997).

3.5.1 Planalto Costeiro

Esta unidade ocorre em grande parte no município de Bragança na forma de relevo colinoso. Apresenta uma superfície plana erodida, suavemente ondulada e intensamente dissecada, com cotas entre 50 e 60 m, que diminuem progressivamente em direção à planície costeira, a norte. Corresponde ao embasamento da Planície Costeira Bragantina, sendo constituído por sedimentos do Grupo Barreiras, tendo seu contraste em relação a planície costeira distinto, tanto litológica (sedimentos areno-argilosos avermelhados do Grupo Barreiras e lamosos da planície costeira) e

morfologicamente (falésias mortas de até 1 m de altura) quanto pela cobertura vegetal (floresta secundária e mangue) (ALVES, 2001; COSTA et al., 1991; SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 1997).

3.5.2 Planície Aluvial

Estende-se ao sul do limite de maré na planície estuarina à altura de Bragança, abrangendo uma área de 3,1 km², sendo subdividida em três unidades (SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, op. cit.):

3.5.2.1 Canal Fluvial do rio Caeté

Apresenta um canal meandrante, com anomalias em caixa e cotovelo, com depósitos de barras em pontal e longitudinais, encaixados no Planalto Costeiro.

3.5.2.2 Planície de Inundação

É limitada por diques marginais ("levees") e Planalto Costeiro, sendo colonizados por campos herbáceos, principalmente por *Eleucharias sp.* e inundados somente durante os períodos de grandes cheias, quando ocorre o transbordamento dos canais.

3.5.2.3 Diques Marginais

São elevações longitudinais construídas 50 cm acima da planície de inundação, adjacente ao canal fluvial, colonizados por mangues e macrófitas aquáticas *Eleucharia sp.*, sendo rompidos durante os períodos de grandes cheias, no momento do transbordamento.

3.5.3 Planície Estuarina

É limitada ao sul pela planície aluvial no limite superior da influência das marés, e a norte pela zona onde dominam os processos marinhos. É margeada pela planície costeira em sua porção distal e pelo Planalto Costeiro na proximal ocupando uma área de 462 km². Três unidades morfológicas foram descritas (SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 1997):

3.5.3.1 Canal estuarino do rio Caeté

Varia da porção distal para a proximal, refletindo progressivamente a influência das marés ao longo do canal estuarino. É compartimentado em quatro padrões morfológicos distintos (funil estuarino, segmento retilíneo, segmento meandrante e canal de curso superior).

3.5.3.2 Córregos de Maré

Recortam a planície costeira e apresentam forma meandrante a retilínea, com largura máxima de 100 m. Em direção ao continente, são bifurcados, rasos, estreitos e com substrato lamoso; em direção ao mar, os mesmos são singulares e largos, com fundo arenoso. São freqüentes barras em pontal.

3.5.3.3 Planície de Inundação

Ocorre ao longo do funil estuarino e dos segmentos retilíneos e meandrantés, onde são observados depósitos lamosos. No canal de curso superior, as planícies de inundação são constituídas por sedimentos pelíticos fitoturbados, ricos em matéria orgânica. Às margens desse trecho, ocorrem estreitas franjas de manguezal, seguidas por gramíneas e palmeiras que colonizam a planície de inundação e desaparecem quando entram em contato com o Planalto Costeiro.

3.5.4 Planície Costeira

É o mais extenso dos domínios morfológicos, abrangendo uma área de 615,7 km². É limitada ao sul por falésias mortas de 1 a 2 m de altura, esculpida no Planalto Costeiro e, a norte pela zona onde predominam os processos marinhos (Figura 14). Compreende desde as amplas planícies de maré até os cordões duna-praia dominadas pelos processos oceanográficos. Nesta região, estão inseridos os subambientes descritos por Alves (2001), Souza Filho (2001) e Souza Filho e El-Robrini (1997).

3.5.4.1 Pântano Salino

Os pântanos salinos ou “Campos de Bragança” ocupam uma área de 82,7 km². Estão sob influência do domínio de supramaré e encaixados em uma rede de drenagem colmatada, alimentada principalmente por sedimentos finos fluviais e oriundos da planície de maré lamosa (Figura 15).



Figura 15: Pântano salino, localizado na margem da estrada que dá acesso à praia de Ajuruteua (julho de 2005).

3.5.4.2 Manguezal

Constituem extensas planícies lamosas da até 20 km de largura, situadas entre os níveis de maré alta de sizígia e a média das marés, ocupando uma área de 466,8 km². São constituídos por sedimentos lamosos colonizados, principalmente, por *Rhizophora mangle* L. e *Avicennia germinans* L., além de *Laguncularia racemosa* L. e *Spartina* sp. L. associados. Baseado nas marés, altimetria relativa e porte da vegetação de mangue, estes depósitos foram divididos em: a) Manguezal de supramaré, topograficamente mais elevado, com menos porte arbóreo e influenciado pelas marés somente durante os períodos de sizígia e; b) Manguezal de intermaré, topograficamente mais baixo, maior porte arbóreo, com frentes de progradação colonizadas por mangues jovens que bordejam a planície costeira (Figura 16).



Figura 16: Manguezal nas margens do estuário do rio Caeté (junho de 2006).

3.5.4.3 Chenier

São antigos cordões duna-praia isolados na planície lamosa. Ocupam uma área de 5,5 km² e são constituídos por cordões duna-praia (dune-beach ridges) de até 3 m de altura e leques de lavagem que dão forma irregular aos corpos. Comumente apresentam formas alongadas de cordões de praia (beach ridges), com ou sem leques de lavagem, de até 1 m de altura, 200 m de largura e 2 km de comprimento. Segundo Souza Filho (1995), sua formação é condicionada às oscilações do nível do mar, com o recuo da linha de costa, em regime de transgressão, associada à progradação dos depósitos lamosos.

3.5.4.4 Planície Arenosa

Localiza-se na porção distal da planície costeira (49 km²), margeando os depósitos de manguezal e dunas costeiras. Esta área é dominada por baixios arenosos a partir do limite das marés baixas de quadratura até a zona de inframaré. Geralmente, esta área apresenta um gradiente baixo (1:100), que por vezes, é quebrado pela presença de barras arenosas de até 3 m de altura. As areias formam mega-ondulações de cristas retas, lunadas, rombóides e lingnóides, além de “sand waves” e fundos planos.

3.5.4.5 Dunas Costeiras

São limitadas a sul por manguezais de intermaré e a norte pela planície arenosa, perfazendo uma área de 6,4 km². Os cordões de dunas mais freqüentes são formados por dunas fixadas por campos arbustivos, que constituem cristas paralelas à linha de costa, produzidas pela estabilização de dunas longitudinais e piramidais de aproximadamente 7 m e 5 m de altura, respectivamente.

As dunas são o resultado do retrabalhamento dos sedimentos arenosos da zona de intermaré, que expostos durante a maré baixa, são transportados pelo vento, causando a migração destes depósitos em direção aos manguezais. Atualmente estão

sendo erodidas por ondas e correntes de marés e/ou dissipadas, constituindo falésias ao longo da linha de costa.

3.5.4.6 Praia

As praias bordejam a planície de maré lamosa (manguezal de intermaré), sendo recortada pelos canais de maré. São representadas por cordões arenosos (beach ridges) lineares, que migram em direção ao continente sobre depósitos de manguezais, constituindo uma costa retrogradacional (Figuras 17 e 18). É subdividida em:

a) Pós-praia: com 200 m de extensão é limitada em direção ao mar pelo nível de maré alta (escarpa de praia) e, em direção ao continente, por dunas costeiras. É representada por uma superfície aproximadamente horizontal, sobre a qual se desenvolvem pequenas dunas e;

b) Estirâncio: representa a face de praia propriamente dita e está limitada pelos níveis de maré alta e baixa, correspondendo a zona de intermaré. Constitui uma zona levemente inclinada em direção ao mar ($2-3^\circ$), muito extensa (~ 700 m), onde se observa um sistema de cristas e calhas (“ridges e runnels”), dispostas paralelamente a linha de costa e interligados por canaletas (“gaps”).



Figura 17: Praia situada na Vila dos Pescadores, formada por cordões arenosos (setas brancas) (junho de 2006).



Figura 18: Praias formadas por cordões arenosos (setas brancas) (Fonte: GOOGLE EARTH).

A Planície Costeira Bragantina é formada pelos seguintes ambientes e sub-ambientes: Planície Costeira Bragantina, Planície Arenosa, Dunas Costeiras, Manguezal de Supramaré, Manguezal de Intermaré, Chenier, Pântano Salino Interno, Pântano Salino Externo, Planície de Inundação, Planície Estuarina, Planície Aluvial, Baixo Planalto Costeiro (Adaptado de SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 1997) (Figura 19).

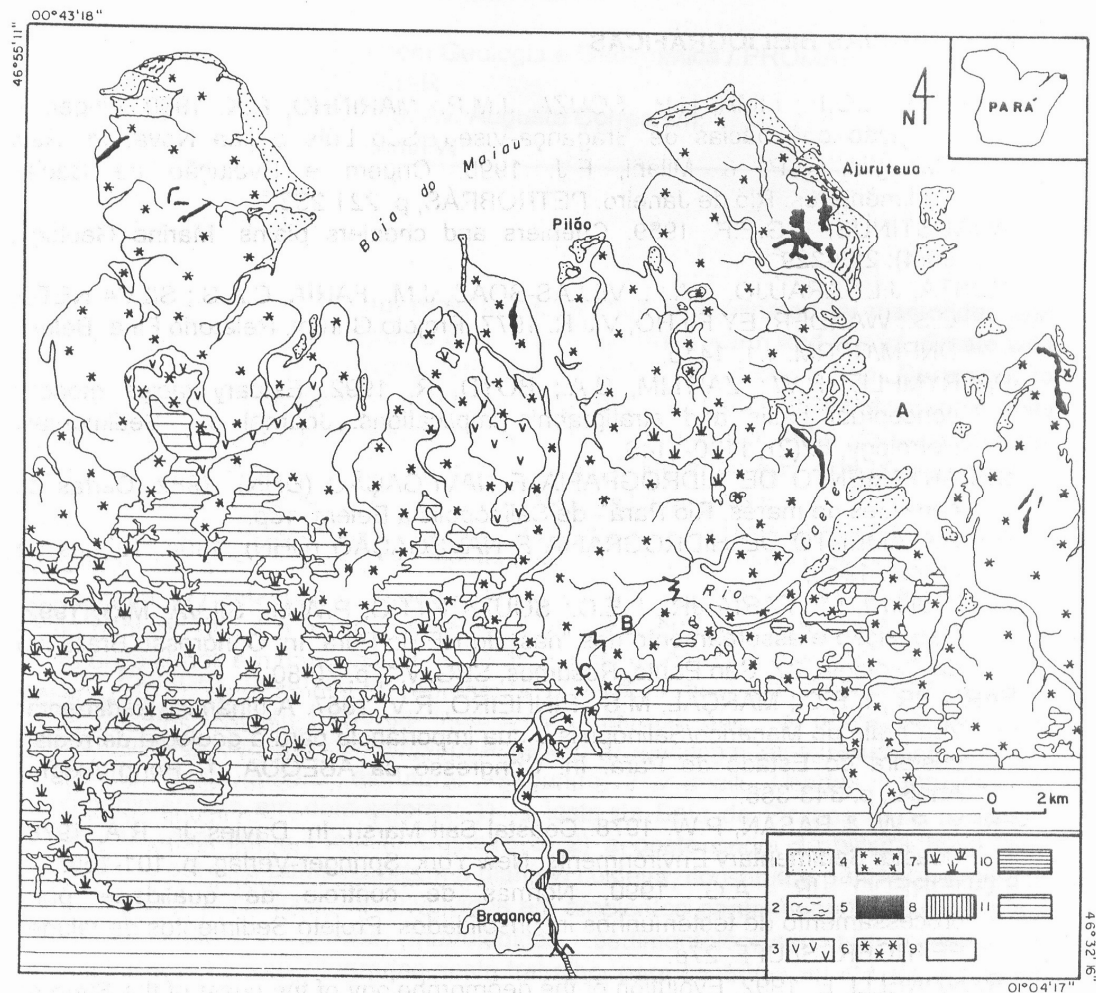


Figura 19: Mapa geomorfológico da Planície Costeira Bragantina. 1 – Planície Arenosa; 2 – Dunas Costeiras; 3 – Manguezal de Supramaré; 4 – Manguezal de Intermaré; 5 – Chenier; 6 – Pântano Salino Interno; 7 – Pântano Salino Externo; 8 – Planície de Inundação; 9 – Planície Estuarina; 10 – Planície Aluvial; 11 – Baixo Planalto Costeiro. A – Funil Estuarino; B – Segmento Reto; C – Segmento Meandrante; D – Canal de Curso Superior (Fonte: Adaptado de SOUZA FILHO; ROBRINI, 1997).

3.6 COBERTURA VEGETAL

Predominam na região: (i) as florestas secundárias, que se localizam nas áreas mais internas, denominadas ainda de capoeira, visto que toda a cobertura praticamente foi alterada pela ação antrópica e (ii) as florestas pioneiras (GÓES FILHO et al., 1973), no entorno das reentrâncias (rias), representada pela vegetação de manguezais,

campos naturais, praias e dunas. A superfície plana das referidas regiões propicia a formação de canais que recortam os manguezais (Figuras 20 e 21).



Figura 20: Manguezal, campos naturais (Ponte sobre o furo do meio, julho de 2005).



Figura 21: Manguezal recortado por canais (Ponte sobre o furo do meio, julho de 2005).

A extensa península de 30 km de comprimento e 15 km de largura é recoberta por 190 km² de “terras alagadas”. Florestas isoladas e com diversas áreas elevadas de até 25 m de altura nas regiões centrais da península, ocorrem rodeado pela vegetação herbácea e por manguezal. As vegetações herbáceas estão em áreas um pouco mais elevadas do que os manguezais. A planície herbácea não é frequentemente inundada, sendo somente inundada pelas altas marés de sizígia. Esta unidade de vegetação é representada pela *Eleocharis geniculata*, *Fimbristylis spadicea* (Cyperaceae) e *Sporobolus virginicus* (Poaceae). A maior parte da península é recoberta por manguezais bem desenvolvidos de 10-25 m de altura. As espécies importantes são *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Laguncularia racemosa* (COHEN, 2003).

Cohen (2003) mostra ainda que diversas unidades de vegetação são encontradas na península e que sua distribuição está ligada à topografia, processos físicos e outros fatores ambientais como frequência de inundação e salinidade:

1. Florestas isoladas, de até 25 m de altura, ocorrem em diversas áreas isoladas na região central da península, cercada por pântanos salinos e manguezais. Sua

composição e espécies ainda não foram estudadas, mas parecem estar relacionadas a vegetação de terra firme e restinga;

2. Os pântanos salinos, da região central da península cobrem cerca de 3-4 km² (Figura 15) e ocorrem em áreas um pouco menos elevadas do que as ilhas (florestas). Os pântanos salinos ocorrem em áreas um pouco mais elevadas do que os manguezais. Os pântanos não são frequentemente inundados e só são drenados na preamar de sizígia. As espécies de pântano salino são *Eleocharis geniculata*, *Fimbristylis spadicea* (Cyperaceae) e *Sporobolus virginicus* (Poaceae) (MOIRAH, P.M. MENEZES comunicação pessoal⁶ apud COHEN, 2003);

3. Manguezais bem desenvolvidos de 10-25 m de altura. Espécies importantes são *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Laguncularia racemosa*. Existem distintos tipos de manguezal. Em áreas relativamente altas no centro da península, a *Avicennia* predomina. Em áreas intermediárias *Rhizophora* e *Avicennia* dominam, enquanto em áreas mais baixas, incluindo as bordas dos canais de maré, a *Rhizophora* predomina. As *Avicennia* ocorrem em posições dispersas, na zona de transição do pântano salino alcançando de 2 m a 3 m de altura, diferente da *Laguncularia* que ocorre em todo o manguezal (COHEN et al., 2001);

4. Restinga, vegetação de grama costeira (campo de dunas) ocorre em planícies arenosas e em dunas estáveis ou instáveis que se localizam no norte da península, perto da linha de costa.

O desenvolvimento do manguezal está relacionado à dinâmica das águas costeiras e à redução da salinidade em decorrência da mistura entre águas doces e salinas, do ambiente estuarino.

⁶ MOIRAH P.M. MENEZES. Comunicação pessoal

4 CLASSIFICAÇÃO E GÊNESE DO AMBIENTE ESTUARINO

A palavra estuário é derivada do adjetivo latino aestuarium e fazem referência a um ambiente altamente dinâmico, com mudanças constantes em resposta a forçantes naturais. Esse termo é utilizado genericamente para indicar o encontro do rio com o mar, caracterizando uma foz litorânea. Portanto, trata-se de um ecossistema de transição entre o oceano e o continente; a complexidade e a vulnerabilidade à influência do homem são características comuns a todos os estuários. Os estuários são biologicamente mais produtivos do que os rios e o oceano adjacente, por apresentarem altas concentrações de nutrientes que estimulam a produção primária (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

O ambiente estuarino é caracterizado pela forma do corpo d'água, conexão livre com o mar aberto e grau de mistura de água salina (SILVA, 1998). A forma pela qual ocorre a mistura das águas é um elemento chave para caracterizar se o sistema apresenta características de retenção ou de exportação de sedimentos e outros constituintes dissolvidos e particulados (FRANKLIN-SILVA; SCHETTINI, 2003). São ecossistemas de elevada importância biológica e sócio-econômica. A sua abundante e diversificada comunidade e capacidade de renovação periódica de suas águas faz destes ecossistemas, locais onde ocorrem intensas transformações da matéria orgânica, representando um importante elo entre os ecossistemas fluviais e marinhos. Além disso, cerca de 2/3 das grandes cidades estão localizadas em estuários e regiões adjacentes, devido à facilidade de construção de portos, marinas, indústrias de pescado, etc (FILHO; SPILLERE; SCHETTINI, 2003).

Dalrymple; Zaitlin; Boyd (1992) admitem que para uma correta definição do sistema estuarino torna-se necessário considerar não apenas fatores restritos como salinidade ou a influência da maré, visto que este sistema é uma zona de interação entre correntes fluviais, marés e ondas. Assim sendo, os referidos autores advogam como definição mais completa para o estuário como “uma porção litorânea de um sistema drenado por um vale, que recebe sedimentos de origem marinha e fluvial e que contém fácies influenciada por marés, ondas e processos fluviais”. A extensão de um

estuário se faz, para o interior, pelo limite continental das fácies de maré, e como limite externo, presença de fácies costeiras em sua foz (SILVA, 1998).

Os movimentos de água nesse ambiente são gerados por oscilações do nível do mar, pela descarga de água doce, pelo gradiente de pressão devido à influência termohalina da salinidade, pela circulação da plataforma continental e pelo vento agindo diretamente sobre a superfície livre (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

4.1 DEFINIÇÃO FÍSICA DE ESTUÁRIO

Historicamente, o termo “estuário” foi de início aplicado a mais baixa extensão de maré de um rio. Do ponto de vista físico, a definição de estuário deve admitir certas semelhanças básicas na distribuição da salinidade e da densidade, bem como no modelo de circulação e nos processos de mistura; deve também salientar a importância das fronteiras que controlam a distribuição das propriedades e a movimentação e mistura das águas (PRITCHARD, 1971).

Levados em conta estes aspectos, pode-se definir estuário como uma massa de água costeira semi-fechada, que tem uma ligação livre com o mar aberto e dentro da qual ocorre uma diluição mensurável de água salgada com água doce, proveniente da drenagem terrestre.

Segundo Miranda, Castro e Kjerfve (op. cit.), no balanço de água, a soma dos volumes que chegam ao estuário, gerados pela precipitação (P) e descarga fluvial (Q_f), deve ser maior do que o volume de água transferido para a atmosfera pelo processo de evaporação (E). Portanto, de acordo com a definição clássica, no estuário vale a seguinte desigualdade para esses volumes: $P + Q_f > E$. Alguns autores referem-se a esse caso como estuário positivo. Em alguns ambientes e lagunas costeiras de regiões tropicais, pode ocorrer para o balanço de água a condição $P + Q_f < E$ e, ao contrário a designação anterior, para esse ambiente pode-se encontrar o termo estuário negativo. Uma condição usualmente de transição entre o estuário e um sistema negativo é aquela na qual $P + Q_f = E$, e o ambiente é denominado neutro.

4.2 GÊNESE

Segundo Pritchard (1971)⁷ apud Schubel (1971) e Davis⁸ (1983) apud Silva (1998), os estuários podem ter formação a partir de: (i) Sistemas drenados de vale, onde ocupam costas cuja morfologia foi delineada por erosão fluvial, onde os rios desenvolvem padrão dentrítico ou entrelaçado (“rias”); (ii) Fjords, que compreendem feições que preenchem depressões causadas pelo movimento de geleiras continentais pré-existentes; (iii) Ilhas barreiras, onde ocorrem associados à costa onde se dá o desenvolvimento de ilhas barreiras e (iv) Produzidos por processos tectônicos, que têm origem induzida por processos tectônicos.

Com algumas exceções, os estuários formaram-se em regiões relativamente estreitas de transição entre o mar e a terra. São ambientes de época geológica muito recente (menos de cinco mil anos), formado por alterações seculares do nível do mar de natureza eustática (variação do volume de água dos oceanos) ou isostáticas (variações do nível da crosta terrestre), bem como por processos de origens tectônicas. Suas localizações, formas e extensões dependem do nível do mar, da topografia do litoral e dos rios, e foram alteradas por processos erosivos e deposicionais de sedimentos no início naturais e, mais recentemente, como consequência da exploração e exploração das bacias de drenagem (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

O efeito da descarga fluvial, constantemente adicionada pelo rio, além de gerar um componente da circulação estuarina que naturalmente se desloca para fora do estuário (vazante), ao diluir a água do mar produz diferenças de densidade ao longo do estuário, gerando movimentos estuário acima (enchente) forçados pelo gradiente de pressão. A interação das várias propriedades e processos – descarga (ou vazão) do rio, correntes de maré, gradiente de pressão, advecção turbulenta – produz, dentro da delimitação geomorfológica da bacia estuarina, a distribuição de salinidade que é característica de cada estuário (OFFICER, 1983).

⁷ PRITCHARD, D.W. **Estuarine modelling**: an assessment capabilities and limitations for resource management and pollution control. Austin: Tracor, 1971. p. 22-33.

⁸ DAVIS Jr., R.A. 1983. **Depositional systems. A genetic approach to sedimentary geology**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall. 669 p.

- Estuários de Planície Costeira: Estes estuários são típicos de regiões de planície costeira e se formaram durante a transgressão do mar (Holoceno), que inundou os baixos cursos dos rios. Esses estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade. A área da seção transversal em geral aumenta estuário abaixo, às vezes de forma exponencial, e a configuração geométrica da seção transversal tem a forma de V. A razão largura/profundidade, em geral, é grande, embora ela esteja na dependência do tipo de rocha em que o vale do rio foi escavado. Devido ao processo recente de sedimentação, o fundo é preenchido com lama e sedimentos finos na sua parte superior, que se tornam mais grossos em direção à entrada (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

- Fjordes: Os fjordes formaram-se em regiões que durante o Pleistoceno estavam recobertas com calotas de gelo, devido à intensa escavação glacial na planície costeira ou próxima à plataforma continental. A pressão dessas calotas sobre os blocos continentais e os efeitos erosivos durante o descongelamento afundaram os vales dos rios primitivos e deixaram um alto fundo rochoso na entrada, denominado soleira. Por ser muito profundo, e com as trocas com o oceano adjacente limitadas pela soleira, a água da descarga fluvial e a circulação ficam confinadas numa camada muito rasa e que no seu movimento estuário abaixo recebe pelo processo de entranhamento uma quantidade razoável de água do mar da camada profunda. A camada de água mais profunda é quase isohalina e o transporte fluvial na primavera e no verão é dominante sobre o prisma de maré. A profundidade da camada superior é praticamente constante e o transporte de volume aumenta estuário abaixo (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, op. cit.).

Como são estuários profundos, a temperatura decresce com a profundidade e, por ocasião da entrada de água de degelo, podem ocorrer inversões (aumentos com a profundidade) de temperatura em camadas subsuperficiais da coluna d'água (PICKARD, 1961⁹ apud MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, op. cit.).

- Construídos por Barra: São estuários também formados com a inundação de vales primitivos de rios durante a transgressão marinha, mas a sedimenta o recente ocasionou a forma o de barras na foz. Portanto, esses ambientes estão associados a

⁹ Pickard, 1961. G.L. Pickard, Oceanographic features of inlets in the British Columbia mainland coast. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **18** 6 (1961), pp. 907–999.

regiões costeiras que podem sofrer processos erosivos com facilidade, produzindo grandes quantidades de sedimentos que são retrabalhados pelas ondas e transportados por correntes litorâneas (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

4.3 CLASSIFICAÇÃO

As diferentes classificações de estuário existentes na literatura são baseadas nas variações de salinidade ou de densidade da água, nas amplitudes de maré da área oceânica adjacente e nas características geomorfológicas. A classificação baseada nos padrões de variação de salinidade foi introduzida por Pritchard (1952b), baseado na definição oceanográfica de estuário.

Os estuários foram classificados por Pritchard (op. cit.) como **a)** de cunha salina, **b)** parcialmente misturados e **c)** verticalmente homogêneos (Figura 22). Nesta o **volume** relativo do fluxo de maré cresce de **a** para **c**, junto à magnitude das correntes de maré. A turbulência na coluna d'água é diretamente proporcional à velocidade do fluxo junto ao fundo, de forma que com o aumento da velocidade da maré expandem-se os processos de mistura. Conseqüentemente, as duas camadas que caracterizam os estuários de cunha salina perdem gradualmente a distinção, até a camada d'água se tornar verticalmente homogênea.

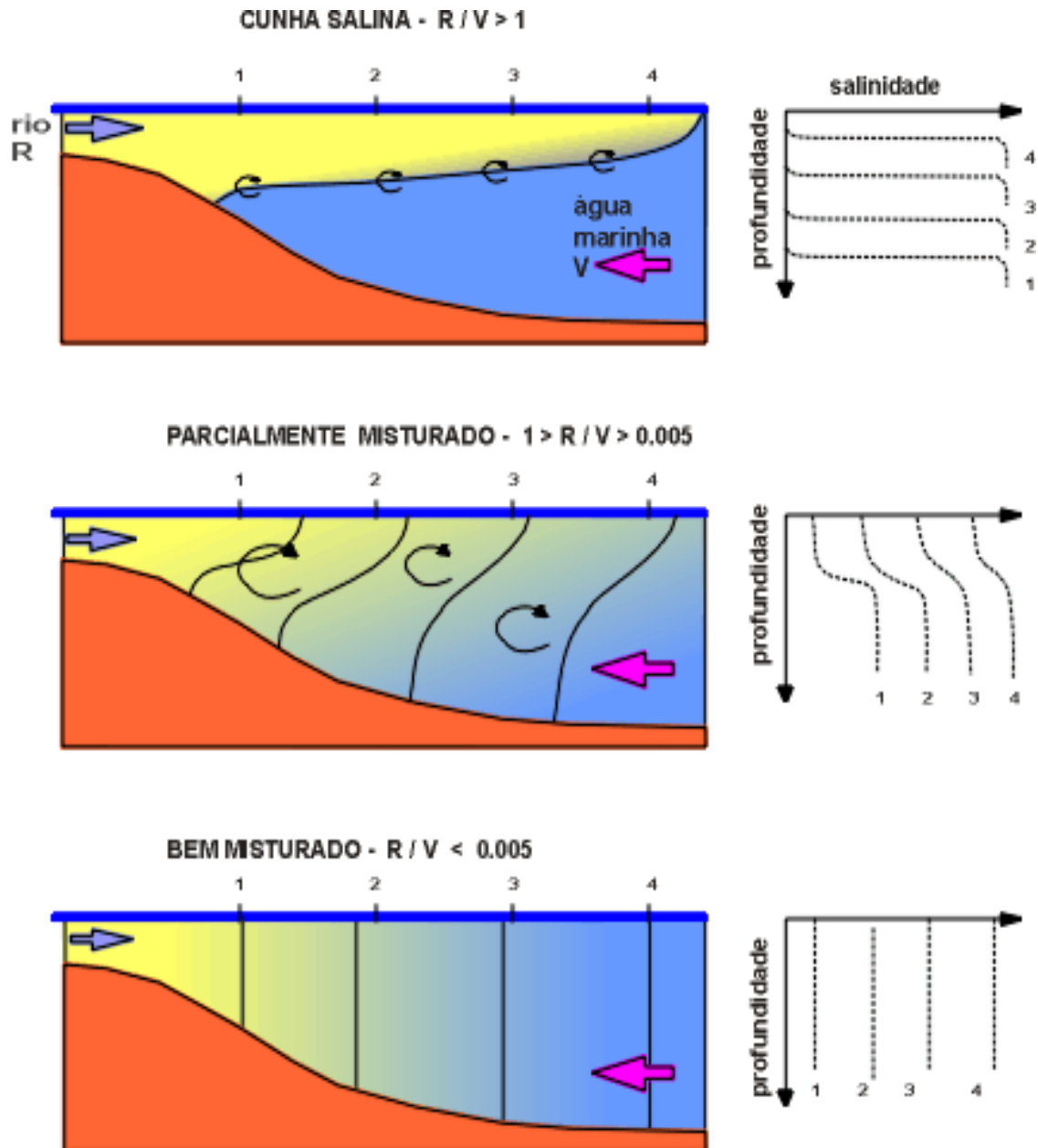


Figura 22: Estuários segundo a classificação adotada por Pritchard (1952).

Hayes (1975) propôs uma classificação geomorfológica baseada na altura da maré. Esta classificação se baseou em formas deposicionais distintas observadas na foz de canais estuarinos e lagunares ao longo de costas de restinga apresentando variações longitudinais na altura das marés. Esta classificação foi baseada na classificação de alturas de maré proposta por Davies (1964), onde o termo micromaré

se refere a marés com altura menor que 2 m, mesomarsés a marés com altura variando de 2 a 4 m e macromarsés a marés com altura maior que 4 m (Figura 23).

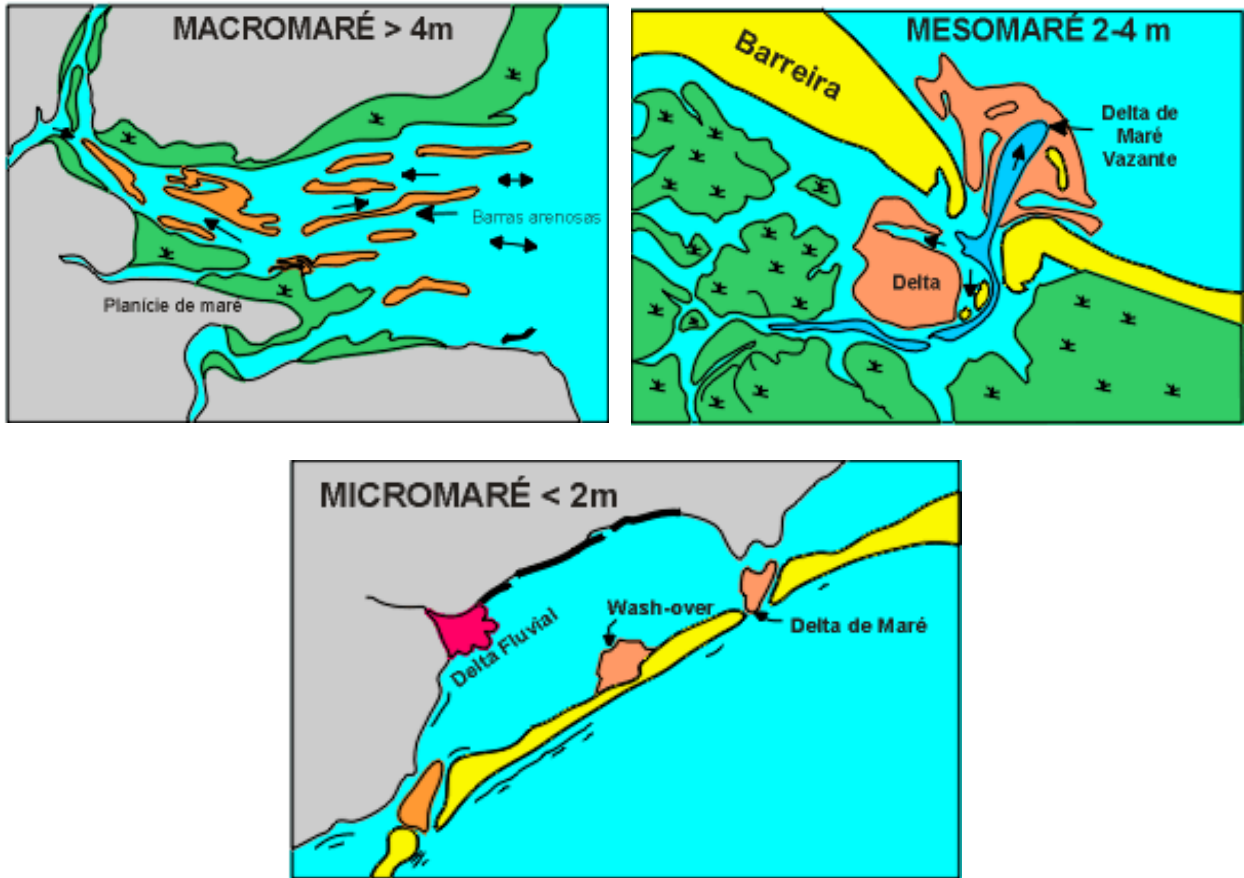


Figura 23: Estuários segundo a classificação adotada por Davies (1964).

Os estuários de micro e mesomarsés estão associados a restingas e ocasionais canais de conexão entre o estuário ou laguna, à retaguarda, e o mar. Estuários largos, com ampla desembocadura e forma longitudinal em funil são característicos de regiões de macromarsés (HAYES, 1975).

A maioria das classificações de estuário propostas até hoje tem cunho geomorfológico (DYER, 1973; FAIRBRIDGE, 1980; KJERFVE; MAGILL, 1989; PRITCHARD, 1967; ROY, 1985). No entanto, nesta dissertação, adotou-se as mencionadas por Silva (1998) e Pritchard (1952b)¹⁰ apud Miranda; Castro e Kjerfve

¹⁰ PRITCHARD, D. W., Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *Journal of Marine Research*, v. 11, p. 106-123. 1952b.

(2002), que foram classificados quanto aos processos físicos dominantes, geomorfologia e quanto à estratificação da salinidade.

4.3.1 Classificação quanto aos processos físicos dominantes

4.3.1.1 Estuários dominados por ondas

Apresentam-se divididos em três zonas bem definidas: (i) um corpo marinho composto por depósitos de ilha barreira, leque de lavagem, canal de maré e delta de maré; (ii) uma bacia central onde se depositam os sedimentos finamente granulados e; (iii) um delta de cabeceira de baía que está submetido à influência da maré e/ou da água salina (Figura 24).

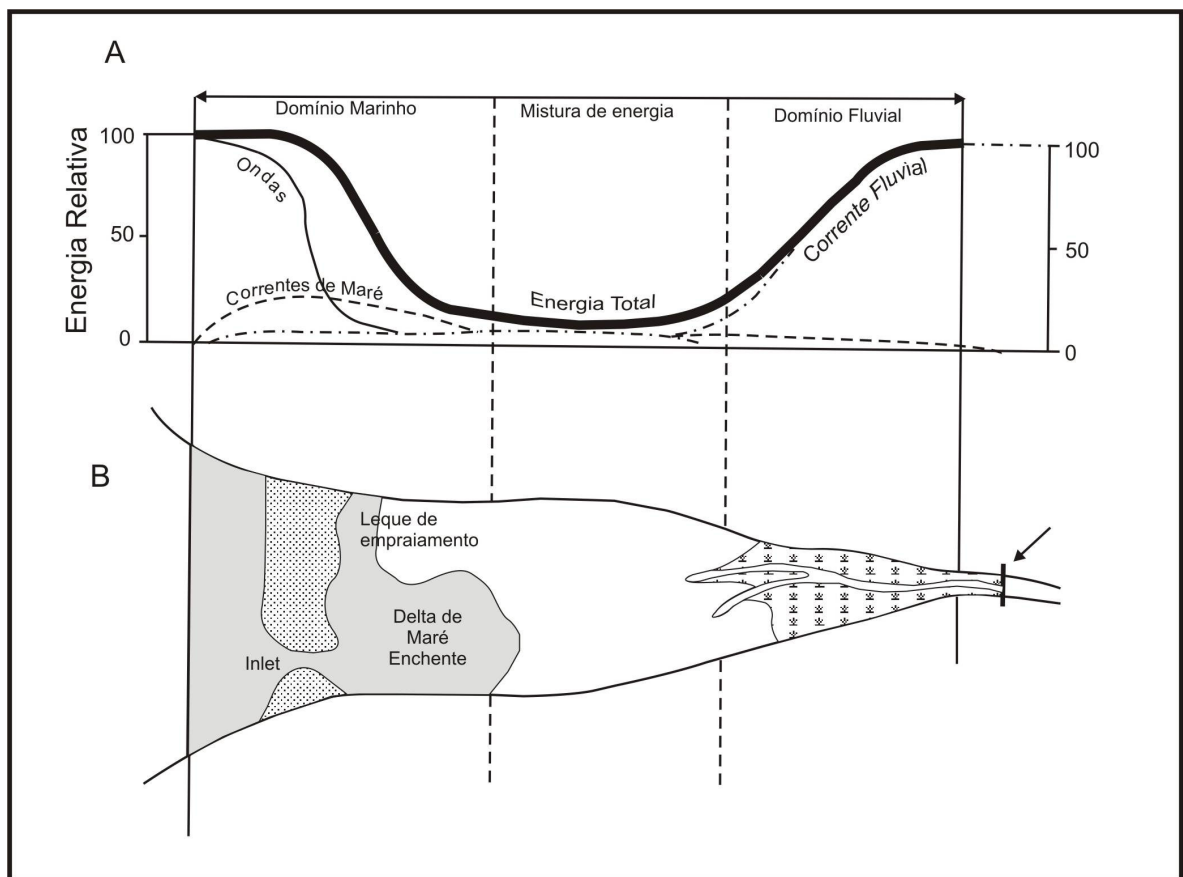


Figura 24: Desenho esquemático de um estuário dominado por onda e sua energia relativa (Fonte: DALRYMPLE; ZAITLIN; BOYD, 1992).

4.3 1.2 Estuários dominados por marés

Neste sistema, mais precisamente na porção marinha, desenvolvem-se barras arenosas alongadas segundo a direção das correntes marinhas e amplas planícies de maré arenosas, que possuem um canal de baixa sinuosidade, sendo seguida por uma zona de meandros apertados e, finalmente, uma zona interior dominada por processos fluviais (Figura 25). Os estuários dominados por maré recebem sedimentos provenientes dos rios, na cabeceira do estuário e da plataforma continental adjacente. A energia das correntes de maré excede a energia das ondas na foz, onde barras de areias alongadas se desenvolvem e dissipam a energia das ondas, variando o decréscimo da energia estuário acima. Além disso, a forma afunilada da foz proporciona que a maré de enchente seja progressivamente contida estuário adentro, chegando a zero no limite de maré, enquanto que a energia fluvial decresce em direção ao mar (DALRYMPLE; ZAITLIN; BOYD, 1992).

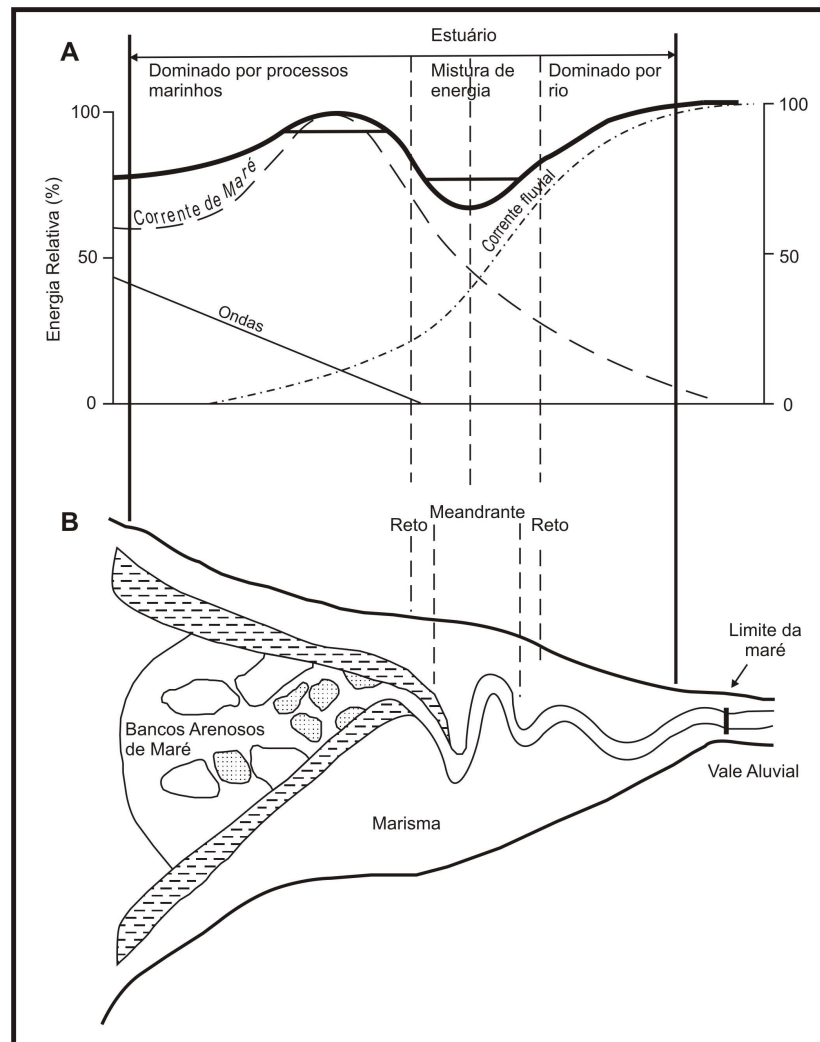


Figura 25: Desenho esquemático de um estuário dominado por maré (Fonte: DALRYMPLE; ZAITLIN; BOYD, 1992).

4.3.2 Classificação quanto à geomorfologia

4.3.2.1 Estuário de Planície Costeira

Os estuários formados em planície costeira estão, em geral, localizados em regiões tropicais e subtropicais, sendo comuns na costa leste da América do Norte. Esses estuários também são muito comuns no Brasil, podendo-se citar os estuários dos rios São Francisco, das Contas e Potengi nos litorais leste e nordeste brasileiro. Como a razão largura/profundidade é grande, a razão de fluxo depende da intensidade da

descarga fluvial e da altura da maré. Além disso, o transporte de sedimentos em suspensão é grande nos estuários abastecidos por rios muito caudalosos.

4.3.2.2 Fjordes

Como exemplo de fjordes profundos e extremamente longos, podem-se citar os fjordes Oslo e Hardanger na Noruega, com profundidades de até 120 m.

Devido ao fato de serem sistemas profundos, os fjordes apresentam a razão largura/profundidade relativamente pequena, quando comparada àquela dos estuários de planície costeira, e têm seção transversal aproximadamente retangular. A gênese justifica o fato de fjordes apresentarem em geral fundo rochoso e com processos de sedimentação recente, ocorrendo principalmente na desembocadura dos rios. A descarga fluvial em geral é pequena, quando comparada ao volume total do sistema, mas pode ser grande em relação ao prisma de maré. Nos meses de inverno a descarga fluvial nos fjordes é muito pequena ou ausente.

4.3.2.3 Construídos por Barras

Esses sistemas são, em geral, rasos, com profundidades não superiores a 20-30 m, e podem apresentar canais e lagunas extensas no seu interior. O rio ou sistema de rios que alimentam esse estuário, além de apresentarem descarga variável de acordo com a estação do ano, podem transportar grande concentração de sedimentos em suspensão, ocasionando alterações sazonais na geometria da entrada (barra). Existem também sistemas em que, durante as épocas de enchente, a barra pode ser erodida completamente, restabelecendo-se novamente quando cessa o período de chuvas mais intensas. Esse grupo de estuário geralmente formou-se em regiões tropicais, sendo referido na literatura brasileira pela terminologia estuarino-lagunar, como o da região de Cananéia-Iguape.

Segundo Silva (1998), esses estuários apresentam um pequeno prisma de maré, com pouca entrada de água doce, se comparado a outro tipo estuarino, sendo característico de áreas costeiras microtidais. São parcialmente estratificados a bem

misturados, dependendo da magnitude da variação sazonal na entrada da água doce. Nesse tipo de estuário, devido a sua baixa profundidade, os ventos desempenham um importante papel no processo de mistura das águas.

4.3.2.4 Os estuários restantes

Nas regiões de macro ou hipermaré, com ação moderada ou grande de ondas e com transporte fluvial de alta concentração de sedimentos em suspensão, o processo sedimentar recente favoreceu o crescimento de ilhas na parte interior do estuário; esse tipo de estuário é denominado de delta estuarino ou delta de enchente. Um dos mais espetaculares deltas estuarinos é o delta tropical do rio Amazonas, no litoral norte brasileiro, com geometria afunilada. Por outro lado, nas mesmas condições da concentração de sedimentos, mas em regiões de micromaré, com ação de ondas de energia moderada, a sedimentação tem lugar na plataforma continental interna, formando bancos de areia e ilhas, dando origem ao delta de vazante ou simplesmente delta (como exemplo, o delta do rio Mississipi, no Golfo do México). Os deltas de enchente e vazante são dominados pela maré e pela descarga fluvial, respectivamente.

4.3.3 Classificação pela circulação das águas

Os estuários também podem ser classificados através da circulação de suas águas. Esta circulação será em função da importância relativa de cada um dos fatores dinâmicos descritos acima. Todos os tipos geomorfológicos de estuários podem apresentar os diversos tipos de circulação das águas (CUNHA, 2005). Pela circulação das águas os estuários podem ser classificados como: estuário tipo cunha salina, tipo bem misturado e parcialmente misturado.

4.3.3.1 Tipo Cunha Salina

As características deste tipo de estuário foram analisadas por vários pesquisadores, dentre os trabalhos pioneiros pode-se citar Farmer e Morgan (1953).

Neste tipo de estuário, as massas de água da camada superior são quase isohalinas e têm salinidade muito baixa, e o movimento do estuário abaixo tem velocidade muito maior do que o movimento estuário acima na cunha salina. As massas de águas da cunha salina, no entanto, apresentam-se quase homogêneas e com salinidade muito próxima à da região adjacente, gerando um acentuado gradiente vertical de salinidade (haloclina) na interface entre essas camadas. O processo físico que determina a continuidade do movimento é o entranhamento, gerando movimentos verticais ascendentes muito lentos e com transporte de água do mar para a camada superior muito pequena (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Segundo Amaral (2003), no estuário de cunha salina (Figura 26) a salinidade das águas de superfície é bem menor que a salinidade das águas do fundo, apresentando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade. Não há mistura de água doce e água salgada. A cunha salina não se movimenta. A grande maioria dos sedimentos trazida pelos rios é levada para a região oceânica na camada de água superior e pouca sedimentação ocorre dentro do corpo estuarino. Para que este tipo de estratificação ocorra, é necessário que as velocidades e a energia sejam baixas.

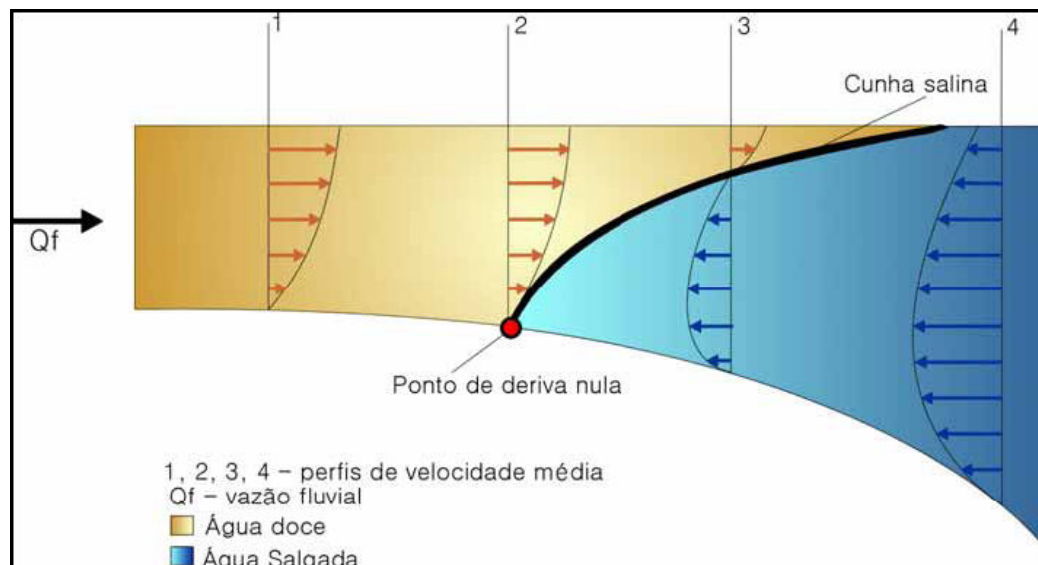


Figura 26: Esquema simplificado de um estuário altamente estratificado (Fonte: AMARAL, 2003).

Em geral, esses estuários são característicos de regiões de micromaré e grande descarga fluvial, de tal modo que a velocidade da massa de água da camada acima da haloclina é praticamente igual à velocidade gerada por essa descarga. Ocorrem também, estuários do tipo cunha salina em regiões de mesomaré, como o do rio Fraser (Vancouver, Canadá), no qual a distância de penetração da cunha salina varia consideravelmente ao longo do estuário durante o ciclo de maré, movendo-se em direção ao equilíbrio em resposta às variações do nível do mar. A estrutura vertical da salinidade, que é altamente estratificada nas estofas de enchente e vazante, evolui para a condição fracamente estratificada durante a vazante e a massa de água mais salina fica confinada na proximidades do fundo (GEYER; FARMER, 1989¹¹ apud MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Quando o estuário é dominado pelo rio, ou seja, a influência fluvial é mais forte que a da maré (Figura 27), neste tipo de estuário a salinidade das águas de superfície é bem menor que a salinidade das águas do fundo, apresentando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade. A grande maioria dos sedimentos trazida pelos rios é levada para a região oceânica na camada de água superior e pouca sedimentação ocorre dentro do corpo estuarino (CUNHA, 2005).

¹¹ GEYER, W. R.; FARMER, D. M. 1989. Tide-induced variations of the dynamics of a salt Wedge estuary. **J. Phys. Oceanogr.**, 19: 1060 – 1072.

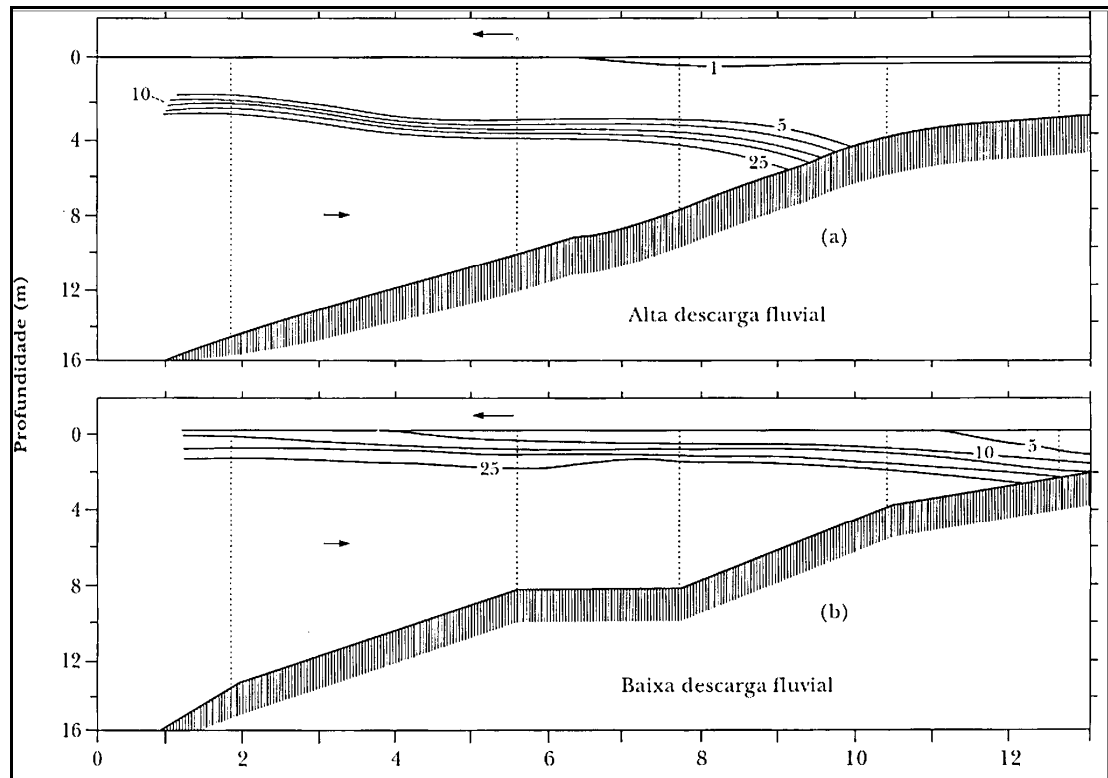


Figura 27: Estratificação de um estuário tipo cunha salina em condições de alta (a) e baixa (b) descarga fluvial (Fonte: de acordo com DAWSON e TILLEY, 1972¹² apud MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

4.3.3.2 Tipo Bem Misturado

Esse estuário é característico de regiões com pequena descarga fluvial, sendo que os seus movimentos e processos de mistura são dominados pela maré. O gradiente vertical de salinidade (densidade) é praticamente desprezível, ou seja, a salinidade das águas superficiais é igual à salinidade das águas do fundo, e a condição de estacionaridade pressupõe que a descarga fluvial e a maré permaneçam constantes e não variem de um ciclo de maré a outro. Segundo Cunha (2005), nesse estuário a salinidade da água só varia lateralmente, sendo mais alta na região oceânica e mais

¹² DAWSON, W. A.; TILLEY, L.J. 1972. **Measurement of Salt Wedge Excursion Distance in the Duwamish River Estuary, Seattle, Washington, by Means of the Dissolved-Oxygen Gradient.** Geological Survey Water-Supply. Washington, D. C., U. S. Department of Interior, Paper 1873-D, pp. D1-D27.

baixa em direção ao continente, por exemplo, tem-se Delaware Bay (EUA). Na prática, essa condição é simulada por valores médios durante ciclos completos de maré e o movimento resultante é unidirecional e com sentido estuário abaixo (Figura 28) (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Nesses estuários, a amplitude de maré é relativamente grande quando comparada ao aporte de água doce. A turbulência gerada pelo movimento da maré promove a mistura vertical completa entre as águas doce e marinha. Nos estuários do tipo bem misturados, a mistura ocorre preferencialmente na direção longitudinal (lateralmente homogêneos). Se o sistema for suficientemente largo, a força de Coriolis tende a defletir o fluxo da maré e do rio gerando circulação e estratificação lateral (lateralmente não homogêneos) (Figura 29). Nos estuários relativamente profundos a circulação gravitacional poderá ocorrer devido ao gradiente horizontal de salinidade (CARVALHO, 2007).

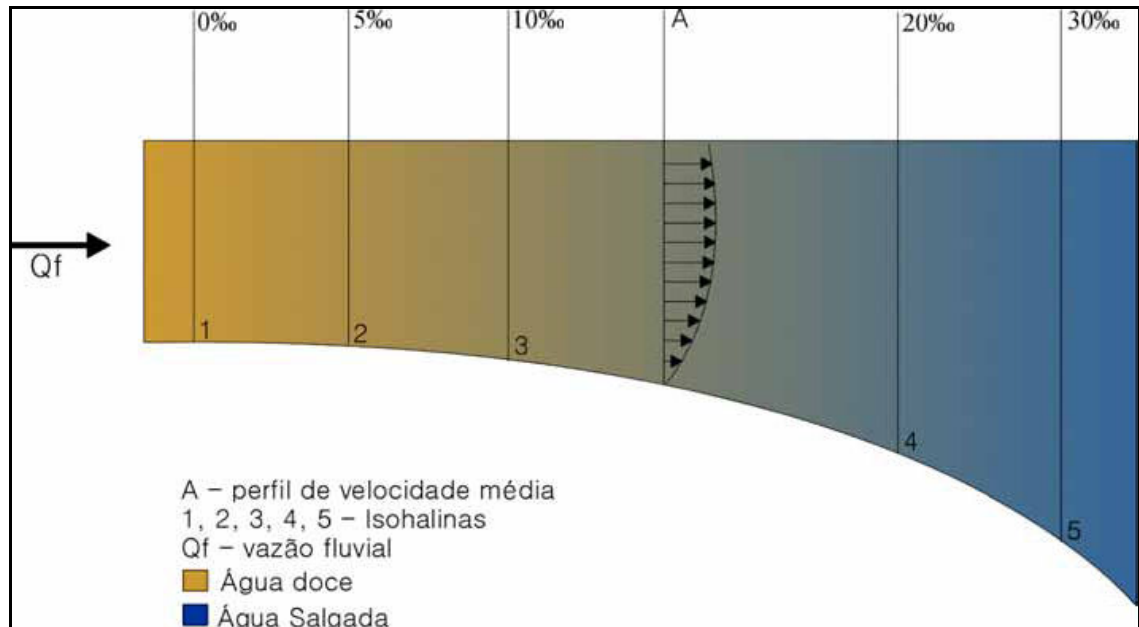


Figura 28: Esquema simplificado de um estuário bem misturado (Fonte: AMARAL, 2003).

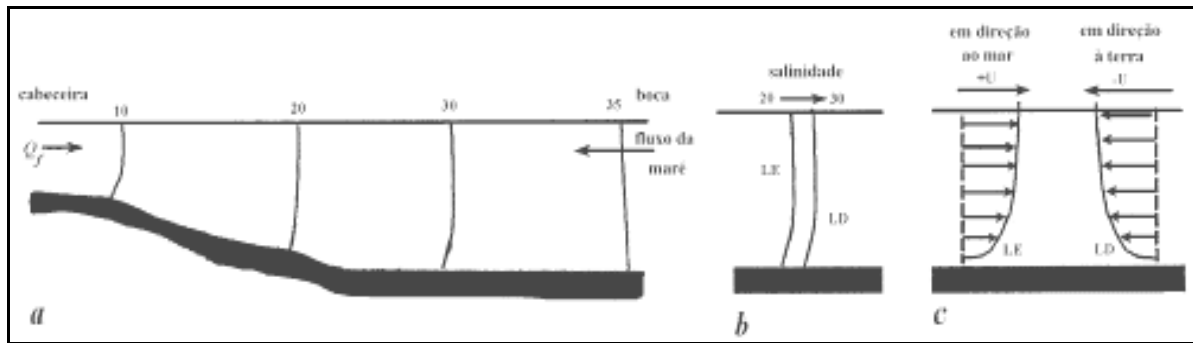


Figura 29: Diagrama esquemático da circulação e distribuição de salinidade num estuário bem misturado: (a) distribuição longitudinal de salinidade, (b) perfil de salinidade e (c) da média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água, considerando o ponto de vista no sentido da cabeceira para a boca do estuário (Fonte: MANTOVANELLI, 1999).

4.3.3.3 Tipo Parcialmente Misturado

Quando as influências fluviais e de maré são comparáveis, o estuário é classificado como parcialmente estratificado ou parcialmente misturado (Figura 30). Neste estuário, o aumento de salinidade se dá de maneira gradativa tanto na escala vertical quanto na horizontal. Exemplos são os diversos estuários situados na costa leste dos Estados Unidos, o estuário do Rio Tâmis, na Inglaterra.

Os Estuários de cunha salina e parcialmente estratificados podem apresentar uma feição sedimentar muito distinta, denominada de zona de turbidez máxima. Nesta região é observada uma concentração de sedimentos em suspensão que pode ser cerca de 100 vezes superior as regiões à montante e à jusante. A zona de turbidez máxima pode ser encontrada em estuários de variados tamanhos e formas e submetidos a distintos tipos de marés, como em estuários de meso-maré como Winyah Bay e Rio Hudson, localizados na costa leste dos Estados Unidos, e macro-maré como o Rio Columbia, na costa oeste dos Estados Unidos e o rio Gironde, França. Na zona de turbidez máxima, um grande volume de sedimento em suspensão pode ficar retido no estuário e passar por várias etapas antes da deposição final (CUNHA, 2005).

É importante salientar que como a circulação das águas de um estuário depende diretamente das condições hidrodinâmicas reinantes, por exemplo, um estuário parcialmente misturado pode se tornar um estuário bem estratificado ou de cunha

salina. Esta seria uma consequência direta da mudança sazonal da descarga fluvial, numa época de grande precipitação. Além disso, um mesmo estuário pode apresentar dois tipos distintos de estratificação das suas águas simultaneamente (CUNHA, 2005).

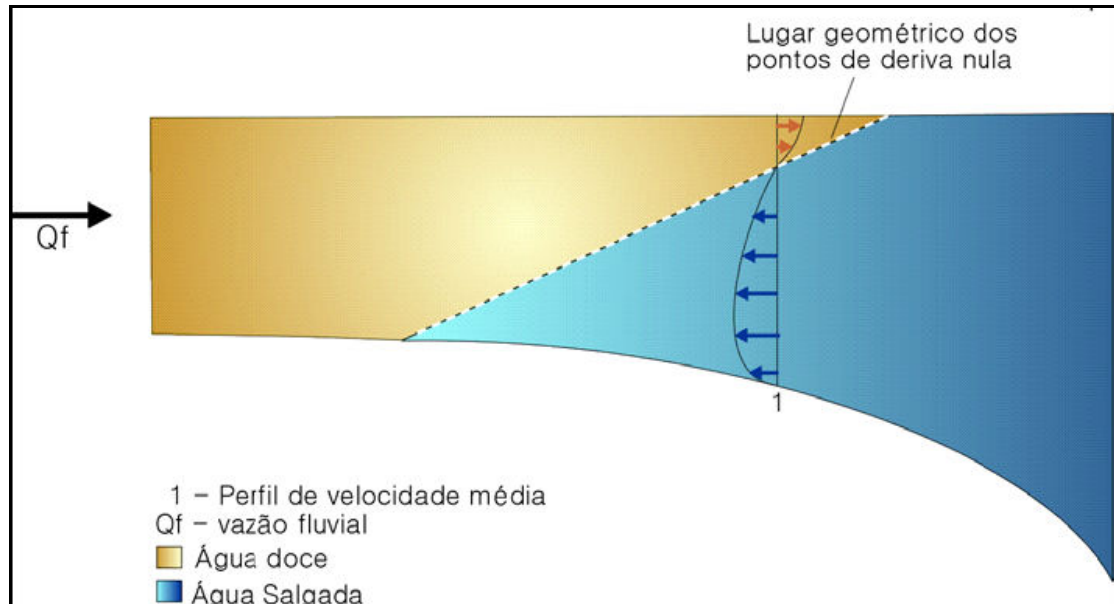


Figura 30: Esquema de um estuário parcialmente estratificado (Fonte: AMARAL, 2003).

Nesse aspecto o estuário do rio Caeté se enquadra num estuário dominado por marés (quanto aos processos físicos), do tipo formado em planície costeira (quanto a geomorfologia) e do tipo bem misturado (quanto a circulação das águas).

4. 4 DELTAS

Os deltas podem ser classificados como: delta estuarino ou delta de enchente e como delta de vazante ou simplesmente delta.

Os deltas estuarinos ou delta de enchente são estuários característicos de regiões de macro ou hipermaré, com ação moderada ou grande de ondas e com transporte fluvial de alta concentração de sedimentos em suspensão, o processo de sedimentação recente favoreceu o crescimento de ilhas na parte interior do estuário. Por outro lado, nas mesmas condições da concentração de sedimentos, mas em regiões de

micromaré, com ação de ondas de energia moderada, a sedimentação tem lugar na plataforma continental interna, formando bancos de areia e ilhas, dando origem ao delta de vazante ou simplesmente delta. Os deltas de enchente e de vazante são dominados pela maré e descarga fluvial, respectivamente (Figura 31).

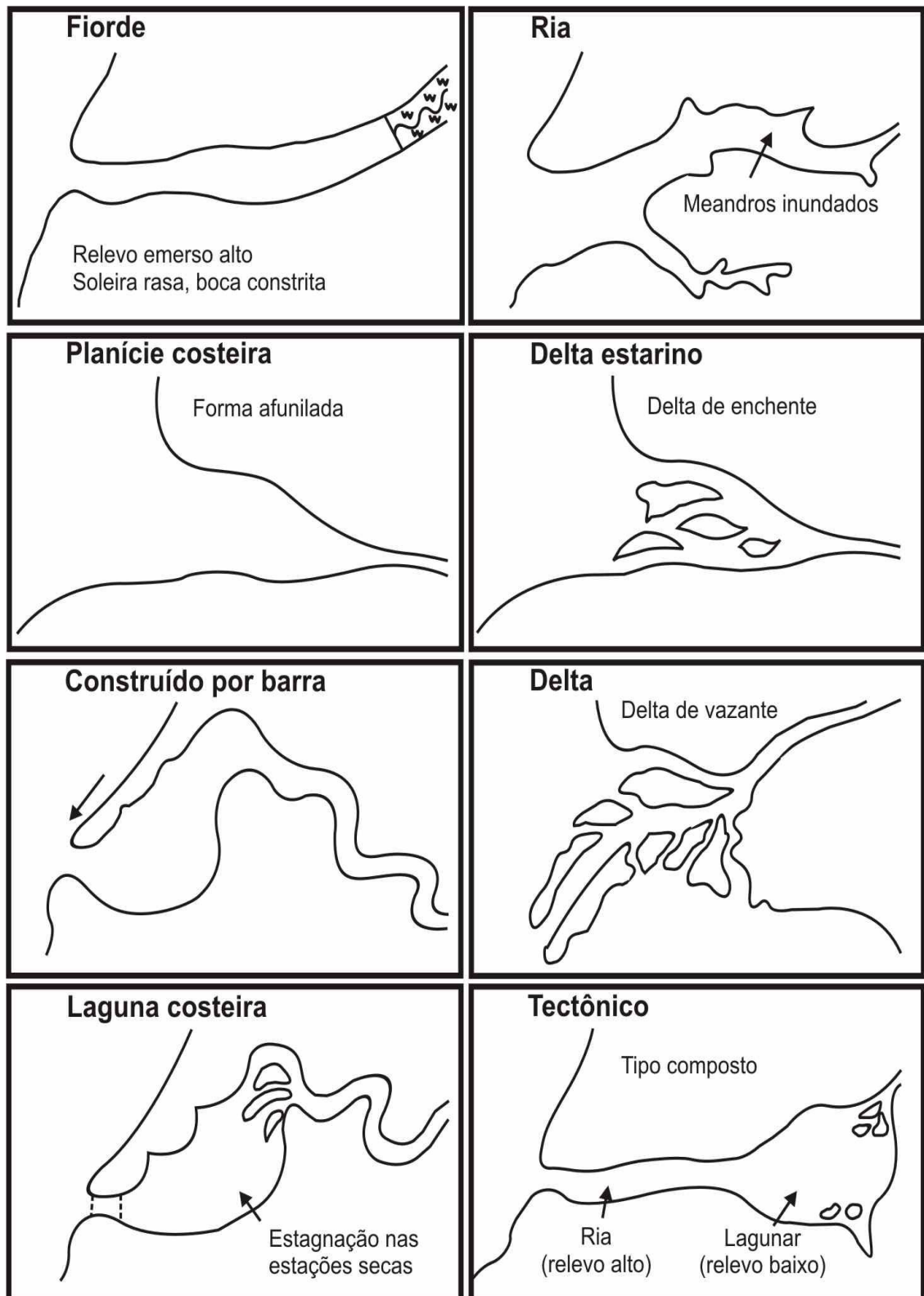


Figura 31: Principais tipos de estuário (Fonte: Adaptado de FAIRBRIDGE, 1980).

5 DESCRIÇÃO DO MODELO SISBAHIA

O modelo utilizado para modelagem da hidrodinâmica da área de interesse fazem parte do SisBAHIA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. O SisBAHIA[®] encontra-se continuamente sendo ampliado e aperfeiçoado na COPPE/UFRJ desde 1987, através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação COPPETEC envolvendo modelagem de corpos de água naturais. Em linhas gerais, na versão atual (4.1), o modelo hidrodinâmico do SisBAHIA[®] apresenta:

Modelo Hidrodinâmico: é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH dominado por forçantes barotrópicos, e otimizado para corpos de água naturais nos quais efeitos de densidade variável possam ser desprezados. Resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada. “Otimizado” é usado no sentido de um modelo planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Os processos de calibração do modelo são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multi-escala baseada em Simulação de Grandes Vórtices.

Interface de trabalho: Todos os modelos e ferramentas são integrados em uma interface de trabalho amigável. Muitos tipos de saídas gráficas, **inclusive animações**, podem ser Referência Técnica do SisBAHIA[®] geradas com modelos rodando. Várias ferramentas de edição de malha são disponíveis na interface. O SisBAHIA[®] interage diretamente com os seguintes programas comerciais:

a) Argus One 4.2: programa para geração e edição de malhas de elementos finitos diretamente importáveis pelo SisBAHIA[®].

b) Grapher 6: programa usado pelo SisBAHIA[®] para apresentação de resultados em forma de gráficos. O SisBAHIA[®] funciona melhor com a versão 6 do *Grapher*. As versões 5, 4 e 3 também funcionam, mas podem ocorrer imperfeições em alguns gráficos.

c) Surfer 8: programa usado pelo SisBAHIA[®] para apresentação de resultados em forma de mapas.

Nessa dissertação de mestrado foi utilizado o Modelo Hidrodinâmico (2DH) e os softwares que fazem parte da interface de trabalho. Sendo assim, pode-se dizer que a modelagem hidrodinâmica pode ser entendida como a determinação da quantidade de movimento de uma dada massa d'água, resultando na definição dos padrões de correntes.

A modelagem matemática de um sistema hidrodinâmico consiste no conjunto de equações capazes de representar os escoamentos naturais presentes nos corpos d'água. Muitas vezes as equações que representariam o fenômeno são não-lineares e não possuem solução analítica conhecida. Para que seja possível a solução destas equações parte-se para a solução numérica, discretizando um domínio contínuo, cujo resultado, apresentado em equações algébricas, pode ser obtido através de algoritmos computacionais (TOPÁZIO, 2003).

Segundo Rosman (1997), os modelos hidrodinâmicos aplicáveis a sistemas estuarinos e águas rasas podem ser divididos em três tipos, podendo variar de acordo com sua complexidade e escala de interesse:

- Modelos tridimensionais: são modelos que possuem todas as dimensões (x,y,z,t). Os modelos gerais ou 3Dg incluem todas as equações, e considera os gradientes de densidades. São aplicáveis a qualquer caso. Já os modelos simplesmente 3D possuem uma hidrodinâmica mais simples, pois não são incluídos gradientes de densidades na sua formulação. São aplicáveis a corpos d'água com coluna d'água homogênea ou pouco estratificada, com o objetivo de se obter perfis verticais das variáveis.
- Modelos bidimensionais: são modelos que tem as variáveis integradas dos modelos tridimensionais: Estes modelos são subdivididos em 2 tipos, modelo bidimensional na horizontal (2DH) e modelo bidimensional na vertical (2DV). No modelo 2DH as variáveis são médias verticalmente, ou seja, possuem somente as dimensões (x,y,t). São aplicáveis a corpos d'água pouco estratificados, tendendo a verticalmente homogêneos. No modelo 2DV as variáveis são médias lateralmente, restando às dimensões (x,z,t). São aplicáveis a corpos d'água com

estratificação vertical de densidade, mas com pouca variação lateral. Normalmente são corpos d'água estreitos.

- Modelo unidimensional (1D): este modelo é aplicável a corpos d'água longitudinais com seção transversal homogênea, como canais. Considerando o eixo x como longitudinal, têm-se somente as dimensões (x,t).

A adoção de um modelo hidrodinâmico tridimensional geral é possível para todos os casos de um determinado sistema em estudo, mas a escolha do modelo a ser aplicado deverá passar primeiramente por uma avaliação de custo/benefício. Os custos relacionados à sua utilização, seja o tempo de execução ou o tipo de ferramenta a ser utilizada, serão sempre maiores em modelos do tipo 3Dg (ROSMAN, 1997). A depender das características do corpo d'água a ser estudado e da qualidade dos resultados requeridos, bons resultados podem ser alcançados com modelos mais simplificados com economia de tempo e de recursos.

5.1 MÓDULO HIDRODINÂMICO DO SisBAHIA

Em qualquer sistema de modelos usado para analisar a circulação hidrodinâmica e a qualidade de água em corpos de água naturais, a base fundamental é o modelo hidrodinâmico. Segundo Rosman (2001), o SisBAHIA possui um modelo de linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*), otimizado para corpos de água naturais, que representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem.

O sistema de discretização espacial é otimizado para corpos de águas naturais, pois permite ótima representação de contornos recortados e batimetria complexas como usual em tais corpos de água. A discretização espacial é preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode igualmente ser feita via elementos finitos triangulares biquadráticos ou combinação de ambos. O esquema de discretização temporal é via um esquema implícito de diferenças finitas.

O FIST3D utiliza uma eficiente técnica numérica em dois módulos, calculando, primeiramente, os valores de elevação da superfície livre através de um modelamento bidimensional integrado na vertical (2DH) e, em seguida, o campo de velocidades. Dependendo dos dados de entrada, o campo de velocidade pode ser computado de forma tridimensional (3D) ou apenas bidimensional (2DH) (Figura 32).

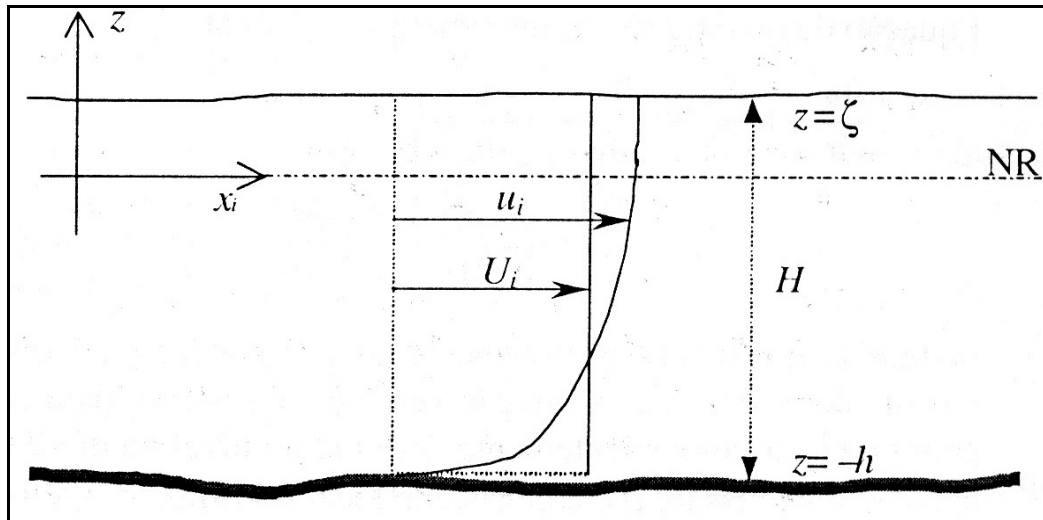


Figura 32: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D e 2DH), onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, U_i , representa a velocidade integrada na vertical. Note que as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como $(x,y) \equiv (x_1,x_2)$ e $(u,v) \equiv (u_1,u_2)$ utilizando o índice $i = 1,2$ (Fonte: ROSMAN, 2001).

Com o FIST3D pode-se simular a circulação hidrodinâmica em corpos de água naturais sob diferentes cenários meteorológicos, oceanográficos, fluviais e lacustres.

5.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES PARA O MÓDULO 2DH DO MODELO HIDRODINÂMICO E SIGNIFICADO DOS TERMOS

Neste item descrevem-se em detalhes aspectos relativos ao módulo integrado na vertical (2DH) do modelo hidrodinâmico FIST3D.

- Equações da quantidade de movimento e continuidade para o módulo 2DH

Para cada intervalo de tempo, o módulo 2DH determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção x e y , $U(x, y, t)$ e $V(x, y, t)$, respectivamente, e as elevações da superfície livre, $z = \zeta(x, y, t)$. As componentes da velocidade resolvível, média na vertical, podem ser definidas como:

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t) dz \quad \text{e} \quad V(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t) dz$$

Considerando esta definição e supondo uma batimetria permanente durante o período de simulação, i.e. $z = -h(x, y)$, a equação da continuidade, ou imposição da condição de escoamento incompressível, dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0$$

Pode ser reescrita para um escoamento 2DH integrado ao longo da vertical, como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0$$

Usando a regra de Liebzniz e as condições de contorno cinemáticas dadas em:

$$\frac{dF}{dt} = 0 \quad \therefore \quad \frac{d}{dt}(F \equiv z + h(x, y, t)) = 0 \quad \therefore \quad \left[w + \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \right]$$

Pode-se integrar as equações da quantidade de movimento 3D:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\phi \text{sen } \theta \cdot v \quad \text{eq. (1)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\phi \text{sen } \theta \cdot u \quad \text{eq. (2)}$$

Para obter as três equações necessárias para determinar as três incógnitas de circulação hidrodinâmica em um escoamento 2DH integrado na vertical, (ζ , U , V) são descritas abaixo:

1. Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\phi \text{sen } \theta V$$

2. Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\phi \text{sen } \theta U$$

3. Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0$$

Onde:

- u , v e w são as componentes da velocidade do escoamento respectivamente nas direções x , y e z
- $\zeta(x,y,z)$ é a elevação da superfície livre;
- g é a aceleração da gravidade;
- ρ é a densidade local do fluido;
- ρ_0 é uma densidade constante de referência;
- Φ é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e os termos com Φ são as forças de Coriolis, no qual θ é o ângulo de latitude.

Quadro 1: Significado dos termos das equações governantes do módulo 2DH.

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento;
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento;
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Representa a pressão hidrostática resultante na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície d'água na direção x ;
$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right)$	Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento;
$2\phi \sin \theta V$	Representa a força de Coriolis devido ao fato do referencial estar em movimento na superfície da Terra;
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S)$	Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa;
$\frac{1}{\rho_0 H} (-\tau_x^B)$	Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento por unidade de massa.

5.3 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE MODELAGEM

Em estudos e projetos envolvendo corpos de água naturais, bem como em aplicações visando à gestão e ao gerenciamento ambiental, a utilização de modelos e cada vez mais presente. Entretanto, por serem apenas ferramentas, sua utilização de modo inadequado, pode levar a resultados enganosos, com graves conseqüências. Por isso, é essencial que se tenha entendimento de como se devem usar tais ferramentas, dentro de um processo de modelagem (ROSMAN et al., 2001).

Pode-se dizer que para a maior parte das pessoas que lidam com estudos, projetos ou gestão ambiental em recursos hídricos o que realmente importa são os relatórios com mapas, gráficos e tabelas, para auxílio em processo de tomada de decisão (Figura 32). Modelos são apenas ferramentas que propiciam a obtenção de informações organizadas de forma adequada. Por vezes usam-se técnicas multimídia para gerar animações que muito ajudam no entendimento da dinâmica de sistemas ambientais. Entretanto, para poder entender e fazer bom uso das informações é importante que o modelador conheça a essência do fenômeno de interesse. Portanto, para o modelador fazer pleno uso das informações apresentadas, é fundamental que ele tenha para si modelos conceituais dos fenômenos de interesse. Inclusive para poder julgar a qualidade das informações recebidas e rejeitá-las se necessário (Figura 33).

- Observação e medição

Inicialmente as observações de um dado fenômeno são geralmente qualitativas, visando propiciar um entendimento das causas, efeitos e agentes intervenientes. Em seguida, parte-se para observações quantitativas, fazendo-se medições das grandezas das causas, efeitos e agentes intervenientes inferidos na etapa de observação qualitativa. Daí, das observações e medições desenvolve-se modelos conceptuais dos fenômenos de interesse.

- Modelo conceptual

Corresponde a formar na mente a concepção do fenômeno observado, conhecer suas causas e efeitos, compreender as interações e relevância dos agentes intervenientes na sua ocorrência. A partir desse modelo conceptual existem duas rotas: modelos matemático e físico.

- Modelo matemático

A modelagem matemática consiste na tradução para a linguagem matemática do modelo conceptual do fenômeno de interesse. Esse modelo para representar a hidrodinâmica e a qualidade das águas em corpos de água são bastante abrangentes, e são baseados em “leis” e “princípios” expressos em termos de equações diferenciais e condições de contorno adequadas. A partir do modelo matemático, dependendo da possibilidade de resolvê-lo, quatro rotas são possíveis, levando respectivamente aos modelos físico, numérico, analítico e analógico.

- Modelo analítico

Utilizado quando se tem, soluções gerais para situações bastante simplificadas e idealizadas. No entanto, na maioria das situações práticas em recursos hídricos, não há uma solução geral conhecida. Neste caso, resta recorrer aos modelos físicos e aos modelos numéricos.

- Modelo analógico

Usados em situações muito peculiares e em geral de cunho mais acadêmico do que prático.

- Modelo físico

Modelos que reproduzem em escala reduzida, modelos conceituais de fenômenos de interesse, chamados de protótipos. Através de um modelo matemático de semelhança, definem-se as escalas de semelhança entre o protótipo e modelo físico reduzido (rota ligando os modelos matemáticos aos modelos físicos mostrados no diagrama).

Hoje em dia os modelos físicos estão restritos a casos muito especiais, pois sempre que possível recorre-se a modelos numéricos por serem incomparavelmente mais baratos e eficientes. Porém, enquanto houver fenômenos de interesses mal compreendidos, haverá modelos conceituais empíricos ou semi-empíricos e, conseqüentemente, modelos matemáticos falhos. Nestes casos, embora seja possível fazer modelos numéricos, estes terão em si as falhas do modelo matemático e a alternativa dos modelos físicos permanecerá necessária e muito importante. Tal fato é indicado no diagrama pela rota que liga diretamente o modelo conceptual ao modelo físico.

- Modelo numérico

Os modelos numéricos são traduções dos modelos matemáticos adaptados para diferentes métodos de cálculo, por exemplo, diferenças finitas, elementos de contorno, elementos finitos e volumes finitos. Praticamente qualquer modelo matemático pode ser resolvido através de um modelo numérico, e em geral há relativamente pouca perda de informação na tradução de um para o outro.

Os modelos numéricos permitem a solução de uma gama de problemas muitíssimo mais abrangente que qualquer outra modalidade de modelos.

➤ Montagem, pré-processamento, definição de parâmetros e similares:

Trata-se de uma etapa comum a qualquer tipo modelo para obter informações quantitativas do modelo conceptual e do modelo matemático. Antes de obter tais informações será necessário preparar o modelo e organizar os dados de entrada.

➤ Pós-processamento

Esta etapa é também comum a todos os modelos e consiste na tradução da massa de informações quantitativas obtidas na saída dos modelos, de tal forma que possam ser mais facilmente assimiladas.

➤ Mapas, gráficos e tabelas

Tradicionalmente na etapa de pós-processamento os resultados quantitativos dos modelos são transformados em mapas, gráficos e tabelas. Sendo mais recentemente apresentados também através de animações.

▪ Calibração e Validação

Nesta etapa do processo de modelagem que se verifica se os resultados obtidos conferem com o que se observa a respeito do fenômeno de interesse. Existem duas possibilidades:

A validação NÃO CONFERE com as observações/medições: neste caso o modelo não está validado e entra-se no processo de calibração efetivamente, com duas rotas possíveis (Figura 32). A rota mais comum é a curta, que leva à caixa do pré-processamento, o que corresponde ao procedimento usual de calibração via ajustes de montagem e de parâmetros, acertos de dados de entrada e coeficientes em qualquer tipo de modelo.

A menos comum, é a rota circular longa levando novamente para o modelo conceptual, que é seguida apenas no caso de repetidos insucessos de validação do modelo com a rota curta.

A validação CONFERE com as observações/medições: neste caso o modelo está validado e o processo de modelagem termina na efetiva incorporação dos resultados do

modelo ao acervo de informações a serem consideradas no processo de tomada de decisão.

- Relatório para auxílio no processo de tomada de decisões

É o objetivo final do processo de modelagem, ou seja, produzir informações organizadas para auxiliar um processo de tomada de decisões.

6 METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Este item apresenta os métodos utilizados na coleta dos dados realizados na etapa de campo, e no processamento dos mesmos na etapa de laboratório, para a implementação do modelo hidrodinâmico. Além disso, apresenta uma pesquisa bibliográfica com informações sobre a importância dos modelos.

6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa apresenta uma síntese dos principais conceitos teóricos necessários para um melhor desenvolvimento da dissertação. Foi realizado um levantamento de publicações e trabalhos já realizados na região, referentes aos aspectos oceanográficos, geológicos e geomorfológicos da região e do local; aos ambientes costeiros quaternários ao longo da costa brasileira e outros locais do mundo, com características semelhantes às da costa nordeste paraense e; às metodologias que foram aplicadas neste trabalho. Também foi utilizada, para dar apoio científico à dissertação, uma pesquisa orientada (disciplina da grade da pós-graduação do PPGG) sobre a gênese e classificação dos estuários (no item 4).

Esta etapa foi importante devido o fato de ainda existirem poucos trabalhos sobre modelagem em ambientes estuarinos, em particular na região norte do Brasil. Sabe-se que a necessidade de aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos são imprescindíveis, face à complexidade do ambiente em corpos de água naturais.

Os modelos numéricos são uma alternativa viável para se determinar a hidrodinâmica do ambiente estuarino, junto com os dados de campo se relacionam, pois através dos modelos é possível sintetizar as informações coletadas em campo constituindo ferramentas importantes para a análise dos dados (ROSMAN, 2001). Através da modelagem podem-se criar cenários e descrever os padrões de circulação hidrodinâmica.

A modelagem numérica se apresenta como uma ferramenta de grande valia. Mesmo quando pouco se conhece das condições reais do ambiente, os modelos podem

ser usados para se formar uma idéia preliminar de suas características mais marcantes, levantando hipóteses a serem confirmadas por estudos observacionais e maximizando a eficiência de futuras coletas de dados (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Os dados ambientais em geral são escassos, e paradoxalmente imprescindíveis para estudos, projetos, diagnósticos, gestão e gerenciamento de corpos d'água naturais. A escassez decorre do alto custo envolvido no levantamento de dados. Os dados que usualmente se obtêm de variáveis ambientais, são em séries temporais de valores medidos em uns poucos pontos distribuídos na área de interesse. Portanto, os dados medidos de fato representam apenas uma pequena fração do todo, e torna-se fundamental dispor-se de ferramentas confiáveis que permitam que tais dados sejam interpolados e extrapolados, tanto no espaço quanto no tempo (ROSMAN, 2001).

Através de modelos pode-se interpolar e extrapolar espacial e temporalmente as informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos, para toda área de interesse. De fato, se os modelos, uma vez calibrados, são capazes de reproduzir valores nos pontos onde se fez medições, não há porque duvidar que possam ser usados para interpolar e extrapolar informações para além de tais pontos. A extrapolação temporal pode ser interpretada como simulações de novos cenários. Neste caso, modelos podem ser usados tanto para prever impactos de modificações a serem introduzidos no meio, quanto para prever situações com cenários diferentes dos que ocorreram nas situações de medições (ROSMAN, op. cit).

No Brasil, especialmente na região Norte do Brasil, poucos são os estudos de modelagem estuarina. Nesse sentido, esta dissertação de mestrado visa contribuir para o conhecimento científico no sentido de compreender a hidrodinâmica do estuário do rio Caeté através da modelagem numérica, fundamentando-se em trabalhos experimentais e na interpretação dos dados coletados em campo.

6.2 CAMPANHAS OCEANOGRÁFICAS

Nesta etapa, foram realizadas campanhas oceanográficas (pré-campo) com finalidade de conhecimento da área e um levantamento de informações medidas em campo necessárias à implementação do modelo computacional no estuário do rio Caeté. Foram feitas duas visitas na área de estudo (junho de 2005) para obtenção de informações, tais como: local para fixar os equipamentos, quantos equipamentos seriam utilizados para cobrir a área de estudo, durante quantos dias, que meio flutuante utilizar. De posse dessas informações, realizou-se o trabalho de campo em janeiro de 2007, compreendendo os dias de 16 a 22 do referido mês. Para a geração dos dados iniciais do modelo ou mesmo para os processos de calibração e validação, foi de grande valia medições de dados, incluindo registros de elevação do nível do mar, batimetria, velocidades das correntes e vazão, que foram utilizados na comparação dos resultados das simulações realizadas com o modelo numérico.

6.2.1 Ecobatimetria

A batimetria foi realizada através do projeto do CNPq/CT-Hidro/Proset (nº do Processo: 50.5251/2004-3) intitulado: Efeito da Hidrodinâmica Estuarina em Aquíferos Costeiros situados em Localidades às Margens do Estuário do Rio Caeté, Costa NE do Estado do Pará.

Para a realização do levantamento ecobatimétrico, utilizou-se uma base cartográfica georeferenciada previamente digitalizada, tendo como base uma imagem de radar LANDSAT-ETM+7. A partir dessa base, foi definida a malha de perfilagem com linhas transversais e longitudinais ao canal estuarino utilizando o *software Hypack® Max*. Esta malha foi utilizada como referência ao padrão metodológico de navegação dos perfis levantados no período de estudo.

O meio flutuante utilizado para execução do levantamento dos dados ecobatimétricos no estuário do rio Caeté, foi:

- barco de alumínio com motor de popa Yamaha 25HP;
- barco pesqueiro de madeira com motor cendro Yamaha 1.11HP.

Nestes barcos foram acoplados os seguintes equipamentos:

- Sonda ecobatimétrica analógico-digital/ODEC, modelo BATHY 500MF e posteriormente substituída por outra sonda da marca RAITHEON;
- DGPS (*Differential Global Positioning System*) marca TRIMBLE modelo Ag132 com correção diferencial em tempo real via satélite e/ou sinal *BEACON* disponibilizado pela Marinha do Brasil, para o posicionamento dos perfis;
- *Notebook* com duas portas seriais de entrada de dados, onde os dados adquiridos tanto pelo ecobatímetro quanto pelo DGPS foram armazenados, monitorados e sincronizados simultaneamente através do *software Hypack® Max*.

As embarcações utilizadas nos levantamentos ecobatimétricos precisavam atender as necessidades da perfilagem em áreas rasas, próximas as margens e área com barras/bancos. Dessa maneira, o critério de escolha pela embarcação foi de pequeno calado. Deste modo, utilizou-se embarcação de alumínio com motor de popa, para as áreas interiores - estuário superior e embarcação de madeira na foz - estuário inferior.

Ao início de cada operação, a sonda ecobatimétrica foi calibrada, onde o valor de 0.30 m foi considerado o “zero” da profundidade medida. Sendo assim, as profundidades registradas oscilaram de acordo com a altura e o tempo da maré para cada setor do estuário. Desta forma, todas as profundidades foram reduzidas a um datum constante onde o zero relativo foi estabelecido para o nível de águas de baixa-mar.

Ressalta-se que o funcionamento dos equipamentos a bordo foi através de um Gerador de energia portátil com potência de 1800 W e voltagem de 110/220V à diesel.

O processamento dos dados batimétricos foi realizado através dos *softwares Hypack® Max*. Concomitante a edição dos dados realizou-se a correção do nível da maré, que foram reduzidos para uma mesma situação de maré (baixa-mar), tendo como base os dados obtidos através do sensor de pressão, marégrafo e leitura vertical em régua graduada instalados em diferentes setores da área.

6.2.2 Medição das Correntes de Maré

Para a medição das correntes de maré foi utilizado um correntógrafo Falmouth 2D ACM ou ADCP Sontek 250 KHz (Figura 34) que mediu as correntes em um ponto do estuário dentro do domínio do modelo. As medidas de correntometria foram realizadas ininterruptamente durante 7 dias de amostragem, em janeiro, com o correntógrafo amarrado a um barco de pequeno porte (Figura 35), que ficou fundeado no canal do estuário do Caeté durante a maré de sizígia (preamar e baixamar). O equipamento fez a leitura a cada 20 minutos e ainda coletou dados de intensidade, velocidade e direção das correntes. O correntógrafo ficou posicionado na latitude $00^{\circ} 56,18' S$ e longitude $046^{\circ} 37,73' W$ e a uma profundidade de 3 metros.



Figura 34: Correntógrafo da marca Falmouth Scientific Inc. modelo 2D ACM.



Figura 35: Barco de pequeno porte utilizado para coleta dos dados de corrente (seta vermelha indica o local que foi amarrado o correntógrafo).

O local exato do correntógrafo foi fornecido a partir da geração da grade do modelo, da segurança do equipamento e do local em que poderiam ser obtidos resultados satisfatórios para o processo de modelagem (Figura 36).

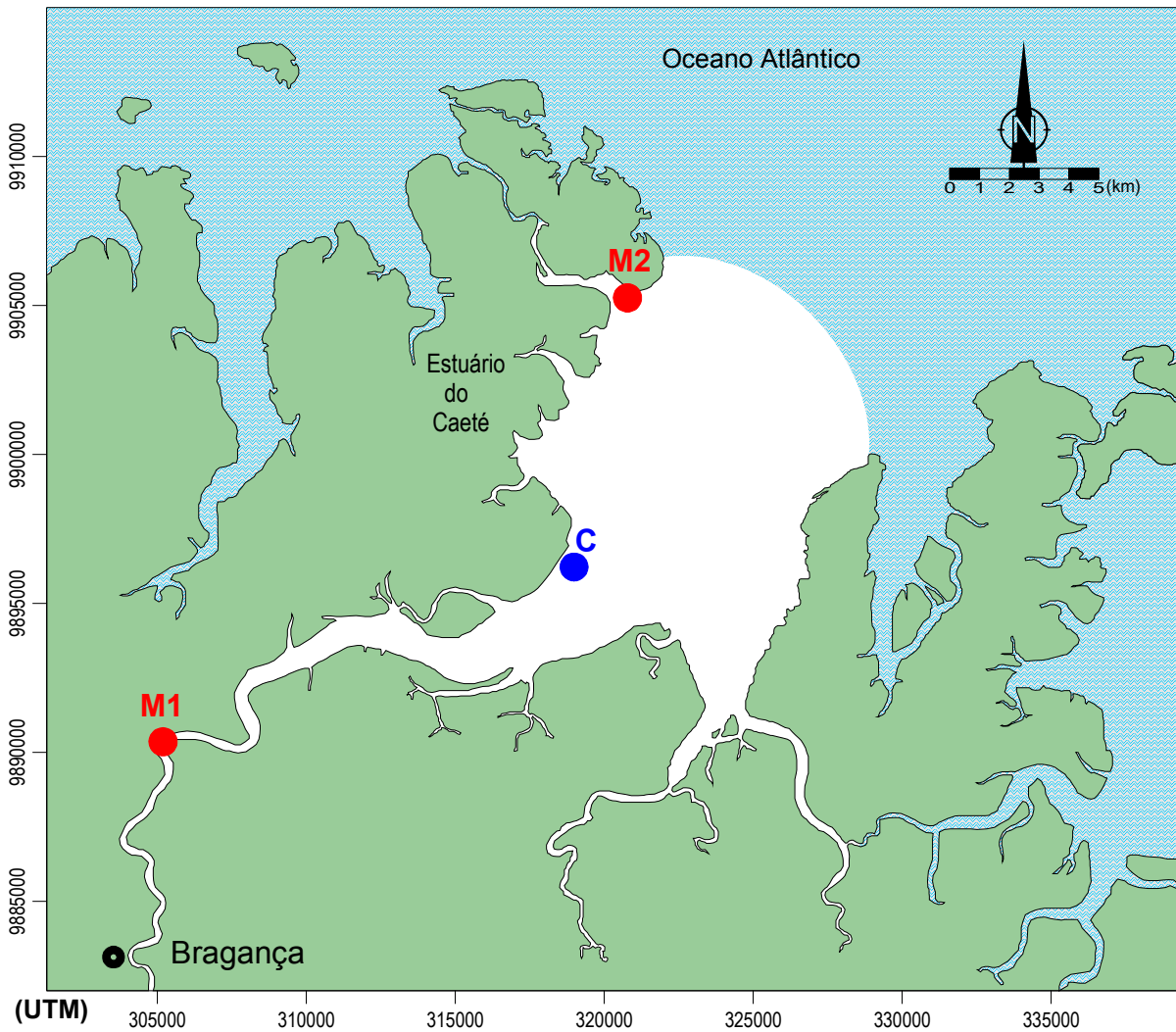


Figura 36: Mapa de localização dos equipamentos, M1 (marégrafo na Pesqueira Maguary), M2 (marégrafo na Vila dos Pescadores) e C (correntógrafo no canal do estuário).

6.2.3 Medição das Marés

As medições dos níveis de maré são de grande importância para a calibração do sistema base hidrodinâmico. Para a medição da maré, foram utilizados dois marégrafos Orphimedes da marca OTT-Hidrometrie (Figura 37), que trabalha segundo o princípio de borbulho de ar, registrando a variação do nível do mar a cada 20 minutos durante 7 dias de amostragem, também em janeiro. Os marégrafos foram armazenados dentro de um tubo PVC de 2" (duas polegadas) para proteção. A elevação da superfície da água foi medida em dois pontos do estuário em estudo, no trapiche da fábrica de gelo Pesqueira Maguary (M1), situada na Vila de Bacuriteua (Figura 38), posição $00^{\circ} 59' 24,23''$ S, $46^{\circ} 44' 57,55''$ W e na Vila dos Pescadores (M2), na ponte sobre o Furo do Maguary (Figura 39), posição $00^{\circ} 51.15'$ S, $46^{\circ} 36,40'$ W.

Os equipamentos utilizados para coleta dos dados de maré e corrente foram instalados ao longo do estuário (Figura 36). Os marégrafos foram instalados, utilizando como nível de referência, o nível de baixamar.

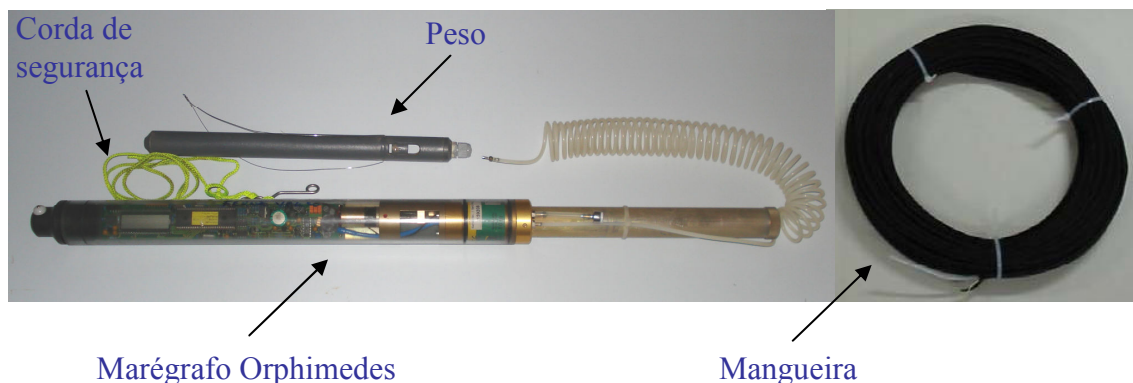


Figura 37: Marégrafo de Pressão utilizado na determinação dos níveis de água nas estações maregráficas M1 e M2.



Figura 38: Marégrafo M1 (seta vermelha) instalado no trapiche da fábrica de gelo Pesqueira Maguary.



Figura 39: Marégrafo M2 (seta vermelha) instalado na Vila dos Pescadores sob a ponte do Furo Maguary.

Na modelagem da circulação hidrodinâmica a maré foi inserida como a principal forçante, principalmente porque o estudo é focado mais para a região estuarina, na qual a maré exerce grande influência. A escolha de estações maregráficas conhecidas na região é fundamental, para o fornecimento das constantes harmônicas, pois se faz

necessário fornecer a altura da maré no contorno do modelo.

A série temporal de elevação do nível d'água devido à maré astronômica adotada nesta dissertação corresponde a registros obtidos no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) para a baía do Caeté (Figura 40).

As curvas de maré foram geradas a partir das constantes harmônicas da Baía do Caeté-PA (Tabela 05) e foram utilizadas como forçantes do modelo hidrodinâmico do Estuário do Caeté. A Figura 41 mostra a curva de maré típica da Baía do Caeté durante um período de 30 dias, abrangendo os períodos de sizígia e quadratura.

Tabela 5: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica da Baía de Caeté, listadas pela significância da amplitude.

Constante	Período (horas)	Amplitude (m)	Fase (graus)
2N2	129.0537	0.048	213
J1	230.9848	0.017	8
K1	239.3447	0.077	266
K2	119.6723	0.138	250
L2	121.9162	0.14	164
M1	248.3325	0.02	158
M2	124.2060	1.738	211
M3	82.8040	0.023	338
M4	62.1030	0.29	349
MK3	81.7714	0.052	9
MN4	62.6917	0.11	346
MNS2	117.8613	0.008	76
MO3	83.8630	0.025	38
MS4	61.0334	0.153	24
MSf	3543.6705	0.083	279
Mm	6613.0920	0.049	82
Mtm	2191.9039	0.027	320
N2	126.5835	0.366	212
OO1	223.0607	0.021	190
P1	240.6589	0.026	265
Q1	268.6836	0.012	232
S2	120.0000	0.508	248
SN4	61.6019	0.068	227
T2	120.1645	0.03	246
mu2	128.7176	0.078	330
nu2	126.2600	0.07	212

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR <i>Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras</i>					
Nome da Estação :		CAETÉ - PA			
Localização :		Na Baía de Caeté – trapiche da cidade			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		00° 58,0' S	Longitude :		46° 42,6' W
Período Analisado :		28/05/83 a 28/06/83	N° de Componentes :		78
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		VII H 22 min	Nível Médio (Zo):		275 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizigia (MHWS) :		500 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		398 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizigia (MLWS) :		50 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		152 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
As	-	-	MU ₂	7,8	330
Ssa	-	-	N ₂	36,6	212
Mm	4,9	082	NU ₂	7,0	212
Mf	-	-	M ₂	173,8	211
MTM	2,7	320	L ₂	14,0	164
Msf	8,3	279	T ₂	3,0	246
Q ₁	1,2	232	S ₂	50,8	248
O ₁	9,2	251	K ₂	13,8	250
M ₁	2,0	158	MO ₃	2,5	038
P ₁	2,6	265	M ₃	2,3	338
K ₁	7,7	266	MK ₃	5,2	009
J ₁	1,7	008	MN ₄	11,0	346
OO ₁	2,1	190	M ₄	29,0	349
MNS ₂	0,8	076	SN ₄	6,8	227
2N ₂	4,8	213	MS ₄	15,3	024
Referências de Nível:		RN-1 fixada na quina da casa do Sr. Lula. RN-2 implantad junto ao Mastro da Bandeira da escola local			

Figura 40: Ficha do Catálogo das Estações Maregráficas Brasileiras, para a baía do Caeté no trapiche da Cidade de Bragança (Fonte: FEMAR, 2002).

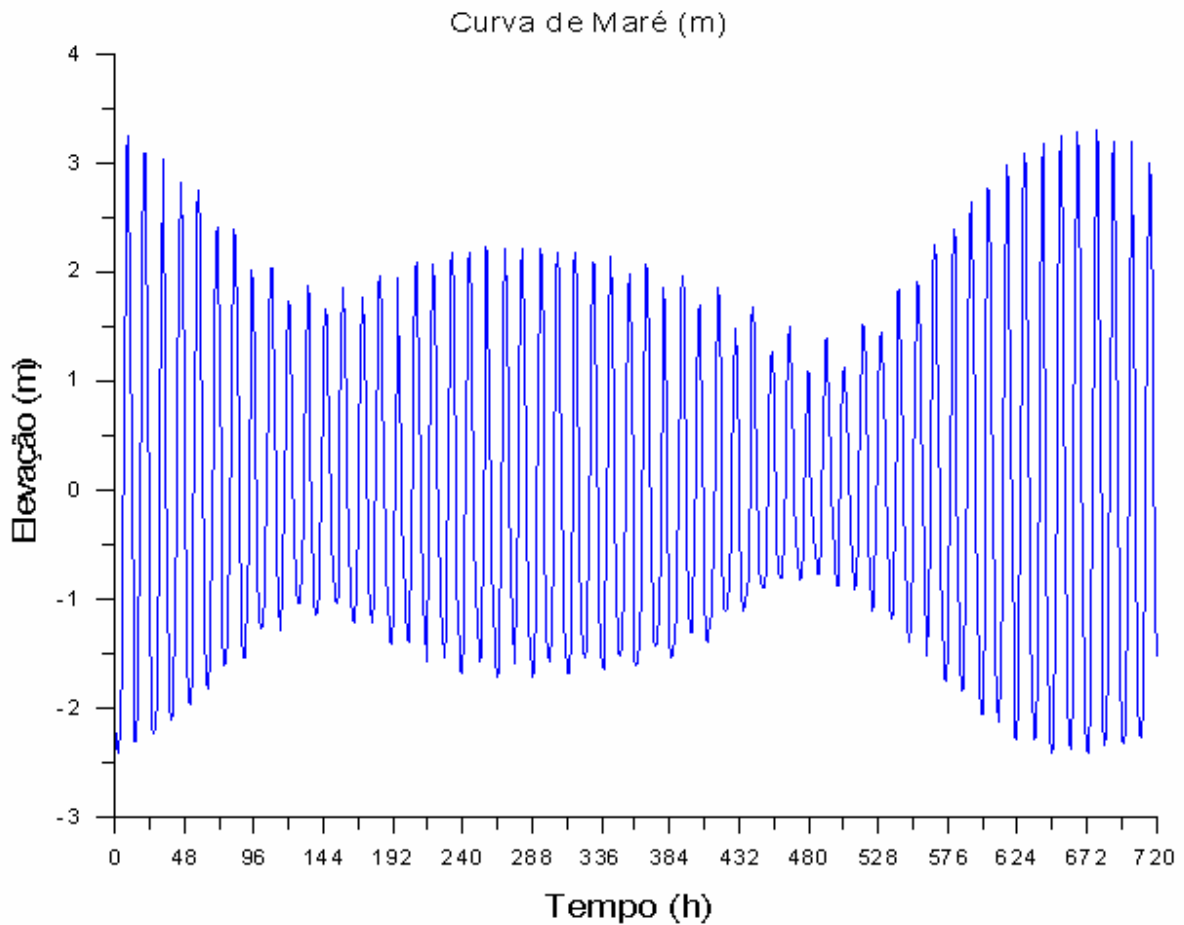


Figura 41: Curva de maré típica da região da Baía de Caeté gerada a partir das constantes harmônicas desta área, ao longo de 30 dias, sendo estas condições adotadas na modelagem do Estuário do Caeté. As marés foram geradas no SisBAHIA entre os dias 01 a 30 de janeiro.

6.2.4 Dados de Vento

Os dados de vento podem ser desde constantes no tempo e uniformes no espaço, até totalmente variáveis no tempo e variados no espaço. O fornecimento de dados de vento variados no espaço depende da disponibilidade de medições, que em geral só são efetuadas em pontos esparsos. Assim, é mais comum alimentar o modelo com dados de vento variáveis no tempo, mas uniformes no espaço.

Nesse trabalho foram utilizados dados de vento, variável no tempo, mas uniforme no espaço com velocidade de aproximadamente 5 m/s.

6.2.5 Dados de Vazão

A vazão tem papel importante na dinâmica das correntes do estuário do rio Caeté, pois a sua variação influencia a circulação das águas no estuário e contribui para a formação de canais. Os dados de vazão (referente aos anos de 2005 e 2006) foram obtidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) e serviram como dado de entrada no modelo (Figura 42).

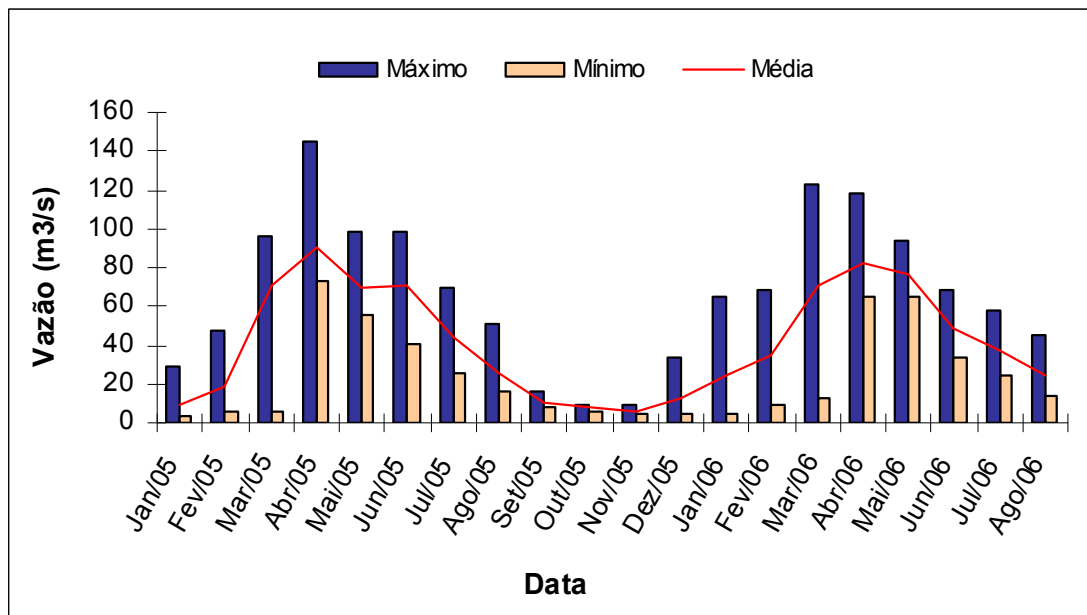


Figura 42: Dados de vazão obtidos no ano de 2005 e 2006 pela Agência Nacional de Águas (Fonte: ANA, 2006).

6.3 LABORATÓRIO

No laboratório foi realizada a análise dos dados coletados em campo, bem como a definição dos contornos, mapa base além da confecção da malha. O modelo utilizado nesse trabalho é o modelo de circulação hidrodinâmica 2DH dominado por forçantes barotrópicas, e otimizado para corpos de águas naturais nos quais efeitos de densidade

variável podem ser desprezados, pertencentes ao SisBAHIA. A região de interesse está localizada no nordeste do Pará ($0^{\circ} 45'$ e $1^{\circ} 07'$ S e $46^{\circ} 50'$ e $46^{\circ} 30'$ W). Nesta seção, foi apresentada uma descrição da implementação do modelo hidrodinâmico no domínio de modelagem, fazendo referência a batimetria, às principais forçantes, à vazão e às marés.

Primeiramente se introduz no modelo dados da malha numérica, confeccionada no programa para geração de malha (Argus ONE), além de batimetria, condições iniciais e de contorno. Uma vez concluídas essas etapas, que serão descritas a seguir, é conveniente efetuar uma análise de sensibilidade do modelo referente aos seus parâmetros físicos e numéricos para depois se efetuar a calibração. Concluída a calibração, é possível efetuar diferentes simulações.

6.3.1 Definição dos Contornos e Mapa Base

Os contornos do estuário do Caeté foram definidos utilizando como base principal uma imagem de satélite (Figura 43). Através da digitalização mediante o software Surfer (versão 8.0) da área georeferenciada criou-se o mapa base (*.srf) onde foram apresentados como resultados os cenários de simulação (Figura 44). Os dados de saída do modelo hidrodinâmico, como velocidades das correntes e elevação da maré, são apresentados tendo o mapa base como referência. Com esse mapa (imagem) foi realizada a definição dos contornos do corpo d'água, de acordo com o domínio de modelagem de interesse. Os contornos definidos foram os contornos fechados, chamados contornos de terra, e os contornos abertos, que representam um limite de conveniência demarcando o domínio em água. Os contornos de terra, em geral, representam as margens do corpo de água e possíveis pontos com afluxo ou efluxo, como por exemplo, rios e estuários. Contornos abertos geralmente representam os limites do domínio de água modelado, e não uma fronteira física.

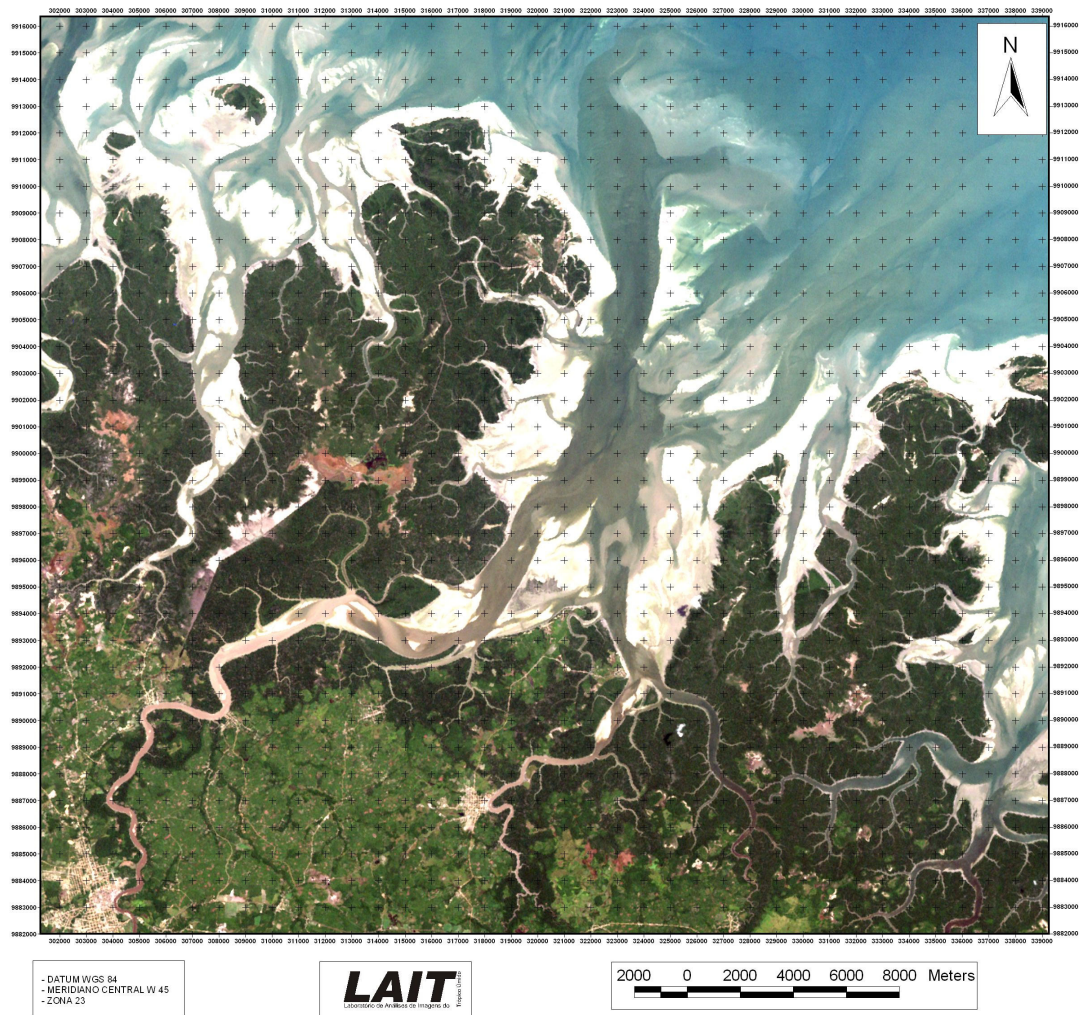


Figura 43: Imagem Landsat R3G2B1 do estuário do Caeté utilizada como principal base para delimitação dos contornos do domínio de modelagem (Coordenadas: Universal Transverse Mercator – UTM). Imagem cedida pelo Laboratório de Análises e Imagens do Trópico Úmido (LAIT).

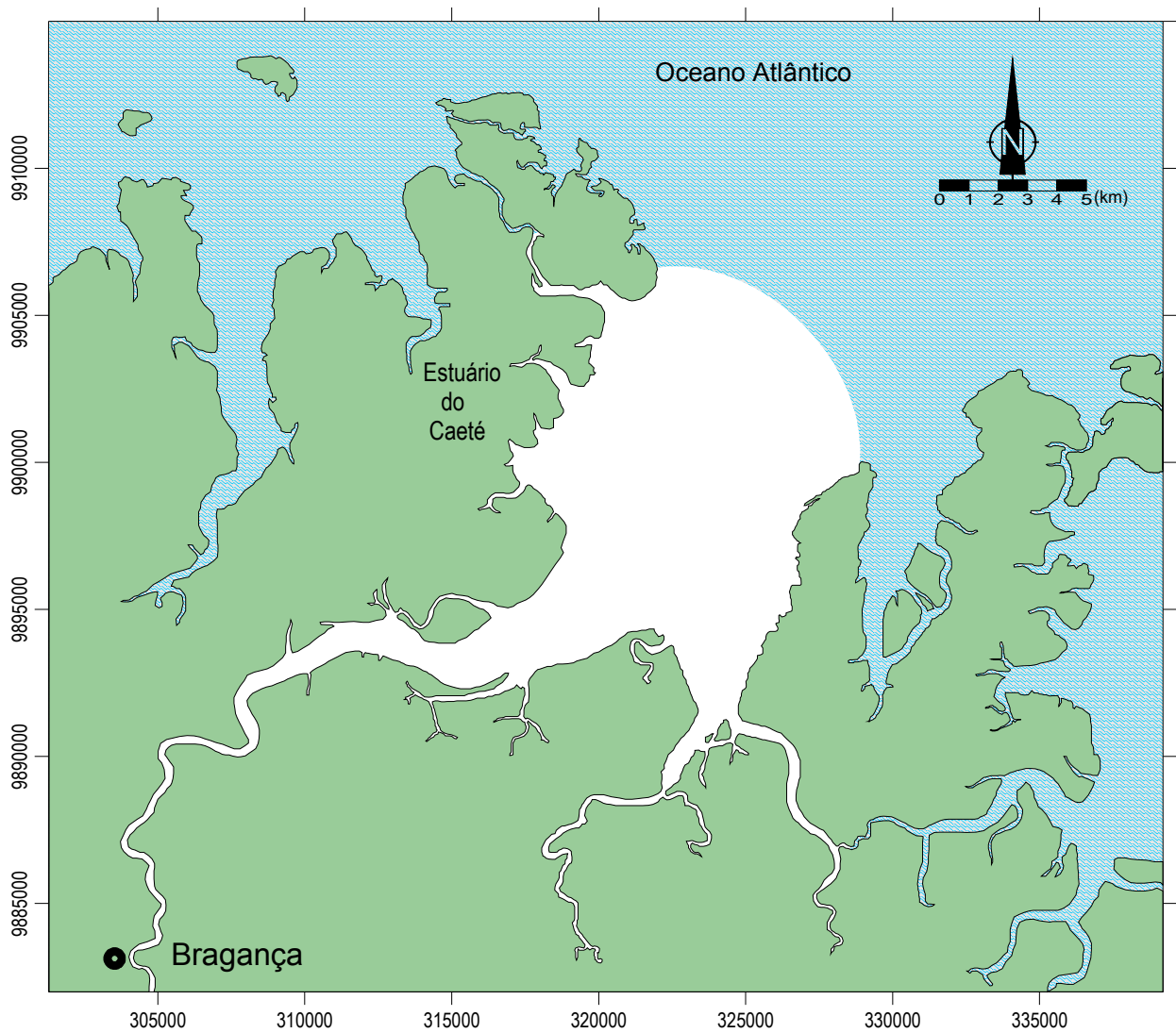


Figura 44: Mapa base (*.srf) gerado no programa Surfer onde serão apresentados os cenários de simulação (Coordenadas UTM).

6.3.2 Confeção da Malha de Elementos Finitos

Para se obter resultados satisfatórios no modelo hidrodinâmico, a confeção da malha foi realizada de tal forma a se respeitar os contornos dos limites do domínio a ser estudado, tendo a densidade de elementos definida de acordo com o grau de detalhamento dos resultados esperados.

O SisBAHIA é um modelo numérico de elementos finitos, o que permite a utilização de grades numéricas que acompanham o contorno físico da região modelada.

No processo de confecção da malha optou-se por adotar elementos finitos quadrangulares de 9 nós em uma formulação Lagrangeana sub-paramétricos, pois obtêm-se melhores resultados com a malha quadrática, pois tem maior estabilidade e acurácia.

A confecção da malha foi realizada levando em consideração os contornos, de modo que se obtivessem bons resultados do modelo hidrodinâmico. A densidade dos elementos, bem como suas dimensões, está de acordo com o grau de detalhamento esperado para alcançar os resultados, visualizando de maneira satisfatória suas escalas e fenômenos de interesse.

A malha foi construída (Figura 45), através da interpretação da imagem de satélite, mediante o programa gerador de malhas Argus ONE e módulos do SisBAHIA. O domínio foi discretizado utilizando um total de 1276 elementos e 6310 nós, dentre os quais 2420 fazem parte do contorno de terra e 31 são pertencentes à fronteira aberta.

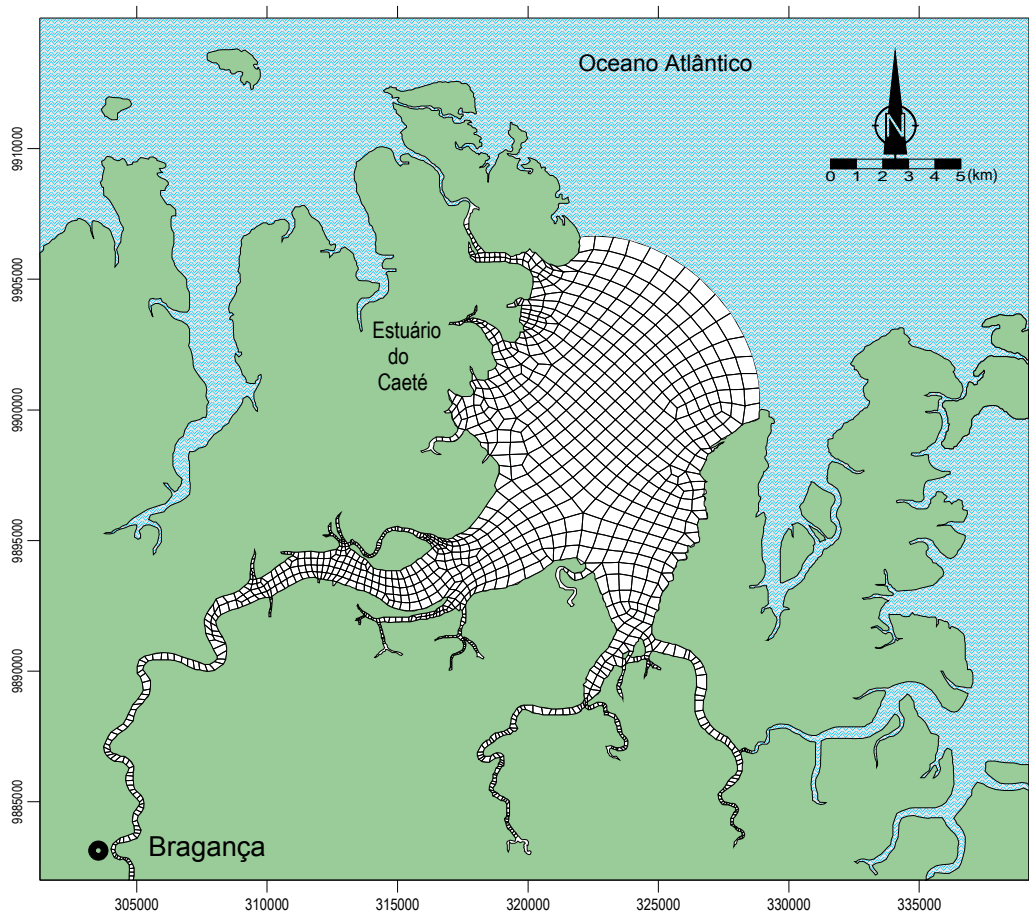


Figura 45: Domínio modelado do Estuário do Caeté, indicando a malha de discretização em elementos e nós. Os eixos representam distâncias em UTM (“Universal Transverse Mercator”).

6.3.3 Parâmetros Ambientais

São apresentados os parâmetros ambientais considerados no modelo hidrodinâmico para a modelagem do estuário do Caeté.

6.3.3.1 Análise dos dados ecobatimétricos

As informações relativas à batimetria, incluindo os contornos de margens, utilizadas nesta dissertação, foram obtidas através de um minucioso levantamento batimétrico que foi realizado pelo projeto do CNPq/CT-Hidro/Proset (nº do Processo: 50.5251/2004-3).

Como a parte fluvial possui uma pequena quantidade de pontos levantados, foi necessário utilizar profundidades estimadas, levando-se em conta o conhecimento da área. Como não se têm dados batimétricos de todo o domínio do modelo, estimou-se cotas batimétricas a partir do conhecimento da área de estudo. Em seguida, durante o processo de modelagem, foram realizados pequenos ajustes no coeficiente de rugosidade de fundo para melhor representar as simulações em condições de água sobre bancos de areia. Para tais ajustes utilizaram-se valores de amplitude de rugosidade (Tabela 06) recomendados por Abbot e Basco (1989)¹³ apud Rosman (2006).

Tabela 6: Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo, ϵ , para uso do modelo 2DH.

Terreno ou leito de terra (areia, terra, vasa, etc.)	
Leito com transporte de sedimentos	0.0070 m < ϵ < 0.0500 m
Leito com vegetação	0.0500 m < ϵ < 0.1500 m
Leito com obstáculos	0.1500 m < ϵ < 0.4000 m
Fundo de pedra ou rochoso:	
Fundo de alvenaria	0.0003 m < ϵ < 0.0010 m
Fundo de pedra lisa	0.0010 m < ϵ < 0.0030 m
Fundo de asfalto	0.0030 m < ϵ < 0.0070 m
Fundo com pedregulho	0.0070 m < ϵ < 0.0150 m
Fundo com pedras médias	0.0150 m < ϵ < 0.0400 m
Fundo com pedras	0.0400 m < ϵ < 0.1000 m
Fundo com rochas	0.1000 m < ϵ < 0.2000 m

Fonte: (Modificado de ROSMAN, 2006).

A análise batimétrica efetuada com auxílio de imagens de satélite constituiu um refinamento dos dados digitalizados, no sentido de se efetuar uma melhor delimitação da linha da costa, dos limites de terra, mar e bancos de areia. Com esse refinamento, aproximou-se ao máximo das condições reais de contorno da área de estudo.

¹³ ABBOT, M. B.; BASCO, D. R., 1989, **Computational fluid dynamics, an introduction for engineers**. Logan Group, UK Limited.

O arquivo contendo os pontos da batimetria e suas respectivas profundidades é importado pelo modelo e este faz a interpolação dos valores de profundidade para cada ponto pertencente à malha de elementos finitos, a partir das coordenadas (x, y, z) fornecidas.

Para evitar que o nível de água durante o processamento do modelo alcance valor negativo, o que é denominado “secagem”, foi preciso impor valores mínimos de profundidade aos registros batimétricos, obtidos a partir da série temporal de elevação do nível do mar na entrada do estuário.

A interpolação batimétrica foi feita mediante a técnica de kriging, que é o método mais recomendável para uso geral, já que interpola e extrapola até os limites X_{min} , Y_{min} , X_{max} , Y_{max} . Esse método gera resultados realistas com variações semelhantes às naturais.

6.3.3.2 Análise dos dados de Marés

Para a realização da modelagem hidrodinâmica, escolheu-se estações maregráficas conhecidas na região, para o fornecimento das constantes harmônicas, já que se faz necessário fornecer a altura da maré no contorno do modelo. Para as simulações do modelo do estuário do Caeté foram consideradas marés sintéticas geradas a partir das constantes harmônicas para a Baía de Caeté. As curvas de maré foram geradas a partir das constantes harmônicas da Baía do Caeté e foram utilizadas como forçantes do modelo hidrodinâmico do Estuário do Caeté.

6.3.3.3 Análise dos dados de Vento

O fornecimento de dados de vento variados no espaço depende da disponibilidade de medições, que em geral só são efetuadas em pontos esparsos. Por isso, nesse trabalho utilizou-se vento variável no tempo, mas uniforme no espaço com velocidade de aproximadamente 5 m/s.

6.3.3.4 Análise dos dados de Vazão

Os dados utilizados como dado de entrada no modelo foram obtidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), medidos para o ano de 2005 e 2006 (Tabela 07).

Tabela 7: Valores máximo, mínimo e médio da vazão (m³/s) para o ano de 2005 e 2006.

Mês	Máximo (m³/s)	Mínimo (m³/s)	Média (m³/s)
Jan/05	28.6	3.78	8.73
Fev/05	47.9	5.81	19.1
Mar/05	96.7	5.55	70.6
Abr/05	145	72.7	90.9
Mai/05	98	55.9	69.7
Jun/05	98.6	40.5	70.9
Jul/05	69.3	25.8	44.2
Ago/05	51.3	15.9	25.3
Set/05	15.7	8.25	10.2
Out/05	9.62	5.81	7.82
Nov/05	9	4.48	5.54
Dez/05	33.7	4.2	13.2
Jan/06	65.4	5.09	24.8
Fev/06	68.2	8.85	34.5
Mar/06	123	12.8	70.8
Abr/06	118	64.8	82.5
Mai/06	93.7	64.8	76.8
Jun/06	68.8	33.3	48.6
Jul/06	57.4	24.8	37.6
Ago/06	45	13.9	24.9

Fonte: (ANA, 2007).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados dos dados coletados em campo, além das etapas de calibração e validação do modelo utilizando o software SisBAHIA. Foram correlacionados os dados de campo com os cenários simulados pelo modelo, afim de que se obtivessem resultados que fossem satisfatórios e que se correspondessem entre si. Sendo assim, com a consistência dos dados observaram-se os aspectos gerais da circulação hidrodinâmica em diferentes fases de maré (preamar, baixamar, enchente e vazante) no estuário do rio Caeté (PA).

Vale ressaltar que os dados utilizados nesta dissertação foram coletados durante um período de 7 dias consecutivos em intervalos para armazenamento dos dados a cada 20 minutos e que seus pontos de coleta foram escolhidos com base no conhecimento da área, além da segurança dos equipamentos.

7.1 CALIBRAÇÃO

O processo de calibração do modelo implica no ajuste dos fatores inexatos conhecidos, como as marés ou correntes de maré, buscando-se alcançar concordância entre o modelo e os dados medidos no campo.

Segundo Rosman (2001), o primeiro passo da calibração do modelo é observar se as escalas características dos fenômenos de interesse e as escalas de discretização do modelo são compatíveis. O segundo é verificar exaustivamente se a geometria do domínio de interesse está adequadamente representada com discretizações adequadas e valores de profundidade, especialmente ao longo dos contornos, ao longo de nós de ilhas e de canais estreitos, corretos. O terceiro passo no processo de calibração refere-se às condições de contorno, já que uma verificação abrangente deve ser feita, pois os modelos hidrodinâmicos são muito sensíveis a mudanças nas condições de contorno.

Na seqüência, segue-se o quarto passo, que foca nas variações dos níveis de água e níveis de maré. Por fim, o quinto passo da calibração refere-se aos valores de velocidade das correntes. Uma vez que os quatro passos anteriores foram checados

positivamente, as correções necessárias para calibrar o campo de velocidades devem ser obtidas através de ajustes no modelo hidrodinâmico.

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBAHIA possui atributos para minimizar o processo de calibração e conseqüentemente maximizar a confiabilidade dos resultados. O SisBAHIA necessita da batimetria do domínio modelado, assim como da rugosidade equivalente do fundo. Quando estes não são totalmente conhecidos pode estimá-los utilizando para isso o bom senso. Assim, utilizando os dados coletados, poderá ser feita a digitalização para importar no SisBAHIA um arquivo com os dados de batimetria no formato texto (*.txt).

Pelo fato do estuário do rio Caeté ser uma área muito complexa para modelagem estuarina, devido aos seus bancos de areia e manguezais, não se dispõe de um levantamento batimétrico satisfatório da região para a realização de uma calibragem adequada. A dificuldade enfrentada em campo durante a coleta de dados e a não utilização de marégrafos e correntógrafos suficientes para a obtenção de dados consistentes dificultou a realização de uma aferição para uma calibragem válida. Portanto, para este trabalho, limitou-se a introduzir os dados coletados em campo sem objetivar uma calibração de grande exatidão.

7.2 DADOS CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO

Apresentam-se a seguir os dados considerados, como resultado, nos cenários realizados pelo modelo.

7.2.1 Dados de Maré

Para as simulações do modelo do Estuário do Caeté são consideradas marés sintéticas geradas a partir das constantes harmônicas para Baía de Caeté – trapiche da cidade. O Quadro 2 apresenta as 26 constantes harmônicas usadas, conforme informações contidas no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR). As curvas de maré típicas da Baía de Caeté-PA foram

usadas como condições de contorno para as simulações realizadas (Figura 40). As curvas de maré foram geradas a partir das constantes harmônicas, e foram utilizadas como forçantes do modelo hidrodinâmico do Estuário do Caeté.

Os dados de maré obtidos em campo foram medidos durante 7 dias e as marés variaram de um mínimo de 0,42 m a 5,18 m, para o ponto situado na Pesqueira Maguary (M1) e de um mínimo de 0,01 m a um máximo de 5,08 m no ponto situado na ponte sobre o furo do Maguary (M2) (Figura 46). Os dados foram coletados entre os dias 16 e 24 de janeiro, abrangendo o período de maré de sizígia.

Comparando-se os dados de campo medidos com a régua maregráfica instalada na ponte sobre o furo Maguary, com os observados pelas constantes harmônicas geradas pelo modelo obtém-se a seguinte curva para as marés (Figura 47).

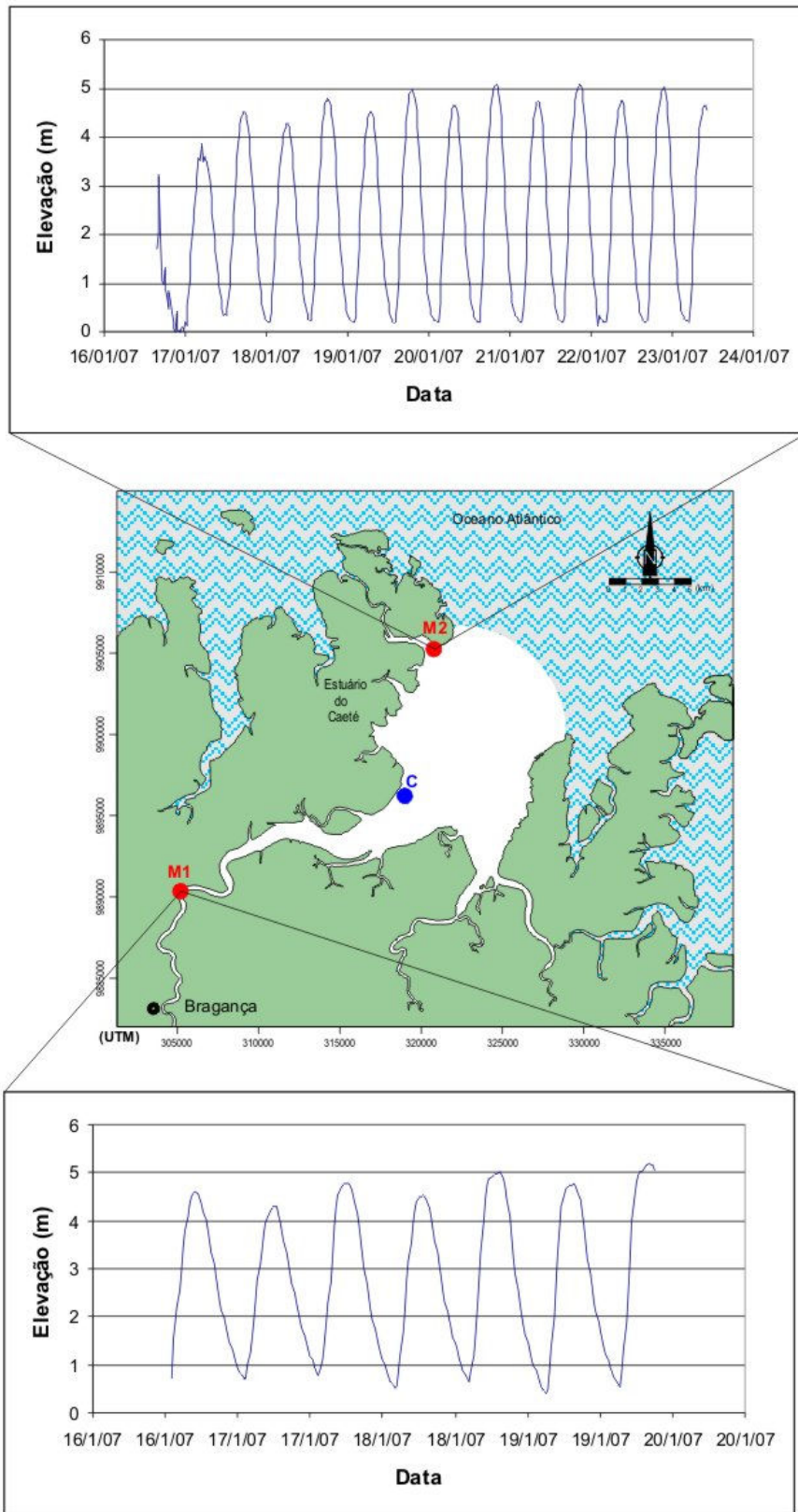


Figura 46: Elevação da maré na Pesqueira Maguary (M1) e na ponte sobre o Furo do Maguary (M2).

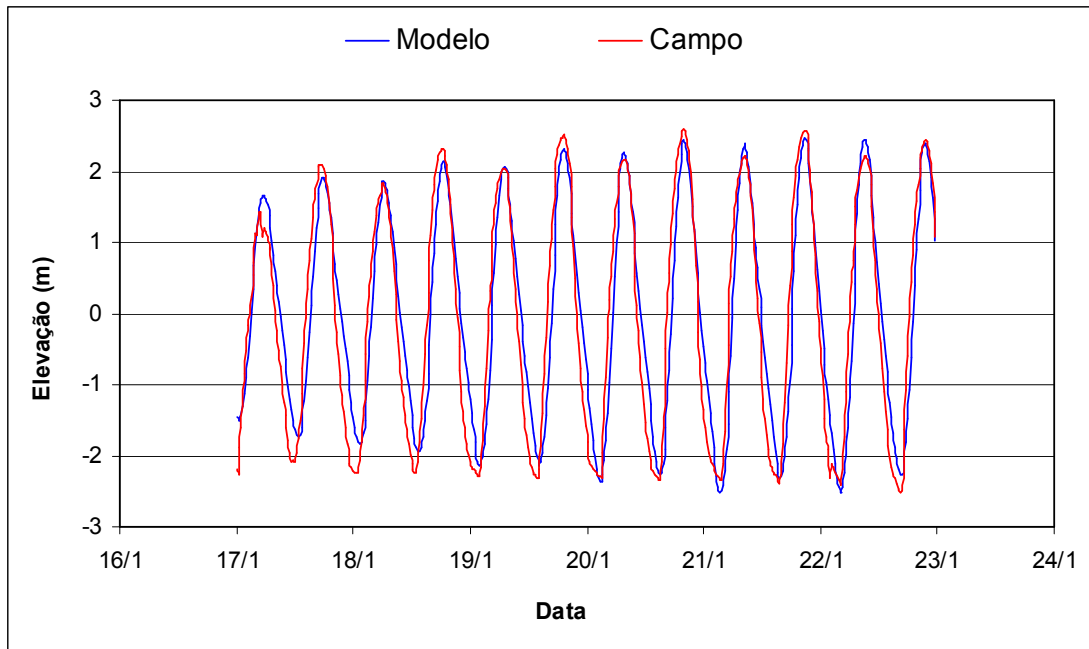


Figura 47: Curva das marés obtidas pelos dados coletados em campo (Ponte - M2) e geradas pelas constantes harmônicas inseridas no modelo.

Foram relacionados também os dados de elevação de maré para os dois pontos de coleta, observando-se uma pequena defasagem da maré, devido a distância entre os marégrafos ser de aproximadamente 22 km (Figura 48).

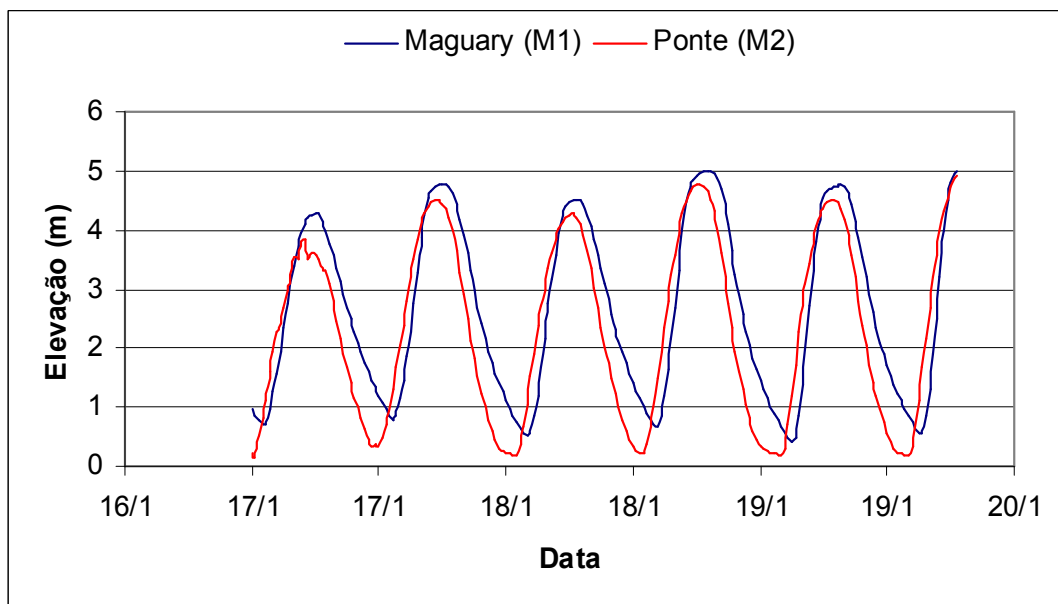


Figura 48: Defasagem da maré nos dados coletados em campo.

Comparando-se os valores de elevação coletados em campo com o observado pelo modelo, a partir da simulação realizada, constatou-se uma diferença em seus valores para os marégrafos situados na Pesqueira Maguary (Figura 49) e na ponte sobre o furo Maguary (Figura 50).

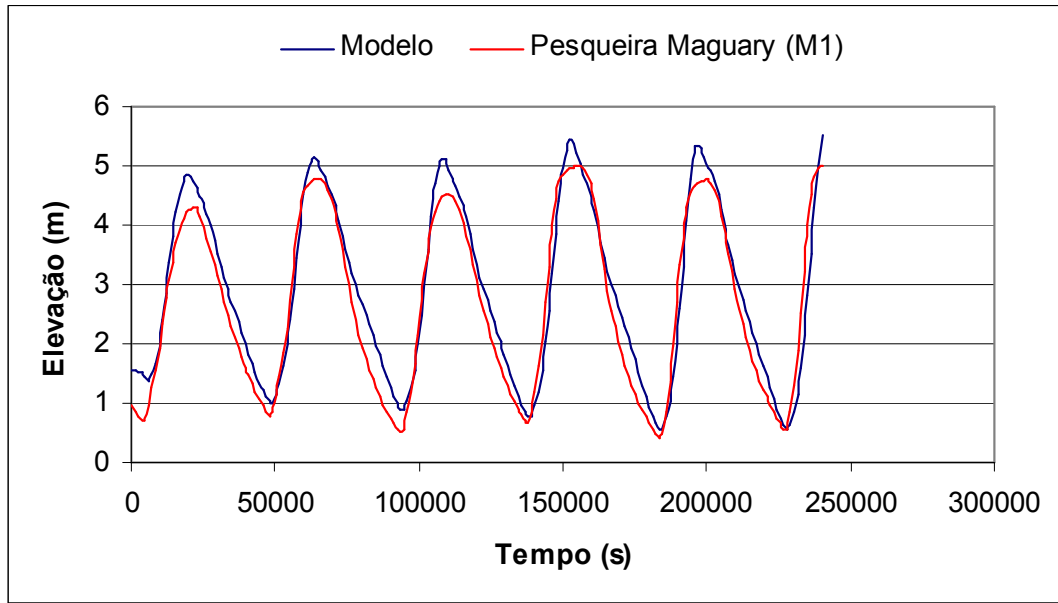


Figura 49: Comparação dos valores de elevação obtidos no campo (Pesqueira Maguary – M1) e no modelo hidrodinâmico.

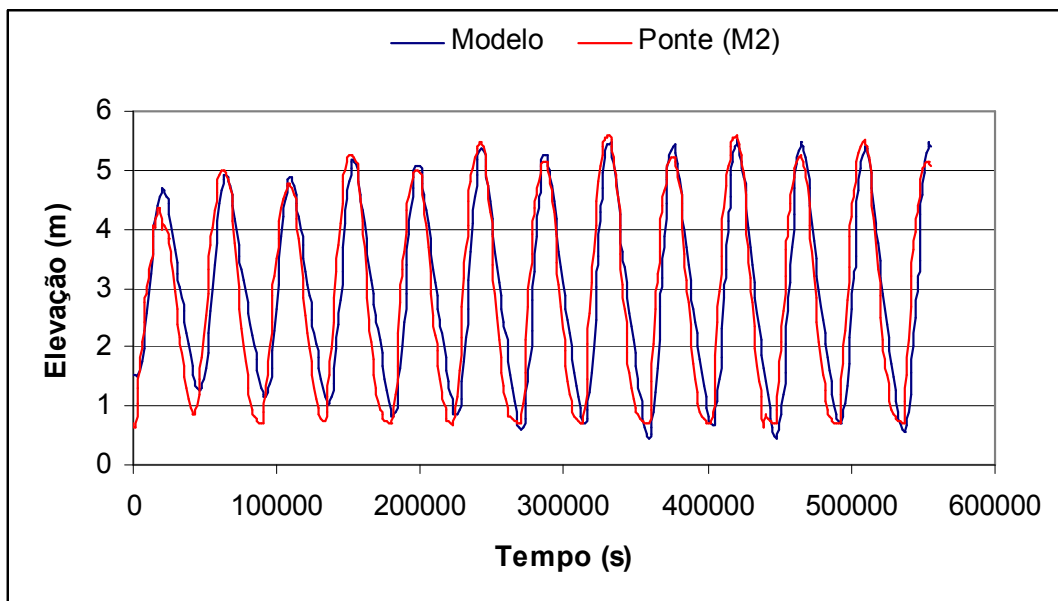


Figura 50: Comparação dos valores de elevação obtidos no campo (Ponte – M2) e no modelo hidrodinâmico.

7.2.2 Dados de Correntes de Maré

Os dados de correntes obtidos pelo correntógrafo são dados brutos em que se pode observar que a velocidade longitudinal ao canal principal (AVN) é maior do que a velocidade transversal ao canal (AVE) (Figura 51). Isto implica dizer que os dados coletados pelo correntógrafo, a princípio, estão consistentes e pôde-se observar essa consistência quando plotou-se esses valores de velocidade (Figura 52).

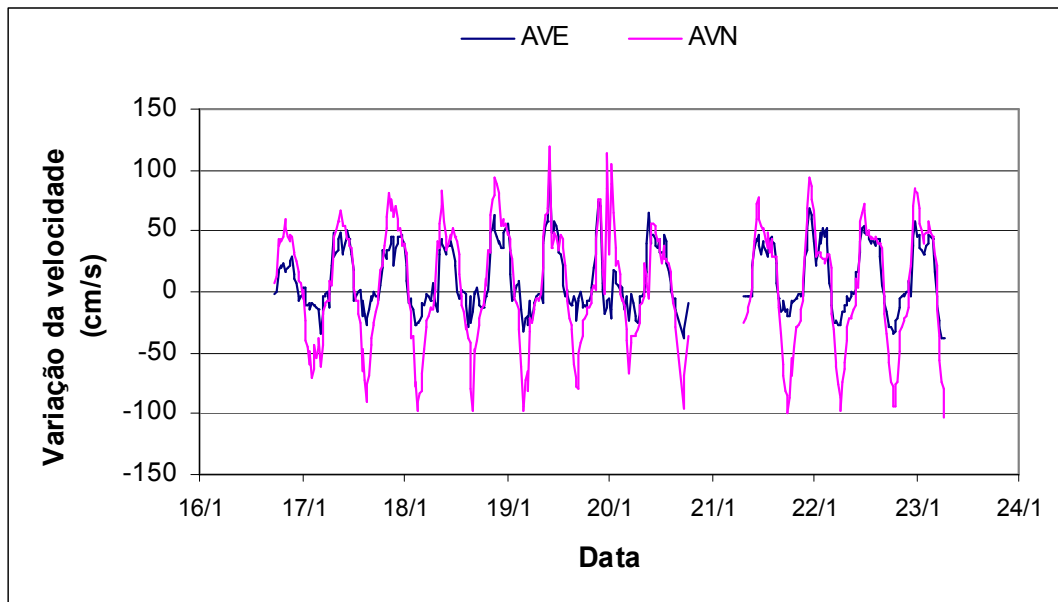


Figura 51: Velocidade das correntes longitudinal e transversal ao canal principal.

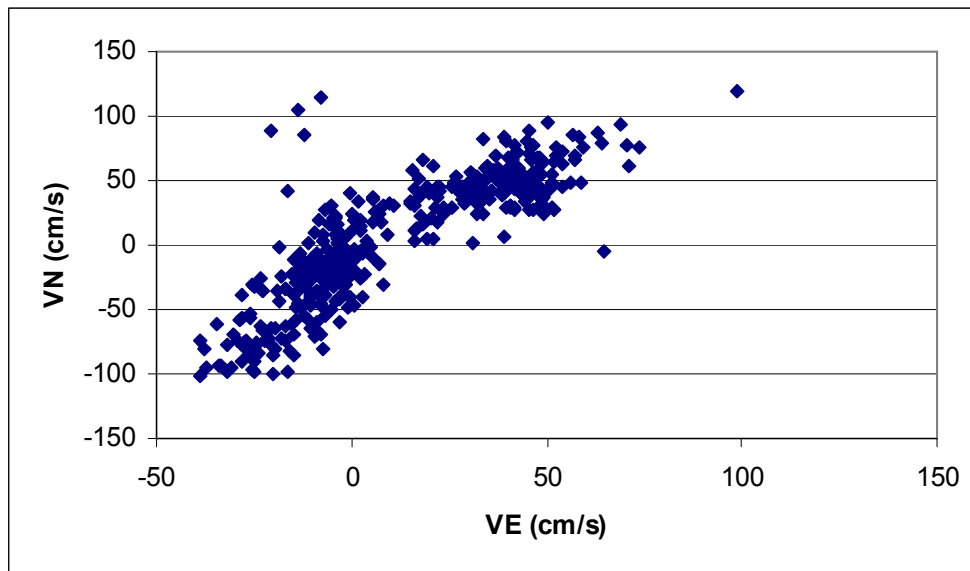


Figura 52: Relação entre as velocidades longitudinal e transversal ao canal principal.

No entanto, trabalha-se com a decomposição da velocidade e com seus dados já corrigidos através da declinação magnética da Terra. Pode-se observar que os menores valores de velocidade absoluta das correntes estão relacionados ao instante de virada da maré (picos de preamar e baixamar) e que os maiores valores estão relacionados às marés de enchente e vazante (Figura 53).

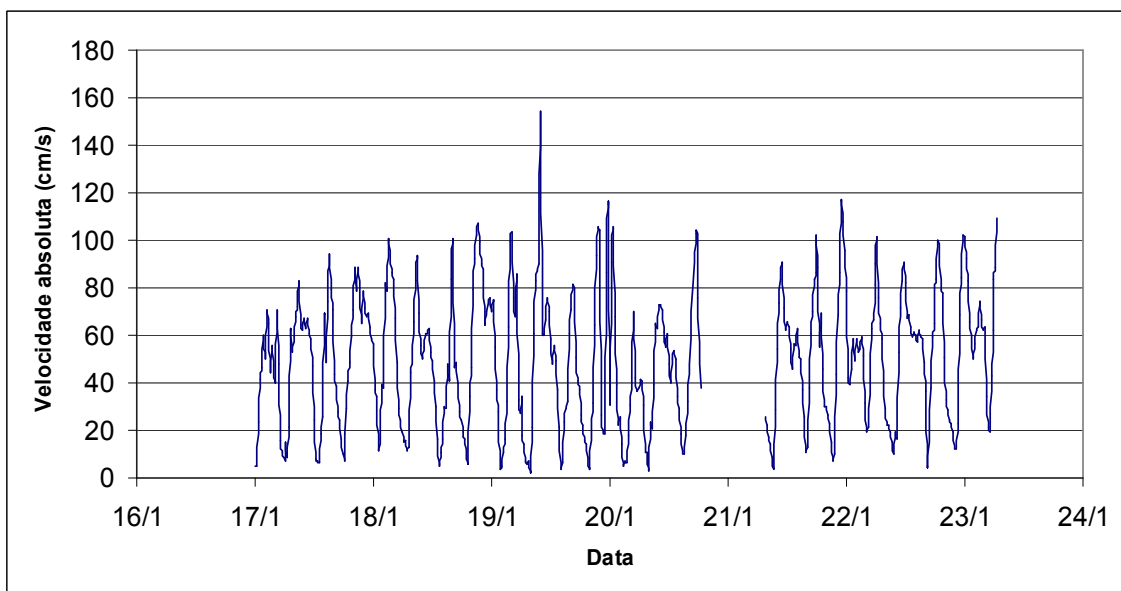


Figura 53: Velocidade absoluta das correntes longitudinal e transversal ao canal principal.

A consistência dos dados pode ser observada quando se compara os valores de elevação de maré com os de velocidade das correntes das marés. Por exemplo, para o dia 18 de janeiro às 19:00 h os valores de correntes são os mais baixos, devido nesse mesmo horário estar durante uma estufa de preamar. Outro exemplo, é o observado para o dia 19 às 03:40 h quando o valor da velocidade da corrente é alto, devido estar relacionado a uma meia maré enchente. E isto é o esperado para qualquer ponto quando comparou-se os dois parâmetros (Figura 54).

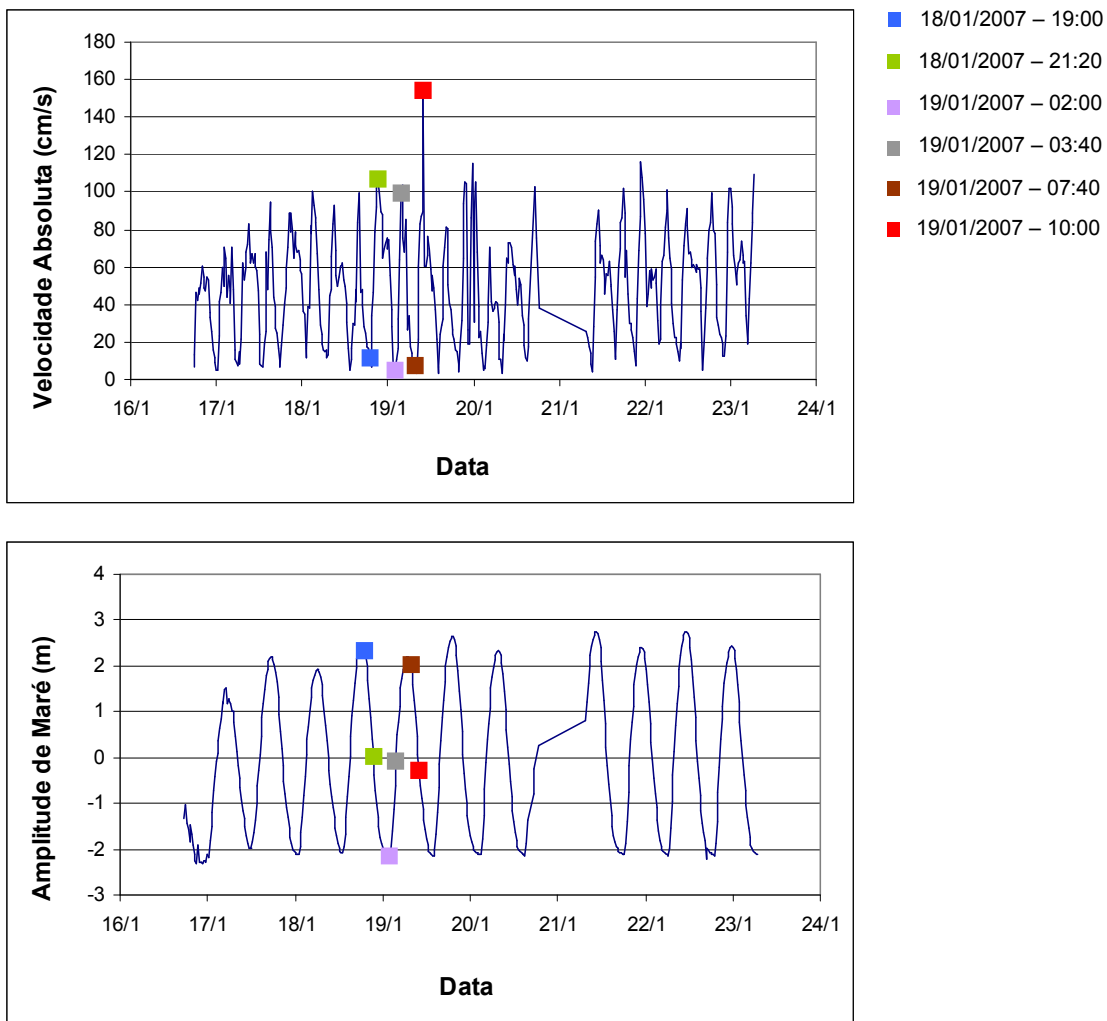


Figura 54: Comparação dos valores de velocidade e altura de maré.

7.2.3 Dados de Vazão

Os valores de vazão observados para o ano de 2005/2006 variaram de um mínimo de 3,78 m³/s para o mês de janeiro, máximo de 145 m³/s e média de 67,41 m³/s (Figura 55).

Os dados de vazão inseridos no modelo hidrodinâmico utilizados nas simulações foram obtidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), tendo sido obtida a média das medidas de vazão para o mês de janeiro (Figura 56). O valor adotado foi de 16,16 m³/s para dado de entrada do modelo.

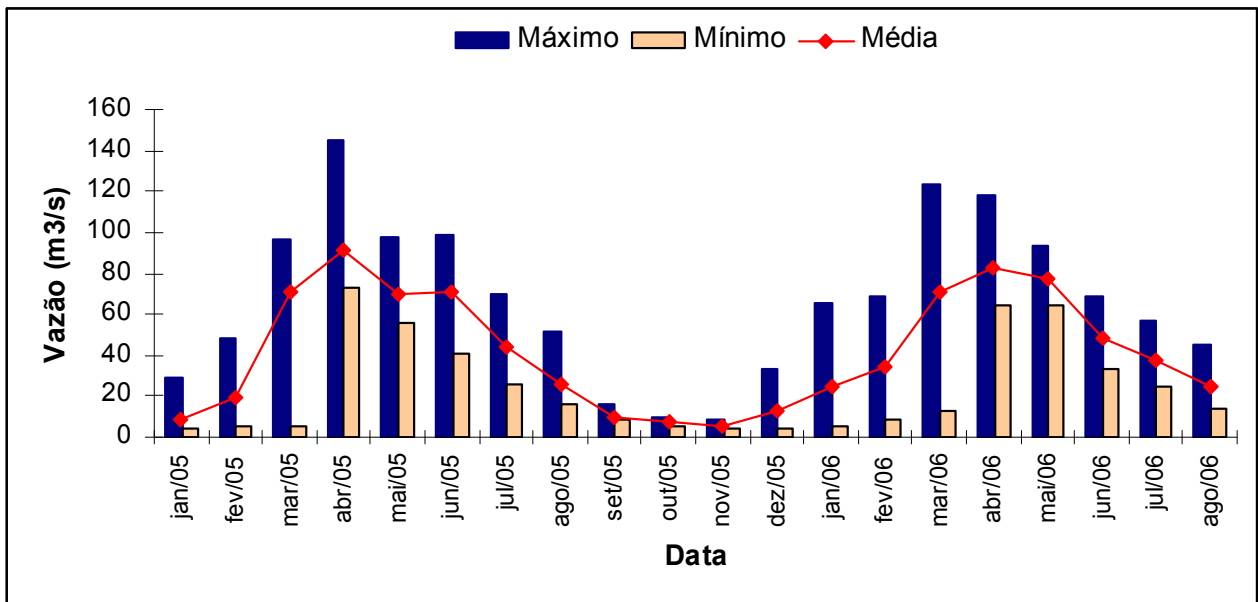


Figura 55: Valores máximos, mínimos e médios de vazão para o ano de 2005.
Fonte: (ANA, 2006).

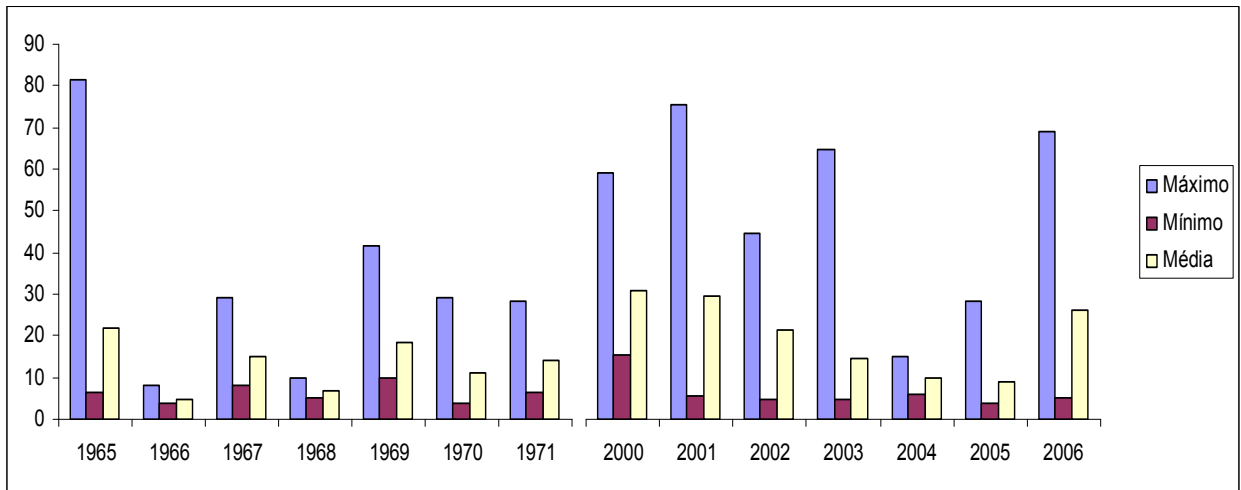


Figura 56: Distribuição dos valores de vazão para os meses de janeiro em diferentes anos. Fonte: (ANA, 2007).

8 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS

O estudo da circulação no estuário do rio Caeté foi realizado através de uma simulação de 10 dias, caracterizando diferentes situações de maré. Esta simulação teve como objetivo observar o comportamento hidrodinâmico durante a maré de sizígia e quadratura (meia maré enchente, meia maré vazante, estofa de preamar e estofa de baixamar).

A determinação dos padrões das correntes foi feita através dos resultados fornecidos pelo modelo 2DH, através de campos de vetores representativos da velocidade resultantes das componentes x e y , integradas ao longo da coluna d'água. Desta maneira, avaliando a velocidade média, a direção e intensidade das correntes no interior do estuário.

Para os valores de correntes apresentados no resultado do modelo hidrodinâmico, definiu-se uma estação (meio caeté) que coincidiu com o ponto de coleta das correntes feitas pelo correntógrafo, de onde se obteve os instantes em que foram realizadas as simulações para as marés de sizígia e quadratura (Figura 57).

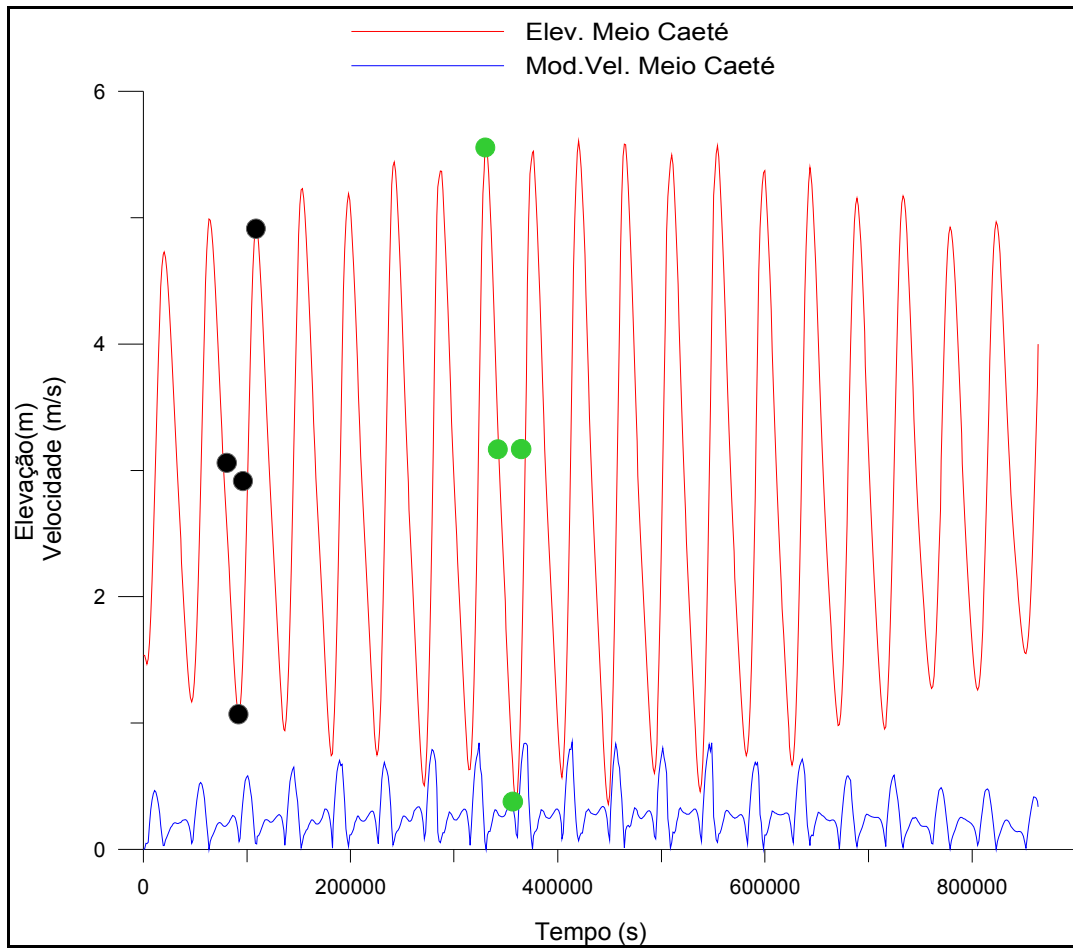


Figura 57: Instantes de maré de quadratura (meia maré vazante, estofa baixamar, meia maré enchente e estofa preamar), representadas pelos círculos pretos e instantes de maré de sizigia (estofa preamar, meia maré vazante, estofa baixamar e meia maré enchente), representadas pelos círculos verdes.

8.1 MARÉ DE QUADRATURA

Simulação 1

Na análise hidrodinâmica da simulação 1 (meia maré vazante - maré de quadratura), indicou-se pelo círculo preto (Figura 57) ($t = 76800$ segundos – dia 17/1 às 21h20min). O ponto onde foi colocado o correntógrafo apresentou velocidade de 0,36 m/s (Figura 58). Essas velocidades representadas na área de estudo foram geradas pelo módulo das velocidades em U e V.

Pode-se observar que próximo às margens oeste as velocidades são menores devido ao grande número de bancos de areias que começaram a emergir com a diminuição do nível de maré (Figura 58). As velocidades diminuíram à medida que o nível de maré começou a baixar e as correntes começaram a atritar-se com o fundo. Os valores de velocidades para esse instante oscilaram de um mínimo de 0 m/s a 0,63 m/s.

Simulação 2

Nesta simulação (estofa baixamar – maré quadratura), indicou-se pelo segundo círculo preto (Figura 57) ($t = 92400$ segundos – dia 18/1 às 01h40min). Pode-se observar que por se tratar de uma estofa de baixamar apresenta muitos valores de velocidade nula, principalmente na margem oeste, devido à grande quantidade de bancos de areia emersos (Figura 59). Ocorre uma inversão das correntes, provavelmente relacionado à grande extensão do estuário e os instantes em que a maré atingiu seu mínimo, em uma parte do estuário, coincidindo com os primeiros instantes em que ela começa a encher, em outras partes do estuário. As velocidades nesse instante variaram de um mínimo de 0 m/s a 0,58 m/s.

Observa-se a distribuição das regiões que possuem bancos de areia em todo o estuário, também nesse instante (Figura 60).

Simulação 3

A simulação 3 (meia maré enchente – maré quadratura) indicou-se pelo terceiro círculo preto (Figura 57) ($t = 100800$ segundos – dia 18/1 às 04h00min). Nesse instante observou-se as maiores velocidades, com valores de 4,75 m/s. Percebe-se que as velocidades de meia maré enchente são mais altas do que as de meia maré vazante. No ponto onde ficou situado o correntógrafo (Estação Meio Maré) a velocidade atingiu valores de 1,58 m/s (Figura 61).

Simulação 4

Para a maré de quadratura, a simulação 4 (estofa preamar – maré quadratura), é indicada pelo quarto círculo preto (Figura 57) ($t = 109200$ segundos – dia 18/1 às 06h20min). Pode-se observar que nesse instante ficou bem evidenciado o momento de estofa de preamar, quando se observou que os valores de velocidade, em sua maioria, estão no intervalo entre 0 m/s e 0,07 m/s (Figura 62). Observa-se também, que os bancos no lado oeste do estuário, mostrados anteriormente, foram totalmente cobertos e suas profundidades apresentaram mínimo de 5,70 m (Figura 63).

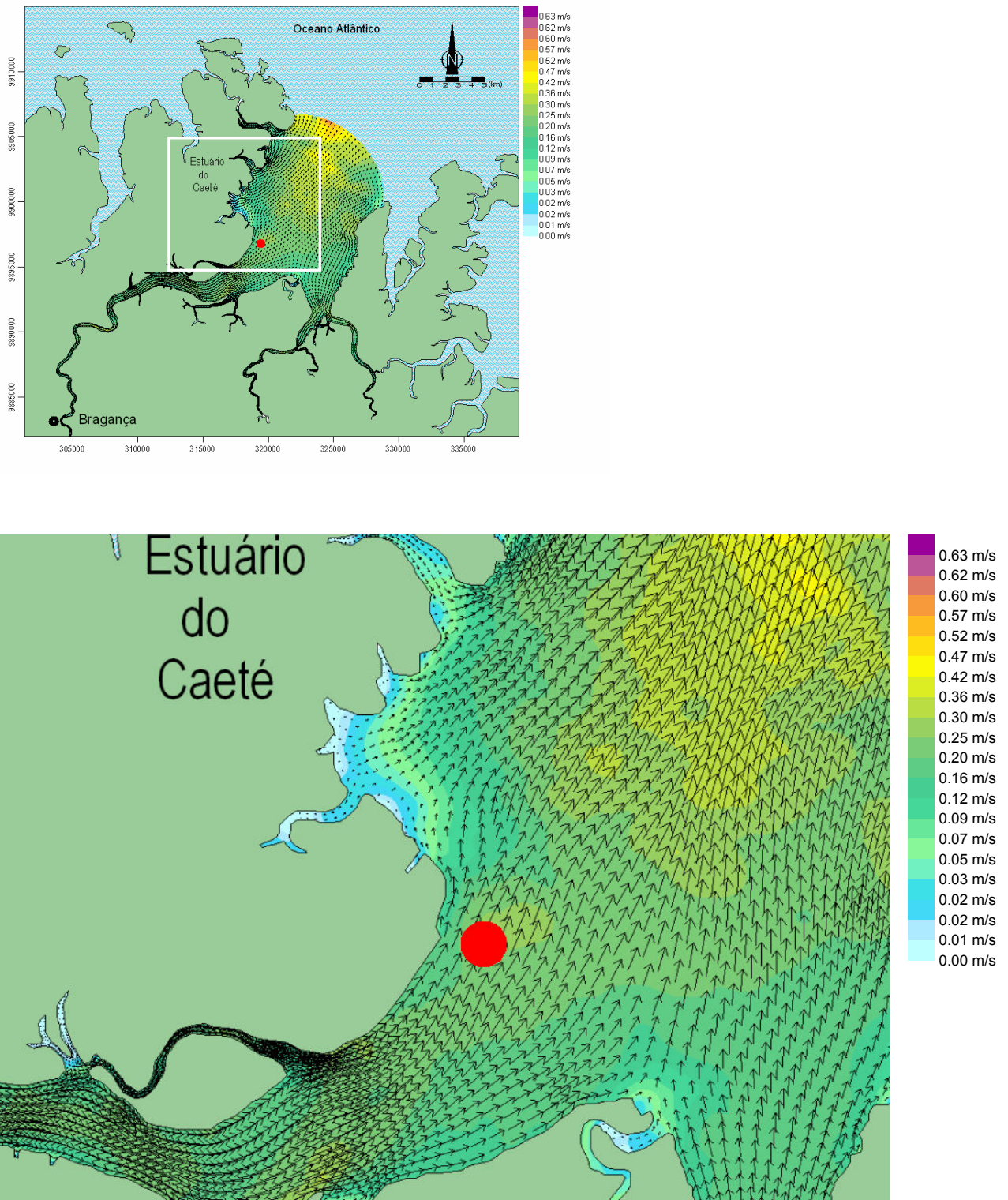


Figura 58: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 1 referente ao instante em que foi atingida a velocidade na Estação Meio Estuário (ponto vermelho) Os vetores correspondem às velocidades e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.

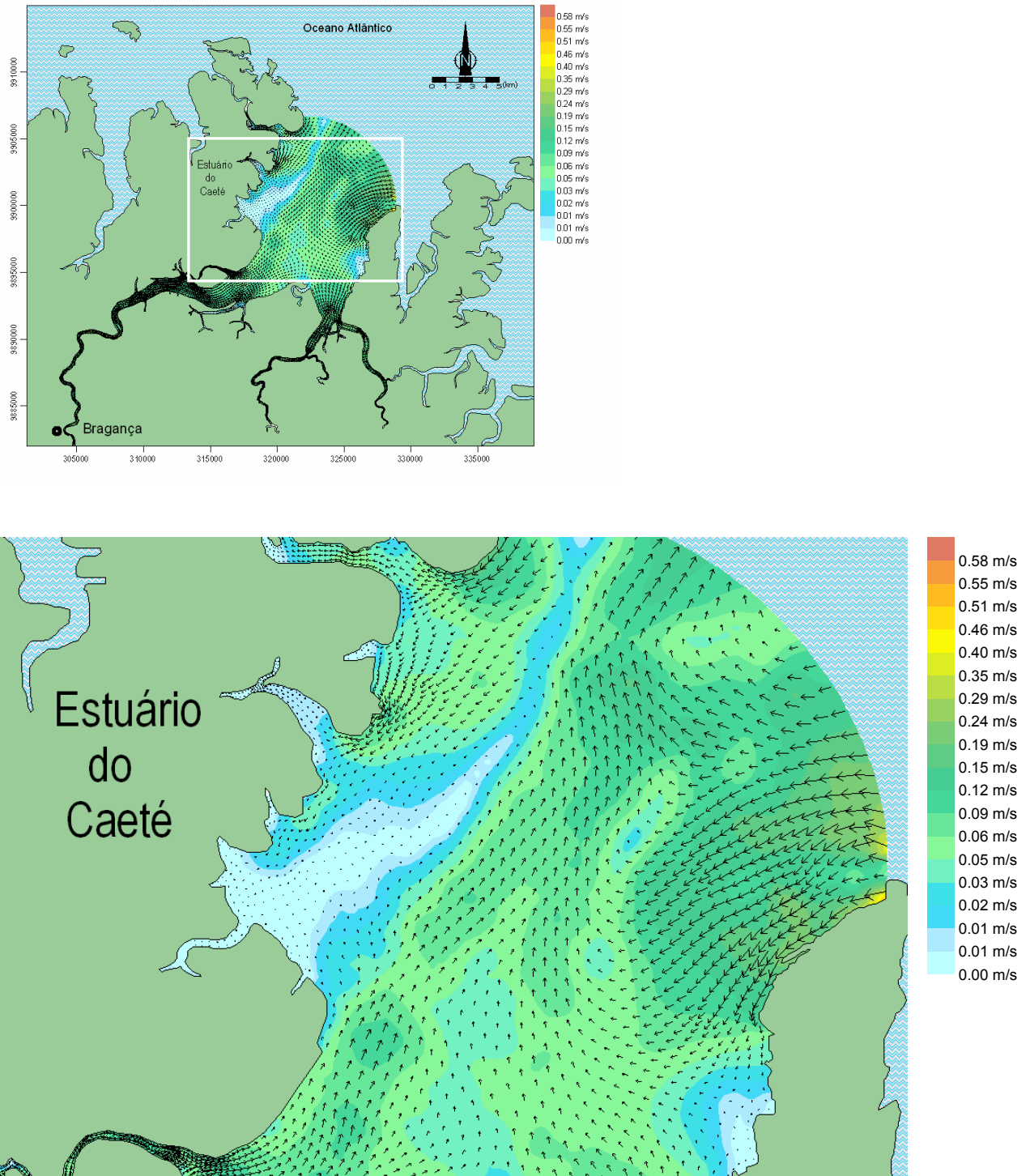


Figura 59: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 2 (estufa de baixamar), mostrando em destaque (quadrado branco) a região onde ocorre a inversão das correntes.

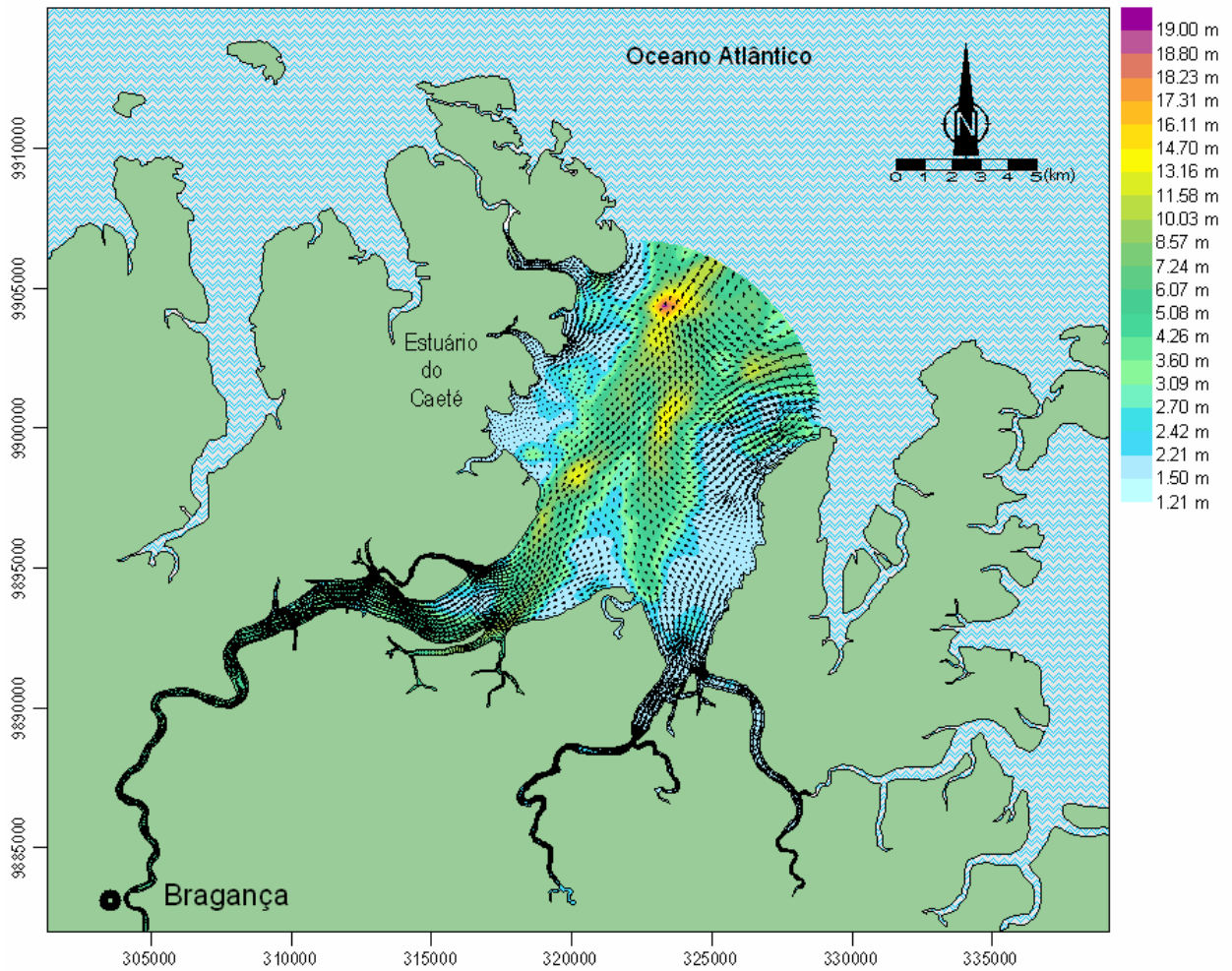


Figura 60: Mapa de elevação de maré, para o instante de estufa de baixamar, mostrando regiões que possuem bancos de areia em todo o estuário, verificados através dos padrões de cores mais claras.

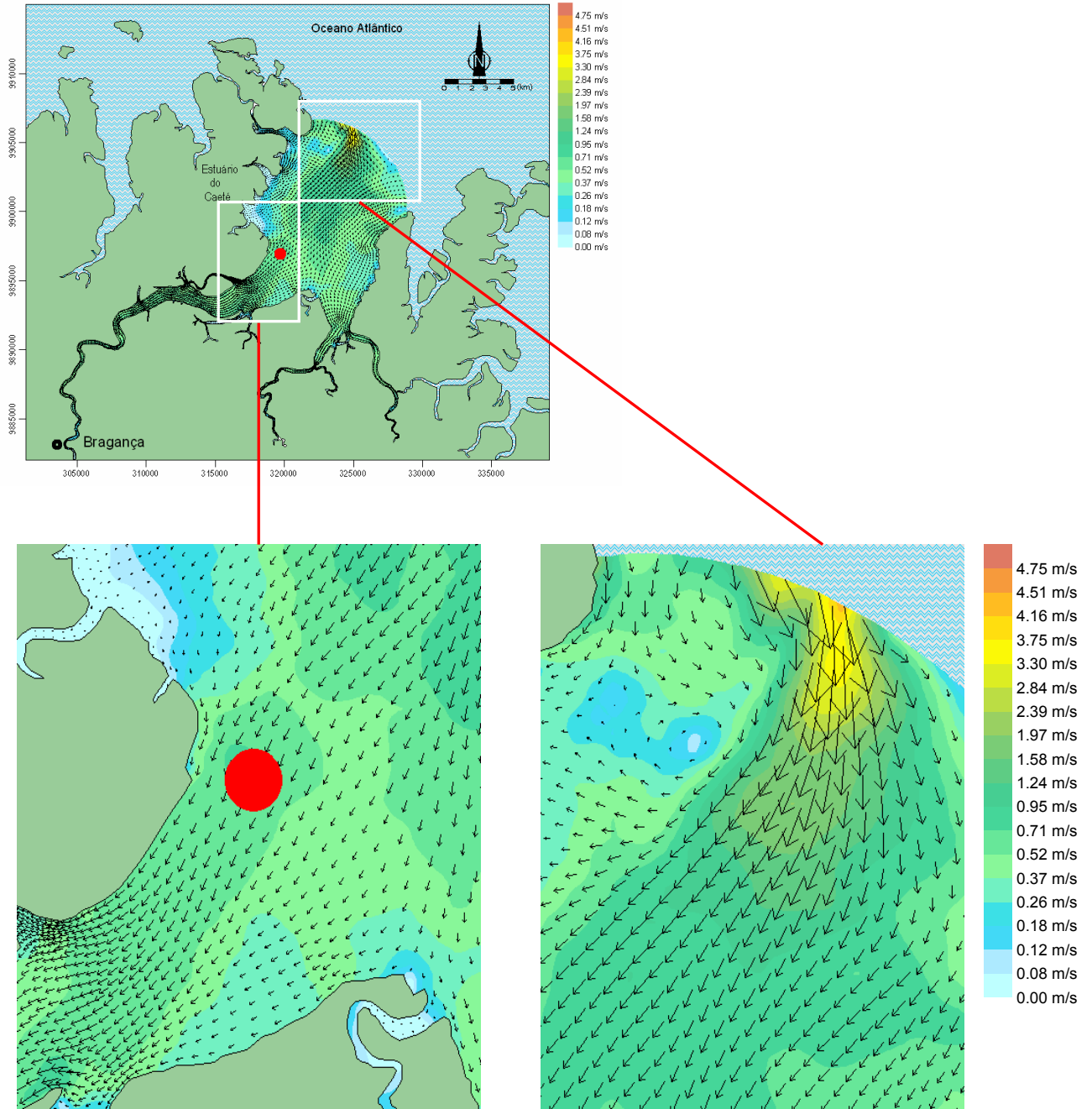


Figura 61: Instante de meia maré enchente com velocidade máxima de 4,75 m/s (quadro branco superior) e velocidade de 1,58 m/s no ponto onde o correntógrafo ficou instalado (quadro branco inferior).

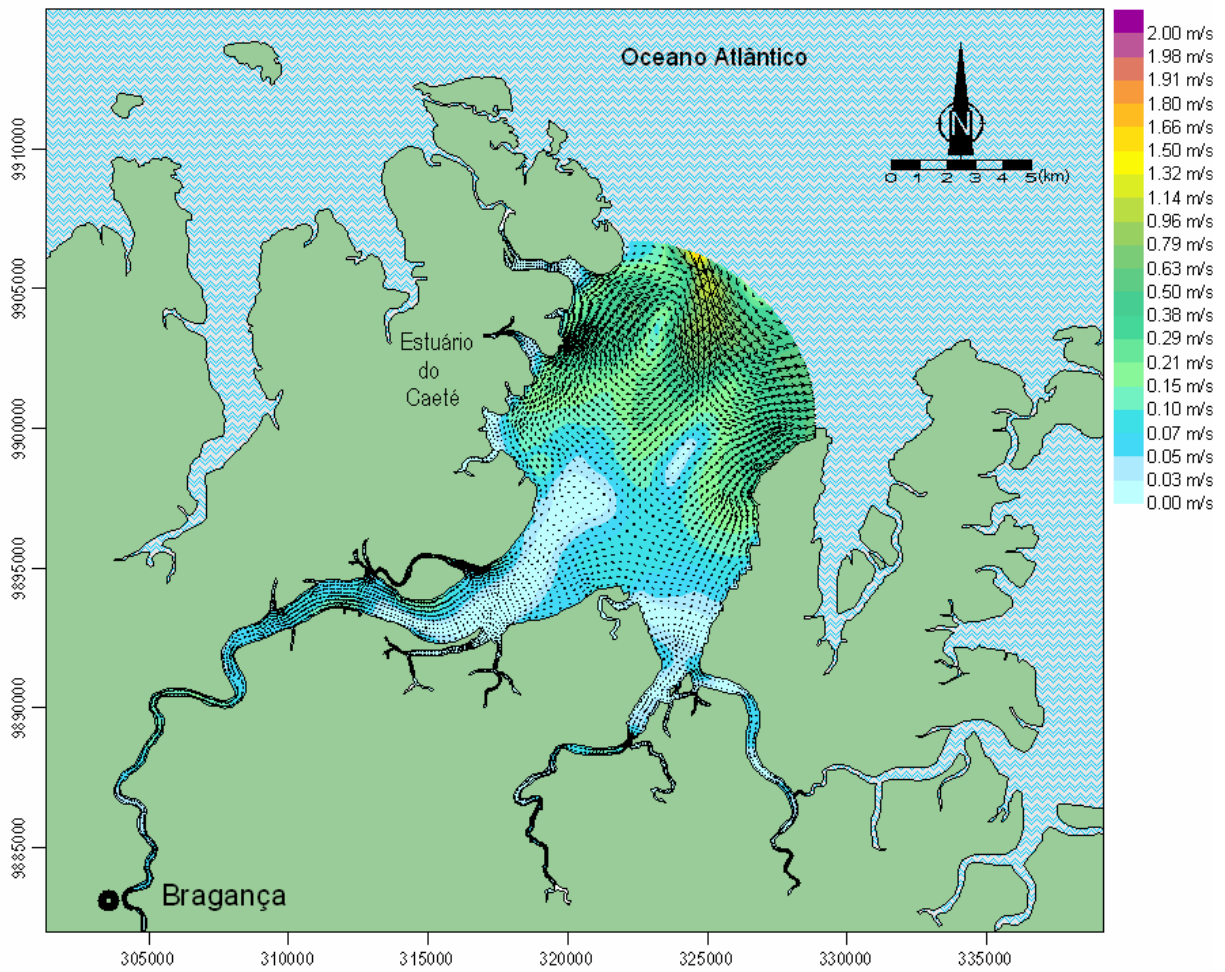


Figura 62: Velocidade das correntes na estufa de preamar durante uma maré de quadratura.

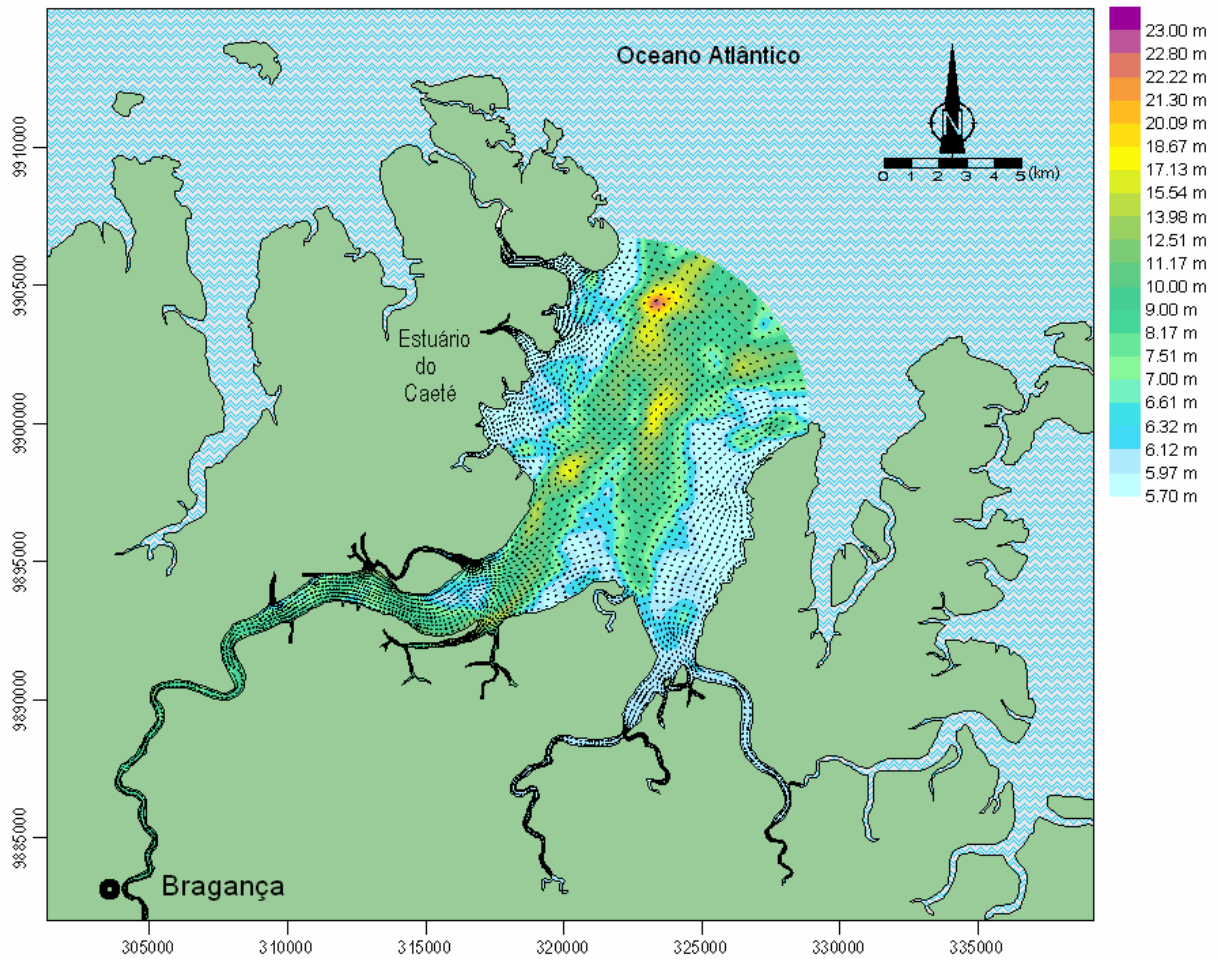


Figura 63: Instante de estufa de preamar (maré de quadratura) onde se observa que, principalmente, os bancos de areia localizados na margem esquerda e direita do estuário estão totalmente cobertos com profundidade mínima de 5,70 m, verificada através do padrão de cor azul.

8.2 MARÉ DE SIZÍGIA

Simulação 5

A simulação 5 ocorre numa maré de sizígia (estofa de preamar), representado pelo primeiro círculo verde (Figura 57) ($t = 330000$ segundos – dia 20/1 às 19h40min). Assim como na simulação 4, pode-se observar que o comportamento da velocidade é semelhante entre a estofa de preamar da maré de quadratura e a maré de sizígia (Figura 64). Porém, quando se compara as estofas de preamar de quadratura (Figura 63) e sizígia observa-se que as marés de sizígia apresentam profundidade mínima maior do que a de quadratura (Figura 65).

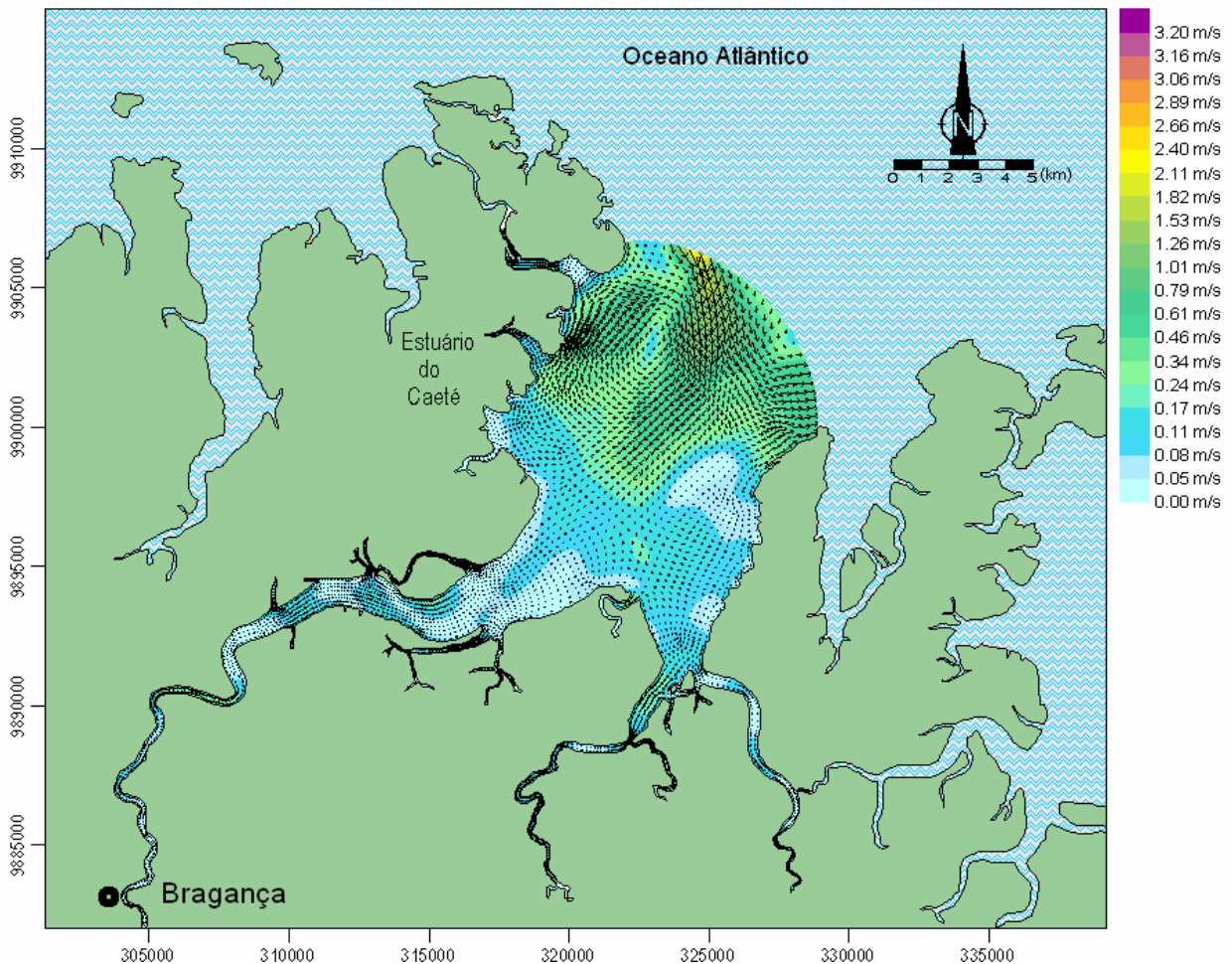


Figura 64: Velocidade da correnteza na estofa de preamar durante uma maré de sizígia.

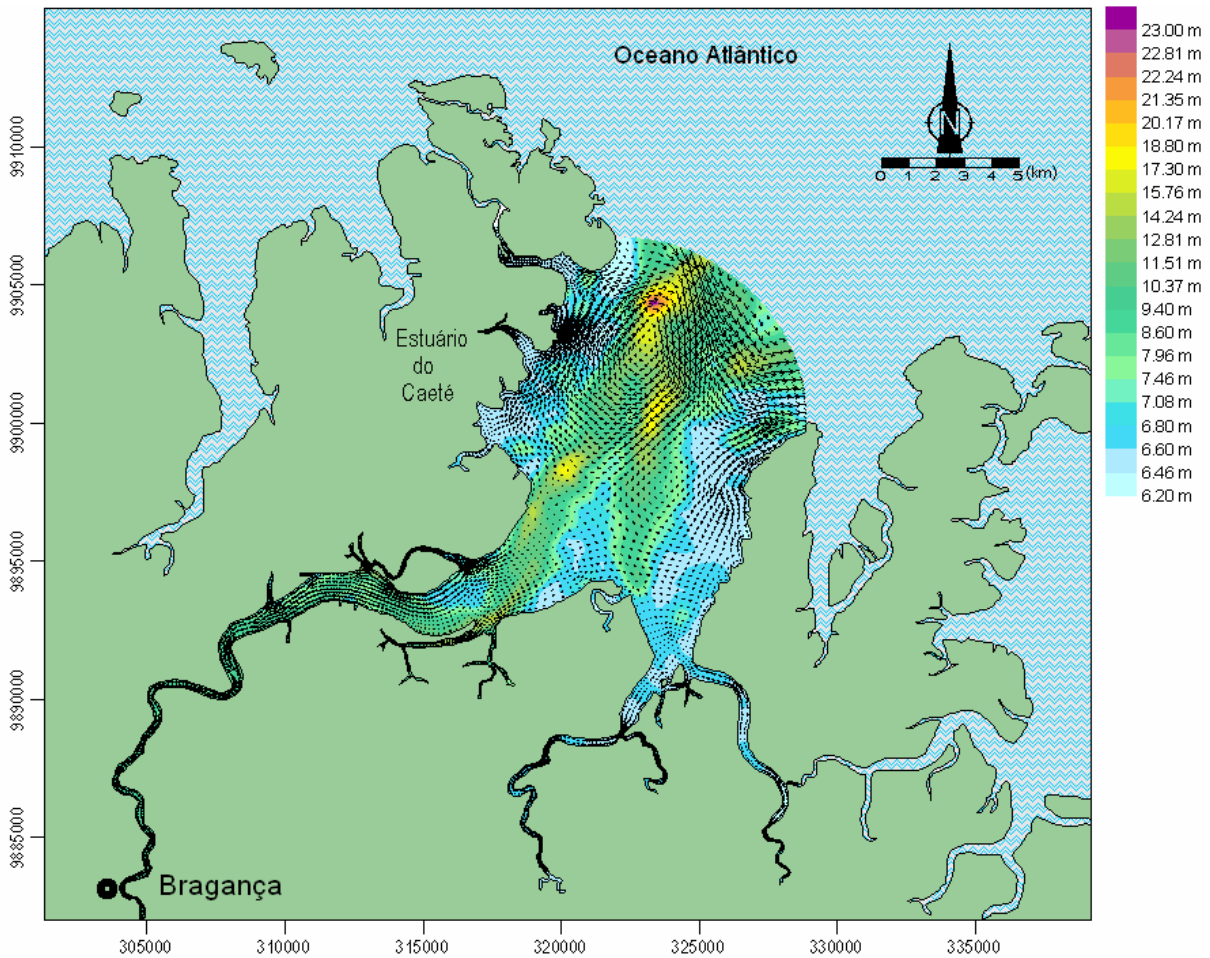


Figura 65: Instante de estufa de preamar onde se observa que, principalmente, os bancos de areia localizados na margem esquerda e direita do estuário estão totalmente cobertos com profundidade mínima de 6,20 m, verificada através do padrão de cor azul

Simulação 6

Essa simulação ocorre na meia maré vazante durante uma maré de sizígia e está representado pelo segundo círculo (Figura 57) ($t = 343200$ segundos – dia 20/1 às 23h20min). Observa-se que a velocidade das correntes durante a maré de sizígia é maior que durante a maré de quadratura, para uma meia maré vazante. As velocidades variaram de 0 m/s a 0,81 m/s, sendo que no ponto onde foi fundeado o correntógrafo as velocidades geradas pelo modelo e coletado em campo atingiram um máximo de aproximadamente 0,54 m/s (Figura 66) e 0,78 m/s.

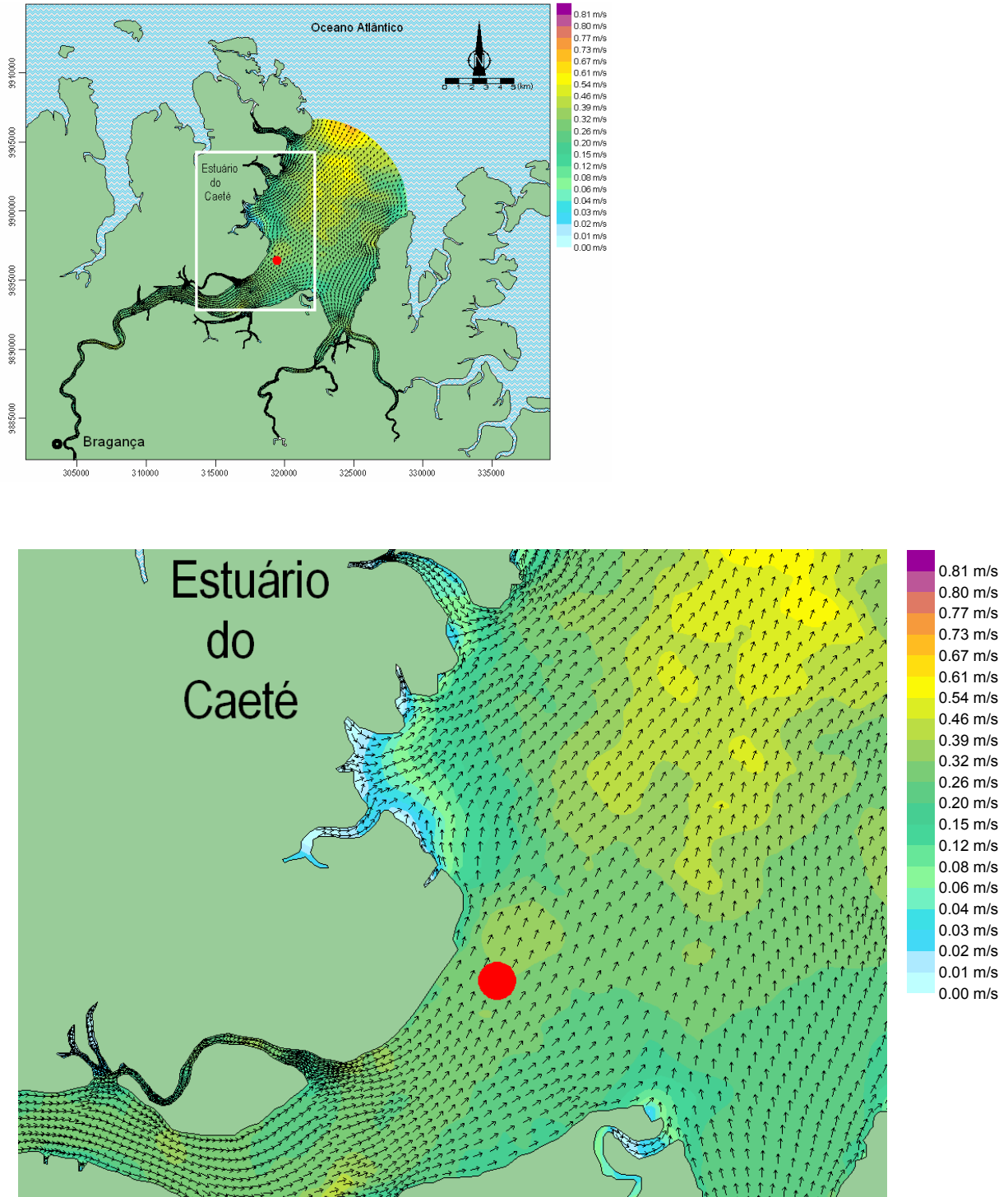


Figura 66: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 6, mostrando em destaque a estação Meio Caeté (em vermelho), onde se observou as velocidades na meia maré vazante, durante uma maré de sizígia.

Simulação 7

A simulação 7 ocorre na estufa de baixamar (maré de sizígia) sendo representado pelo terceiro círculo (Figura 57) ($t = 360000$ segundos – dia 21/1 às 04h00min). Pode-se observar que nesse instante (baixamar) as velocidades das correntes são menores ao longo do estuário variando de 0 m/s a 0,59 m/s (Figura 67).

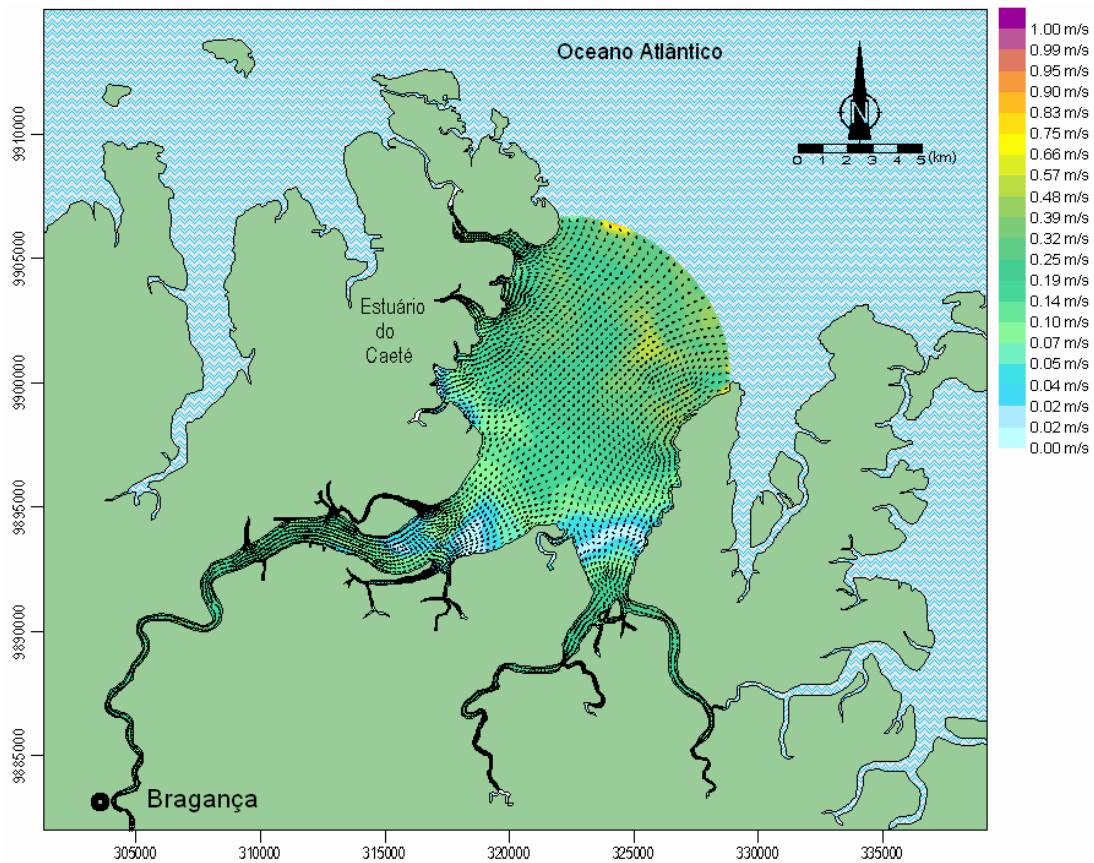


Figura 67: Velocidade da corrente na estufa de baixamar durante uma maré de sizígia.

Simulação 8

Por fim a simulação 8, indicada pelo círculo verde (Figura 57) ($t = 368400$ segundos – dia 21/1 às 06h20min). Nessa simulação, de meia maré vazante, observou-se que os valores de velocidades na maré de sizígia são maiores do que para uma meia maré vazante durante uma maré de quadratura (Figura 68). Isso se deve em função dos bancos de areia aparecerem em maiores quantidades durante a meia maré vazante. Há valores de velocidade nulos nas margens do estuário, pois durante a enchente há a presença de bancos de areia ainda sendo, submergidos pela maré.

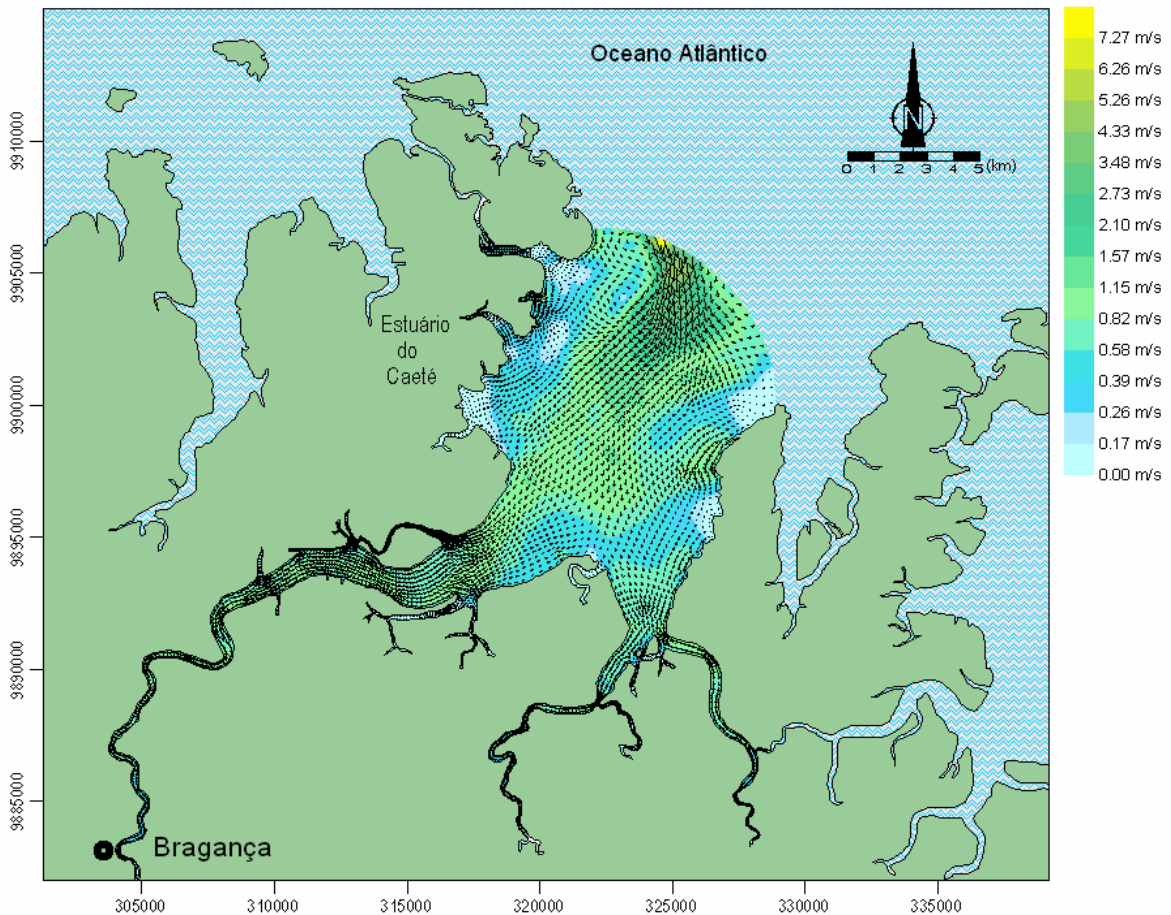


Figura 68: Detalhamento do padrão de correntes na simulação 8 onde se observou as velocidades na meia maré enchente, durante uma maré de sizígia.

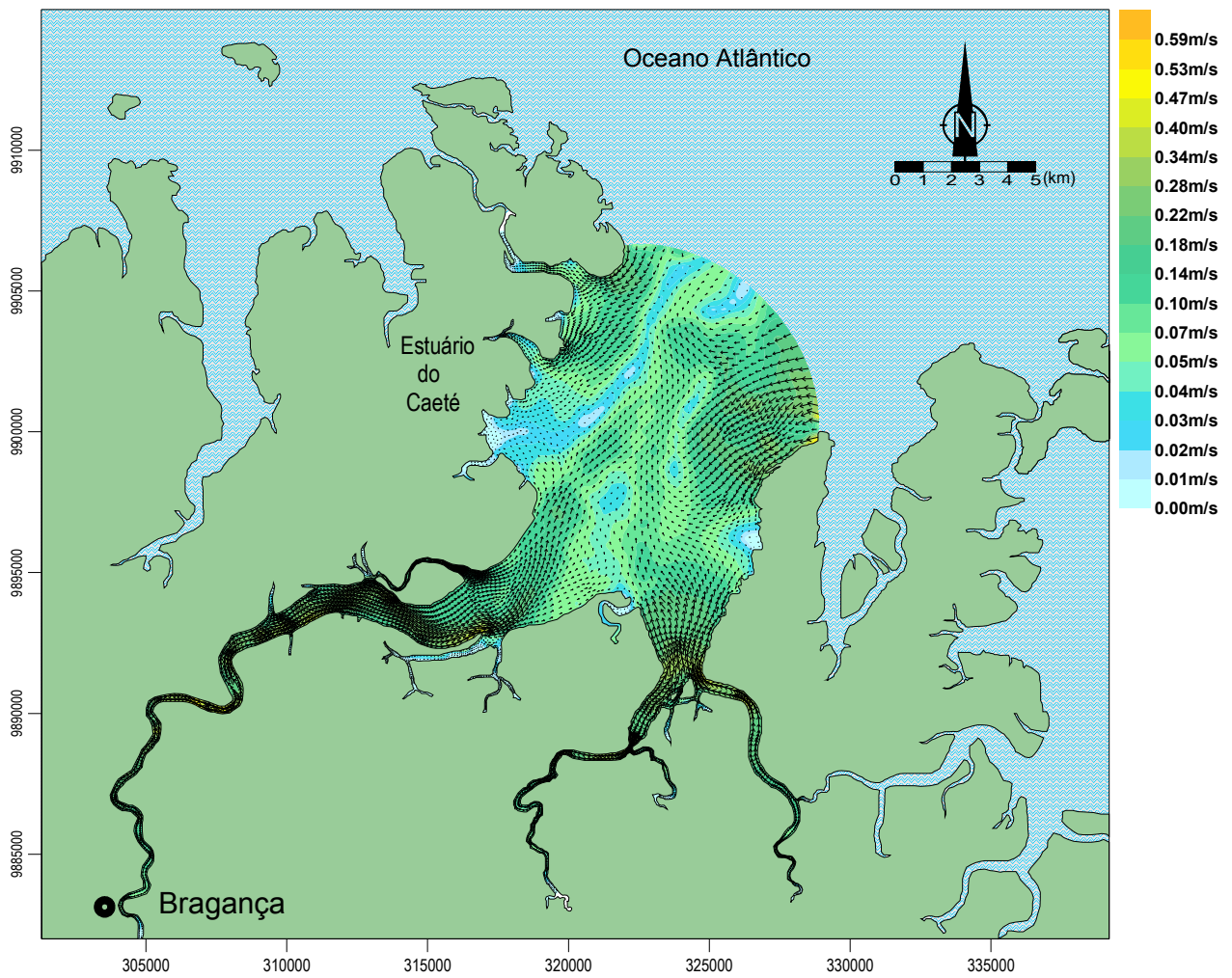


Figura 69: Instante de estufa de baixamar durante uma maré de sizígia.

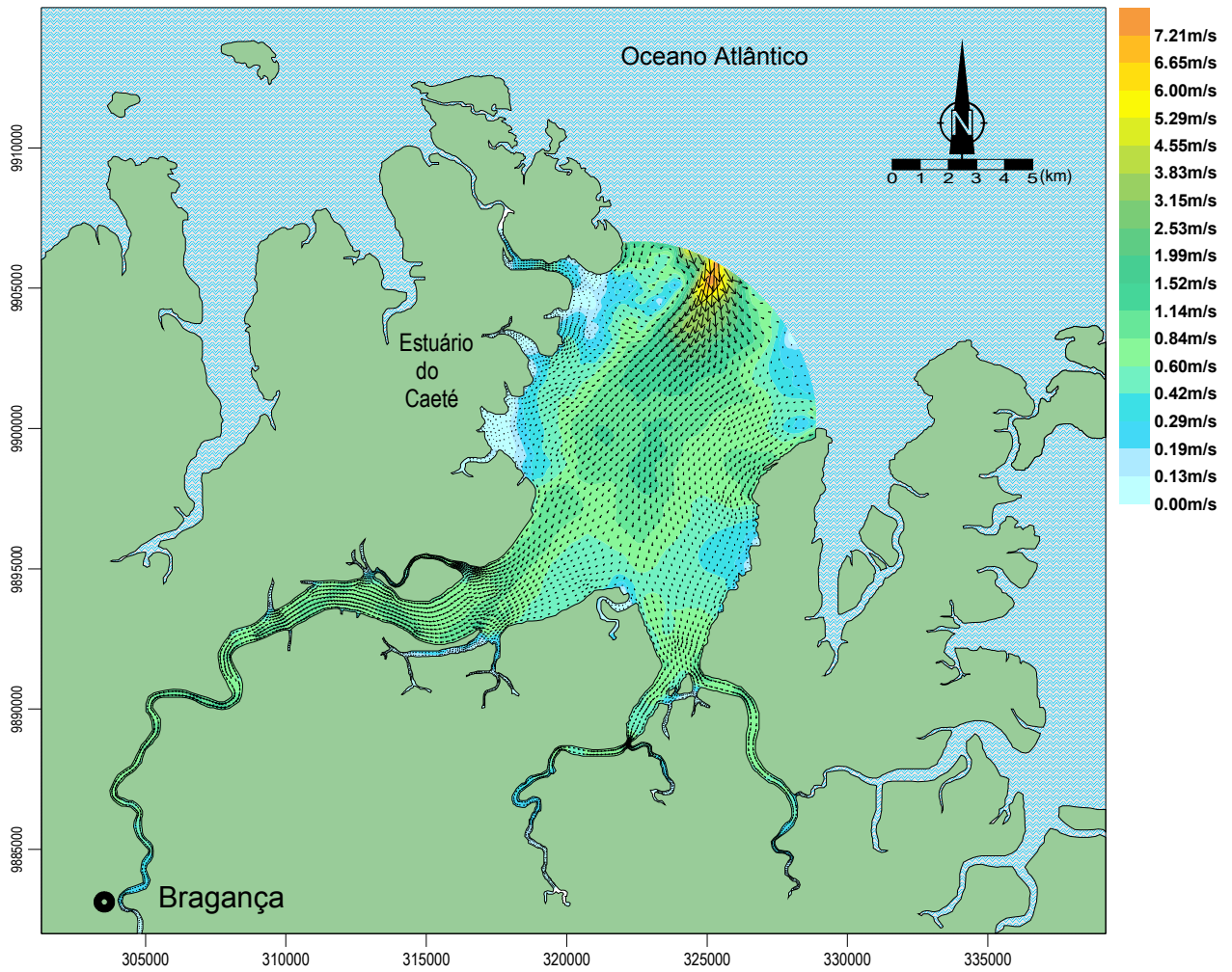


Figura 70: Instante de meia maré vazante durante uma maré de sizígia.

9 CONCLUSÕES

O estuário do rio Caeté recorta uma planície costeira e sofre influência de macromarés semi-diurnas com amplitude média de 5,6 m, correntes com velocidade média de 0,46 m/s e ventos alísios que possuem direção preferencialmente NE com velocidade de 7,5 m/s. É uma área muito complexa para a modelagem estuarina, devido sua extensão, seus bancos de areia e manguezais. Mesmo assim optou-se por esse estuário em virtude da escassez de trabalhos relacionados à modelagem e o interesse em saber qual o comportamento hidrodinâmico da área de estudo.

A importância da utilização do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SISBAHIA) neste trabalho foi indiscutível e contribuiu cientificamente para mostrar os padrões de circulação hidrodinâmica e assim tornar-se um trabalho pioneiro na abordagem da modelagem estuarina. A determinação dos padrões das correntes foi feita através dos resultados fornecidos pelo modelo 2DH, através de campos de vetores representativos da velocidade resultante das componentes x e y , integradas ao longo da coluna d'água. Sendo assim, a aplicação desse modelo foi fundamental para o estudo da circulação hidrodinâmica do estuário do rio Caeté.

A curva de elevação da maré medida em campo, durante 7 dias consecutivos, foi maior na ponte sobre o furo do Maguary (M2), situado na Vila dos Pescadores, com seus valores variando de um mínimo de 0,01 m a um máximo de 5,08, do que na fábrica de gelo da pesqueira Maguary (M1) que apresentou valor mínimo de 0,42 m e máximo de 5,18 m. Em relação à elevação gerada pelo modelo, também foi observado que foi maior na estação definida na ponte sobre o furo do Maguary (mínimo de 0,20 m e máximo de 6,10 m) do que na estação definida na fábrica de gelo da Pesqueira Maguary (mínimo de 0,44 m e máximo de 5,51 m).

As marés medidas em campo e no modelo mostraram boa correlação com o maior valor de amplitude ocorrendo na ponte sobre o furo do Maguary (M2). A amplitude de maré em M2, medida em campo, foi ± 30 cm maior do que em M1, possivelmente em virtude da menor profundidade e geometria do canal.

Em relação à velocidade das correntes medidas em campo pelo correntógrafo, observou-se que os valores variaram de um mínimo de 0,029 m/s, máximo de 1,54 m/s

e média de 46,16 m/s. O maior valor de velocidade (1,54 m/s) foi no instante 208800 segundos, durante uma meia maré vazante.

Nas simulações realizadas neste trabalho (capítulo 8) observou-se que em alguns pontos do estuário as velocidades das correntes de meia maré enchente, tanto na quadratura (4,75 m/s) quanto na sizígia (7,27 m/s), foram maiores do que as meias marés de vazante da quadratura (0,63 m/s) e sizígia (0,81 m/s). Porém, através da simulação gerada no modelo, o local onde o correntógrafo ficou instalado, observou-se que as velocidades se equiparavam quando comparou-se as marés de quadratura (variando aproximadamente de 0,50 m/s a 0,70 m/s) e sizígia (1,54 m/s a 1,65 m/s), demonstrando, assim como observado em campo, a influência do rio Caeté.

A elevação e a velocidade nos pontos medidos em campo foram comparadas com as elevações e velocidades geradas pelo modelo ao longo de dez dias. Ambos os parâmetros (elevação e velocidade) tiveram mesmo comportamento, porém apresentaram diferenças na intensidade. A diferença considerável entre os dados de nível e velocidade obtidos no modelo e os dados de campo, deve-se a falta de dados ou calibração adequada de batimetria na parte fluvial, o que levou o modelo a interpolações que não representam a realidade, além da falta de um mapeamento em escala mais detalhada da parte fluvial modelada.

Sendo assim, foram realizadas simulações onde foi observado o comportamento hidrodinâmico do rio Caeté. Observou-se então que as simulações 2 e 7 (ambas estofa de baixamar) apresentaram mesmo padrão de circulação hidrodinâmica, sendo possível observar através dos mapas maior quantidade de bancos de areia a oeste do estuário do rio Caeté.

A velocidade das correntes durante a meia maré enchente de quadratura (simulação 3) foi menor em relação à mesma situação de sizígia (simulação 8).

REFERÊNCIAS

- ABBOT, M. B., BASCO, D. R. **Computational fluid dynamics, an introduction for engineers**. UK: Logan Group Limited, 1989.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema de informações hidrológicas**. 2007. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **HidroWeb, sistema de informações hidrológicas**. 2006. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/HidroWeb.asp>.
- ALMEIDA, J.R.C. **Evolução paleogeográfica, durante o Cenozóico, da região de Bragança, NE do Estado do Pará**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, Belém, 2002.
- ALVES, M.A.M.S. **Morfodinâmica e sedimentologia da praia de Ajuruteua – NE do Pará**. 2001. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001.
- AMARAL, K.J. **Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos**. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE, Rio de Janeiro, 2003.
- ANDRADE, R.C. **Uma nova abordagem para a solução numérica de problemas de advecção e difusão multidimensional em corpos de água naturais**. 2006. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.
- ARAI, M. et al. Novos dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4. 1994, Belém. **Resumos expandidos**. Belém: SBG, 1994. p. 185-187.
- BARBOSA, G. V.; PINTO, M. N. Geomorfologia da Folha SA.23 (São Luiz) e parte da Folha SA.24 (Fortaleza). In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAM. **Folha SA.23 (São Luiz) e parte da Folha SA.24 (Fortaleza): geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1973. p. II/1-II/26. (Levantamento de Recursos Naturais, 3).
- BEMERGUY R.L.; COSTA, J.B.S. Controle tectônico na evolução do sistema de drenagem da Amazônia. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3. 1991, Rio Claro: SBG, 1991. **Anais**. v 1, p. 103 – 104.
- BEMERGUY, R.L. et al. Tectônica e paleogeografia da calha do rio Amazonas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5. 1995. **Anais**. Gramado, RS, 1995. Porto Alegre. SBG, p. 419-420.

CARVALHO, C.A. **Estudos morfoestratigráfico e sedimentológico dos depósitos holocênicos da Planície Costeira de Maracanã – NE do Pará.** 2007. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geologia em Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2007.

CAVALCANTE, L. M. **Neotectônica na área do Tirambacu (NE do Estado do Pará, NW do Estado do Maranhão).** 2000. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2000.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC), 2007. Disponível em: http://www.cptec.inpe.br/ondas/cidade_atual/Salinopolis.shtml.

COHEN, M.C.L. **Past and current mangrove dynamics on the Bragança Peninsula, Northern Brazil.** 2003 126 f. Tese (Doutorado em Biologia Química) – Universidade de Bremen, Bremen, 2003.

COHEN, M.C.L. et al. Digital elevation model applied to mangrove coast analysis, Amazon Region, Brazil. **Journal of International Environment Creation** 4, p. 1-8. 2001.

COSTA, F.R.C. **Influência neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos na região metropolitana de Belém – Estado do Pará.** 2004. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2004.

COSTA, F.F. **Avaliação geoquímica ambiental de área selecionada da bacia hidrográfica do rio Maracanã (Nordeste do Pará).** 2004. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2004.

COSTA, J.B.S. A neotectônica na Amazônia. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5. 1996. Belém.. **Anais.** Belém: SBG/NO 1996. v 1, p. 35 – 38.

COSTA, J.B.S. et al., Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. GEONOMOS. **Revista de Geociências**, v. 4, n. 2. p. 23-44. 1996.

COSTA, J.B.S. et al., Aspectos da tectônica cenozóica na região do Salgado, litoral Nordeste do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., 1991. Belém. **Resumos Expandidos.** Belém: SBG-Núcleo Norte. p. 156-165. 1991.

CUNHA, E.M.S. **Considerações gerais sobre a Zona Costeira.** 2005 (Cap. 3). p. 126-153. Disponível em: www.tdx.cesca.es/tesis_ub/available/tdx-0422105-33010/3.consider_gerais_zona_costeira.

DALRYMPLE, R.W.; ZAITLIN, B.A.; BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 62, n.6, p. 1130-1146. 1992.

DAVIES, J.L., A morphogenic approach to world shorelines. **Zeitschrift für Geomorphology**, Mortensen Sonderheft, v. 8. p. 127-142. 1964.

DAVIS Jr., R.A. **Depositional systems. A genetic approach to sedimentary geology**. New Jersey: Englewood Cliffs; Prentice-Hall, 1983. 669 p.

DAWSON, W. A.; TILLEY, L.J. **Measurement of Salt Wedge excursion distance in the Duwamish River Estuary, Seattle, Washington, by means of the dissolved-oxygen Gradient. Geological Survey Water-Supply**. Washington, D. C., U. S.: Department of Interior, 1972. p. D1-D27. Paper 1873-D,.

DAY, J. W.; HALL, C. A. S.; KEMP, W. M. **Estuarine ecology**. New York: John Wiley e Sons, 1989. 558p.

DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Centro de Hidrografia da Marinha (CHM)**. 2007. Acessado em 05/01/2007. Disponível em: <http://www.dhn.mar.mil.br>

DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Centro de Hidrografia da Marinha (CHM)**. 2003. Acessado em 22/03/2003. Disponível em: <http://www.dhn.mar.mil.br>

DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN), **Roteiro da Costa Norte**. 1986. 152 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DNAEE). **Inventário das estações pluviométricas**. Brasília: DNAEE. 1996. 150 p.

DYER, K. R., **Estuaries, a physical introduction**. London: John Wiley e Sons, 1973. 140 p.

EL-ROBRINI M. et al., Deposição e assoreamento das rias do Nordeste o Estado do Pará - Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, 1992. São Paulo, Brasil. **Anais**. São Paulo: SBG. 1992. v. 2, p. 79-80.

FAIRBRIDGE, R. W., The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: OLAUSSON, E., AND CATO, I. (EDS.), **Chemistry and biogeochemistry of estuaries**. p. 1-36. 1980.

FARIAS, D.R. **Variabilidade morfo-sedimentar das praias estuarinas do Amor e dos Artistas (Ilha de Caratateua, PA)**. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2006.

FARMER, H.G.; MORGAN, G.W. The salt wedge. In: PROC. THIRD CONF COASTAL ENGINEERING, **Council Wave Res. Cambridge**, Mass., 1953. p. 54-64.

FELIPE, L.B. **Implantação de rotinas de criação de modelos digitais de terreno e visualização científica em PC's e estações gráficas UNIX (sistema Solaris), exemplo de Folha Bauru (SF-22-Z-B). Estado de São Paulo.** 2001. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001.

FUNDAÇÃO PARA OS ESTUDOS DO MAR (FEMAR) - Catálogo Das Estações Maregráficas Brasileiras. Rio de Janeiro: **FEMAR**. 2002. 60 p.

FERREIRA, C.S. Notas estratigráficas sobre o cenozóico marinho do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1, 1982, Belém. **Anais**. Belém: SBG, 1982, v.1, p. 84-88, 1982.

FERREIRA, C.S. Características litopaleontológicas da Formação Pirabas, Estado do Pará. In: CONFERÊNCIA GEOLÓGICA DAS GUIANAS, 4. 1966. Cayena, 1957. **Anais...**, Rio de Janeiro: Avulso Departamento Nacional de Produção Mineral, 4, p. 101-111.

FERNANDES, J.M.G. Paleoeecologia da Formação Pirabas, Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. **Anais**. Rio de Janeiro, 1984, v. 1, p. 84-88, 1984.

FILHO, J.P.; SPILLERE, L.C.; SCHETTINI, C.A.F. Dinâmica de Nutrientes na Região Portuária do Estuário do Rio Itajaí-Açu, SC. **Revista Atlântica**. v. 25(1), p. 11-20. 2003.

FRANKLIN-SILVA, L.; SCHETTINI, C.A.F. Avaliação da dinâmica lateral e dos mecanismos de transporte no estuário no rio Camboriú. **Notas técnicas da FACIMAR**. Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar/Universidade do Vale do Itajaí. v.7, p. 97-108. 2003.

GALLO, M. N. **A influência da vazão fluvial sobre a propagação da maré no estuário do rio Amazonas.** 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

GEYER, W. R.; FARMER, D. M. Tide-induced variations of the dynamics of a salt Wedge estuary. **J. Phys. Oceanogr.**, 19, p. 1060 – 1072. 1989.

GÓES, A. M. et al. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no Nordeste do Estado do Pará. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**, Série Ciências da Terra, 2, 1990. p. 3-15. 1990.

GÓES FILHO, L., et al. Estudo fitogeográfico da folha SA 23 São Luis e SA 24 Fortaleza. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. **PROJETO RADAM**. Rio de Janeiro, DNPM. v. 3. 1973. Levantamento dos Recursos Naturais.

GORINI, M.A.; BRYAN, G.M. The Tectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 48 p. 101-119. 1976.

HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZÓICA CONTINENTAL NO SUDESTE DO BRASIL, 1990. **Anais**. Belo Horizonte: SBG. 1990. v.1, p.766-771.

HAYES, M. O. Morphology of sand accumulations in estuaries. In: CRONIN, L.E. (Ed.) Estuarine research, **geology and engineering**. New York: Acad. Press, 1995. v.2, p. 3-22. 1975.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **2007**. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/html/observacoes.php?lnk=NOAA%20>. Acessado em 10/08/2007.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas**. 1992. 155p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE); CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). 2003. Disponível em: <<http://www.inpe.org.br/cptec>>. Acesso em: janeiro de 2003.

JÚNIOR, A. V. **Paleogeografia e evolução da paisagem do nordeste do estado do Pará e noroeste do Maranhão – Cretáceo ao Holoceno**. 2002. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2002.

KJERFVE, B. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. 1990. UNESCO/UNDF Regional Project "Mangrove Ecosystems in Asia and the Pacific" (RAS/79/002 e RAS/86/120), 79p.

KJERFVE, B; MAGILL, K.E. Geographic and hydrographic characteristics of shallow coastal lagoons. **Mar. Geol.**, v. 8, p. 187-199. 1989.

KJERFVE, B. et al. Temporal and spatial considerations in measuring estuarine water fluxes. In: ESTUARINE COMPARATIONS. V.S. KENNEDY (Ed.), **Academic Press**, New York, p. 37-51.

MANTOVANELLE, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**. 1999. 152 p. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Paraná. Departamento de Geologia, Curitiba 1999.

MACIEL, M. A. **Modelagem do padrão de escoamento no canal da passagem (Vitória - ES)**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Vitória, 2004.

MARTORANO, L.G. et al. Estudos climáticos do estado do Pará, classificação climática (KÖPPEN) e deficiência hídrica (THORNTHWHITE, MATHER). Belém: **SUDAM / EMBRAPA**, SNLCS. 1993. 53p.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo. 2002. Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP). 414 p.

MONTEIRO, M. C. Estudo morfodinâmico de uma praia de macromaré no litoral Amazônico, Ajuruteua-PA (Brasil). **Revista Científica da UFPA**. 2006. Disponível em: <http://www.cultura.ufpa.br/rcientifica/cabecalho.php?conteudo=4.14>. Acessado em 12/04/2007.

MORAES, B.C. et al. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**. v. 35, n. 2, p. 207 – 214. 2005.

OFFICER, C.B. **Physics of estuarine circulation**. In: KETCHUM, B. H. (Ed.). **Estuaries and enclosed seas**. Amsterdam. Elsevier, 1983. v. 26, 15-41 p, (Ecosystems of the World).

PETRI, S. Foraminíferos miocenos da Formação Pirabas. **Bol. Fac. Ciênc. Let.**, Univ. São Paulo, v. 216, n. 16, p. 1 - 78. 1957.

PICKARD G.L. Pickard, Oceanographic features of inlets in the British Columbia mainland coast. **Journal of the Fisheries Research Board of Canadá**, v.18, n. 6, p. 907–999. 1961.

PINHEIRO, R.V.L. **Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do estuário do Guajará**. 1987. 152 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Geociências, Belém, 1987.

PRITCHARD, D.W. **Estuarine modelling: an assessment capabilities and limitations for resource management and pollution control**. Austin: Tracor, 1971. p. 22-33.

PRITCHARD, D. W. What is an estuary: physical viewpoint. In: AUF G. H. (Ed). **Estuaries**. Washington D.C. American Association for the Advancement of Science, 1967. publ. n. 83.

PRITCHARD, D. W., Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. **Journal of Marine Research**, v. 11, p. 106-123. 1952b.

RIBAS, T.M. **Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá**. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

ROCHA, E.J.P.; RIBEIRO, J.B.M.; EL-ROBRINI, M. 2002. Caracterização Climática da Faixa Litorânea PA-MA-PI-CE. **Notas de aula da disciplina oceanografia física**. Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Pará. 16 p.

ROSMAN, P. C. C. Os modelos para recursos hídricos. In: MAGRINI, A. SANTOS, M. A. dos (Ed). **Gestão ambiental em recursos hídricos**. v. 3, Cap. 2, Parte 3, Local: Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE/UFRJ. 2001.

ROSMAN, P.C.C. **Sistema base de hidrodinâmica ambiental (SISBAHIA)**. 2006. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 2006. 151 p. (Referência técnica do SisBAHIA).

ROSMAN, P.C.C. **Documentação sobre módulo de análise & previsão de maré**. 2007. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia. 190 p. (Referência técnica do SisBAHIA).

ROSMAN, P. C. C. Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos. In: ROSMAN, P. C. C. et al. **Métodos numéricos em recursos hídricos 3**, Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. v. 3, cap. 3, 100 p.

ROSMAN, P.C.C. et al. **Métodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos / Fundação COPPETEC, 2001.

ROSSETTI, D. F., Late cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. **Journal of South American Earth Sciences**, v 14, p. 77-89. 2001.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A.M., Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na Região Bragantina, nordeste do estado do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Série Ciência da Terra, v. 1, n. 1, p. 25-74. 1989.

ROY, B., **Méthodologie multicritère d'aide à la décision**. Paris, Economica, 1985. 423 p.

SAMPAIO, M. **Estudo de circulação hidrodinâmica 3D e trocas de massas d'água da Baía de Guanabara – RJ**. 2003. 213 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

SCHUBEL, J. R. Classification of estuaries. In: SCHUBEL, J. R., Ed. **Estuarine environment: estuaries and estuarine sedimentation**. Washington D.C: American Geological Institute. Cap. II, p. 2 - 8. 1971.

SILVA, M.G.L. **Avaliação multitemporal da dinâmica costeira da Praia do Pescador – Bragança (Norte do Brasil)**. 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2001.

SILVA, C.A. **Análise morfoestratigráfica do estuário do rio Marapanim- NE do Pará**. 1998. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém. 1998.

SOTO, Y. J. M. **A Modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR**. 2004. 187 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

SOUZA, R.F. **Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA)**. 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2006.

SOUZA FILHO, P.W.M. **Análise multitemporal e multisensor (TM Landsat e radarsat) da dinâmica de ambientes costeiros dominados por macromaré na Planície Costeira Bragantina-Pará**. 2001. 123 f. Tese (Doutorado em Geologia Química) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001. 1.CD ROM.

SOUZA FILHO, P.W.M. **A Planície Costeira Bragantina (NE do Pará): influência das variações do nível do mar na morfoestratigrafia costeira durante o holoceno**. 1995. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Química) – Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Belém. 1995.

SOUZA FILHO, P.W.M. Tectonic control on the coast zone geomorphology of the northeastern Pará State. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 527-530. 2000.

SOUZA-FILHO, P.W.M.; EL-ROBRINI, M., Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfo-sedimentares da planície costeira bragantina, nordeste do Pará, Brasil. **GEONOMOS**, v. 4, n. 2, p. 1-16. 1997.

TOPÁZIO, E. F. S. **Modelagem de pluma de emissários com T_{90} variável na costa oceânica de Salvador, BA**. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

XAVIER, A. G. **Análise da hidrodinâmica da baía de Todos os Santos (BA)**. 2002. 205 f. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002.