

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR  
PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**DINÂMICA DO SISTEMA ESTUARINO  
TIMONHA / UBATUBA (CEARÁ – BRASIL):  
CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS**

**CAROLINA BRAGA DIAS**

Dissertação apresentada à coordenação do curso de Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de MESTRE.

**Orientador: Jáder Onofre de Morais**

**FORTALEZA – CE  
Julho de 2005**

**CAROLINA BRAGA DIAS**

**DINÂMICA DO SISTEMA ESTUARINO TIMONHA / UBATUBA  
(CEARÁ – BRASIL): CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, outorgado pela Universidade Federal do Ceará. A transcrição de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita em conformidade com as normas da ética científica.

Após defesa pública esta dissertação de mestrado, foi considerada APROVADA pela banca examinadora.

Fortaleza, 11 de julho de 2005.

---

**Dr. Jäder Onofre de Moraes**  
Universidade Estadual do Ceará  
ORIENTADOR

**Examinadores:**

---

**Dr<sup>a</sup>. Carmen Medeiros**  
Universidade Federal de Pernambuco

---

**Dr<sup>a</sup>. Lidriana de Souza Pinheiro**  
Universidade Estadual do Ceará

---

**Dr. Luis Parente Maia**  
Universidade Federal do Ceará

“Algo só é impossível até que alguém duvide  
e acabe provando o contrário.”

Albert Einstein

Aos meus pais Paulo César e Helena Neyla  
e as minhas irmãs Isabella e Paula pelo  
amor, compreensão e dedicação em  
todos os momentos da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jáder Onofre de Moraes, um verdadeiro exemplo de MESTRE a quem associo todo o meu sucesso profissional. Agradeço o incentivo e confiança a mim dedicados e especialmente o esforço pessoal em viabilizar essa pesquisa.

À Professora Lidriana de Souza Pinheiro pelas valiosas contribuições na estruturação desse trabalho e pelo apoio e entusiasmo que também solidificaram uma grande amizade.

À professora Carmen Medeiros pelas observações e discussões que muito contribuíram para o aperfeiçoamento desse trabalho.

Ao professor Luis Parente Maia pelas importantes contribuições e pelas informações compartilhadas pelo projeto **Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE)**.

À toda a equipe do projeto **Diagnóstico Geoambiental e Socioeconômico para Elaboração do Plano de Monitoramento das Áreas Estuarinas e de Manguezais dos Rios Jaguaribe, Malcozinhado, Catu e Timonha, Ceará**, em especial ao professor Marcos José Nogueira de Souza (coordenador deste projeto) que sempre se mostrou disposto à colaborar para o êxito dessa pesquisa.

Ao IBAMA, na pessoa do Chefe do Escritório Regional de Parnaíba Fernando Antônio Lopes Gomes e em especial ao servidor Francisco de Paula Oliveira de Souza “Seu Paulão” que se colocou a nossa inteira disposição quando da realização dos trabalhos de campo.

À equipe do projeto Peixe-Boi / IBAMA em Cajueiro da Praia (Magnus, Ana e Heleno) pelas enriquecedoras informações sobre os recursos naturais da área.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro.

Às Instituições SEMACE, FUNCEME, DNOCS e COGERH pela cessão de dados hidroclimáticos e material geocartográfico.

À Equipe de Bolsistas e Pesquisadores do LGCO / UECE (Davis, Jorge, Luzineide, João Paulo, Miguel, Laldiane, Felipe, Paulo Augusto, João Sérgio, Rony, Marisa, Glacianne, Glairton, Raquel e Léa) pelo apoio durante os trabalhos de campo e de laboratório.

À todos os professores do Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais que muito contribuíram para a minha formação.

Aos Funcionários do LABOMAR que sempre se mostraram dispostos a ajudar no que fosse necessário.

À toda minha família, em especial aos meus avós, Silvandira, José Oilton, José Bessa e Iêda, aos meus tios Paulinho, Nara, Nancy e Clóvis e aos primos Daniel e Virgínia pelo apoio e confiança que os fizeram investir no meu futuro profissional.

Aos meus amigos Luis Ernesto (Biologia / UFC), Aluizio Araújo, Paulo Henrique “PH” e Tatiana Falcão (LGCO / UECE) pela ajuda incondicional e satisfação em poder cooperar para superação do que parecia “IMPOSSÍVEL” (vocês foram fundamentais).

Aos meus estimados amigos de Maranguape, especialmente à Suêrda, Sâmia, Mardônio, Luciana, Bia, Lorena, Jerônimo, Daniele e Valesca pelos inesquecíveis momentos de alegria e descontração que me deram ânimo para superar as dificuldades. (Ôh Luta...!).

À todos da turma de 2003 do Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais (Gleire, Isabel, Janaína, Gil, Lucélia, Gualdino, Marquinhos, Leonardo, Esaú, André, Geraldo, Sérgio e Guelson) pelo companheirismo e bons momentos vividos.

Aos colegas do Laboratório de Biogeoquímica / LABOMAR (Franzé, Saulo, Júnior, Ilene, Edvard) pela presteza e paciência em me ensinar métodos analíticos.

Em fim, a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O sistema estuarino Timonha / Ubatuba está localizado na divisa dos Estados do Ceará e Piauí, 500 km à noroeste de Fortaleza, nordeste do Brasil. A bacia hidrográfica afluyente ao sistema estuarino ocupa uma área de 2.165 km<sup>2</sup>. A porção norte está inserida em terrenos Paleozóicos do Planalto da Ibiapaba, Embasamento Cristalino, Formação Barreiras e depósitos Quaternários enquanto que a porção sul está assentada sobre terrenos Pré-Cambrianos com exumações do Granitóide Chaval. A procura por áreas para expansão da carcinicultura, crescimento urbano e desenvolvimento agroindustrial pode representar o comprometimento da saúde desse ecossistema, considerado o maior do Estado do Ceará. Estes impactos tendem a se incrementar com a construção e operação do açude público Itaúna, com capacidade de armazenamento de 77,5 milhões de m<sup>3</sup>, localizado 17 km à montante da área estuarina. A par destes problemas e considerando as hipóteses de minimizá-los ou elimina-los, este trabalho considerou os elementos estruturais, dinâmicos e controladores do estado de evolução atual do sistema estuarino, contribuindo com informações úteis para o uso adequado e sustentável da área. Os processos hidrodinâmicos e sedimentológicos estão subordinados, sobretudo, ao regime sazonal das precipitações onde somam-se processos de assoreamento da foz pela deriva litorânea e oscilação da maré. A construção do reservatório implicou na redução de 91% da descarga fluvial do rio Timonha apresentando atualmente, uma vazão de 5,6 X 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> ao longo de um ano. A vazão regularizada não é suficiente para promover os processos de mistura e diluição de sais, contribuindo para inversão da salinidade no período e estiagem. No período chuvoso, a salinidade do rio Timonha aumenta progressivamente em direção ao mar com regimes oscilando do limnético (< 0,5) ao euhalino (30,0 à 40,0). Na estiagem, o regime é tipicamente euhalino com fortes indícios de hipersalinização (> 40,0). No Ubatuba, o regime salino variou de polihalino (18,0 à 30,0) a euhalino entre os períodos de chuva e estiagem. Os estuários são do tipo 2a no período chuvoso e do tipo 1a no período de estiagem. O balanço de sal do rio Timonha no período de chuva foi de + 0,3 t enquanto que no período de estiagem foi 0,0 t. No Ubatuba o balanço referente ao período de chuva foi de - 0,1 t e na estiagem foi de - 0,2 t. A profundidade média do sistema é de 5m com máximas observadas no Ubatuba. O substrato é formado predominantemente por areias médias e sedimentos bioclásticos. O total de sedimentos exportados para deriva litorânea, ao longo de um ano, foi de 250 t enquanto que a carga importada foi de 150 t. O volume do prisma de maré no Timonha foi de aproximadamente 3,6 x 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup> e no rio Ubatuba 4,3 x 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>. Considerando o modelo simplificado, o tempo de residência do Timonha é de 1 dia no período de chuva e 5 dias no de estiagem. No Ubatuba esse tempo é de 0,5 dia no período chuvoso e 2 dias na estiagem. Considerando o tempo de residência calculado para cada segmento dos canais estuarinos dos rios Timonha e Ubatuba observa-se que o modelo linear não é o mais representativo para análise da capacidade de diluição do sistema. Com base no modelo segmentado, observa-se que, no Timonha, a área situada entre 3,7 km e 7,0 km de distância do mar assume forte tendência à retenção de água, com tempo de residência equivalente à aproximadamente uma semana. Essa área parece ser a mais inadequada à recepção de descarga direta de efluentes. Em comparação com outros estuários tropicais, o sistema apresenta uma boa capacidade de diluição e baixo tempo residência. A ausência de monitoramento para a correção das vazões liberadas pelo Açude Itaúna em períodos de estiagem prolongados e os processos de assoreamento da foz poderão representar os principais vetores de comprometimento da capacidade de suporte do estuário.

**Palavras – Chave:** Estuários, rio Timonha, Balanço de Água e Sal.

## ABSTRACT

The Timonha / Ubatuba estuarine system is located between Ceará and Piauí States, 500 km northwest of Fortaleza City, in Northeast Brazil. The hydrographic tributary basin of this estuarine system has an area of 2 165 km<sup>2</sup>, and lies in Paleozoic lands of the Ibiapaba Plateau, Embasamento Cristalino, Formação Barreiras and Quaternary deposits. It is important to stand out that the south portion of this estuarine basin is inserted in Pre-Cambrian lands where may be seen Granitóide Chaval exhumed inside of the system. The search for areas suitable to shrimp farming and urban/agroindustrial development may represent a potential risk to this ecosystem, which is considered the largest of the Ceará State. These impacts tend to increase with the construction and operation of the Itaúna reservoir, with a capacity of 77.5 million m<sup>3</sup> and located 17 km from the estuarine basin. The aim of this study was considering the structural, dynamic and controlling elements of the current state of the estuarine system, to contribute with useful information to the suitable and sustainable use of this ecosystem. The hydrodynamic and sedimentologic processes are dominated by the rainy seasons plus the sedimentation processes on the mouth by longshore current and tide oscillation. The reservoir resulted in the reduction of 91% of the Timonha river discharge presenting an outflow of  $5.6 \times 10^8$  m<sup>3</sup> in a year. The regularized outflow is not enough to promote the mixing and salt dilution processes, contributing to the inversion of salinity in the drought season. In the rainy season, the salinity of Timonha River grows gradually seaward and varied from limnetic (< 0.5) to euhaline (30.0 at 40.0). In the dry season, predominated the euhaline pattern with strong signals of hipersalinization. In Ubatuba river, the salinity varied from polihaline (18.0 at 30.0) to euhaline between the rainy and drought periods. The estuaries are type 2a in the rainy period and 1a in the drought period. The salt balance of Timonha river in the rainy period was + 0.3 ton, while in the dry period was 0.0 ton. In Ubatuba river the salt balance was - 0.1 ton and in the dry period was - 0.2 ton. The average depth of the system is 5 m and the deeper depths were seen in Ubatuba river. The bottom is made up predominantly by medium sand and biogeneous sediments. The total of sediments exported to the longshore current, in a year, was 250 tons and the load imported was 150 tons. The volume of the tide prism in Timonha river was nearly  $3.6 \times 10^7$  m<sup>3</sup> and in Ubatuba river  $4.3 \times 10^7$  m<sup>3</sup>. Considering the simplified model, the period of water residence is 1 day in the rainy period and 5 days in dry period. This period, in Ubatuba river, is 0.5 day in the rainy period and 2 days in the dry period. Considering the water residence time calculated to each segment of the channels of Timonha and Ubatuba Estuaries, it was observed that the linear model is not applicable to the system dilution capacity analysis. Based on the segmented model, it was verified, in Timonha river, that the area located between 3,7 km and 7,0 km from the sea, has a strong tendency to water retention and reaches a residence time equivalent to almost a week, been inadequate to the direct emission of effluent. Comparing to other tropical estuaries, the system presents a good dilution capacity and a low residence time. The lack of monitoring to correct the outflows released by Itaúna Dam in long dry periods and the deposition processes on the mouth river will represent the main elements to jeopardize the support capacity of the estuary.

**Key-words:** Estuaries, Timonha river, Salt and Water Balance.



## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE ABREVIATURAS

### RESUMO

### ABSTRACT

<b>1. Introdução</b>	17
<b>2. Objetivos</b>	19
2.1. Geral	19
2.2. Específicos	19
<b>3. Características Gerais da Área de Estudo</b>	20
<b>4. Fundamentação Teórica</b>	27
4.1. Estuários	27
4.1.1. Origem Geológica dos Estuários	29
4.1.2. Dinâmica Estuarina	30
4.1.3. Sedimentologia Estuarina	36
<b>5. Metodologia</b>	39
5.1. Atividades de Reconhecimento Básico	39
5.2. Experimentos de Campo	40
5.3. Técnicas de Laboratório	44
5.4. Análise dos Dados	46
<b>6. Resultados e Discussões</b>	47
6.1. Hidrologia da Bacia de Drenagem	47
6.1.1. Contextualização Hidroclimática	49
6.1.2. Características do Escoamento Superficial	53
6.2. Balanço de Água	57
6.3. Características Hidrológicas do Sistema Estuarino	61
6.3.1. Salinidade	61
6.3.2. Condutividade Elétrica	71
6.3.3. Temperatura	79
6.4. Balanço de Sal	85
6.5. Processos de Circulação e Mistura	87

6.5.1. Correntes	87
6.5.2. Marés	99
6.5.3. Regime de Ventos	101
6.6. Diagrama de Classificação	104
6.7. Morfologia da Bacia Estuarina	107
6.8. Processos Hidrossedimentológicos	114
6.8.1. Características dos Depósitos Sedimentares	114
6.8.2. Transporte de Sedimentos	123
6.9. Capacidade de Diluição e suas Implicações Ambientais	129
<b>7. Conclusões</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>138</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Localização geográfica da área de estudo.....	20
Figura 02: Fotografias da região onde ocorrem afloramentos do embasamento cristalino (Chaval – CE).....	21
Figura 03: Sistema estuarino Timonha / Ubatuba.....	24
Figura 04: Fotografias do açude Itaúna: (a) sangradouro; (b) tomada d’água.....	26
Figura 05: Diagrama esquemático das ZR, ZM e ZC e delimitação funcional de um sistema estuarino hipotético (extraído de Miranda <i>et al.</i> , 2002).....	28
Figura 06: Mapa do sistema estuarino Timonha / Ubatuba indicando as estações onde foram realizados os experimentos de campo.....	41
Figura 07: Bacia hidrográfica dos rios Timonha e Ubatuba com a divisão em sub-bacias e localização das estações climatológicas e postos pluviométricos.....	48
Figura 08: Flutuações diurnas da temperatura na Estação Base.....	51
Figura 09: Vazões do açude Itaúna monitoradas pela COGERH em 2004.....	56
Figura 10: Descarga fluvial dos rios Timonha e Ubatuba considerando as hipóteses de ausência (SR) e presença (CR) de barramento.....	56
Figura 11: Distribuição longitudinal da salinidade média da coluna d’água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	61
Figura 12: Distribuição longitudinal da salinidade média da coluna d’água do rio Ubatuba ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	65
Figura 13: Distribuição horizontal da salinidade média da coluna d’água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a baixa-mar e a enchente da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.....	68
Figura 14: Distribuição horizontal da salinidade média da coluna d’água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a preamar e a vazante da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.....	70
Figura 15: Distribuição longitudinal da condutividade média da coluna d’água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	72

Figura 16: Distribuição longitudinal da condutividade média da coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	75
Figura 17: Distribuição horizontal da condutividade média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a baixa-mar e a enchente da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.....	77
Figura 18: Distribuição horizontal da condutividade média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a preamar e a vazante da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.....	78
Figura 19: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período chuvoso de 2004.....	80
Figura 20: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período de estiagem de 2004.....	81
Figura 21: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Ubatuba ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período chuvoso de 2004.....	82
Figura 22: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Ubatuba ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período de estiagem de 2004.....	83
Figura 23: Distribuição horizontal da temperatura média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a baixa-mar e preamar nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.....	84
Figura 24: Aumento e decréscimo exponencial dos valores médios da salinidade longitudinal do estuário do rio Timonha em um ciclo completo de maré de sizígia nos períodos de chuva e estiagem de 2004.....	86
Figura 25: Aumento e decréscimo exponencial dos valores médios da salinidade longitudinal do estuário do rio Ubatuba em um ciclo completo de maré de sizígia nos períodos de chuva e estiagem de 2004.....	86
Figura 26: Direção e intensidade das correntes para baixa-mar de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.....	88
Figura 27: Direção e intensidade das correntes para fase de enchente da maré de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.....	89
Figura 28: Direção e intensidade das correntes para preamar de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.....	90

Figura 29: Direção e intensidade das correntes para fase de vazante da maré de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.....	91
Figura 30: Direção e intensidade das correntes para baixa-mar de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.....	94
Figura 31: Direção e intensidade das correntes para fase de enchente da maré de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.....	95
Figura 32: Direção e intensidade das correntes para preamar de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.....	96
Figura 33: Direção e intensidade das correntes para fase de vazante da maré de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.....	97
Figura 34: Variação da maré de sizígia no Porto de Luís Correia e em Barra Grande referente ao mês de fevereiro de 2004 – 07.02.04 (período chuvoso).....	100
Figura 35: Variação da maré de sizígia no Porto de Luís Correia e em Barra Grande referente ao mês de novembro de 2004 – 11.11.04 (período de estiagem).....	101
Figura 36: Direção e velocidade dos ventos na região de Barra Grande, obtidas durante os experimentos de chuva (fevereiro de 2004).....	102
Figura 37: Direção e velocidade dos ventos na região de Barra Grande, obtidas durante os experimentos de estiagem (novembro de 2004).....	102
Figura 38: Diagramas de estratificação x circulação referentes a cada fase da maré e estação do ano elaborado a partir da proposta de Hansen & Rattray (1966).....	105
Figura 39: Diagrama de estratificação x circulação elaborado com base em valores médios obtidos ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia (Hansen & Rattray, 1966).....	106
Figura 40: Batimetria do sistema estuarino Timonha / Ubatuba realizada pela DHN em 1964.....	107
Figura 41: Batimetria referente ao ano de 2004 com cotas obtidas durante as sondagens de campo.....	109
Figura 42: Perfis batimétricos das seções transversais ao leito fluvial dos rios Timonha e Ubatuba.....	110
Figura 43: Bancos de sedimentação localizados na foz do sistema estuarino.....	111
Figura 44: (a) – Evidências de erosão em Cajueiro da Praia. (b) – Bancos arenosos que bordejam a faixa de praia em Pontal das Almas.....	113

Figura 45: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Timonha coletadas durante o período chuvoso de 2004.....	114
Figura 46: (a) – Associação de sedimentos bioclásticos possivelmente cimentados por calcita. (b) – Depósito de conchas na porção norte da Ilha Grande. (c) – Área de acumulação de biodetritos na margem oeste estuarina.....	115
Figura 47: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Timonha coletadas durante o período de estiagem de 2004.....	115
Figura 48: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Ubatuba coletadas durante o período chuvoso de 2004.....	116
Figura 49: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Ubatuba coletadas durante o período de estiagem de 2004.....	117
Figura 50: Distribuição longitudinal dos valores de assimetria dos sedimentos de fundo do rio Timonha durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	118
Figura 51: Distribuição longitudinal dos valores de assimetria dos sedimentos de fundo do rio Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	119
Figura 52: Distribuição longitudinal dos valores de curtose dos sedimentos de fundo do rio Timonha durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	119
Figura 53: Distribuição longitudinal dos valores de curtose dos sedimentos de fundo do rio Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	120
Figura 54: Distribuição longitudinal dos valores do grau de seleção dos sedimentos de fundo do rio Timonha durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	121
Figura 55: Distribuição longitudinal dos valores do grau de seleção dos sedimentos de fundo do rio Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	122
Figura 56: Descarga de sólidos suspensos totais do complexo estuarino Timonha / Ubatuba referente ao período chuvoso de 2004.....	125
Figura 57: Descarga de sólidos suspensos totais do complexo estuarino Timonha / Ubatuba referente ao período de estiagem de 2004.....	126
Figura 58: Balanço entre as descargas de enchente e vazante do sistema estuarino Timonha e Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.....	128

Figura 59: Tempo de residência acumulativo determinado para cada segmento do canal do rio Timonha referente ao período de chuvoso.....	130
Figura 60: Perfil morfológico longitudinal do canal estuarino do rio Timonha com estaque para a área com maior tempo de residência.....	131
Figura 61: Tempo de residência acumulativo determinado para cada segmento do canal do rio Ubatuba referente ao período de chuvoso.....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Estimativa das vazões do açude Itaúna referentes ao ano de 2004.....	26
Tabela 02: Localização geográfica das estações de monitoramento em UTM.....	42
Tabela 03: Coordenadas dos pontos de amostragem sedimentológica nas margens em UTM.....	43
Tabela 04: Esquema tempo / profundidade / granulação adotados na pipetagem.....	45
Tabela 05: Sub-bacias que compõem a bacia de drenagem dos rios Timonha e Ubatuba.....	47
Tabela 06: Dados de localização das estações climatológicas do INMET.....	49
Tabela 07: Dados de localização das estações pluviométricas da FUNCEME.....	49
Tabela 08: Médias mensais de temperatura e evaporação obtidas através das estações do INMET.....	51
Tabela 09: Médias mensais de precipitação nos postos da FUNCEME com mais de 25 anos de monitoramento.....	52
Tabela 10: Médias mensais de precipitação nos postos da FUNCEME em 2004.....	52
Tabela 11: Variação do coeficiente de escoamento superficial e da descarga fluvial de cada sub-bacia ( $m^3 s^{-1}$ ) com base nas médias históricas.....	54
Tabela 12: Variação do coeficiente de escoamento superficial e da descarga fluvial de cada sub-bacia ( $m^3 s^{-1}$ ) com base nos dados de 2004.....	55
Tabela 13: Variáveis relacionadas ao balanço de água do sistema estuarino Timonha / Ubatuba com base nas séries de dados históricos.....	58
Tabela 14: Variáveis relacionadas ao balanço de água do sistema estuarino Timonha / Ubatuba elaboradas para o ano de 2004.....	59
Tabela 15: Variáveis relacionadas ao balanço de água do sistema estuarino Timonha / Ubatuba elaboradas para os meses em que foram realizados os experimentos de campo - 2004.....	60

Tabela 16: Áreas médias das seções transversais dos rios Timonha e Ubatuba.....	108
Tabela 17: Características morfológicas do sistema estuarino Timonha / Ubatuba.....	108
Tabela 18: Classificação dos sedimentos de fundo do sistema estuarino Timonha / Ubatuba de acordo com Folk (1959).....	122
Tabela 19: Variação sazonal das concentrações de sólidos suspensos totais (mg l <sup>-1</sup> ) no sistema estuarino Timonha / Ubatuba (2004).....	124

## LISTA DE ABREVIATURAS

BIRD - Banco Interamericano de Desenvolvimento

CLC - Camada Limite Costeira

COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos

CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

GPS - Sistema de Posicionamento Global

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

IEPRO - Instituto de Estudos, Pesquisas e Projetos da UECE.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

LGCO - Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica

PROURB - Projeto de Desenvolvimento Urbano e Gestão dos Recursos Hídricos

SEMACE - Superintendência Estadual do Meio Ambiente

SRH - Secretaria dos Recursos Hídricos do Governo do Estado do Ceará

SST - Sólidos Suspensos Totais

SUDENE - Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

TMG - Tempo de Greenwich

UECE - Universidade Estadual do Ceará

UFC - Universidade Federal do Ceará

UFF - Universidade Federal Fluminense

UTM - Sistema de Projeção Universal Transversa de Mercator

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

ZM - Zona de Mistura

ZR - Zona de Maré do Rio

ZTM - Zona de Turbidez Máxima



## 1. INTRODUÇÃO

Em geral, os estuários são áreas de alta produtividade biológica natural. Junto com as áreas de ressurgências e as baías, as áreas costeiras estuarinas, embora correspondam a apenas 10% da superfície marinha, produzem mais de 95% do alimento que o homem captura do mar (CIRM, 1981). Segundo Caddy & Sharp (1986) a drenagem terrestre contribui para essa alta produtividade através do carreamento de sais, nutrientes dissolvidos e materiais orgânicos.

Em regiões tropicais, os estuários dão suporte ao desenvolvimento de manguezais. Esses ecossistemas, que podem ocorrer a partir das desembocaduras fluviais até onde há influência da maré, desempenham papel fundamental na pesca e aquicultura (Miranda *et al.*, 1988) funcionando como berçário para diversas espécies de peixes, moluscos, crustáceos, dentre outros.

De um modo geral, os impactos que ocorrem no próprio estuário, conjugados aos da bacia hidrográfica e aos oriundos de processos costeiros, têm grande efeito sobre o sistema estuarino, resultando num complexo mosaico de atividades extremamente atuantes sobre a dinâmica estuarina.

Agricultura, desmatamento, mineração, indústria e urbanização são responsáveis pelo incremento no aporte de sedimentos fluviais gerando assoreamento e aumento da turbidez (Patchineelam *et al.*, 1999). Essas atividades também lançam substâncias tóxicas que podem ser encontradas diluídas na água, agregadas ao substrato superficial ou transportadas sob a forma de pluma em suspensão para o estuário (Schoellhamer, 1996).

Por outro lado, a construção de represas próximas às áreas estuarinas, além de reduzir a descarga fluvial e o aporte de nutrientes para zona costeira, aumenta a intrusão da maré e modifica os processos hidrodinâmicos à jusante. A existência de barragens implica na passagem de um regime fluvial para uma zona de maré dinâmica, passando de um escoamento permanente a um movimento alternativo com períodos de imobilidade (Fidelman, 1999). Os ecossistemas locais também sofrem impactos que afetam organismos aquáticos e terrestres. A ausência dos períodos sazonais de cheia e de seca altera fortemente os ciclos de crescimento e reprodução de muitos vegetais e animais, reduzindo ou até extinguindo suas populações (Marins *et al.*, 2003).

No Estado do Ceará a construção de barragens é uma prática comum. O problema da escassez da água, associado ao crescimento acelerado da população ocorrido nos últimos anos, vem provocando o aparecimento de regiões cujas potencialidades hídricas estão esgotadas ou sujeitas a racionamento em períodos de estiagem prolongados (ANB, 1997).

Essa demanda hídrica, imposta pelas adversidades climáticas e geológicas, tem impulsionado cada vez mais à implementação de projetos que visam aumentar a disponibilidade de água e melhorar a qualidade de vida da população.

Essa tendência pôde ser constatada por meio das ações referentes ao Projeto de Desenvolvimento Urbano e Gestão dos Recursos Hídricos – PROURB, desenvolvido pelo Governo do Estado do Ceará. Esse projeto, dentre outros produtos, viabilizou a construção do açude Itaúna e do sistema de adução Chaval / Barroquinha, obras que proporcionaram o acesso fácil e rápido à água potável para a população desses dois municípios e assim, contribuíram para o desenvolvimento econômico da região. No entanto, assim como na maioria dos projetos, a carência de estudos diagnósticos detalhados a cerca dos processos que regem a dinâmica dos sistemas naturais constitui-se numa ameaça a sustentabilidade dos ecossistemas e comprometimento das suas potencialidades.

Dessa forma, esse estudo se propôs a caracterizar os processos físicos atuantes na área estuarina à jusante do açude Itaúna, integrando elementos estruturais e dinâmicos aos mecanismos vinculados à ação antrópica. Salienta-se que a formulação hidrodinâmica dos processos de transporte, circulação e mistura representa conhecimento básico indispensável aos estudos interdisciplinares que se destinam à elaboração de diretrizes de manejo compatíveis com a vulnerabilidade do sistema.

Nessa pesquisa, foram utilizados modelos numéricos, baseados em séries históricas de parâmetros hidroclimáticos, para simular o regime de escoamento fluvial apresentado pela bacia hidrográfica dos rios Timonha e Ubatuba. Assim foi possível estimar o comportamento desse sistema estuarino antes e depois da construção do açude Itaúna e propor critérios para avaliação de impactos ambientais.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Caracterizar os processos hidrodinâmicos e sedimentológicos do sistema estuarino Timonha / Ubatuba para o uso adequado da área.

### **2.2. Específicos**

- Obter perfis batimétricos atualizados relacionando-os à migração dos bancos de areia;
- Simular a descarga fluvial da bacia de drenagem pelo escoamento superficial antes da construção do açude Itaúna;
- Avaliar os efeitos das variações sazonais na descarga de água doce;
- Identificar a variabilidade espacial das propriedades hidrológicas e da circulação durante o ciclo de maré;
- Calcular o transporte de sal e de sedimentos na Zona de Mistura;
- Classificar o sistema estuarino através do diagrama de Circulação x Estratificação de Hansen & Rattray;
- Avaliar a capacidade de diluição do sistema estuarino e suas implicações ambientais.

### 3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

O sistema estuarino Timonha / Ubatuba localiza-se no litoral noroeste do Estado do Ceará, limite interestadual com o Estado do Piauí, a aproximadamente 500 km de Fortaleza (Figura 01). A planície flúvio-marinha constituída por esse sistema ocupa uma área de 68 km<sup>2</sup> encaixada entre terrenos da Formação Barreiras e do Embasamento Cristalino.



Figura 01: Localização geográfica da área de estudo.

Os afloramentos de rochas Pré-Cambrianas bordejam o limite à montante da bacia estuarina próximo à sede do município de Chaval, cuja litologia é representada por micaxistos, quartzitos e paragneisses da Formação Goiabeiras e por exumações do Granitóide Chaval (Torquato, 1985). Costa *et al.*, (1973) definiram esse granitóide como um granito porfiróide grosseiro, com porfiroblastos de feldspato cinza de até 5 cm de dimensão, caoticamente distribuídos em uma matriz escura constituída de biotita, quartzo e outros grãos de feldspato menores.



Figura 02: Fotografias da região onde ocorrem afloramentos do embasamento cristalino (Chaval – CE).

Em Chaval observa-se a transição brusca entre terrenos Pré-Cambrianos e Cenozóicos com sedimentos da Formação Barreiras e de planícies flúvio-marinhas (Figura 02). A Formação Barreiras é constituída predominantemente por arenitos argilosos, conglomerados e nódulos lateríticos (CPRM, 2003). Os sedimentos são mal selecionados notando-se intercalações de material grosseiro com fácies conglomeráticas. Os efeitos da lixiviação justificam os baixos percentuais de sedimentos finos (Souza, 2000). As áreas interfluviais constituem os tabuleiros litorâneos, terrenos firmes, estáveis, com topografia plana e solos espessos, propícios à expansão urbana e onde as condições de estabilidade ambiental não oferecem maiores empecilhos ao uso e ocupação (MMA, 2002). Já a planície flúvio-marinha, é área de uso e acesso restrito por imposições legais (Brasil, 2000). Caracteriza-se por apresentar solos lodosos, negros e profundos, sujeitos à inundações, onde o húmus alcalino sofre intenso processo de fermentação, permitindo a fixação de mangues (Souza, 2000).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema atmosférico controlador das condições climáticas na região estudada (Souza, 2000). A ZCIT é uma região de confluência dos ventos alísios de nordeste e sudeste, caracterizada por intensa

nebulosidade e baixa pressão atmosférica (Maia, 1998). Seu posicionamento varia de 14° N a 2° S com um período de um ano (Ceará, 1994) e sua aproximação produz condições favoráveis à precipitações pluviométricas. Durante a maior parte do ano a ZCIT se mantém ao norte. A partir de fevereiro esse sistema começa a deslocar-se para sul estando sobre o território cearense entre os meses de março e maio (correspondentes à quadra chuvosa).

De acordo com ANB (1997), utilizando a classificação climática de Köppen, o clima da região estuarina dos rios Timonha e Ubatuba é tropical, quente e úmido. O período chuvoso inicia-se em janeiro prolongando-se até junho o que corresponde ao verão e outono do hemisfério sul.

A precipitação pluviométrica anual incidente sobre a área estuarina é de aproximadamente 917,00 mm com cerca de 97,5% ocorrendo no primeiro semestre do ano. Durante os meses de estiagem o total precipitado é de aproximadamente 23 mm enquanto que na época chuvosa esse montante é de 894 mm. Os dados de pluviometria acima relacionados se referem às séries históricas (1979/2004) de informações coletadas no posto da FUNCEME localizado na sede de Chaval. As demais grandezas meteorológicas foram obtidas através da estação climatológica do INEMET - Acaraú. Essa estação forneceu dados históricos entre os anos de 1976 e 1988 mostrando-se a mais representativa para área por está situada na zona costeira, 125 km à leste da área de estudo.

Na região estuarina dos rios Timonha e Ubatuba a distribuição das temperaturas apresenta pequenas variações ao longo do ano. Durante o período chuvoso (janeiro a junho) a média das temperaturas máximas é 30,5° C enquanto que, durante a estiagem, esse valor sobe para 31,8° C. O mesmo não ocorre com a média das temperaturas mínimas que, durante a época chuvosa é de 22,7° C e, no período oposto, 22,6° C. Nota-se que o regime térmico da região é caracterizado por temperaturas pouco amenas, com média anual em torno de 26,8° C e amplitude de 1,8° C.

A evaporação total anual é da ordem de 2.400 mm sendo 65% dessa taxa correspondente à estação seca. A média mensal é 202,25 mm, com mínima em abril (91mm) e máxima em outubro (291 mm), o que reflete a alta insolação a qual a região está sujeita. Em média, são 2.885 horas/ano de exposição ao sol, correspondendo a 33% do tempo total de um ano. A umidade relativa do ar se mantém alta durante todo o ano (média 75,8%). As máximas são registradas entre março e maio (84%) e mínimas entre setembro e novembro (70%). Essas variações mensais estão intimamente relacionadas às irregularidades temporais do regime pluviométrico.

Os ventos predominantes na região têm velocidade média anual de  $5,2 \text{ m s}^{-1}$  variando sazonalmente em intensidade e direção. No primeiro semestre são provenientes principalmente do quadrante SE e possuem velocidades mais moderadas, média de  $4,1 \text{ m s}^{-1}$ . A partir de junho tornam-se mais fortes, velocidade média de  $6,3 \text{ m s}^{-1}$ , soprando preferencialmente do quadrante NE (ANB, 1997). Vale destacar que o regime de ventos atuantes na área estuarina também sofre oscilações diárias decorrentes principalmente da influência das brisas.

O rio Timonha forma-se a partir da confluência dos rios Trapiá e Grande, ambos com nascentes localizadas na porção setentrional do Planalto da Ibiapaba, município de Viçosa do Ceará. Sob o controle geológico de coberturas sedimentares da Formação Serra Grande, os afluentes do rio Timonha escoam seguindo um padrão de drenagem paralelo até unirem-se próximo a localidade de Pessoa Anta, distrito de Granja. A cabeceira do rio Ubatuba também está localizada no Planalto da Ibiapaba, numa região próxima ao distrito de Padre Vieira, em Viçosa do Ceará. Esse rio, que nasce na região de contato entre os depósitos sedimentares paleozóicos e o Embasamento Cristalino, escoam pela vertente ocidental influenciado pelo controle estrutural de áreas fraturadas.

Antes de chegar à planície flúvio-marinha, no entanto, os rios Timonha e Ubatuba escoam por uma extensa área de tabuleiros e superfícies pediplanadas apresentando padrão de drenagem sub-dendrítico com tributários unindo-se ao rio principal em ângulos retos (ANB, 1997). As planícies de acumulação fluvial relacionadas a esses rios dispõem-se longitudinalmente ao longo do canal com deposição favorecida pela suavização topográfica.

Atualmente, em decorrência da construção do açude Itaúna, a água doce que chega ao sistema estuarino é proveniente do escoamento superficial de uma área de aproximadamente  $1.400 \text{ km}^2$  e das vazões liberadas por este reservatório. O regime de escoamento da bacia de drenagem é intermitente exorréico subordinado, sobretudo à sazonalidade hidroclimática. Ressalta-se, no entanto, que a regularização do escoamento fluvial do rio Timonha pela construção do açude Itaúna, proporcionou a perenização do baixo curso desse rio. Os recursos hídricos subterrâneos da bacia de drenagem são representados pelas formações sedimentares que ocupam o seu baixo curso e/ou encontram-se dispersas em blocos isolados nas regiões do médio e alto curso (dunas, Formação Barreiras e aluviões). Os aquíferos cristalinos são representados pelo Complexo Granja e pelo Grupo Martinópole.

Além dos rios Timonha e Ubatuba, considerados os mais importantes por apresentarem maior descarga fluvial, a bacia estuarina recebe contribuição de outros cursos d'água de menor porte, são eles: rio das Almas, rio da Chapada, rio São João da Praia, rio

Camelo e rio Carpina. Na área estuarina a drenagem é caracteristicamente anastomosada formando um complexo sistema de canais e ilhas fluviais que evidenciam processos evolutivos dominados por intensa sedimentação (Consórcio BIRD, IEPRO, FUNCEME, SRH, 2004). A Ilha Grande, com 20 km<sup>2</sup> de área, é a maior do sistema e está situada na região de confluência final entre os rios Timonha e Ubatuba. Além desta existem diversas outras ilhas fluviais delimitadas por canais sinuosos que interligam os rios principais (Figura 03).

A única ligação do sistema com o mar ocorre entre as praias de Cajueiro/PI e Pontal das Almas/CE, na região denominada Barra Grande. A morfologia da foz é marcada pela presença de extensos bancos arenosos que se prolongam mar adentro por mais de 3 km. Esses bancos, que emergem na baixa-mar (DNH, 1964), constituem-se em obstáculos à hidrodinâmica à medida que contribuem para o retardo da maré.

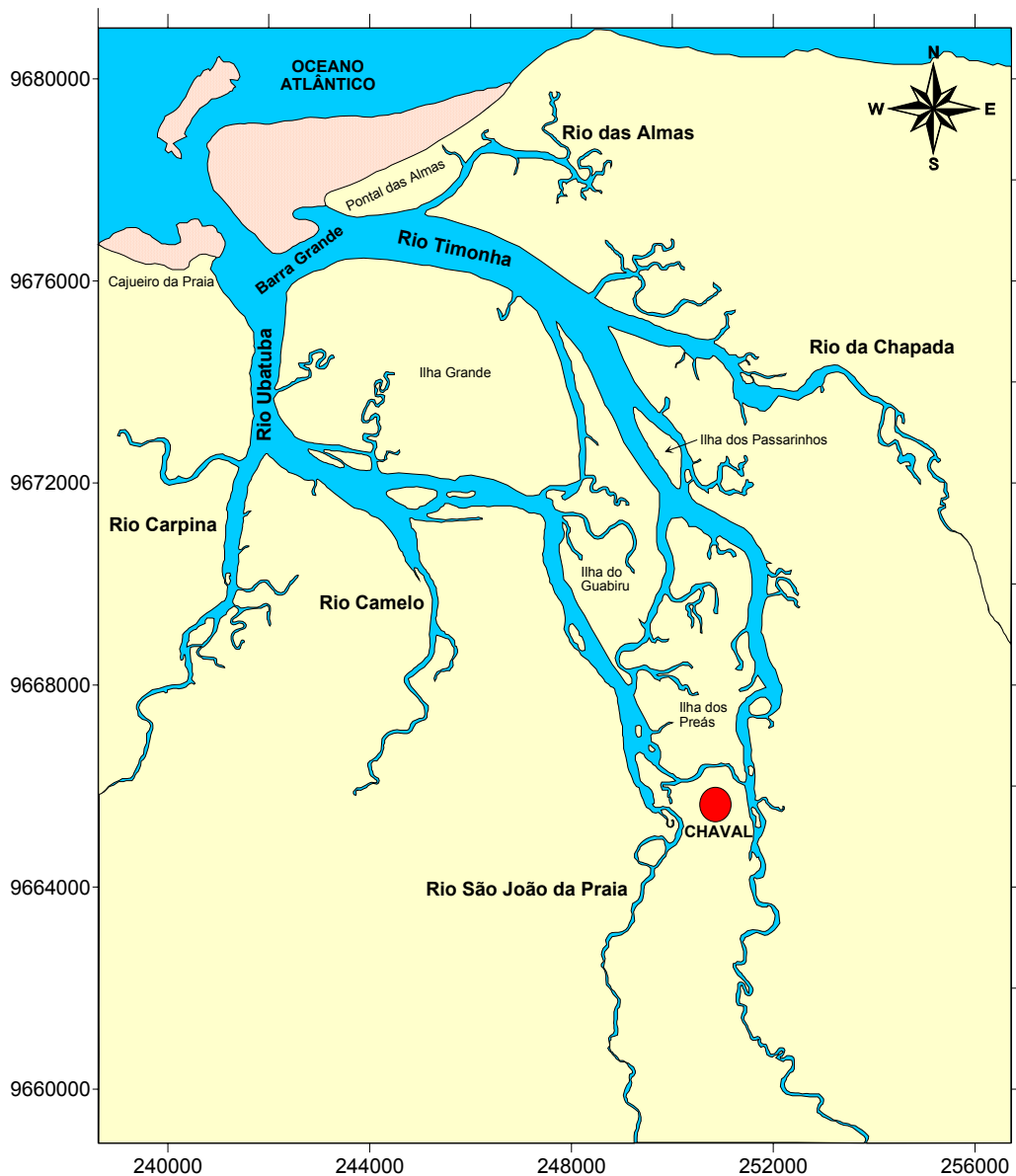


Figura 03: Sistema estuarino Timonha / Ubatuba.



O sistema estuarino Timonha / Ubatuba localiza-se numa região de mesomaré representada por ondas semidiurnas com período médio de 12,4 h. De acordo com dados observados no Porto de Luís Correia, situado 25 km a oeste da área de estudo, a amplitude em maré de sizígia chega a 3,4 m reduzindo-se a menos de 1 m em marés de quadratura.

A zona costeira adjacente à desembocadura fluvial apresenta evidências de um forte controle, exercido pela função de espigão hidráulico da descarga fluvial, sobre sua evolução morfodinâmica. Entre Cajueiro da Praia e Barra Grande, são observadas diversas exumações de um paleomangue formado quando o nível do mar era mais baixo que o atual. Essas exumações testemunham o avanço do mar e o recuo da linha de costa resultante de processos erosivos atuantes na região (MMA, 2002). Já em Pontal das Almas, a acumulação de sedimentos transportados pelas correntes longitudinais, contribui para progradação da faixa de praia e conseqüente estabilização da linha de costa.

O histórico de uso e ocupação da bacia de drenagem afluyente ao sistema estuarino Timonha / Ubatuba não apresenta registros de grandes impactos sobre seu regime hídrico. Em contraposição ao que ocorre na maioria das bacias hidrográficas do Estado do Ceará, essa bacia possui apenas um barramento expressivo representado pelo açude público Itaúna.

Esse açude começou a ser construído em 1999, como parte das ações desenvolvidas pelo PROURB, a partir de uma parceria entre Secretaria dos Recursos Hídricos do Governo do Estado do Ceará (SRH / CE) e Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Sua conclusão, em 2001, representou a viabilização de diversas atividades econômicas com o conseqüente incremento da economia e melhoria da qualidade de vida da população local.

A água proveniente desse açude destina-se principalmente ao abastecimento dos municípios de Chaval e Barroquinha, no entanto, também dá suporte ao desenvolvimento da piscicultura e da agricultura irrigada. Dentre as atividades econômicas ainda incipientes, mas que também foram favorecidas pela implantação do açude, destaca-se o cultivo de camarão em cativeiro.

O açude Itaúna está localizado 43 km à montante da foz do rio Timonha, fazendo parte da bacia hidrográfica do rio Coreaú. Sua capacidade de armazenamento é de 77.500.000 m<sup>3</sup>, volume este, abastecido por uma bacia afluyente de aproximadamente 770 km<sup>2</sup> (SRH, 2004). A descarga fluvial que escoar do rio Timonha para a bacia estuarina é diretamente influenciada pelo volume de água liberado pelo reservatório. Atualmente, a vazão regularizada pela tomada d'água é de 1,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, no entanto, durante os períodos de chuva, esse volume é acrescido da vazão liberada pelo sangradouro (Figura 04).



Figura 04: Fotografias do açude Itaúna: (a) sangradouro; (b) tomada d'água.

A primeira e maior sangria registrada no açude Itaúna ocorreu entre os dias 06 e 07 de março de 2002 ( $70,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Nos meses seguintes essa vazão decresceu gradativamente até maio, quando cessou por completo. Em 2003 o açude começou a sangrar em fevereiro continuando assim até julho o que correspondeu a 140 dias de sangria (COGERH, 2004). Para elaboração desse trabalho foram considerados os dados mensais referentes ao ano de 2004, período em que foram realizados os experimentos de campo. Todos os dados de vazão foram obtidos junto a COGERH, órgão responsável pelo monitoramento dos açudes do Estado do Ceará (Tabela 01).

Tabela 01: Estimativa das vazões do açude Itaúna referentes ao ano de 2004.

Mês	Vazão Regularizada ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Vazão de Sangria ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Total Liberado ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )
Janeiro	1,1	2,7	3,8
Fevereiro	1,1	19,8	20,9
Março	1,1	11,1	12,2
Abril	1,1	9,0	10,1
Maio	1,1	3,0	4,1
Junho	1,1	2,4	3,5
Julho	1,1	0,1	1,2
Agosto	1,1	0,0	1,1
Setembro	1,1	0,0	1,1
Outubro	1,1	0,0	1,1
Novembro	1,1	0,0	1,1
Dezembro	1,1	0,0	1,1
Total	13,2	48,1	61,3

Fonte: COGERH (2004).

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa pesquisa foi desenvolvida sob uma perspectiva sistêmica do meio físico natural. De acordo com Christofolletti (1999), o conceito sistêmico é o instrumento mais adequado para estudar os problemas do meio ambiente porque leva em consideração a interação entre processos antagônicos vinculados aos elementos naturais e socioeconômicos. Avaliar os processos de circulação e mistura em estuários significa então, identificar como os mecanismos de natureza física atuam na espacialização das feições e manutenção da estabilidade dos ecossistemas. Portanto, os estudos de hidrodinâmica estuarina representam instrumentos indubitavelmente úteis à análise de impactos ambientais e grau de suporte constituindo-se como poderosa ferramenta de gestão integrada da zona costeira.

### 4.1. Estuários

“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com interligação livre com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”. Essa é a definição clássica apresentada por Cameron & Pritchard (1963). Uma adaptação possivelmente mais satisfatória foi apresentada por Dyer (1997) que definiu: “Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com interligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

Dependendo do tipo de abordagem, um estuário pode assumir definições mais específicas. Para oceanógrafos, engenheiros, geógrafos e ecologistas o termo estuário é utilizado para indicar a região interior de um ambiente costeiro, onde ocorre o encontro das águas fluviais com a do mar transportada pelas correntes de maré (Miranda *et al.*, 2002).

Nesse estudo os aspectos relacionados à sedimentação também assumem grande importância. A esse respeito Dalrymple *et al.* (1992) definiu estuário como: “a parte voltada para o mar de um sistema de vales inundados, os quais recebem sedimentos de fontes fluviais e marinhas, contendo fácies influenciadas pela maré, ondas e processos fluviais. Considera-se que o estuário se estende desde o limite interno das fácies de maré, até o limite oceânico das fácies costeiras na entrada”.

O termo sistema estuarino, por sua vez, possui uma definição mais abrangente e pode ser aplicado a diversos ambientes costeiros de transição sob influência da descarga fluvial e

da maré (Geophysics Study Committee, 1977). Nesse sentido, Kjerfve (1989) definiu sistema estuarino como: “um ambiente costeiro que apresenta conexão restrita com o oceano adjacente à qual permanece aberta pelo menos intermitentemente”. Na definição funcional elaborada por Kjerfve *op. cit.* os sistemas estuarinos podem ser subdivididos em três zonas distintas (Figura 05): **Zona de Maré do Rio (ZR)** – Corresponde à parte fluvial, com salinidade inferior a 1, mas ainda sujeita à influência da maré; **Zona de Mistura (ZM)** – Região onde ocorre a mistura da água doce proveniente da drenagem continental com a água do mar; **Zona Costeira (ZC)** – Corresponde à zona costeira adjacente, delimitada pela “frente” da pluma de maré vazante. A extensão dessa “frente” estuarina determina a Camada Limite Costeira (CLC).

Os limites entre as diferentes zonas são dinâmicos e sua posição pode variar em diferentes escalas de acordo com a intensidade e variabilidade das diferentes forças. Essas forças, somadas às influências exercidas pela geometria e pela variação da salinidade do sistema, condicionam os principais processos de circulação (gravitacional, residual e gerada pelo vento) e mistura (entranhamento e difusão turbulenta) na ZM. (Kjerfve, 1990; Miranda, 1990; Miranda *et al.*, 2002).

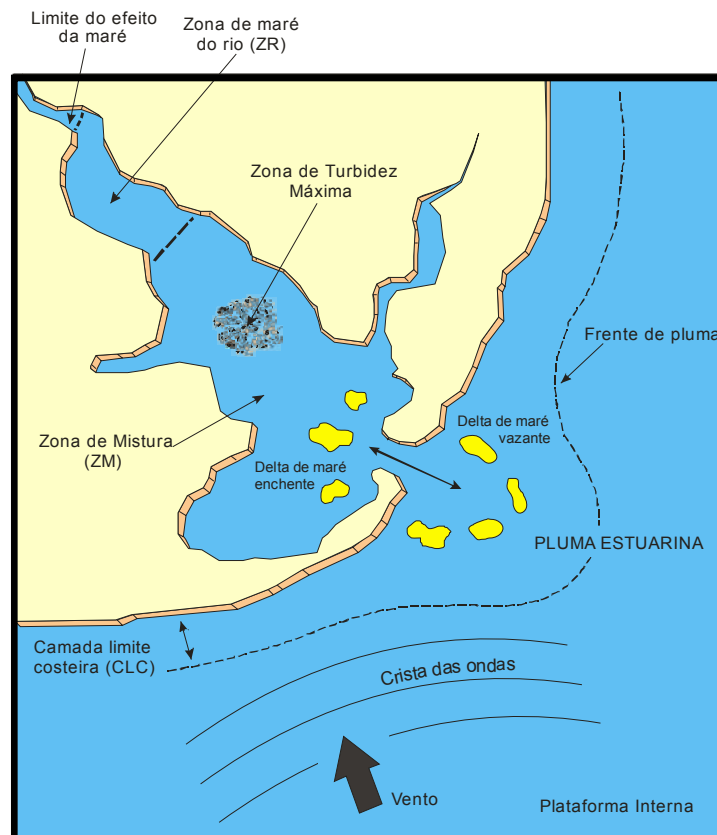


Figura 05: Diagrama esquemático das ZR, ZM e ZC e delimitação funcional de um sistema estuarino hipotético (extraído de Miranda *et al.*, 2002).

#### 4.1.1. Origem Geológica dos Estuários

Em sua maioria, os estuários atuais são feições costeiras geologicamente recentes moldadas por processos relacionados às flutuações do nível relativo do mar. Essas flutuações são reflexos tanto de alterações diretas do nível marinho (eustasia) como de mudanças do nível dos continentes (tectonismo e isostasia). A esse respeito Martin *et al.* (1986) elaborou um fluxograma onde estão dispostos os principais mecanismos responsáveis por essas flutuações estabelecendo as interações que ocorrem entre cada processo.

No Brasil, as primeiras pesquisas relacionadas às evidências de flutuações do nível do mar tiveram uma abordagem exclusivamente geomorfológica. Entretanto, grande parte dos estudos recentes relativos à essas flutuações foram desenvolvidos com base em evidências sedimentológicas e paleoecológicas que, juntamente com as primeiras, contribuíram decisivamente para elaboração de curvas homogêneas específicas para determinados setores do litoral. Desde a década de 70, muitos pesquisadores realizam trabalhos sobre as formações quaternárias da costa oriental brasileira e várias curvas de flutuações do nível relativo do mar foram elaboradas (Martin *et al.*, 1979; Bittencourt *et al.*, 1979; Suguio *et al.*, 1985; Dominguez *et al.* 1992). No entanto, ainda não há uma curva específica para a costa setentrional do Brasil.

Alguns trabalhos realizados na zona costeira do Estado do Ceará evidenciaram a presença de testemunhos das flutuações quaternárias do nível do mar (Carvalho & Maia, 1990; Meireles 1991; Maia, 1993; Freire *et al.*, 1993). Considerando a evolução holocênica da zona costeira, as evidências observadas apresentaram algumas semelhanças com a proposta de evolução elaborada por Martin *et al.* (1979) para a costa oriental do Brasil (especificamente o setor ao norte de Salvador – BA). Desse modo, essa curva de variação do nível relativo do mar representa o modelo mais adequado para compreensão dos processos que delinearão a costa cearense durante o holoceno (Maia, 1998).

O início do holoceno (a 10.000 anos A.P.) foi caracterizado pela subida rápida do nível do mar que ultrapassou a cota equivalente ao zero atual a 7.100 anos A.P. (Morais, 1996). O máximo dessa transgressão ocorreu a 5.100 anos A.P. quando o nível médio do mar chegou a 5 m acima do atual. Até 3.900 anos A.P. seguiu-se um período de regressão quando o nível do mar atingiu cotas um pouco abaixo do zero atual. O período compreendido entre 3.900 e 3.600 anos A.P. foi marcado por uma rápida ascensão do nível relativo do mar que chegou a atingir 3,5 m acima do nível atual. Entre 3.600 e 2.800 anos A.P. houve mais um processo regressivo e o nível médio do mar se reduziu novamente a cota próxima ao nível

zero atual. A transgressão seguinte prolongou-se até 2.500 anos A.P. quando o nível médio do mar atingiu o máximo de 2,5 m acima do atual. A partir de então, teve início um processo regressivo lento e gradual até atingir o nível médio atual.

A seqüência de episódios transgressivos e regressivos provocou uma alternância entre processos de erosão e deposição de sedimentos nas partes inferiores dos vales fluviais. A elevação rápida do nível do mar foi o principal fator para a formação dos estuários, cuja vida depende da relação entre o levantamento do nível do mar e a razão de sedimentação. Os estuários jovens, particularmente aqueles encaixados em vales de rios afogados, apresentam linha de praia muito irregular e dendrítica. A progressiva retificação das linhas de praia demonstra a maturidade do estuário (Coutinho, 1986).

De acordo com Morais (1996), a variação recente do nível do mar é de natureza eustática, ou seja, em escala mundial e independente do movimento continental. Evidências sugerem uma transgressão de aproximadamente 2 mm/ano impulsionada pelo aquecimento global. Nesse caso, os estuários atuais tendem a sofrer inundações formando novos ambientes estuarinos na parte superior dos rios e gerando mudanças de configuração intrínsecas aos processos evolutivos desses sistemas.

#### **4.1.2. Dinâmica Estuarina**

Os mecanismos físicos que controlam a hidrodinâmica estuarina (circulação e mistura) são principalmente governados pela ação das marés e pela descarga de água doce. Considerando a definição clássica de estuário estabelecida por Cameron & Pritchard (1963), no balanço de água estuarino, a soma dos volumes da precipitação (P) e contribuição pela descarga fluvial da bacia de drenagem ( $Q_f$ ) deve ser maior que o volume de água transferido para a atmosfera pela evaporação (E). Portanto, para satisfazer a definição clássica de estuário, deve prevalecer a seguinte desigualdade:

$$P + Q_f > E$$

Os sistemas onde o balanço hídrico satisfaz essa equação são denominados estuários positivos. No entanto, em regiões tropicais, é comum encontrar a seguinte situação:

$$P + Q_f < E$$

Sob essa condição, o sistema não pode ser classificado como um estuário clássico. Todavia, alguns autores referem-se a esse caso como estuário negativo (Miranda *et al.*, 2002). Ainda de acordo com esses autores, a condição de transição entre os dois regimes hídricos é dada por:

$$P + Q_f = E$$

A estimativa da descarga fluvial da bacia de drenagem para o sistema estuarino ( $Q_f$ ) foi realizada considerando-se duas hipóteses: ausência e presença do barramento. Devido ao fato de que não há informações da descarga de nenhum dos rios afluentes ao sistema estuarino Timonha / Ubatuba, foram utilizadas equações semi-empíricas para estimar a contribuição da bacia de drenagem para o sistema estuarino. Esse método foi aplicado satisfatoriamente por Medeiros & Kjerfve (1993), Kjerfve *et al.* (1996) e Pinheiro (2003a) em estudos hidrológicos de sistemas estuarinos tropicais.

Por definição, a taxa de escoamento superficial ( $\Delta f$ ) é a parcela da precipitação pluviométrica que, escoando da bacia de drenagem para os rios, irá alimentar o sistema estuarino (Miranda, *et al.*, 2002). O restante evapora, infiltra-se no solo e/ou é incorporado ao metabolismo das plantas. Dessa forma, evaporação e transpiração são combinadas em um único processo, a evapotranspiração potencial ( $E_v$ ) (Bérgamo, 2000). Seguindo este princípio, o modelo climático para estimativa do escoamento superficial proposto por Kjerfve (1990) baseia-se em dados de precipitação e temperatura representativos para cada sub-bacia. De acordo com esse modelo, a vazão de água doce de cada sub-bacia ( $q_{fi}$ ) em  $m^3 s^{-1}$  é dada por:

$$q_{fi} = a_i \times P \times \frac{\Delta f}{P}$$

Onde,  $a_i$  é a área superficial da sub-bacia em  $m^2$ ,  $P$  representa a contribuição pela precipitação pluviométrica em  $m s^{-1}$  e  $(\Delta f/P)$  a razão de escoamento superficial. Esta razão corresponde à fração da água da chuva que vai ser escoada superficialmente (Miranda, *et al.*, 2002). De acordo com Schreiber (1904) *apud* Medeiros & Kjerfve (1993) o valor adimensional da razão de escoamento superficial pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\frac{\Delta f}{P} \approx \exp\left(\frac{-E_v}{P}\right)$$

Em que  $E_v$  é a taxa média anual de evapotranspiração potencial em  $m s^{-1}$ , obtida em função da temperatura de acordo com a equação proposta por Holland (1978):

$$E_v = 0,3805 \times \exp\left(\frac{-4,62 \times 10^3}{T}\right)$$

Nessa equação a temperatura deve ser expressa em Kelvin (K) e  $E_v$  é dada em  $m s^{-1}$  tendo resultados satisfatórios do Equador até cerca de  $70^\circ$  de latitude (Norte e Sul). O valor de  $E_v$  somente é significativo quando são utilizados dados médios de temperatura de longos períodos de tempo (Kjerfve, 1990). Então, a contribuição da bacia de drenagem para o sistema estuarino através do escoamento superficial ( $Q_f$ ) em  $m^3 s^{-1}$  é dada por:

$$Q_f = \sum_{i=1}^{i=n} q_{fi}$$

No sistema estuarino Timonha / Ubatuba, a contribuição de água doce pelo escoamento difuso ( $Q_d$ ) foi obtida através da seguinte equação:

$$Q_d = A_E \times (P - E)$$

Onde  $A_E$  é a área do espelho d'água estuarino em  $m^2$  e  $Q_d$  é dado em  $m^3 s^{-1}$ . As taxas de precipitação e evaporação devem ser aplicadas em  $m s^{-1}$ . Assim, o aporte total de água doce que abastece o sistema estuarino ( $Q_T$ ) em  $m^3 s^{-1}$  é:

$$Q_T = Q_f + Q_d$$

O balanço de água é um dos principais processos que condicionam a hidrodinâmica e a capacidade de suporte de estuários tropicais. No sistema estuarino Timonha / Ubatuba optou-se por utilizar o mesmo método aplicado por Kjerfve *et al.* (1996) na Lagoa Costeira de Araruama, para estimar o volume de água que entra e sai da bacia estuarina:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_f + Q_p + Q_E + Q_{as} + Q_r + Q_c$$

Essa equação expressa a variação de volume do estuário ( $\Delta V$ ) de acordo com os fluxos de entrada e saída de água no sistema em um espaço de tempo  $\Delta t$ .  $Q_f$  representa a



descarga de água doce que escoar da bacia de drenagem para o estuário;  $Q_P$  e  $Q_E$  a precipitação pluviométrica e a evaporação;  $Q_{as}$  o fluxo de água da drenagem subterrânea;  $Q_T$  a vazão do reservatório e  $Q_c$  a contribuição de água do mar. Os fluxos expressos em  $m^3 s^{-1}$  com notação positiva significam entrada de água e negativa perda.

Os fluxos gerados pela subida e descida da maré são responsáveis por variações cíclicas do volume estuarino interferindo diretamente no balanço de água. A vazão resultante vinculada às oscilações periódicas da maré é dada por:

$$Q_c = Q_e - Q_v$$

Onde  $Q_e$  e  $Q_v$  representam os fluxos de enchente e de vazante, respectivamente. Essas variáveis são calculadas através das equações:

$$Q_e = A_{(o)} \times u_{(e)}$$

$$Q_v = A_{(o)} \times u_{(v)}$$

As vazões associadas aos estágios de enchente e vazante são expressas em  $m^3 s^{-1}$ . Nas equações acima,  $A_{(o)}$  é a área ( $m^2$ ) da seção transversal da desembocadura estuarina, em Barra Grande e  $u_{(e)}$  e  $u_{(v)}$  referem-se as velocidades médias ( $m s^{-1}$ ) de enchente e vazante medidas em campo. Em virtude da ausência de estudos hidrogeológicos específicos e considerando as condições de semi-aridez climática e estrutura geológica pouco permeável da área, assumiu-se o valor  $Q_{as} = 0$ .

O prisma de maré ( $Q_T$ ) representa a variação do volume de água no interior do sistema estuarino durante um ciclo de maré semi-diurna sendo calculado através da seguinte equação:

$$Q_T = \frac{A_E \times \Delta h}{44714}$$

Onde  $\Delta h$  (m) é a variação média da maré e a constante em segundos (s) representa a duração de um ciclo de maré semi-diurna.

Os mecanismos de mistura estuarina podem ser facilmente avaliados a partir do conhecimento das variações da densidade da água. Para a grande maioria dos estuários essa densidade pode ser considerada função apenas da salinidade (Miranda *et al.*, 2002). A distribuição da salinidade em estuários pode ser admitida como principal parâmetro de mistura pelos seguintes motivos: (1) a salinidade é um constituinte conservativo, não sendo

afetada por processos biogeoquímicos, mas respondendo bem aos processos hidrológicos e de mistura; (2) o sal estuarino é, em sua maioria, derivado de uma única fonte, o oceano; (3) o método de determinação da salinidade é rápido e relativamente barato (Kjerfve, 1990).

Para utilização do diagrama de circulação x estratificação elaborado por Hansen & Rattray (1966) é necessário determinar as grandezas adimensionais referentes aos parâmetros de estratificação e circulação. O primeiro foi definido pela seguinte razão:

$$\frac{\Delta S}{\bar{S}}$$

Onde  $\Delta S$  representa a diferença entre a salinidade de fundo e de superfície e  $\bar{S}$  salinidade média da coluna d'água. O parâmetro de circulação é determinado pela seguinte razão:

$$\frac{u_s}{u_f}$$

Onde  $U_s$  representa a velocidade da corrente residual na superfície e  $U_f$  o valor médio da componente de velocidade gerada pela descarga fluvial. O valor de  $U_f$  ( $m\ s^{-1}$ ) é calculado pela equação:

$$u_f = \frac{Q_T}{A(x)}$$

Nesse caso,  $A(x)$  representa a área da seção transversal em  $m^2$ .

A avaliação do sistema de correntes atuantes na área de estudo baseou-se primordialmente em dados obtidos nos experimentos de campo. No entanto, a utilização segura desses dados somente foi possível diante da correção dos referenciais, de acordo com o procedimento proposto por Miranda, *et al.* (2002).

Partindo da premissa de que o oceano representa a única fonte de sal para o sistema estuarino Timonha / Ubatuba, o balanço de sal foi obtido através da seguinte equação:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = S_C + S_D$$

$\Delta S$  representa a variação da quantidade de sal no sistema estuarino no período de tempo  $\Delta t$  (Kjerfve *et al.*, 1996).  $S_C$  é a quantidade de sal, em  $kg\ s^{-1}$ , que entra no sistema através do canal da Barra Grande associada aos processos advectivos, sendo calculada por:

$$S_C = Q_c \times \rho \times \frac{S_o}{1000}$$

Onde  $\rho$  corresponde à densidade da água ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e  $S_o$  à salinidade média da zona costeira (35).  $S_D$ , por sua vez, representa o volume de sal resultante dos fluxos difusivos ao longo dos canais estuarinos. Essa variável pode ser calculada através da seguinte equação, apresentando resultados em  $\text{kg s}^{-1}$ :

$$S_D = \left( -\frac{\rho \times A_{(X)} \times K_x}{\Delta_{(X)}} \right) \times \left( \frac{S_{\text{seq.}} - S_o}{1000} \right)$$

$A_{(X)}$  e  $S_{\text{seq.}}$  representam, respectivamente, a área ( $\text{m}^2$ ) e a salinidade média da seção transversal.  $\Delta_{(X)}$  é a distância da seção em relação ao mar, fornecida em metros, e  $K_x$  o coeficiente de dispersão longitudinal efetiva ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

De acordo com Smith (1994)  $K_x$  pode ser estimado por:

$$K_x = \frac{Q_f}{\left\{ \frac{A_{(X)} \times (\bar{S} - S_o)}{\Delta_x} \right\}}$$

Para a determinação das frações de água doce e de sal retidas na zona de mistura em cada fase da maré foram utilizadas as equações elaboradas por Miranda, *et al.* (2002).

$$f_x = 1 - \frac{S_x}{S_o}$$

A fração de água doce  $f_x$  é um número adimensional assumindo valores entre 0 e 1 de acordo com a menor ou maior descarga de água doce, respectivamente. Para determinação de  $f_x$  é necessário calcular o valor da incógnita  $S_x$ . Essa variável refere-se à fração de sal retida na zona de mistura e pode ser facilmente obtida por:

$$S_x = S_o \times \exp \left( \frac{u_f \times \Delta_{(X)}}{K_x} \right)$$

Considerando que os estuários do semi-árido são bem misturados, o método proposto por Miranda *op. cit.* para determinação do volume de água doce na ZM mostrou-se adequado aos estudos hidrodinâmicos do sistema Timonha / Ubatuba. Esses autores basearam-se nas equações da continuidade e conservação de sal para estimar variação longitudinal da

salinidade ao longo do canal estuarino. Desse modo  $V_f$  ( $m^3$ ) representa o volume de água doce na ZM tendo obtido através da seguinte expressão:

$$V_f = V \times f_x$$

Como  $V$  ( $m^3$ ) representa o volume geométrico estacionário do estuário e, portanto, é constante, conclui-se que  $V_f$  varia primordialmente em função de  $f_x$ . O tempo relacionado à permanência de  $V_f$  no interior estuarino é denominado tempo de residência e pode ser dado pela equação:

$$T_R = \frac{V_f}{Q_T}$$

Ketchum (1950). A determinação de  $T_R$  é importante visto que se refere ao intervalo de tempo necessário para que a água doce retida na ZM seja removida juntamente com outras substâncias. Quanto menor for o valor de  $T_R$  maior será a capacidade de renovação das águas o que reduz a susceptibilidade do sistema à poluição. A taxa de descarga ( $D$ ) refere-se à vazão correspondente a remoção de todo o volume de água da ZM durante o espaço de tempo  $T_R$  sendo obtida por:

$$D = \frac{V}{T_R}$$

#### 4.1.3. Sedimentologia Estuarina

Os estuários representam o principal meio através dos quais os sedimentos são transportados do continente para a plataforma continental e exercem influência direta sobre a dinâmica costeira. Quantificar as trocas de água e materiais através das desembocaduras fluviais constitui-se numa tarefa difícil, mas de fundamental importância para a compreensão do funcionamento tanto dos estuários como da zona costeira (Dyer *et al.*, 1992).

As pesquisas que buscam compreender a dinâmica de circulação de água e sedimentos em estuários ainda são bastante escassas, nesse sentido destacam-se os trabalhos de Dobereiner (1983), Barros (1984), Ayup (1986), Morais *et al.* (1988), Lessa (1991) e Pinheiro (2003a). As principais dificuldades metodológicas desse tipo de pesquisa estão relacionadas à necessidade de medidas sistemáticas dos parâmetros hidrossedimentológicos obedecendo à escala espacial e temporal específica para cada sistema.

A distribuição de fácies sedimentares em estuários é controlada tanto pela interação entre a natureza e quantidade dos sedimentos quanto pela morfologia de fundo e processos hidrodinâmicos (Davis, 1985). A identificação dos padrões de circulação e mistura nos ambientes estuarinos é importante para o controle da distribuição e transporte de materiais assim como também para localização das áreas com maior concentração e deposição de sedimentos, denominada Zona de Turbidez Máxima - ZTM (Schoellhamer, 2001). Nessa região a velocidade resultante de movimentos convergentes é praticamente nula e a concentração de sedimentos de origem fluvial e marinha é muito alta (Miranda *et al.*, 2002).

A maior parte dos sedimentos grossos carregados pelos rios acumula-se nas planícies de inundação, sendo liberada apenas durante os períodos de maior descarga fluvial. As frações mais finas, transportadas para o estuário, sofrem alterações físicas e químicas, em decorrência das diferenças de pH, que afetam seu potencial de deposição (Drever, 1988; Dyer, 1995).

As correntes fluviais podem transportar materiais tanto em suspensão como por tração de fundo. Nos estuários, onde os processos turbulentos são mais intensos, a hidrodinâmica favorece o transporte em suspensão. Em eventos de grande descarga fluvial o rio transporta materiais de todos os tamanhos. A seleção atua gradativamente fazendo com que o material mais fino seja transportado em suspensão com velocidades maiores e o material mais grosso seja transportado no fundo mais devagar. Durante esse transporte parcelas do material sedimentar pode se depositar, sendo erodido e retrabalhado mais tarde. (Mabesoone, 1983).

No litoral cearense, condições como: abundância de sedimentos marinhos; acentuada deriva litorânea e forte incidência de ondas, aliadas a predominância de rios intermitentes de baixo caudal contribuem para que os estuários importem grande quantidade de sedimentos marinhos. Segundo Maia (1998) é necessário definir o volume de material transportado pelo estuário durante a estiagem pois, sob essas condições, o estuário pode funcionar como sumidouro de sedimentos, extraíndo material da deriva litorânea. Nesses casos, os processos de sedimentação e circulação estuarina contribuem para a retenção de materiais no interior do sistema provocando o assoreamento do canal.

A quantidade total de sedimentos transportados por um rio ( $Q_{TT}$ ) é definida pelo somatório dos transportes por arraste de fundo e em suspensão. O material transportado em suspensão, por sua vez, pode ser proveniente da bacia hidrográfica ou da remobilização de sedimentos de fundo (Maia, 1998).

$$Q_{TT} = Q_{TF} + Q_{TS}$$

No entanto, nessa pesquisa, foi considerado apenas o transporte em suspensão por ser o mais atuante em rios de regiões semi-áridas. A descarga sólida em suspensão ( $Q_{TS}$ ) depende fundamentalmente de duas grandezas: a concentração média de sedimentos e a vazão líquida. Para o cálculo do transporte em suspensão no sistema estuarino Timonha / Ubatuba utilizou-se o mesmo procedimento aplicado, com sucesso, por Pinheiro (2003a) no estuário do rio Malcozinhado / CE. De acordo com esse método,  $Q_{TS}$ , em  $\text{kg s}^{-1}$ , é calculado por:

$$Q_{TS} = (u \times A_{(X)}) \times C_{SS}$$

Onde,  $u$  é a velocidade média da corrente ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $A_{(X)}$  a área da seção transversal ( $\text{m}^2$ ) e  $C_{SS}$  a concentração de sedimentos em suspensão ( $\text{kg m}^{-3}$ ) obtida através das amostragens diretas.

## 5. METODOLOGIA

Nessa pesquisa, a análise dos cenários de riscos ambientais foi realizada tendo por base a compartimentação geoambiental elaborada pela equipe do projeto **Diagnóstico Geoambiental e Socioeconômico para Elaboração do Plano de Monitoramento das Áreas Estuarinas e de Manguezais dos Rios Jaguaribe, Malcozinhado, Catu e Timonha, Ceará** (Consórcio BIRD, IEPRO, FUNCEME, SRH, 2004).

A abordagem hidrodinâmica, por sua vez, baseou-se na aplicação de modelos matemáticos semi-empíricos que, juntamente com os dados obtidos nos ensaios de campo, viabilizaram a avaliação dos processos de circulação, mistura e transporte de sedimentos no sistema estuarino Timonha / Ubatuba.

### 5.1. Atividades de Reconhecimento Básico

Os primeiros procedimentos metodológicos dessa pesquisa basearam-se na construção de um banco de dados históricos sobre os elementos físicos que compõem o geossistema local. Para tanto foi realizado um minucioso levantamento bibliográfico e cartográfico junto às instituições como: Universidade Federal do Ceará (UFC); Universidade Estadual do Ceará (UECE); Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS); Secretaria de Recursos Hídricos do Governo do Estado do Ceará (SRH); Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH); Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME); Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE); Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA); Capitania dos Portos e Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM).

De um modo geral, a dinâmica e evolução geoambiental do sistema estuarino Timonha / Ubatuba é pouco conhecida. Para superar essa carência foram empregadas técnicas de cartografia, sensoriamento remoto e fotointerpretação retirando das projeções e imagens o maior número de informações possíveis. O material geocartográfico utilizado para tanto foi:

- Fotografias aéreas na escala de 1:25.000 datadas de 1958 e 1997;
- Composição colorida (bandas 2, 4 e 5) da imagem orbital fornecida pelo satélite Landsat 5 TM com resolução de 30m, referente ao ano de 2001;

- Bases cartográficas da SUDENE (folhas Chaval e Bitupitá) na escala de 1:100.000, datadas de 1979;
- Carta Batimétrica da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) na escala de 1:50.000 de 1964.

Todas as imagens foram trabalhadas em meio digital com o auxílio de softwares específicos. Os resultados obtidos a partir da análise das imagens foram comparados àqueles encontrados nas cartas e ratificados em reconhecimentos de campo. Com isso foi possível identificar o arranjo espacial das principais feições fisiográficas assim como as mudanças relacionadas ao uso e ocupação do solo ocorridas nos últimos 45 anos.

## **5.2. Experimentos de Campo**

Partindo do conhecimento prévio das características hidroclimáticas locais, optou-se por trabalhar sob condições extremas do ponto de vista da disponibilidade hídrica. Desse modo foi possível avaliar o comportamento sazonal do sistema estuarino e assim, as circunstâncias sob as quais ele se apresenta mais vulnerável. Os experimentos de campo foram realizados durante um ciclo completo de maré de sizígia nos meses representativos para os períodos de chuva e de estiagem. A realização desses trabalhos foi viabilizada pela utilização de duas embarcações gentilmente cedidas pelo Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO - UECE) e pelo IBAMA - Parnaíba.

Para os estudos hidrodinâmicos foram estabelecidas 23 estações (Tabela 02), ao longo do canal fluvial, englobando desde a ZR até a ZC (Figura 06). Todas as sondagens foram realizadas durante um ciclo completo de maré de sizígia evidenciando o comportamento do sistema em estágios de maré diferentes (baixa-mar, enchente, preamar e vazante).



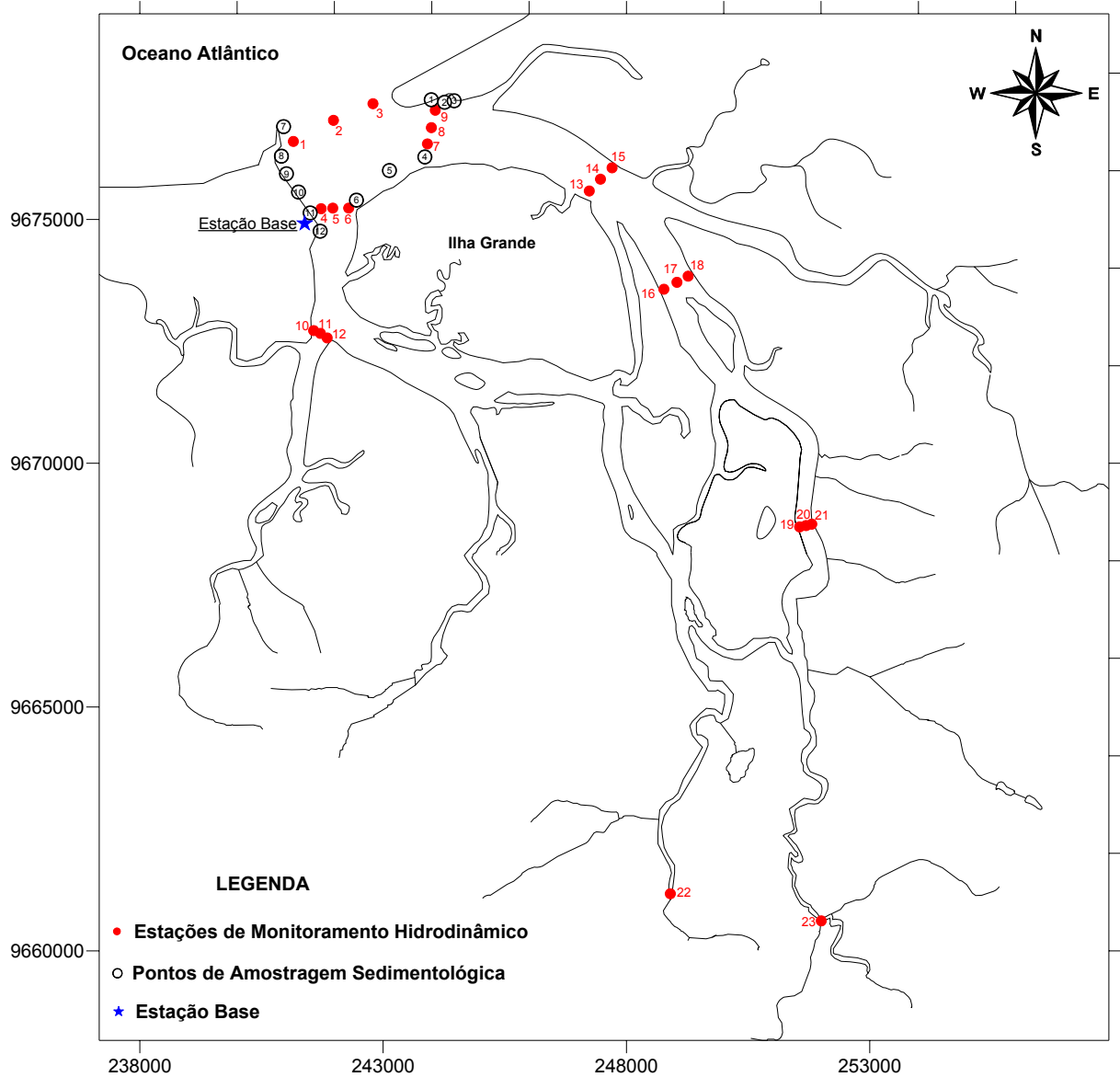


Figura 06: Mapa do sistema estuarino Timonha / Ubatuba indicando as estações onde foram realizados os experimentos de campo.

Ressalta-se, que as estações 22 e 23 representam o limite à montante da área estuarina visto que não apresentaram influência da maré. Nas demais, os experimentos foram realizados, de acordo com o procedimento acima, em dois níveis de profundidade (superfície e fundo), sempre que possível.

Tabela 02: Localização geográfica das estações de monitoramento em UTM.

Estações	Referencial	Longitude (X)	Latitude (Y)
1	ZC - Rios Timonha e Ubatuba (Desembocadura)	241156	9676600
2		241980	9677033
3		242792	9677374
4	ZM 1 - Rio Ubatuba	241727	9675220
5		241966	9675233
6		242293	9675233
7	ZM 1 - Rio Timonha	243911	9676550
8		243992	9676883
9		244072	9677240
10	ZM 2 - Rio Ubatuba	241573	9672721
11		241712	9672663
12		241851	9672570
13	ZM 2 - Rio Timonha	247237	9675584
14		247467	9675826
15		247705	9676059
16	ZM 3 - Rio Timonha	248770	9673569
17		249038	9673711
18		249268	9673837
19	ZM 4 - Rio Timonha	251559	9668695
20		251693	9668722
21		251808	9668752
22	ZR - Rio Ubatuba	248902	9661171
23	ZR - Rio Timonha	252004	9660615

ZC – Zona costeira / ZM – Zona de mistura / ZR - Zona do rio.

A localização de cada estação de monitoramento hidrodinâmico foi estabelecida a partir do conhecimento prévio do delineamento da hidrografia. Assim, assumiu-se como critério principal, a contribuição pela descarga fluvial exercida pelos rios afluentes.

Os parâmetros hidrodinâmicos foram avaliados através dos seguintes equipamentos:

- Mini - correntômetro *Sensordata* a.s. (modelo SD-6000/30) para medições de direção e velocidade da corrente;
- Sonda oceanográfica *Sensordata* a.s. (STD/CTD modelo SD 204) para determinação da salinidade, condutividade e temperatura da água;
- Garrafa tipo *Van Dorn* para amostragens de água que posteriormente foram analisadas quanto à concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST).

As coletas de água para determinação de SST foram feitas a 1,0 m de profundidade. Na maioria das sondagens os parâmetros foram mensurados em níveis de profundidade

correspondentes a 1m abaixo da superfície e 1 m acima do fundo, exceto os dados de salinidade, condutividade e temperatura que foram registrados em perfilações verticais a cada 20 cm na coluna d'água.

Foram feitas ainda, coletas de sedimentos nas estações (2, 5, 8, 11, 14, 17, 20) e em 12 pontos, distribuídos nas margens e na porção norte da Ilha Grande (Tabela 03). Para as coletas de fundo foi utilizada uma draga oceanográfica tipo *Van Veen*.

Tabela 03: Coordenadas dos pontos de amostragem sedimentológica nas margens em UTM.

Pontos	Referencial	Longitude (X)	Latitude (Y)
1	Pontal das Almas	243990	9677455
2	Pontal das Almas	244263	9677404
3	Pontal das Almas	244460	9677434
4	Ilha Grande	243858	9676282
5	Ilha Grande	243130	9676004
6	Ilha Grande	242452	9675396
7	Cajueiro da Praia	240955	9676904
8	Cajueiro da Praia	240911	9676298
9	Cajueiro da Praia	241014	9675937
10	Cajueiro da Praia	241262	9675562
11	Cajueiro da Praia	241502	9675134
12	Cajueiro da Praia	241707	9674759

A avaliação de parâmetros meteorológicos e da maré foi feita em uma estação fixada na margem oeste da desembocadura fluvial.

***Estação Base: Cajueiro da Praia***

- Longitude (UTM): 241389 E

- Latitude (UTM): 9674919 N

No que se refere à caracterização climática da área, além das informações obtidas através das estações meteorológicas da FUNCEME e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foram realizadas medições *in situ* para avaliação do comportamento dos ventos (direção e velocidade) e temperatura do ar. Para tanto foi utilizada uma estação meteorológica portátil (*DAVIS Weather III*), fixada a 3,0 m do solo, que forneceu dados instantâneos registrados a cada 5 minutos.

A oscilação da maré dentro da área estuarina foi calculada a partir da determinação dos desníveis da superfície da água. Para tanto foi fixado um nível topográfico (CST *Berger* 24x) na Estação Base, cuja cota altimétrica foi determinada em relação ao nível zero da DHN (+ 4,0 m) com base nas estimativas de altura da maré para o porto de Luís Correia. A partir

desse referencial de nível, com o auxílio de uma mira topográfica, foram feitas leituras do nível da água a cada 15 minutos durante um ciclo completo de maré. Desse modo, foi possível caracterizar a propagação da onda de maré dentro do estuário e determinar seu retardo em relação às estimativas feitas para o porto de Luís Correia.

Para atualização da batimetria foi utilizado um ecobatímetro Furuno (DGPS/Plotter/Sonar Colorido modelo GP-1650F/1650DF). As profundidades obtidas através desse equipamento foram corrigidas, de acordo com a altura da maré verificada no interior do sistema estuarino, no instante das sondagens. Esse procedimento viabilizou também a determinação da área referente a cada uma das seções transversais correspondentes às estações de monitoramento hidrodinâmico.

A navegação e estabelecimento dos pontos de monitoramento foram feitos através do uso de um GPS (Garmin Plus III). Todos os equipamentos utilizados durante o monitoramento de campo foram disponibilizados pelo LGCO – UECE.

### **5.3. Técnicas de Laboratório**

As amostras de água coletadas durante os experimentos de campo foram analisadas em laboratório quanto à concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST). Nesse sentido, a técnica da filtração mostrou-se a mais adequada, tendo em vista seu baixo custo operacional e boa precisão.

Os procedimentos laboratoriais basearam-se na utilização de um sistema de filtragem acoplado a uma bomba de vácuo. Para tanto, foram usados também filtros de fibra de vidro ( $\varnothing 47 \pm 0,5$  mm) fabricados pela Schleicher & Schuell.

Antes da filtração, no entanto, os filtros foram postos para secar numa estufa à 60°C para, em seguida, serem pesados em uma balança analítica (resolução 0,0001g) obtendo-se assim, o peso do filtro seco sem sólidos ( $P_F$ ). Depois da filtração, os filtros foram novamente levados à estufa e depois pesados. Esse peso final correspondeu ao peso do filtro seco com sólidos ( $P_{F+S}$ ). Todas as pesagens foram feitas após os filtros atingirem a temperatura ambiente em um dessecador.

O cálculo da concentração de SST ( $C_{SS}$ ) foi obtido através da seguinte fórmula:

$$C_{SS} = \frac{P_{(F+S)} - P_F}{vol}$$

Onde,  $C_{SS}$  é obtida em  $\text{kg m}^{-3}$ .  $P_{(F+S)}$  e  $P_F$  representam, respectivamente, o peso do filtro com e sem sólidos expressos em kg e o volume filtrado da amostra (vol) deve ser empregado em  $\text{m}^3$ .

Os sedimentos de fundo foram analisados quanto a sua granulometria de acordo com a metodologia proposta por Wentworth (1922). Em laboratório, as amostras foram inicialmente colocadas para secar à  $60^\circ\text{C}$  para, só então, serem quarteadas e pesadas. Na etapa seguinte, 100 g de amostra foram submetidas ao peneiramento úmido (lavagem em uma peneira com malha de 0,062mm de diâmetro). A fração retida na peneira correspondeu aos cascalhos e areias (grossas, médias e finas) e a fração recolhida sob a peneira, aos sedimentos finos (siltes e argilas).

Após seca, a fração maior do que 0,062mm foi colocada em uma bateria de 12 peneiras (malhas variando entre 2,830 e 0,088mm) e postas para vibrar, por 10 (dez) minutos, no agitador mecânico tipo *Rotap*. A parcela da amostra retida em cada uma das peneiras correspondeu à porcentagem da amostra que apresenta granulometria igual ao diâmetro da malha da respectiva peneira.

A fração fina foi analisada pelo método da pipetagem seguindo a lei de *Stokes* que se baseia na velocidade de decantação das partículas em meio aquoso (Suguio, 1973). Em uma proveta de 1.000 ml foi feita uma solução composta de sedimentos finos, água destilada e pirofosfato de sódio ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ). Através da agitação manual homogeneizou-se a amostra deixando-a em seguida em repouso. Após esse procedimento, com uma pipeta de 20 ml foram realizadas várias pipetagens de acordo com a tabela 04.

Tabela 04: Esquema tempo / profundidade / granulação adotados na pipetagem.

<b>Tempo da Pipetagem (hh:mm:ss)</b>	<b>Profundidade na Proveta (cm)</b>	<b>Tamanho da Partícula (mm)</b>	<b>Tamanho da Partícula (<math>\Phi</math>)</b>
00:00:58	20	0,044	4,5
00:03:52	10	0,032	5,0
00:07:44	10	0,016	6,0
00:31:00	10	0,008	7,0
02:03:00	10	0,004	8,0

Fonte: Wentworth (1922) *apud* Suguio (1973).

As frações retiradas em cada uma das pipetagens foram postas para secar e depois pesadas. A análise estatística dos dados granulométricos foi feita através dos programas GRANULS, desenvolvido pelo Departamento de Geologia e Geofísica Marinha da UFF e ANASED 5.0, desenvolvido pelo Laboratório de Geologia Marinha da UFC.

#### 5.4. Análise dos Dados

Os dados hidroclimáticos obtidos junto às estações meteorológicas e postos pluviométricos foram analisados estatisticamente através do teste – t pareado. Desse modo foi possível identificar claramente os efeitos da sazonalidade hidroclimática sobre o escoamento superficial da bacia de drenagem.

Os sistemas de correntes estuarinas e ventos foram representados por meio de vetores aos quais foram associadas as grandezas correspondentes à intensidade e direção. Todas as direções mencionadas nesse trabalho referem-se ao Norte Geográfico e foram determinadas a partir da correção da declinação magnética local (23,65° W).

A distribuição horizontal dos parâmetros hidrológicos, batimetria e cobertura sedimentar foi obtida a partir da interpolação *Kriging* com base na variação espacial dos dados medidos durante os experimentos de campo. Essa malha foi utilizada para obtenção de isolinhas de cada propriedade.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Hidrologia da Bacia de Drenagem

A bacia de drenagem é a origem do sistema de rios que suprirá o estuário de água fluvial, sedimentos, substâncias orgânicas e inorgânicas e eventualmente poluentes. (Miranda *et al.*, 2002). Assim, é importante levar em consideração as alterações ocorridas em toda a bacia de drenagem, para que se possa ter uma noção precisa da magnitude dos processos que atuam nas áreas estuarinas.

Sabe-se que a descarga fluvial é um dos principais fatores que controlam a hidrodinâmica de estuários. As variações sazonais no aporte de água doce afetam diretamente os gradientes longitudinais de salinidade e assim, os processos de circulação e mistura. Em se tratando de bacias hidrográficas muito grandes, a descarga fluvial tende a tornar-se espacialmente heterogênea, apresentando áreas com maior ou menor disponibilidade hídrica.

Para melhorar a acuidade das estimativas de descarga fluvial utilizadas nessa pesquisa, a bacia de drenagem dos rios Timonha e Ubatuba foi dividida em nove sub-bacias (Tabela 05), dentre as quais foram incluídas as bacias afluentes ao reservatório Itaúna (Figura 07). Para cada uma delas foi calculado o coeficiente de escoamento superficial  $e$ , a partir dele, a descarga fluvial. Esse procedimento facilitou a aplicação dos modelos matemáticos e viabilizou a localização das sub-bacias que exercem maior contribuição hídrica.

Ressalta-se, no entanto, que as vazões das sub-bacias afluentes ao açude Itaúna foram levadas em consideração, apenas para que fosse possível simular o comportamento do sistema antes do represamento do rio Timonha.

Tabela 05: Sub-bacias que compõem a bacia de drenagem dos rios Timonha e Ubatuba.

Bacia	Sub-Bacia	Referencial	Área (km <sup>2</sup> )
Rio Timonha	1	Nascente do Timonha*	558
	2	Pessoa Anta*	212
	3	Chaval	91
	4	Rio da Chapada	53
Rio Ubatuba	5	Nascente do Ubatuba	328
	6	Ibuguaçu	577
	7	Rio São João da Praia	185
	8	Rio Camelo	44
	9	Rio Carpina	117
Bacia Litorânea			244
<b>Total da Bacia de Drenagem</b>			<b>2.409</b>

\* Bacias consideradas apenas nas estimativas de descarga fluvial anteriores ao barramento do rio Timonha.

As características hidrológicas de um sistema estuarino podem facilmente ser estudadas através do conhecimento das variações dos campos de salinidade. Nessa pesquisa a aplicação desse procedimento teve o intuito de identificar os efeitos da sazonalidade hidroclimática e da barragem sobre a hidrologia estuarina. De acordo com (Roy *et al.*, 2001) as flutuações da salinidade estão associadas principalmente à:

- Mudanças sazonais das características climáticas;
- Fluxos de entrada e saída de água doce e salgada;
- Processos de mistura.

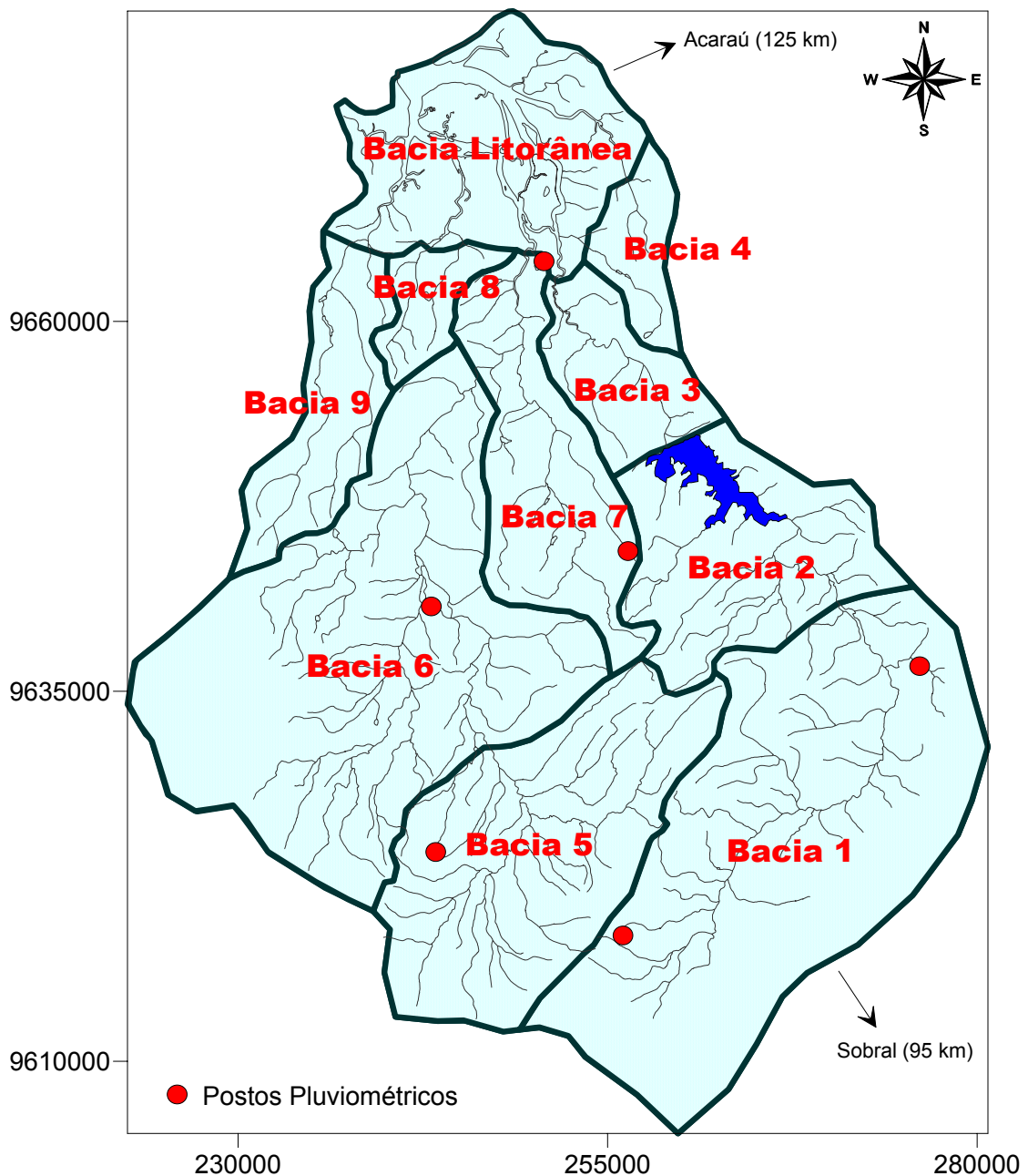


Figura 07: Bacia hidrográfica dos rios Timonha e Ubatuba com a divisão em sub-bacias e localização das estações climatológicas e postos pluviométricos.



### 6.1.1. Contextualização Hidroclimática

Para efeito de estudos hidrológicos foram consideradas as características hidroclimáticas de toda a bacia de drenagem que provém o sistema estuarino Timonha / Ubatuba. A estimativa da descarga fluvial de cada sub-bacia foi realizada a partir das seguintes grandezas meteorológicas:

- Temperatura do ar;
- Evaporação;
- Pluviometria.

A caracterização climática foi feita com base em dados históricos fornecidos pelas estações climatológicas mais próximas, visto que não há estações dentro dos domínios da bacia de drenagem. Nesse caso, foram consideradas as normais climatológicas referentes às estações do INMET instaladas em Sobral e Acaraú (Tabela 06), distantes da área 95 km e 125 km, respectivamente. Assim, os dados da primeira foram considerados representativos para o alto curso e os da segunda para o baixo curso.

Tabela 06: Dados de localização das estações climatológicas do INMET.

<b>Estação</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>Série de Dados</b>
Sobral	40° 21' W	03° 42' S	1961 / 1990
Acaraú	40° 08' W	02° 53' S	1976 / 1988

No que se refere às medidas de pluviometria, no entanto, foram identificados seis postos da FUNCEME dentro da bacia de drenagem (Tabela 07), sendo que apenas dois apresentaram série de dados superiores a 25 anos. Os demais, com série de dados mais curtas, mostraram-se representativos apenas para o período de monitoramento (2004).

Tabela 07: Dados de localização das estações pluviométricas da FUNCEME.

<b>Estação</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>Série de Dados</b>
Viçosa do Ceará (Sede)*	41° 05' W	03° 34' S	1974 / 2004
Viçosa do Ceará (Padre Vieira)	41° 20' W	03° 34' S	1998 / 2004
Granja (Ibuguaçu)	41° 16' W	03° 21' S	1998 / 2004
Granja (Pessoa Anta)	40° 59' W	03° 21' S	1998 / 2004
Granja (Timonha)	41° 08' W	03° 15' S	2000 / 2004
Chaval (Sede)*	41° 14' W	03° 02' S	1979 / 2004

\*Postos representativos para avaliação das condições históricas médias da taxa de escoamento superficial.

No tratamento dos dados de temperatura foram consideradas as médias compensadas referentes a cada mês. A temperatura média compensada ( $T_{\text{comp}}$ ) foi obtida por ponderação entre as temperaturas observadas nos pontos discretos de monitoramento  $T_{12}$  e  $T_{24}$  (12:00 e 24:00 TMG – Tempo de Greenwich, respectivamente) e a máxima ( $T_{\text{max}}$ ) e mínima ( $T_{\text{min}}$ ) do dia. Assim:

$$T_{\text{comp}} = \frac{T_{12} + (2 \times T_{24}) + T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{5}$$

Os dados de evaporação foram calculados a partir de leituras em um tanque Classe A, representando, portanto, o volume de água desprendido de uma superfície líquida plana para a atmosfera. As taxas de evaporação e precipitação correspondem às médias mensais baseadas em medidas diárias de cada parâmetro.

As informações obtidas através das estações climatológicas e dos postos pluviométricos foram associadas a cada uma das sub-bacias dos rios Timonha e Ubatuba o que possibilitou estimar a contribuição efetiva de cada uma para o sistema estuarino. Desse modo foram determinadas taxas de descarga fluvial da bacia de drenagem para as seguintes situações:

- Bacia sob condições hidroclimáticas médias, baseadas em séries históricas, antes do represamento das águas do rio Timonha;
- Bacia controlada pelas condições hidroclimáticas médias, baseadas em séries históricas, sob os efeitos do açude Itaúna;
- Bacia de drenagem controlada pelas condições hidroclimáticas registradas durante o ano monitorado (2004), mas sob a hipótese de ausência do reservatório Itaúna;
- Bacia de drenagem após a construção do açude Itaúna, sob influência das condições hidroclimáticas atuantes durante o ano monitorado (2004).

A partir do cruzamento dessas informações, relacionadas tanto a configuração da bacia de drenagem quanto às séries de dados hidroclimáticos, foi possível avaliar o comportamento hidrológico do sistema assim como também, os impactos do barramento sobre o aporte de água doce na região estuarina. O conhecimento da variabilidade hidrológica associada a forçante gerada pela descarga fluvial subsidiou ainda a modelagem dos processos de transporte, circulação e mistura atuantes no sistema estuarino.

Tabela 08: Médias mensais de temperatura e evaporação obtidas através das estações do INMET.

Mês	Sobral - (1961 – 1990)		Estação - Acaraú (1976 – 1988)	
	Temperatura (°C)	Evaporação (mm)	Temperatura (°C)	Evaporação (mm)
Janeiro	26,7	157	27,0	202
Fevereiro	27,1	125	26,8	184
Março	26,2	95	26,5	116
Abril	27,5	102	26,3	91
Mai	26,2	100	26,2	111
Junho	24,9	117	25,9	154
Julho	26,4	158	26,4	192
Agosto	27,2	191	26,8	262
Setembro	26,3	221	27,1	282
Outubro	26,7	225	27,1	291
Novembro	27,1	220	27,3	284
Dezembro	27,1	205	27,5	258
<b>Total</b>	-	<b>1.916</b>	-	<b>2.427</b>
<b>Média</b>	<b>26,6</b>	<b>159,67</b>	<b>26,8</b>	<b>202,25</b>

Com base nas séries da tabela 08, nota-se que a temperatura não varia significativamente, sendo praticamente homogênea no tempo e no espaço. A amplitude térmica anual para a região das nascentes é de 2,6° C enquanto que na área estuarina, desce para apenas 1,6° C.

A análise das flutuações diurnas da temperatura do ar demonstra oscilações discretas vinculadas a maior ou menor exposição ao sol ao longo do dia (Figura 08). A amplitude térmica observada durante os experimentos referentes ao período chuvoso foi de 7° C com média de 29° C enquanto que durante o período de estiagem a amplitude foi de 8° C com média de 31° C. Essa sazonalidade térmica está relacionada principalmente a influência da ZCIT sobre as características meteorológicas suavizando os efeitos da semi-aridez durante o período chuvoso.

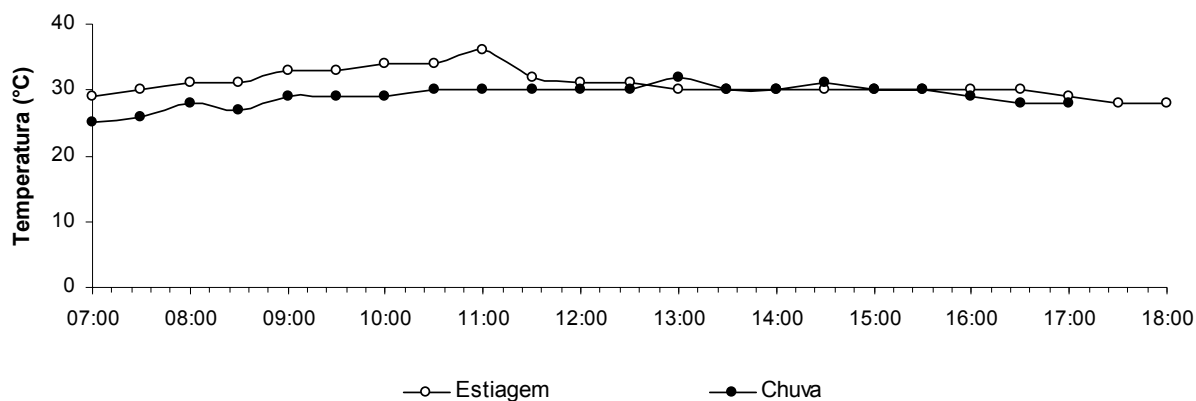


Figura 08: Flutuações diurnas da temperatura registrada na Estação Base.

Como já era esperado, as taxas de evaporação mostraram-se bem mais rigorosas na região estuarina. Historicamente o volume evaporado nessa área é 27% maior do que aquele evaporado nas sub-bacias onde se localizam as cabeceiras dos rios.

Tabela 09: Médias mensais de precipitação nos postos da FUNCEME com mais de 25 anos de monitoramento.

Mês	Posto – Viçosa do Ceará (1974 / 2004)	Posto – Chaval (1979 / 2004)
	Precipitação (mm)	Precipitação (mm)
Janeiro	197,29	127,93
Fevereiro	281,12	167,56
Março	364,91	254,35
Abril	320,40	211,20
Mai	156,58	100,14
Junho	57,97	32,80
Julho	28,65	7,72
Agosto	4,65	0,89
Setembro	4,50	0,41
Outubro	3,48	0,00
Novembro	15,86	0,71
Dezembro	64,60	13,06
<b>Total</b>	<b>1.500,02</b>	<b>916,78</b>

Os dados históricos de precipitação demonstram que as sub-bacias das nascentes contribuem efetivamente com a maior parcela de chuvas para a bacia de drenagem (Tabela 09). Na área estuarina o volume de chuvas é 39% menor do que o verificado nas serras.

A supremacia da evaporação sobre a precipitação demonstra uma forte tendência do sistema à assumir condições de deficiência hídrica. Isso se torna ainda mais evidente se considerarmos apenas as bacias do baixo curso onde a evaporação é quase três vezes maior que a precipitação.

Tabela 10: Médias mensais de precipitação nos postos da FUNCEME em 2004.

Mês	Localização dos Postos					
	Viçosa do Ceará		Granja			Chaval
	Sede	Padre Vieira	Ibuguaçu	Pessoa Anta	Timonha	Sede
Janeiro	360,4	493,0	342,0	234,0	719,0	551,1
Fevereiro	581,2	132,0	179,0	263,0	180,0	254,4
Março	262,8	36,0	113,0	121,0	276,0	211,7
Abril	143,8	0,0	171,0	193,0	187,0	194,3
Mai	168,0	30,0	0,0	137,0	50,0	20,3
Junho	101,8	16,6	0,0	168,0	141,5	153,2
Julho	56,6	36,0	0,0	47,0	0,0	3,4

Agosto	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Novembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dezembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Total</b>	<b>1.677,6</b>	<b>743,6</b>	<b>805,0</b>	<b>1.163,0</b>	<b>1.553,5</b>	<b>1.388,4</b>

Para o período de monitoramento (2004), quando os dados de pluviometria tiveram maior representatividade para cada sub-bacia, a tendência à deficiência hídrica se manteve (Tabela 10). No entanto, as diferenças entre as taxas de evaporação e precipitação foram menores do que as baseadas em séries históricas. Nas nascentes dos rios Timonha e Ubatuba (Bacias 1 e 5) as diferenças foram respectivamente -238,4 mm e -1.172,4 mm e na área estuarina, -1.038,6 mm. O valor negativo representa a predominância da perda de água do sistema para a atmosfera.

Na análise dos dados de precipitações pluviométricas constatou-se ainda que o ano de 2004 foi atípico. As médias históricas demonstram que a precipitação pluviométrica anual incidente sobre a bacia estuarina é de 917 mm. No entanto, em 2004, o total precipitado foi de 1.390 mm o que representou um aumento de 52% em relação a média histórica de chuvas para região.

Nesse caso os dados de precipitação referentes ao período monitorado (2004) não são significativos para a análise dos impactos do barramento a longo prazo. Para suprir essa deficiência foram feitas também simulações do escoamento da bacia de drenagem sob as condições atuais de represamento, mas considerando as médias históricas dos parâmetros climatológicos.

### **6.1.2. Características do Escoamento Superficial**

Os recursos da área refletem diretamente as condições climáticas da região. O escoamento superficial encontra-se representado pelos rios e riachos intermitentes que formam a bacia hidrográfica dos rios Timonha e Ubatuba. Essa bacia ocupa uma área total de aproximadamente 2.400 km<sup>2</sup> dos quais 770 km<sup>2</sup> correspondem à bacia afluyente ao reservatório Itaúna.

A avaliação das características hidrológicas mostra um sistema bastante marcado pelos efeitos da sazonalidade hidroclimática. Praticamente toda a água doce que chega ao sistema estuarino no decorrer de um ano, escoo durante o primeiro semestre. As variações da descarga fluvial de cada sub-bacia afluyente ao sistema estuarino Timonha / Ubatuba estão

apresentadas nas tabelas 11 e 12, sendo a primeira baseada nas séries de dados históricos e a segunda nos dados verificados durante o ano de monitoramento (2004).

Tabela 11: Variação do coeficiente de escoamento superficial e da descarga fluvial de cada sub-bacia ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) com base nas médias históricas.

Mês	Rio Timonha								Rio Ubatuba									
	SB1 *		SB2 *		SB3		SB4		SB5		SB6		SB7		SB8		SB9	
	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$
jan	0.4	15.5	0.2	2.2	0.2	0.9	0.2	0.5	0.4	9.1	0.2	5.9	0.2	1.9	0.2	0.4	0.2	1.2
fev	0.5	29.4	0.3	4.2	0.3	1.8	0.3	1.0	0.5	17.2	0.3	11.3	0.3	3.6	0.3	0.9	0.3	2.3
mar	0.6	46.1	0.5	9.6	0.5	4.1	0.5	2.4	0.6	27.1	0.5	26.1	0.5	8.4	0.5	2.0	0.5	5.3
abr	0.5	36.1	0.4	6.9	0.4	2.9	0.4	1.7	0.5	21.2	0.4	18.7	0.4	6.0	0.4	1.4	0.4	3.8
mai	0.3	9.8	0.1	1.2	0.1	0.5	0.1	0.3	0.3	5.7	0.1	3.2	0.1	1.0	0.1	0.2	0.1	0.6
jun	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
set	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
out	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
dez	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Média	-	11.5	-	2.0	-	0.9	-	0.5	-	6.8	-	5.4	-	1.7	-	0.4	-	1.1

SB – Sub-Bacia /  $\Delta f/P$  – Razão de Escoamento Superficial /  $q_{fi}$  – Descarga da Sub-Bacia.

\* Sub-bacias afluentes ao açude Itaúna.

O deflúvio médio da bacia de drenagem calculado para o período chuvoso foi de 36,7% enquanto que durante a estiagem reduziu-se a zero. Os dados históricos demonstram que as sub-bacias do rio Timonha têm uma capacidade de descarga média anual de  $4,7 \times 10^8 \text{ m}^3$ , o que representa praticamente 50% do volume total de água doce que deveria chegar ao estuário. A outra metade estaria associada às descargas fluviais das sub-bacias do rio Ubatuba. No total, se mantidas as médias históricas, o sistema deveria receber anualmente uma descarga fluvial da bacia de drenagem da ordem  $9,5 \times 10^8 \text{ m}^3$ .

No entanto, se consideramos a existência do açude Itaúna (subtraindo a vazão das sub-bacias 1 e 2), verifica-se uma redução de 91% na descarga fluvial do rio Timonha. Mesmo acrescentando a vazão regularizada pelo reservatório ( $1,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), que corresponde a  $3,5 \times 10^7 \text{ m}^3$  por ano, essa redução ainda se mantém muito alta (83%).

Somando-se as vazões dos rios Timonha e Ubatuba observa-se que a contribuição da bacia de drenagem afluyente ao reservatório representa 44,8 % de todo o volume de água doce que estaria disponível para a bacia litorânea. Atualmente, em virtude da construção do açude Itaúna, o sistema recebe anualmente  $5,6 \times 10^8 \text{ m}^3$ , sendo 87% provenientes das sub-bacias do

rio Ubatuba. A construção do açude Itaúna, apesar de ter reduzido significativamente a descarga fluvial da bacia de drenagem, garantiu o aporte de água doce para a bacia litorânea durante todo o ano, diminuindo assim os efeitos da sazonalidade do regime hídrico da região.

Tabela 12: Variação do coeficiente de escoamento superficial e da descarga fluvial de cada sub-bacia ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) com base nos dados de 2004.

Mês	SB1 *		SB2 *		SB3		SB4		SB5		SB6		SB7		SB8		SB9	
	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$	$\Delta f/P$	$q_{fi}$
jan	0.6	44.6	0.4	8.1	0.8	19.1	0.7	7.8	0.7	41.6	0.6	42.1	0.7	27.2	0.7	6.5	0.7	17.2
fev	0.7	88.2	0.5	10.0	0.3	2.1	0.5	2.4	0.2	3.6	0.3	13.0	0.5	8.3	0.5	2.0	0.5	5.2
mar	0.5	27.0	0.2	1.9	0.5	4.8	0.4	1.7	0.0	0.0	0.2	4.4	0.4	6.0	0.4	1.4	0.4	3.8
abr	0.2	7.3	0.4	5.7	0.4	2.3	0.4	1.5	0.0	0.0	0.3	12.2	0.4	5.1	0.4	1.2	0.4	3.2
mai	0.3	11.4	0.2	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jun	0.2	3.7	0.3	4.4	0.3	1.3	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.1	0.3	0.7	0.3	2.0
jul	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
set	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
out	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
dez	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Média	-	15.2	-	2.7	-	2.5	-	1.2	-	3.8	-	6.0	-	4.1	-	1.0	-	2.6

SB – Sub-Bacia /  $\Delta f/P$  – Razão de Escoamento Superficial /  $q_{fi}$  – Descarga da Sub-Bacia.

\* Sub-bacias afluentes ao açude Itaúna.

As maiores vazões normalmente são observadas durante os meses de março e abril. No entanto, durante o período de monitoramento, as descargas fluviais afluentes foram maiores nos meses de janeiro e fevereiro, correspondendo a 74% ( $9,1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ ano}$ ) de toda a água que chegou ao sistema estuarino durante o ano de 2004.

Nesse mesmo ano, o somatório das descargas fluviais das bacias afluentes ao sistema estuarino foi cerca de 30% acima da média histórica. Durante o período chuvoso o deflúvio médio nas sub-bacias dos rios Timonha e Ubatuba foi de 38% e 30%, respectivamente. Em contrapartida, durante a época de estiagem praticamente não houve escoamento superficial na área da bacia de drenagem.

Ignorando-se a presença do reservatório, em 2004, o volume total de água que chegaria ao estuário seria de  $1,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ , sendo  $6,8 \times 10^8 \text{ m}^3$  (57%) provenientes das sub-bacias do rio Timonha. No entanto, a descarga total de água doce que efetivamente escoou da bacia de drenagem para o estuário durante esse ano foi de  $8,3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , sendo que 96,0% desse total correspondem às descargas fluviais ocorridas durante os seis meses da época

chuvosa. Nesse caso, o volume escoado pelo rio Timonha foi de apenas  $2,8 \times 10^8 \text{ m}^3$  (33% da descarga efetiva calculada para 2004), valor que inclui também as vazões liberadas pelo açude (regularizada e sangria).

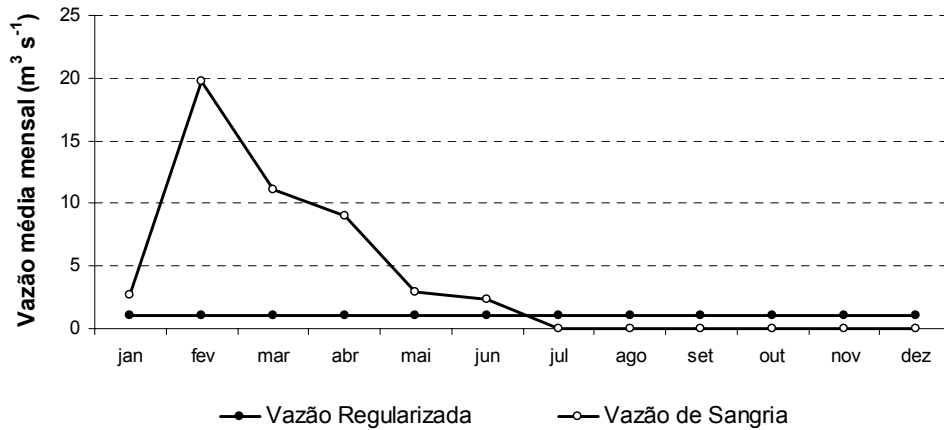


Figura 09: Vazões do açude Itaúna monitoradas pela COGERH em 2004.

O gráfico da figura 09 mostra que as vazões liberadas pelo açude Itaúna perenizaram o baixo vale do rio Timonha. A descarga média anual desse reservatório em 2004 foi de  $5,09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  com vazão de sangria ocorrendo apenas durante o período chuvoso. No primeiro semestre desse ano, somente essa vazão correspondeu a um volume de  $1,4 \times 10^8 \text{ m}^3$  (18% de toda a água doce escoada durante o período chuvoso).

Da descarga fluvial que efetivamente chegou a bacia litorânea em 2004 ( $8,3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ), as sub-bacias do rio Ubatuba responderam por  $5,5 \times 10^8 \text{ m}^3$ . Um aporte de água doce 15% acima da média histórica (Figura 10).

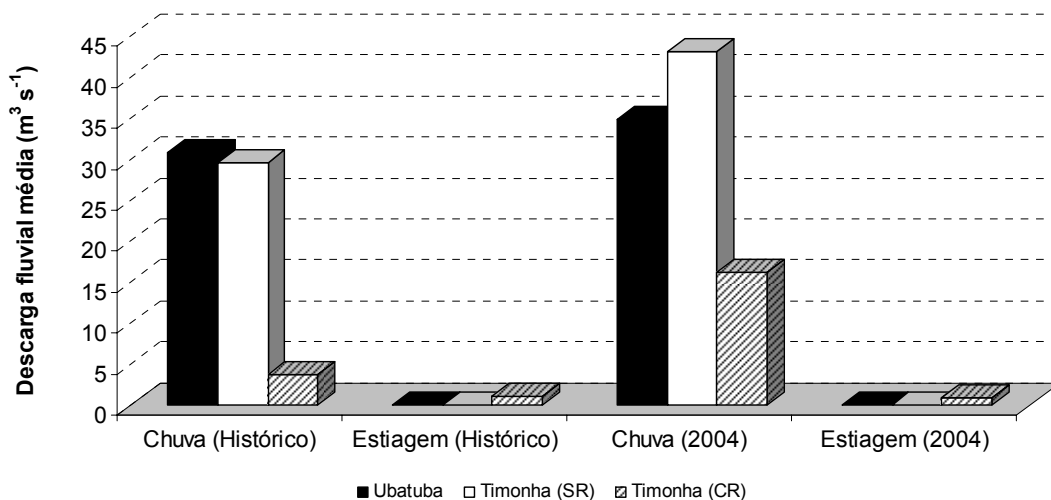


Figura 10: Descarga fluvial dos rios Timonha e Ubatuba considerando as hipóteses de ausência (SR) e presença (CR) de barramento.



## 6.2. Balanço de Água

As descargas fluviais das sub-bacias afluentes ao sistema estuarino foram utilizadas como subsídio à elaboração do balanço total de água no sistema estuarino. A contribuição da bacia de drenagem ( $Q_f$ ) para esse balanço foi obtida através do somatório entre as vazões médias de cada sub-bacia afluente.

Foram calculadas ainda as contribuições provenientes da lavagem das margens da sub-bacia litorânea ( $Q_m$ ) e do escoamento difuso incidente diretamente sobre o espelho d'água ( $Q_d$ ). Para estimar a contribuição exercida por cada um dos rios principais, a área da sub-bacia litorânea foi dividida ao meio e a taxa de escoamento superficial das margens, determinada para os rios Timonha e Ubatuba, separadamente. O cálculo da descarga resultante do escoamento difuso também foi feito a partir da divisão da área superficial do espelho d'água correspondente a cada um dos rios principais.

Em virtude da grande área de mangue que recobre a planície estuarina dos rios Timonha e Ubatuba, foi subtraído também o volume de água que é perdido para a atmosfera através da evapotranspiração ( $Q_{evap}$ ). A taxa de evapotranspiração média de manguezais de sistemas estuarinos tropicais é de  $2 \text{ mm dia}^{-1}$  (Andrews *et. al.*, 1984). Baseado nessa taxa e levando-se em consideração que o manguezal atualmente recobre uma área de  $50 \text{ km}^2$  (SEMACE, 2004) obteve-se uma taxa de evapotranspiração de  $1,16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  o que corresponde a uma perda anual de  $3,7 \times 10^7 \text{ m}^3$  de água para atmosfera através do processo de evapotranspiração.

Para os fluxos de água subterrânea ( $Q_{as}$ ), devido a falta de dados disponíveis para o cálculo desse parâmetro, assumiu-se o valor igual a zero. Esse valor foi adotado com base no conhecimento da pouca permeabilidade da estrutura geológica da área e das altas taxas de evaporação características de regiões semi-áridas.

As descargas fluviais associadas ao reservatório Itaúna ( $Q_r$ ) foram obtidas junto à COGERH, órgão responsável pelo monitoramento dos açudes do estado do Ceará. A vazão aplicada na fórmula do balanço de água corresponde ao somatório entre as vazões, regularizada e de sangria. No entanto, para a avaliação do comportamento histórico, foi considerada apenas a vazão regularizada visto que só existem dados de sangria para o período de 2002 a 2004.

A contribuição da maré para o balanço de água estuarino ( $Q_c$ ) foi calculada com base na diferença entre o volume de água que entra e sai do sistema, durante um ciclo completo de maré, através da seção correspondente a desembocadura fluvial.

As variáveis relacionadas ao balanço entre entrada e saída de água do sistema estuarino, elaborado a partir das séries de dados históricos, estão demonstradas na tabela 13. Os valores positivos representam entrada de água e os negativos, perda.

Tabela 13: Variáveis relacionadas ao balanço de água do sistema estuarino Timonha / Ubatuba com base nas séries de dados históricos.

Período	Variáveis ( $m^3 s^{-1}$ )	Rio Ubatuba	Rio Timonha (SR)	Rio Timonha (CR)
Chuvoso	$Q_f$	30,81	29,6	2,72
	$Q_m$	2,06	2,02	2,02
	$Q_d$	0,03	0,03	0,03
	$Q_{evap}$	-0,6	-0,6	-0,6
	$Q_{as}$	0	0	0
	$Q_r$	0	0	1,10
	$Q_c$	-301,8	-301,8	-33,7
Estiagem	$Q_f$	0,06	0,10	0
	$Q_m$	0	0	0
	$Q_d$	-1,22	-1,45	-1,45
	$Q_{evap}$	-0,6	-0,6	-0,6
	$Q_{as}$	0	0	0
	$Q_r$	0	0	1,10
	$Q_c$	502,9	502,9	976,1

SR – Sem reservatório / CR – Com Reservatório.

Nesse caso, em virtude da ausência de informações históricas sobre a contribuição da maré para o balanço de água desse sistema, foram aplicados os valores de  $Q_c$  obtidos para o período monitorado (2004). Quanto à hipótese SR (sem reservatório), assumiu-se que, historicamente, o rio Timonha apresentaria vazões semelhantes às do rio Ubatuba.

O balanço de água da tabela 13 demonstra ainda que as variações sazonais da descarga fluvial governam a hidrodinâmica do sistema estuarino. Na análise comparativa entre os balanços elaborados para os rios Ubatuba e Timonha (SR) observa-se uma grande semelhança entre as contribuições de cada uma das variáveis. Em contrapartida, o balanço de água elaborado para o rio Timonha (CR) evidencia que, durante a estiagem, há uma forte redução do volume de água doce e aumento da massa d'água marinha no interior do estuário. Durante o período chuvoso nota-se que a vazão associada a penetração do prisma de maré é significativamente menor e predominantemente de vazante.

As massas de água doce foram mais representativas sobre a composição do volume total do estuário durante o período chuvoso. Sob essas condições, a interação entre as massas d'água tende a formar um suave gradiente de densidade que favorece os processos de mistura

de natureza baroclínica. A presença do açude Itaúna suaviza os efeitos desses processos através da redução da componente de força relacionada à descarga fluvial.

Durante o período de estiagem as oscilações da maré representam o principal mecanismo de entrada de água no sistema o que favorece os transportes advectivos e difusivos de natureza barotrópica. No entanto, a descarga proveniente da vazão regularizada pelo reservatório, minimiza os efeitos do bombeamento gerado pela maré através da manutenção de uma forçante ligada ao escoamento de água doce que gera movimento estuário abaixo.

Para o ano de 2004 foram observadas algumas variações no regime hídrico do sistema estuarino Timonha / Ubatuba relacionadas principalmente à condições de descarga fluvial atípicas. O balanço de água elaborado para o ano de monitoramento encontra-se na tabela 14.

Tabela 14: Variáveis relacionadas ao balanço de água do sistema estuarino Timonha / Ubatuba elaboradas para o ano de 2004.

Período	Tipo de Descarga ( $m^3 s^{-1}$ )	Rio Ubatuba	Rio Timonha (SR)	Rio Timonha (CR)
Chuvoso	$Q_f$	34,97	43,17	7,31
	$Q_m$	4,91	4,81	4,81
	$Q_d$	0,41	0,49	0,49
	$Q_{evap}$	-0,6	-0,6	-0,6
	$Q_{as}$	0	0	0
	$Q_r$	0	0	9,08
	$Q_c$	-301,8	-301,8	-33,7
Estiagem	$Q_f$	0	0,07	0
	$Q_m$	0	0	0
	$Q_d$	-1,23	-1,47	-1,47
	$Q_{evap}$	-0,6	-0,6	-0,6
	$Q_{as}$	0	0	0
	$Q_r$	0	0	1,11
	$Q_c$	502,9	502,9	976,1

SR – Sem reservatório / CR – Com Reservatório.

Assim como para a análise dos dados históricos, constatou-se uma forte variação sazonal entre as contribuições da descarga fluvial. A ocorrência de chuvas acima da média histórica contribuiu para intensificação das descargas de água doce durante o semestre chuvoso e conseqüentemente para a formação de um gradiente de densidade mais proeminente. Durante o período de estiagem, o déficit hídrico favoreceu o acúmulo da massa

d'água marinha no interior do sistema com efeitos atenuados pela vazão regularizada do reservatório.

A inclusão das vazões de sangria proporcionou a obtenção de resultados mais reais para avaliação dos impactos da barragem sobre a hidrodinâmica estuarina. Enquanto a descarga do reservatório representava apenas 18% do volume nas estimativas baseadas em dados históricos para o período chuvoso, nos cálculos referentes ao ano de 2004, a representatividade para esse mesmo período subiu para 42%.

Levando-se em consideração os meses em que foram realizados os experimentos de campo foi possível estimar o balanço de água do sistema diante das condições de disponibilidade hídrica máxima e mínima ocorridas em 2004. A tabela 15 mostra as variáveis do balanço de água elaborado para os meses de fevereiro e novembro de 2004, quando foram realizados os experimentos de campo.

Tabela 15: Variáveis relacionadas ao balanço de água do sistema estuarino Timonha / Ubatuba elaboradas para os meses em que foram realizados os experimentos de campo - 2004.

Período	Tipo de Descarga ( $m^3 s^{-1}$ )	Rio Ubatuba	Rio Timonha (SR)	Rio Timonha (CR)
Fevereiro Chuvoso	$Q_f$	32,05	102,67	4,46
	$Q_m$	4,9	4,80	4,80
	$Q_d$	0,33	0,40	0,40
	$Q_{evap}$	-0,6	-0,6	-0,6
	$Q_{as}$	0	0	0
	$Q_r$	0	0	20,86
	$Q_c$	-301,8	-301,8	-33,7
Novembro Estiagem	$Q_f$	0	0	0
	$Q_m$	0	0	0
	$Q_d$	-1,34	-1,60	-1,60
	$Q_{evap}$	-0,6	-0,6	-0,6
	$Q_{as}$	0	0	0
	$Q_r$	0	0	1,10
	$Q_c$	502,9	502,9	976,1

SR – Sem reservatório / CR – Com Reservatório.

De acordo com os resultados obtidos no balanço de água pode-se dizer que o sistema estuarino Timonha / Ubatuba é um estuário temporário. Nesse caso, assume as características estabelecidas na definição de Cameron & Pritchard (1963) apenas durante o período chuvoso.

### 6.3. Características Hidrológicas do Sistema Estuarino

#### 6.3.1. Salinidade

Na plataforma continental interna do estado do Ceará, observa-se que a salinidade apresenta variações ao longo do ano que são controladas, dentre outros fatores, pela maior ou menor descarga fluvial. Segundo dados do Geomar XVII, durante o período chuvoso, a zona costeira apresenta salinidade média variando entre 35,0 e 37,0. Para a época de estiagem os valores observados são um pouco mais altos, oscilando entre 37,0 e 38,0 (Freire, 1989).

Os efeitos da sazonalidade da descarga fluvial sobre a salinidade são ainda mais fortes em sistemas estuarinos. Nesse estudo a salinidade foi mensurada ao longo dos rios Timonha e Ubatuba, o que viabilizou a caracterização halina de cada um, separadamente, durante um ciclo completo de maré de sizígia. Os gráficos de distribuição longitudinal da salinidade no rio Timonha para os períodos de chuva e de estiagem estão demonstrados na figura 11.

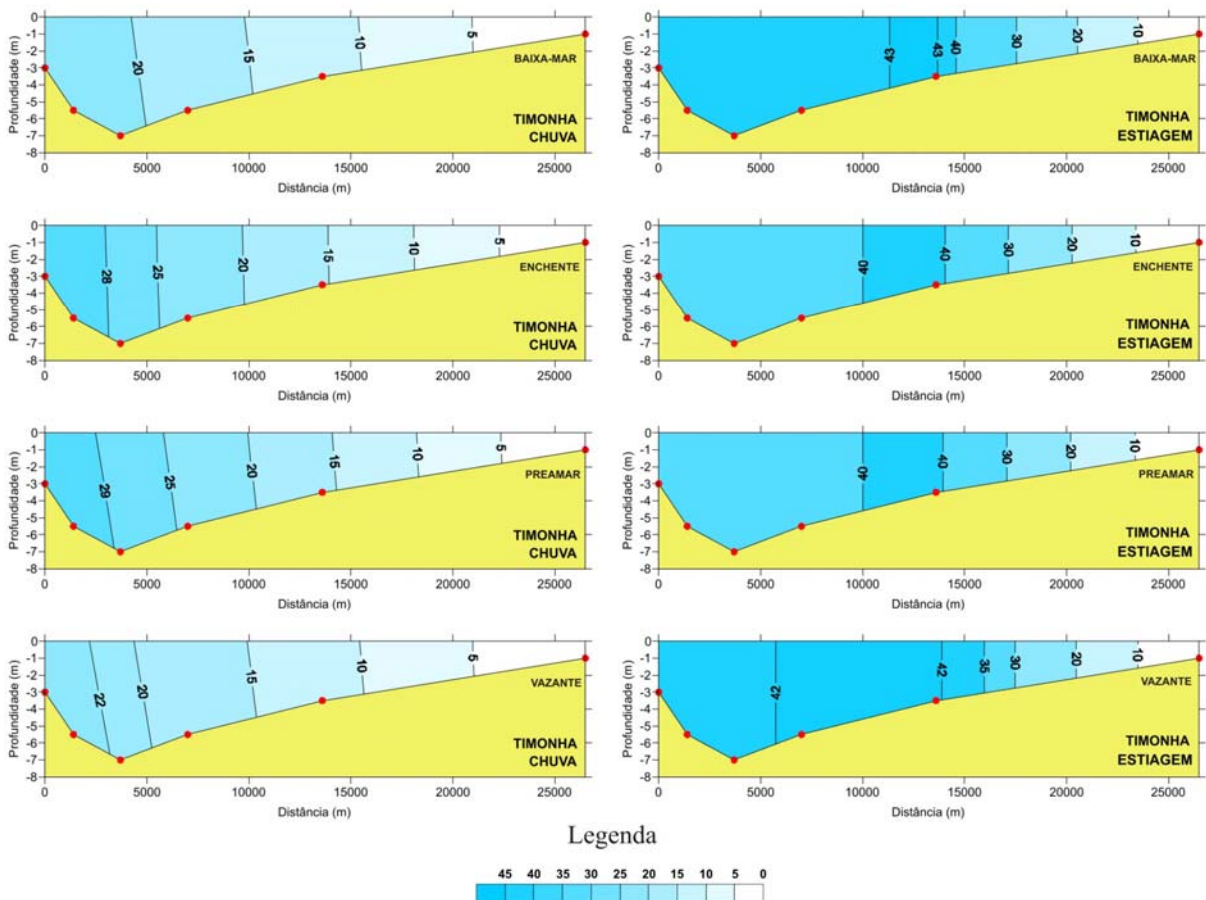


Figura 11: Distribuição longitudinal da salinidade média da coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

A zona do rio foi delimitada à aproximadamente 26 km de distância da foz, onde não foi verificada qualquer influência da maré (salina e dinâmica) em nenhum dos experimentos. No entanto, durante os experimentos de chuva, essa zona avançou sobre a área estuarina chegando a uma distância mínima de aproximadamente 14 km em relação a foz.

No perfil batimétrico médio do rio Timonha (Figura 11) fica claro que o sistema funciona como um reservatório. A desembocadura é mais rasa que a região interna o que dificulta a troca de água com o oceano, principalmente durante a época de estiagem. Aproximadamente 15 km antes de chegar à desembocadura, o fluxo fluvial é forçado pela morfologia a desviar-se em direção ao rio Ubatuba, contornando a Ilha Grande. Esse se constitui como o principal canal de ligação do sistema com o mar.

No período chuvoso nota-se uma suave haloclina, evidente em praticamente todas as fases de maré e que tende a se formar a 2,0 m de profundidade. Os perfis verticais da coluna d'água demonstraram que a salinidade varia em média 3,0 unidades entre as medidas de superfície e fundo, no entanto, foram identificadas diferenças de até 9,0 unidades no perfil de salinidade da seção 20 durante a maré vazante (7,0 na superfície e 16,0 no fundo). Esse fenômeno está associado a maior disponibilidade de água doce que gera uma componente de transporte estuário abaixo mais forte e um gradiente de densidade mais proeminente. Já na época de estiagem, o sistema não apresenta estratificação salina sendo caracteristicamente, bem misturado e lateralmente homogêneo durante todo o ciclo de maré.

As variações da salinidade associadas a sazonalidade do regime fluvial do rio Timonha refletem-se não só sobre a estrutura vertical da coluna d'água, mas também na disposição das massas d'água ao longo do canal. Observa-se, que durante o período chuvoso, a distribuição da salinidade cresce progressivamente do rio para o mar com regimes oscilando do limnético ( $< 0,5$ ) ao eusalino (30,0 à 40,0). Na época de estiagem o sistema é tipicamente eusalino com fortes indícios de hipersalinização.

No estuário do rio Timonha, durante o período de chuva, a salinidade média é de 24,5 com desvio padrão de 7,6. Durante a estiagem essa média sobe para 40,2 com desvio padrão igual a 1,6. A variação sazonal da salinidade reflete a ação combinada entre redução da descarga de água doce e da precipitação e aumento da evaporação. Segundo Miranda *et al.* (2002) num sistema estuarino com pequena descarga fluvial forçado por mesomaré ou macromaré, o cisalhamento das correntes do fundo tende a produzir turbulência fazendo com que o fluxo estuário acima seja capaz de erodir completamente a haloclina. Nesse caso o transporte vertical de sal é desprezível e o processo de mistura ocorre primordialmente na direção longitudinal.

Na baixa-mar do período de chuva, a salinidade média ao longo do canal do rio Timonha foi de aproximadamente 20,0 (desvio padrão de 7,4). A máxima de 26,6 foi observada na estação 8, a 1,4 km de distância do mar. Na estação 20, localizada a 13,6 km de distância da foz, a salinidade foi igual a 0,0. Nessa mesma estação, durante a baixa-mar do período de estiagem, verificou-se o pico de salinidade máxima do estuário com valores médios próximos a 43,0. Para esse período a salinidade mínima de 39,8 foi obtida na estação 3 (desembocadura fluvial) e o valor médio ao longo do canal foi de 41,6 (desvio padrão de 1,0).

Como pode ser observado, a componente de força vinculada à descarga fluvial exerce papel fundamental sobre a hidrodinâmica da área. Durante o monitoramento referente ao período chuvoso de 2004 a descarga média de  $9,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  foi suficiente para conter o avanço da maré salina e extinguir os efeitos da hipersalinização sobre a área estuarina. Nesse sentido, destaca-se também o importante papel exercido pela vazão regularizada do reservatório. A análise dos dados históricos demonstra que, durante o período de estiagem, a vazão fluvial se reduz a zero e o sistema tende a assumir características de estuário negativo. Sem a descarga de  $1,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  os efeitos da hipersalinização no baixo curso do rio Timonha durante o período de estiagem seriam ainda mais forte.

Nos experimentos realizados durante a enchente da maré referente ao período chuvoso a salinidade média foi de 25,2 (desvio padrão de 8,6) com máxima de 31,8 na área da desembocadura e mínima de 2,1 a 13,6 km do mar. Analisando a mesma fase de maré, sendo esta correspondente ao período de estiagem, observou-se tendência semelhante aquela apresentada durante a baixa-mar. A salinidade máxima igual a 41,7 foi observada nas estações 19, 20 e 21 (a 13,6 km da foz) e a mínima de 38,2 a apenas 1,4 km da foz. A salinidade média dessa fase de maré para o período seco foi de 39,2 (desvio padrão 1,2).

Os maiores valores de salinidade do período chuvoso foram observados durante a preamar. A média dessa fase foi de 27,7 (desvio padrão de 5,7) com salinidade máxima verificada na área da desembocadura (32,8) e mínima a 13,6 km da foz (16,0). Em contrapartida, durante os experimentos da estação seca, a preamar apresentou os menores valores de salinidade. Essa inversão reflete claramente o déficit hídrico do sistema e as altas taxas de evaporação. A média calculada para o rio Timonha sob essas circunstâncias foi de 39,0 (desvio padrão de 1,2), a máxima de 41,3 foi verificada na estação 20 e a mínima de 38,0 na estação 9, distantes 13,6 km e 1,4 km da desembocadura fluvial, respectivamente.

Esse fenômeno de inversão ocorre porque a massa d'água, retida no interior estuarino durante a baixa-mar, sofre intenso processo de evaporação e, assim aumenta sua concentração

de sais. A perda de água para a atmosfera é tão forte que, eventualmente, a massa d'água estuarina pode apresentar salinidade mais alta que a água do mar. Esse fenômeno é acentuado ainda pela morfologia da foz que, por apresentar muitos bancos arenosos, contribui para o represamento das águas no interior estuarino. Então, durante a preamar, é na verdade, a água do mar que dilui parte dos sais concentrados na área estuarina, reduzindo a salinidade.

O desenvolvimento de uma zona de salinidade máxima no interior de estuários localizados em zonas semi-áridas é muito comum. Pinheiro (2003a) identificou esse fenômeno no estuário do rio Malcozinhado, litoral leste do Ceará, durante os meses correspondentes ao período de estiagem. Em alguns casos os estuários podem ser completamente inversos durante todo o ano, como foi observado nos estuários no norte da Austrália (Ridd & Stieglitz, 2002).

Durante a vazante da maré a descarga fluvial tende a expulsar toda a água do mar do interior estuarino. Esse mecanismo é nitidamente observado durante o período chuvoso, quando a descarga fluvial é mais eficiente. No rio Timonha a salinidade média durante a maré vazante em épocas de chuva é de 23,9 apresentando desvio padrão igual a 6,8. A salinidade máxima de 32,0 foi medida nas estações 7 e 8 (ambas a 1,4 km de distância da desembocadura fluvial), e a mínima de 13,5 na estação 20 (a 13,6 km da foz). No período de estiagem confirma-se a tendência do sistema em acumular água em seu interior, aumentando a concentração de sais dissolvidos. A salinidade média de 41,3 calculada para esse período é significativamente mais alta do que aquela verificada durante a preamar. O desvio padrão de 1,5 demonstra a pouca variabilidade ao longo do canal do rio Timonha. Os valores máximos e mínimos de 43,2 e 39,2 são correspondentes às estações 20 e 3, respectivamente.

Como mostra a Figura 12, no rio Ubatuba a distribuição longitudinal da salinidade foi determinada a partir da zona do rio, delimitada a 2,4 km da desembocadura fluvial, até a estação 1 (foz do estuário).



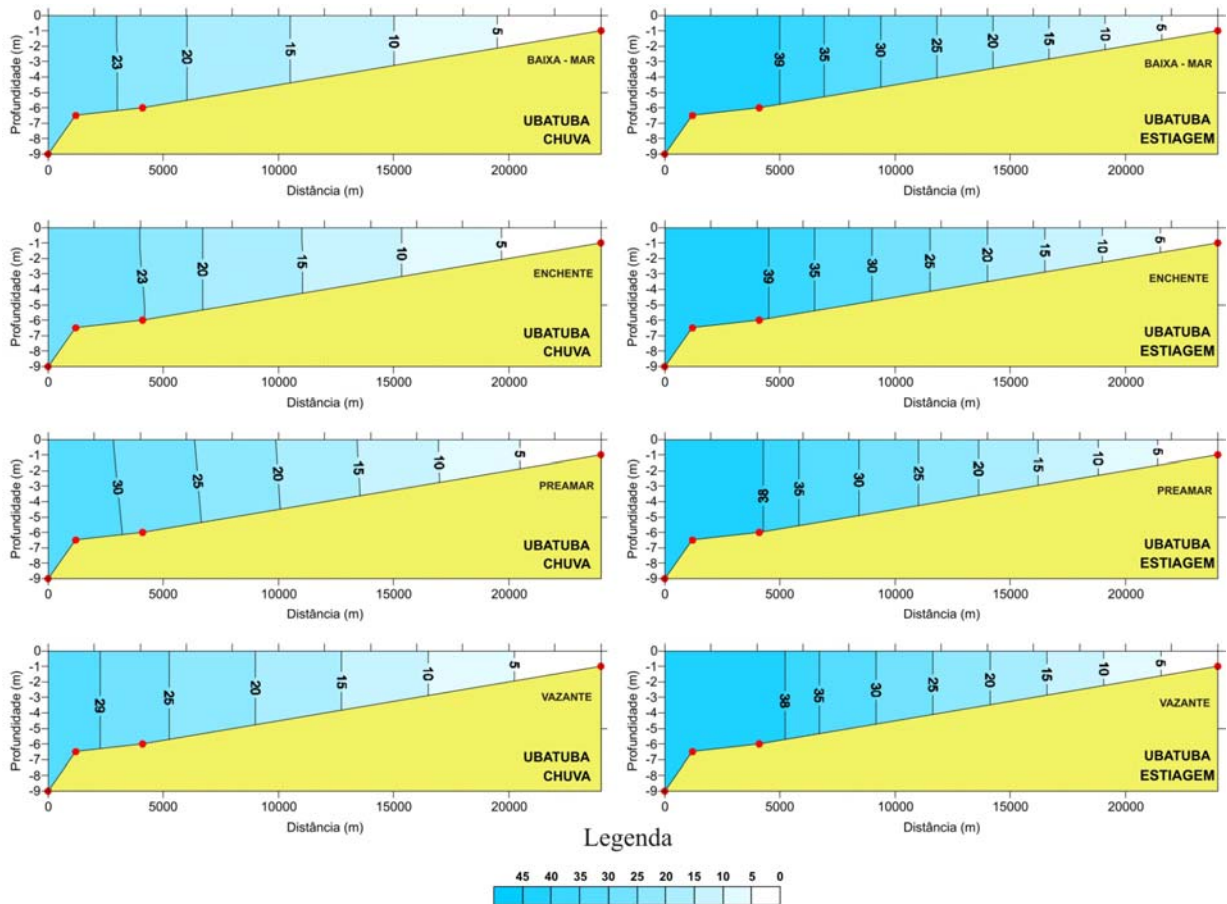


Figura 12: Distribuição longitudinal da salinidade média da coluna d'água do rio Ubatuba ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

A morfologia do canal do rio Ubatuba favorece os fluxos de entrada e saída de água. Ao contrário do que acontece com o rio Timonha, no rio Ubatuba, as maiores profundidades são observadas na área da foz (9,0 m) onde não há obstáculos capazes de desviar o fluxo principal do escoamento (Figura 12). A interação entre as massas d'água marinha e estuarina são mais intensas ao longo desse canal e o escoamento, em ambos os sentidos, mais forte.

Do mesmo modo que para o rio Timonha, durante os experimentos referentes ao período chuvoso, a estrutura vertical da coluna d'água do rio Ubatuba apresentou significativas variações de salinidade. Em geral a haloclina desse rio forma-se a 3,5 m de profundidade com uma diferença média de 3,0 unidades entre a salinidade da superfície e do fundo. A maior estratificação foi identificada no perfil vertical da estação 11 durante a enchente da maré quando a salinidade variou 8,0 unidades (19,0 na superfície e 27,0 no fundo). Durante a estiagem o sistema é verticalmente e lateralmente homogêneo fortemente controlado pelas oscilações da maré visto que não existe descarga fluvial durante a estação seca.

Quanto à distribuição longitudinal da salinidade o rio Ubatuba apresenta um comportamento diferente daquele observado no rio Timonha. Durante o período chuvoso esse rio comporta-se como um sistema polihalino (18,0 à 30,0) sem grandes variações ao longo do canal. Em períodos de estiagem a tendência à homogeneidade torna-se ainda mais forte e o ambiente estuarino assume características de euhalino (30,0 à 40,0).

Diferentemente do que ocorre no estuário do rio Timonha, não são observados indícios de hipersalinização ao longo do canal do rio Ubatuba. No entanto, em virtude da ausência de descarga fluvial durante o período seco, constata-se que o sistema é preenchido primordialmente com água de origem marinha o que justifica as altas taxas de salinidade e a homogeneidade da massa d'água do sistema em todos os estágios da maré.

No semestre chuvoso a salinidade média do rio Ubatuba, durante um ciclo completo de maré, é de 28,0 com desvio padrão de 4,2. Em épocas de estiagem esse valor médio sobe para 39,3 com desvio padrão de 0,9. A drástica redução do desvio entre as medidas de salinidade ao longo das estações do ano comprova a homogeneidade longitudinal do sistema. Nesse caso, o rio Ubatuba assume características de “braço de mar” com salinidade um pouco superior a da zona costeira adjacente em virtude das rigorosas taxas de evaporação as quais o sistema está sujeito.

Durante a baixa-mar dos experimentos de chuva a salinidade média do sistema foi de 24,4 (desvio padrão de 1,5). A estação 1, situada na desembocadura fluvial, apresentou o maior valor (25,1) e a estação 11, localizada a 4,1 km da foz, o menor valor (23,3). No período de estiagem, a salinidade observada durante a baixa-mar foi a maior verificada durante todo o ciclo de maré. A média referente a esse período foi de 40,0 (desvio padrão de 0,4), com máxima de 40,2 também medida na estação 11 e mínima de 39,8 na estação 5 (1,2 km à montante da foz estuarina).

No período chuvoso, a enchente da maré apresentou valores de salinidade média próximos a 24,0 (desvio padrão de 6,17). A salinidade máxima de 25,9 foi verificada na estação 1 enquanto que a mínima de 22,6 ocorreu na estação 12, a 4,1 km de distância da desembocadura fluvial. Para a época de estiagem a salinidade média da coluna d'água foi de 39,8 sem variações entre as estações.

Os picos máximos da salinidade durante o semestre chuvoso foram observados no estofo da preamar. Nessa fase da maré a salinidade média do rio Ubatuba foi de 33,0 (desvio padrão de 1,7) com máxima de 34,5 e mínima de 30,1 medidas nas estações 1 e 11, respectivamente. Durante a estiagem, a salinidade média, nessa mesma fase de maré, ao longo

do rio Ubatuba, foi de 38,17 (desvio padrão de 0,1). A salinidade máxima observada nessas circunstâncias foi de 38,4 na estação 12 e a mínima de 38,1 na estação 1.

A distribuição longitudinal da salinidade durante a vazante da maré referente ao período chuvoso apresentou média de 38,8 e desvio padrão de 1,3. A máxima (32,0) ocorreu na estação 1 e a mínima (29,6) na estação 6, localizada a 1,2 km da foz. Durante o período de estiagem a média foi de 39,0 (desvio padrão de 0,5) com máxima de 40,3 verificada na estação 10 e mínima de 38,8 na estação 1.

Na desembocadura fluvial (estações 1, 2 e 3), durante o período de chuva, a salinidade média ao longo da coluna d'água foi de 29,8. Os valores máximo (34,5) e mínimo (23,8) da salinidade nessa região foram verificados na estação 1 durante a preamar e baixa-mar, respectivamente. Para o período de estiagem a salinidade média da foz foi de 39,5 com máxima verificada durante a baixa-mar (40,4) na estação 3 e mínima (38,8) durante a vazante da maré na estação 1. Ressalta-se que essas estações estão sob influência tanto do rio Timonha quanto do rio Ubatuba e que a estação 1 localiza-se exatamente na área de interligação do sistema estuarino com o mar refletido diretamente os fluxos entre os dois ambientes.

Levando-se em consideração a distribuição horizontal da salinidade ao longo do sistema, elaborada com base nas médias dos perfis de cada estação, podem ser avaliadas as alterações na salinidade que estão vinculadas a influência dos rios afluentes, diluição gradativa da água do mar no movimento estuário acima e a disposição espacial das massas d'água no interior estuarino. A figura 13 mostra os campos de salinidade do sistema estuarino e suas variações ao longo do ciclo de maré durante os períodos de chuva e de estiagem.

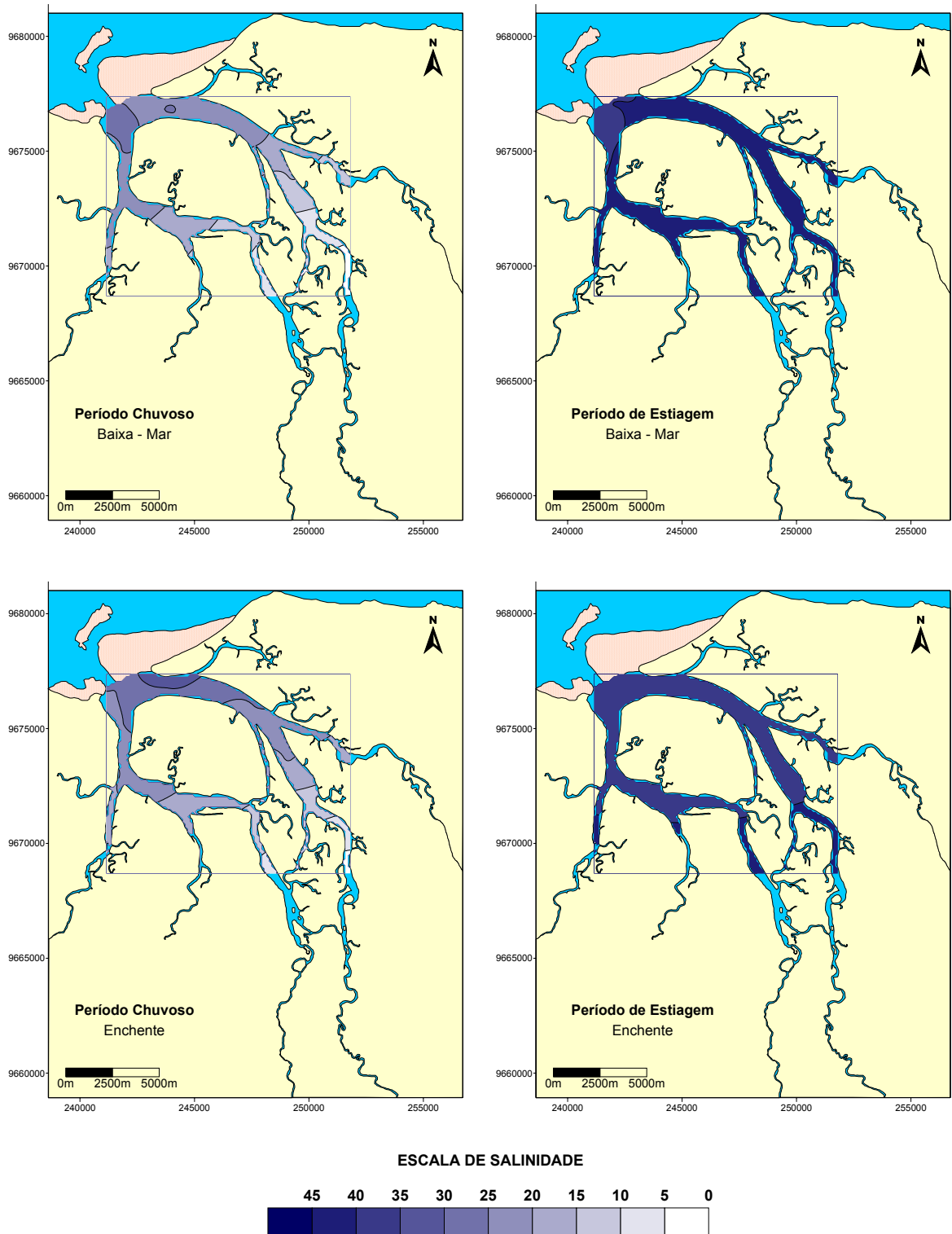


Figura 13: Distribuição horizontal da salinidade média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a baixa-mar e a enchente da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.

A contribuição dos rios afluentes ao sistema estuarino Timonha / Ubatuba parece exercer pouca influência sobre a distribuição da salinidade. Observa-se que, no período chuvoso, o sistema como um todo apresentou grande poder de diluição, empurrando a zona de mistura para fora dos domínios geomorfológicos do estuário. Sob essas condições, a salinidade observada na região de Barra Grande foi de aproximadamente 25,0 o que comprova a eficiência do movimento de transporte estuário abaixo gerado pela descarga fluvial.

As características hidrodinâmicas atuantes durante o período de estiagem favorecem a formação de área hipersalinas no interior estuarino. Durante a baixa-mar o sistema apresenta-se praticamente todo com salinidade superior a 40,0 sem grandes mudanças ao longo das demais fases da maré.

Destaca-se também que a morfologia da foz representa um forte obstáculo aos processos de mistura. Os bancos de sedimentação arenosa existentes na desembocadura fluvial controlam os fluxos entre o sistema estuarino e o oceano adjacente principalmente durante o período de estiagem. Nos diagramas da figura 20, lançando mão da salinidade para identificar as massas d'água, fica claro que o principal canal de interligação do sistema estuarino com o mar situa-se na região próxima a Cajueiro da Praia (margem oeste).

Durante a maré enchente do período chuvoso, o fluxo estuário acima encontra a barreira hidrodinâmica constituída pelo rio Ubatuba (descarga média de  $36,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durante o mês de fevereiro de 2004). Em Barra Grande, ocorre o desvio do movimento em direção ao rio Timonha onde a descarga fluvial oferece menos resistência (descarga média de  $9,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durante o mês de fevereiro de 2004). Assim a intrusão salina penetra mais facilmente nesse último rio. Durante o período de estiagem, tendo em vista a ausência de descarga fluvial, nenhum dos rios oferece resistência ao avanço da maré e o estuário é facilmente preenchido pela água do mar.

Na época de chuvas há uma redução da excursão da maré sobre o sistema estuarino. Na preamar, o rio Timonha assume características de polihalino (18 à 30) a cerca de 3,7 km de distância da foz enquanto que, no rio Ubatuba isso ocorre a pouco mais de 4,0 km de distância do mesmo referencial. Em períodos de estiagem, a subida do prisma de maré causa efeito inverso ao observado durante o período chuvoso. Em ambos os rios, durante o período de estiagem, a salinidade média da preamar é menor do que a observada durante a baixa-mar. Além disso, nota-se que os campos de hipersalinização tendem a se dispersar durante essa fase da maré ocupando áreas maiores, porém com salinidades menores.

A distribuição horizontal da salinidade durante a preamar e vazante referentes aos períodos de chuva e de estiagem monitorados em 2004 estão demonstrados na figura 14.

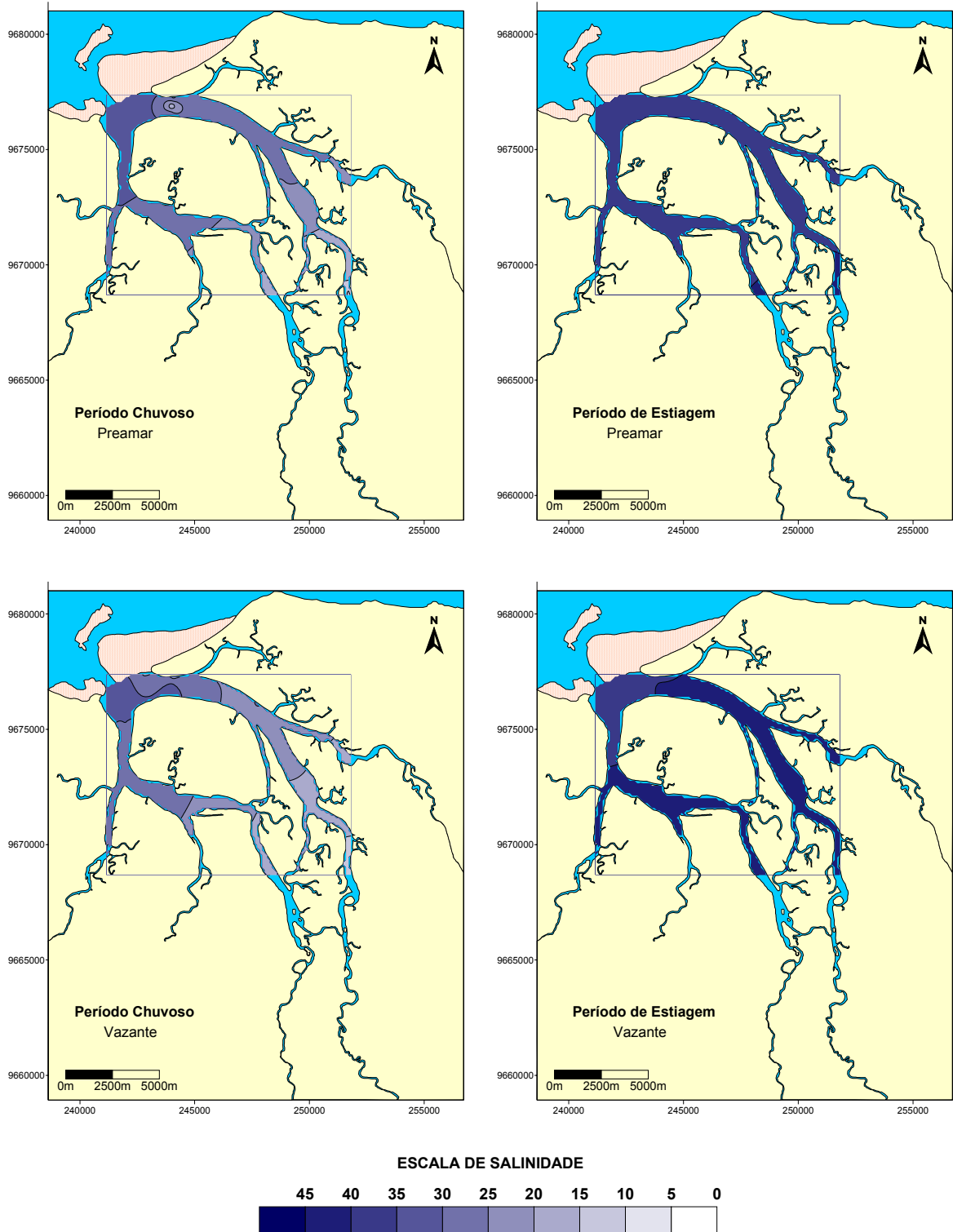


Figura 14: Distribuição horizontal da salinidade média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a preamar e a vazante da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.

Durante a vazante da maré correspondente ao período chuvoso a massa de água salina fica restrita a região do canal de Cajueiro da Praia (estação 1), por onde a descarga fluvial escoar para o mar. Em contrapartida, na época de estiagem, o represamento de água salgada no interior estuarino começa a ser sentido no início da vazante permanecendo assim por aproximadamente meio período de maré (6,2 hs).

Em praticamente todos os estágios da maré o rio das Almas, afluente situado em Pontal das Almas (à montante da estação 9), demonstra uma ligeira influência sobre a salinidade estuarina. Esse rio tem como principal fonte hídrica a percolação de água proveniente de aquíferos dunares e sua contribuição para o sistema está restrita ao período chuvoso. No entanto, as variações associadas a essa contribuição têm efeito local, sendo evidente apenas na área de confluência entre esse rio e o rio Timonha (estações 8 e 9).

De acordo com a classificação elaborada por Pritchard (1955), baseada na estratificação de salinidade, os rios Timonha e Ubatuba formam um sistema estuarino do tipo bem misturado e lateralmente homogêneo. No entanto, durante o período chuvoso, algumas áreas apresentaram características de transição para outros tipos de estratificação salina. Na saída do rio Timonha (estações 7, 8 e 9) foi observada uma estratificação lateral (variação de 15 unidades de salinidade) possivelmente relacionada às descargas de água doce do rio das Almas. Nas proximidades da zona do rio (estações 19, 20 e 21), também foi constatada uma diferença significativa (9 unidades de salinidade) entre as medidas de superfície e fundo que conferiram, a essa área, características de moderadamente estratificada. Ressalta-se que esses fenômenos são locais e restritos a determinados estágios da maré.

### **6.3.2. Condutividade Elétrica**

Essa propriedade reflete diretamente a quantidade de íons elétricos contidos na água, apresentando estreita correlação com a salinidade. Esteves (1998) define a condutividade elétrica de uma solução como a capacidade que esta apresenta de conduzir corrente elétrica. Nessa pesquisa esse parâmetro foi mensurado através de um CTD que forneceu perfis verticais contínuos da coluna d'água em cada uma das estações monitoradas. Os perfiladores tipo CTD determinam a condutividade elétrica através da composição iônica do meio convertendo-a em salinidade com o algoritmo EPS-1978.

As variações de salinidade discutidas anteriormente são, na verdade, reflexos de mudanças na composição iônica das massas d'água. Em regiões estuarinas, devido aos efeitos da diluição provocada pela descarga de água doce, a concentração de sais dissolvidos

ionicamente é bastante variável. Fatores hidroclimáticos associados ao balanço evaporação – precipitação também modificam a concentração de íons dissolvidos. Todos esses aspectos corroboram para que a distribuição espacial da condutividade elétrica de sistemas estuarinos seja extremamente instável, no entanto, conhecer essas variações (verticais, longitudinais e horizontais) facilita a compreensão dos processos de circulação e mistura desses ambientes.

Assim como para a salinidade, as medidas de condutividade elétrica das massas d'água dos rios Timonha e Ubatuba foram analisadas separadamente. Esse procedimento facilitou a identificação do comportamento hidrológico de cada um dos rios principais constituindo-se em mais um elemento de caracterização do sistema.

Os perfis verticais referentes aos períodos de chuva e estiagem do rio Timonha demonstraram suaves variações de condutividade elétrica. Em geral, essas variações ocorreram associadas à presença de massas d'água de origens diferentes (marinha ou fluvial). No entanto, também evidenciaram processos locais de intensa precipitação e/ou evaporação.

Os gráficos de distribuição longitudinal da condutividade elétrica para o rio Timonha podem ser observados na figura 15.

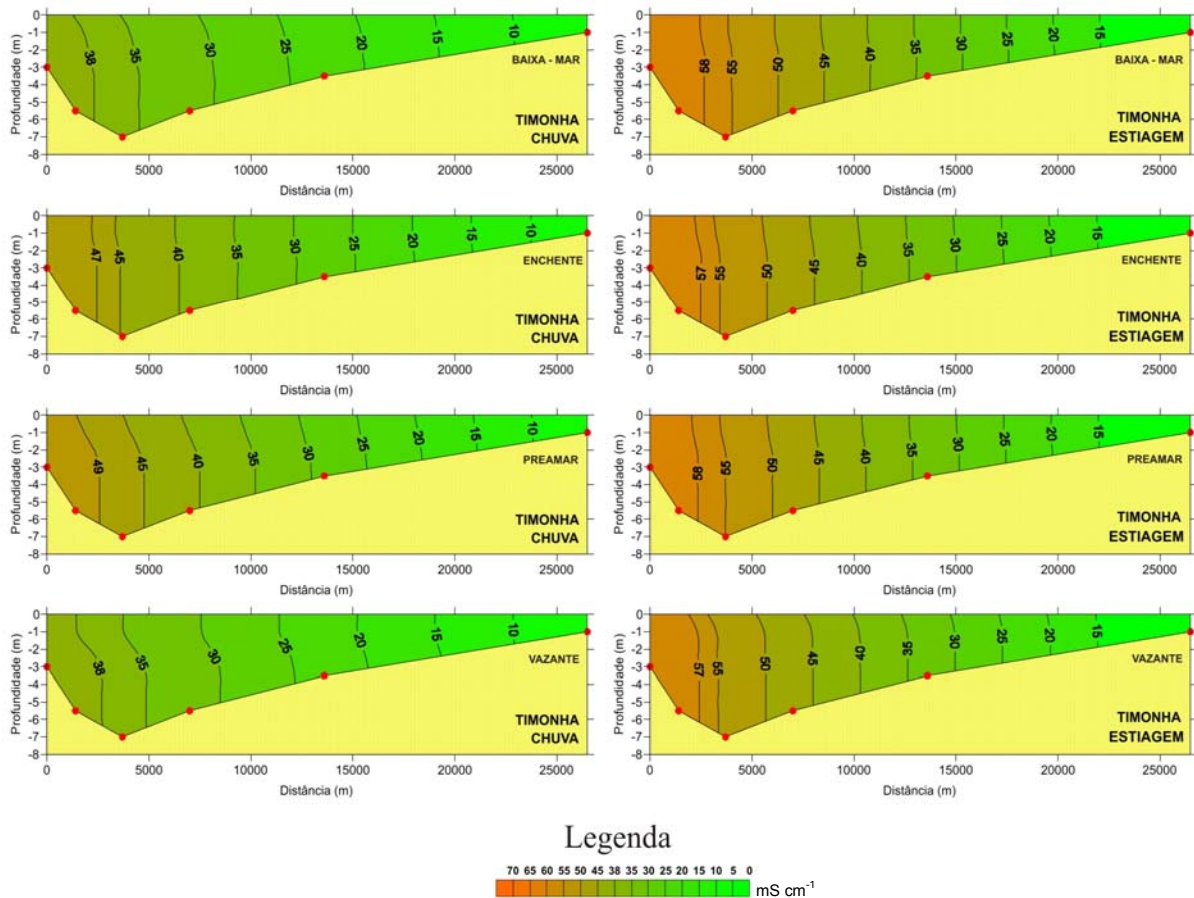


Figura 15: Distribuição longitudinal da condutividade média da coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.



Durante o período chuvoso as variações da condutividade, ao longo da estrutura vertical da coluna d'água, foram mais proeminentes do que aquelas observadas durante a estiagem. O perfil médio teve concentrações iônicas mais baixas na superfície e mais altas no fundo comprovando o fluxo bidirecional entre a descarga de água doce (movimento estuário abaixo) e o avanço da maré (movimento estuário acima). A água do mar, com condutividade maior que a água de origem fluvial, escoou junto ao fundo enquanto que, a água doce oriunda da bacia de drenagem, tende a fluir através da área superficial da coluna d'água.

Na época de estiagem os efeitos da diluição sobre as variações da condutividade são praticamente desprezíveis. Isso decorre do fato de que, a descarga de água doce é de apenas  $1,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e as taxas de evaporação e evapotranspiração somadas, correspondem a uma perda de  $2,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de água para a atmosfera. Nesse caso, as altas concentrações de íons estão associadas à presença de grande volume de água marinha e às altas taxas de evaporação. As variações verticais de condutividade durante esse período, ocorrem principalmente durante as fases de enchente e vazante sendo praticamente irrelevantes do ponto de vista hidrodinâmico.

A distribuição longitudinal da condutividade ao longo do rio Timonha foi bem mais significativa do que as variações verticais. Durante o período chuvoso a descarga fluvial atuou fortemente no sentido de diluir os sais de origem marinha fazendo com que os valores observados durante essa estação fossem bem menores do que aqueles observados no período de estiagem.

A condutividade elétrica média observada durante um ciclo completo de maré de sizígia no período chuvoso foi de  $33,9 \text{ mS cm}^{-1}$ . Os valores máximos foram observados durante a preamar (média de  $39,5 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e os mínimos durante a baixa-mar (média de  $26,8 \text{ mS cm}^{-1}$ ). No período de estiagem a média para o ciclo completo de maré de sizígia foi de  $63,9 \text{ mS cm}^{-1}$  com máxima ocorrendo durante a baixa-mar (média de  $66,1 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínima durante a preamar ( $61,7 \text{ mS cm}^{-1}$ ).

Analisando os dados referentes ao período chuvoso nota-se que o sistema apresenta grande capacidade de diluição iônica. Na baixa-mar a condutividade elétrica média da coluna d'água foi de  $26,8 \text{ mS cm}^{-1}$ , com máxima observada na estação 8 ( $43,7 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínima nas estações 19, 20 e 21 ( $5,2 \text{ mS cm}^{-1}$ ). Durante a fase de maré enchente a condutividade elétrica foi superior àquela calculada para a baixa-mar, o que reflete o efeito do avanço da maré. A média para essa fase foi de  $32,7 \text{ mS cm}^{-1}$  com máxima de  $52,2 \text{ mS cm}^{-1}$  na estação 9 e mínima de  $8,3 \text{ mS cm}^{-1}$  na estação 20. Durante a preamar foram observadas as maiores concentrações iônicas ocorridas durante o período chuvoso. A média calculada para essa fase da maré foi de  $39,5 \text{ mS cm}^{-1}$  e as concentrações máxima ( $49,8 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínima ( $24,6 \text{ mS cm}^{-1}$ ).

$\text{cm}^{-1}$ ) ocorreram respectivamente nas estações 9 e 19. As maiores variações verticais da condutividade foram observadas durante a fase de maré vazante comprovando a ação da descarga fluvial sobre o recuo do prisma de maré. Os valores de condutividade máxima foram mensurados nas estações 7 e 8 ( $51,5 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínima na estação 19 ( $22,6 \text{ mS cm}^{-1}$ ).

Esses dados comprovam que, durante o semestre chuvoso, o mar representa a principal fonte de íons para o rio Timonha. Os efeitos da evaporação não são suficientemente fortes para alterar a condutividade elétrica da água durante esse período do ano, no entanto, esse parâmetro meteorológico é um dos principais responsáveis pela formação de áreas hipersalinas durante o período de estiagem.

Sob condições de déficit hídrico observa-se uma forte tendência do sistema em concentrar íons salinos, fato que já foi discutido pormenorizadamente no item de salinidade. Além das altas concentrações iônicas, a massa de água estuarina também apresenta-se bastante homogênea durante todo o ciclo de maré. Em todas as fases os valores máximos de condutividade foram observados nas estações 19, 20 e 21 (a 13,6 km de distância da foz) e os mínimos nas estações 7, 8 e 9 (a 1,4 km de distância da foz). Os valores médios obtidos para cada fase foram: baixa-mar  $66,1 \text{ mS cm}^{-1}$ ; enchente  $62,3 \text{ mS cm}^{-1}$ ; preamar  $61,7 \text{ mS cm}^{-1}$ ; vazante  $65,5 \text{ mS cm}^{-1}$ .

Para o rio Ubatuba observam-se processos semelhantes aos do rio Timonha, no entanto, com efeitos mais brandos. A análise dos perfis médios da coluna d'água, durante o período chuvoso, também evidenciou suaves variações de condutividade, no entanto, essas variações foram mais nítidas na baixa-mar e enchente da maré. Para esse período observa-se que a descarga de água doce de  $35,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  foi suficiente para diluir a massa d'água marinha e reduzir drasticamente a concentração de íons dissolvidos. No período de estiagem manteve-se a tendência à homogeneidade vertical observada para salinidade em todas as fases de maré.

No que diz respeito a distribuição longitudinal, a condutividade média para o período chuvoso, durante um ciclo completo de maré de sizígia, foi de  $44,7 \text{ mS cm}^{-1}$ . Os maiores valores foram observados durante a preamar (média de  $51,2 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e os menores valores durante a baixa-mar e enchente (média de  $40,0 \text{ mS cm}^{-1}$ ). Para o período de estiagem a condutividade média ao longo do ciclo de maré foi de  $62,0 \text{ mS cm}^{-1}$ . As maiores concentrações iônicas foram observadas durante a enchente da maré (média de  $62,8 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e as menores durante a preamar ( $60,4 \text{ mS cm}^{-1}$ ). Os resultados das medidas de condutividade elétrica refletiram também os efeitos da sazonalidade da descarga fluvial e assim, da capacidade de diluição exercida pelo sistema.

As distribuições longitudinais da condutividade elétrica da água para esse rio, durante ciclos completos de maré de sizígia, em períodos de chuva e estiagem, encontram-se apresentadas na figura 16.

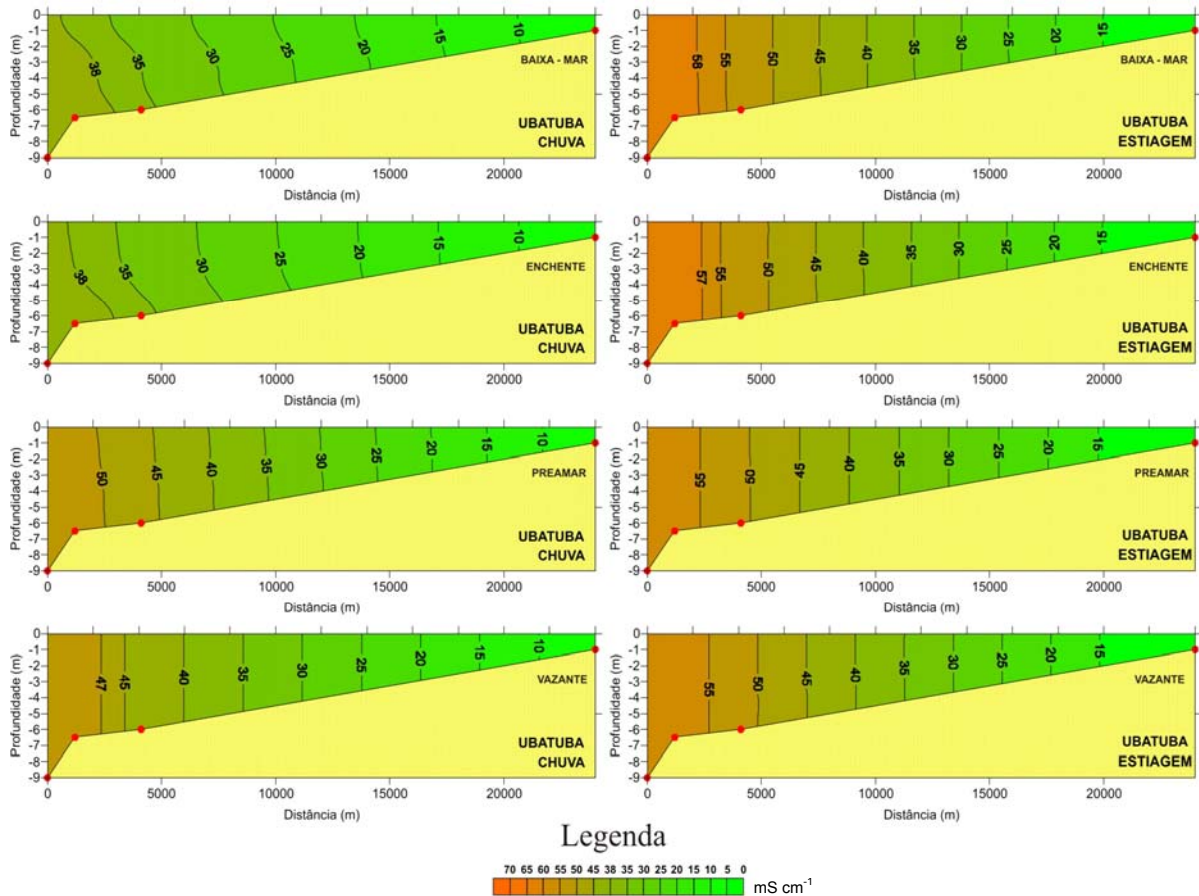


Figura 16: Distribuição longitudinal da condutividade média da coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

Durante a baixa-mar do período chuvoso as maiores concentrações de íons dissolvidos foram verificadas na desembocadura fluvial (estação 1 =  $41,5 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e as menores a 4,0 km do mar (estação 12 =  $37,6 \text{ mS cm}^{-1}$ ). A condutividade média obtida tanto para baixa-mar quanto para enchente da maré desse período foi de  $40,0 \text{ mS cm}^{-1}$ . Os valores máximos e mínimos observados durante essa última foram de  $43,6 \text{ mS cm}^{-1}$  e  $29,1 \text{ mS cm}^{-1}$ , respectivamente nas estações 6 e 10. Na preamar do período chuvoso a condutividade média ao longo do rio Ubatuba foi de  $51,2 \text{ mS cm}^{-1}$  com máxima ocorrendo na estação 1 ( $55,1 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínima nas estações 10 e 12 ( $48,6 \text{ mS cm}^{-1}$ ). Durante a maré vazante a condutividade média foi de  $48,6 \text{ mS cm}^{-1}$  com máxima ( $51,5 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínima ( $47,0 \text{ mS cm}^{-1}$ ) também ocorrendo nas estação 1 e 10, respectivamente.

Para o período de estiagem as variações de condutividade entre as fases de maré foram bem mais discretas do que as observadas durante o período chuvoso. A condutividade média durante a baixa-mar foi de  $62,4 \text{ mS cm}^{-1}$  com máxima de  $64,3 \text{ mS cm}^{-1}$  verificada na estação 12 e mínima de  $56,7 \text{ mS cm}^{-1}$  na estação 1. Durante a enchente da maré a condutividade média foi de  $62,8 \text{ mS cm}^{-1}$  apresentando distribuição praticamente homogênea ao longo do canal do rio Ubatuba. Ao contrário do que acontece durante o período de chuva, em épocas de estiagem as menores concentrações de íons dissolvidos são observadas durante a preamar. A condutividade média durante essa fase de maré foi de  $60,4 \text{ mS cm}^{-1}$  com máxima ( $60,8 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínima ( $60,1 \text{ mS cm}^{-1}$ ) ocorrendo nas estações 12 e 1, respectivamente. A condutividade média durante a vazante da maré foi semelhante a calculada para baixa-mar ( $62,4 \text{ mS cm}^{-1}$ ) com valor máximo observado na estação 12 ( $63,7 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e mínimo na estação 1 ( $61,4 \text{ mS cm}^{-1}$ ).

A distribuição horizontal da condutividade média da coluna d'água mostra que os processos de diluição e/ou concentração de íons dissolvidos atuantes sobre os rios Timonha e Ubatuba são semelhantes. A figura 17 apresenta a distribuição da condutividade elétrica média do sistema durante a baixa-mar e enchente nos períodos de chuva e de estiagem.

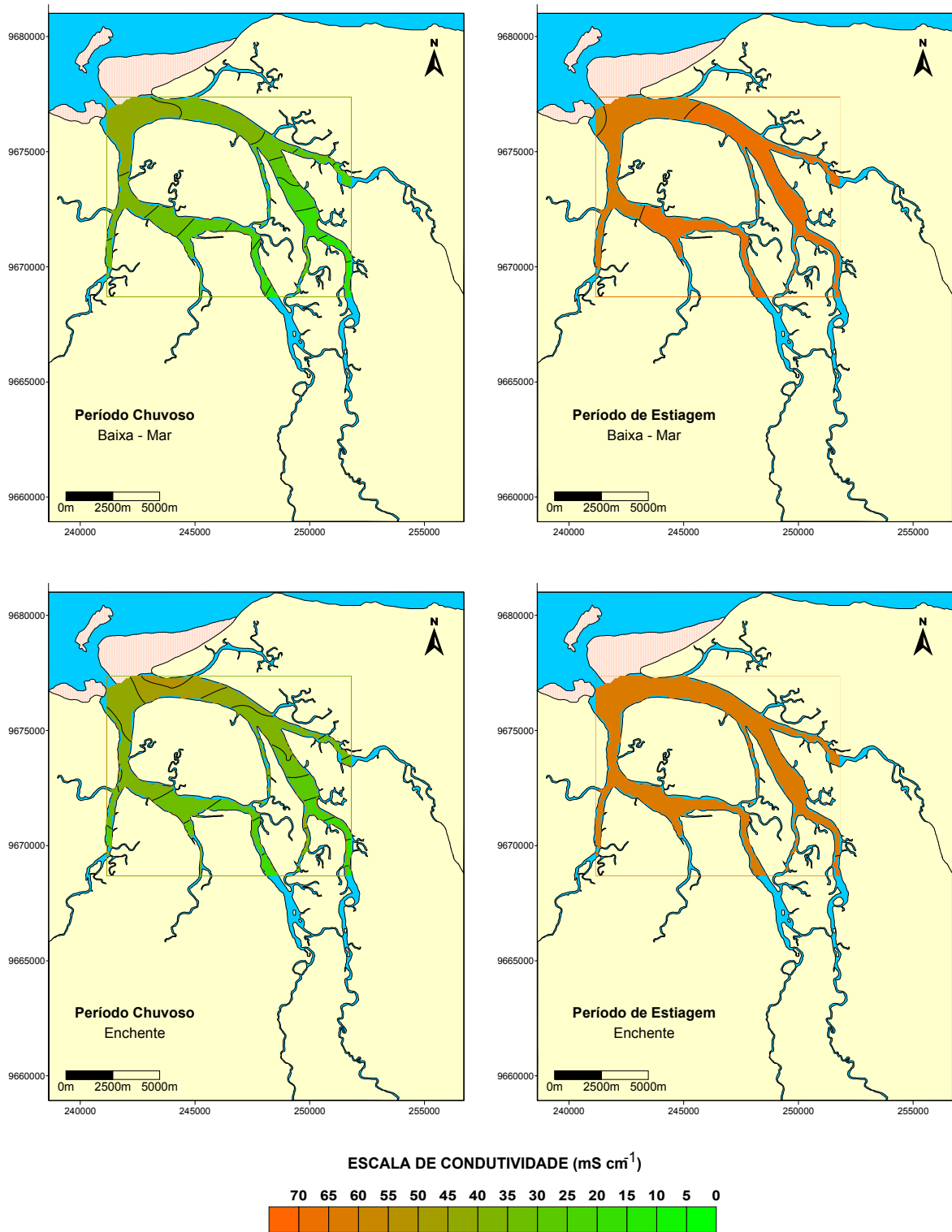


Figura 17: Distribuição horizontal da condutividade média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a baixa-mar e a enchente da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.

Nota-se que as variações da condutividade elétrica ao longo do sistema estuarino estão associadas primordialmente à sazonalidade hidroclimática, sendo mais fortes durante o

período chuvoso. A distribuição da condutividade elétrica para preamar e vazante em períodos de chuva e estiagem está demonstrada na figura 18.

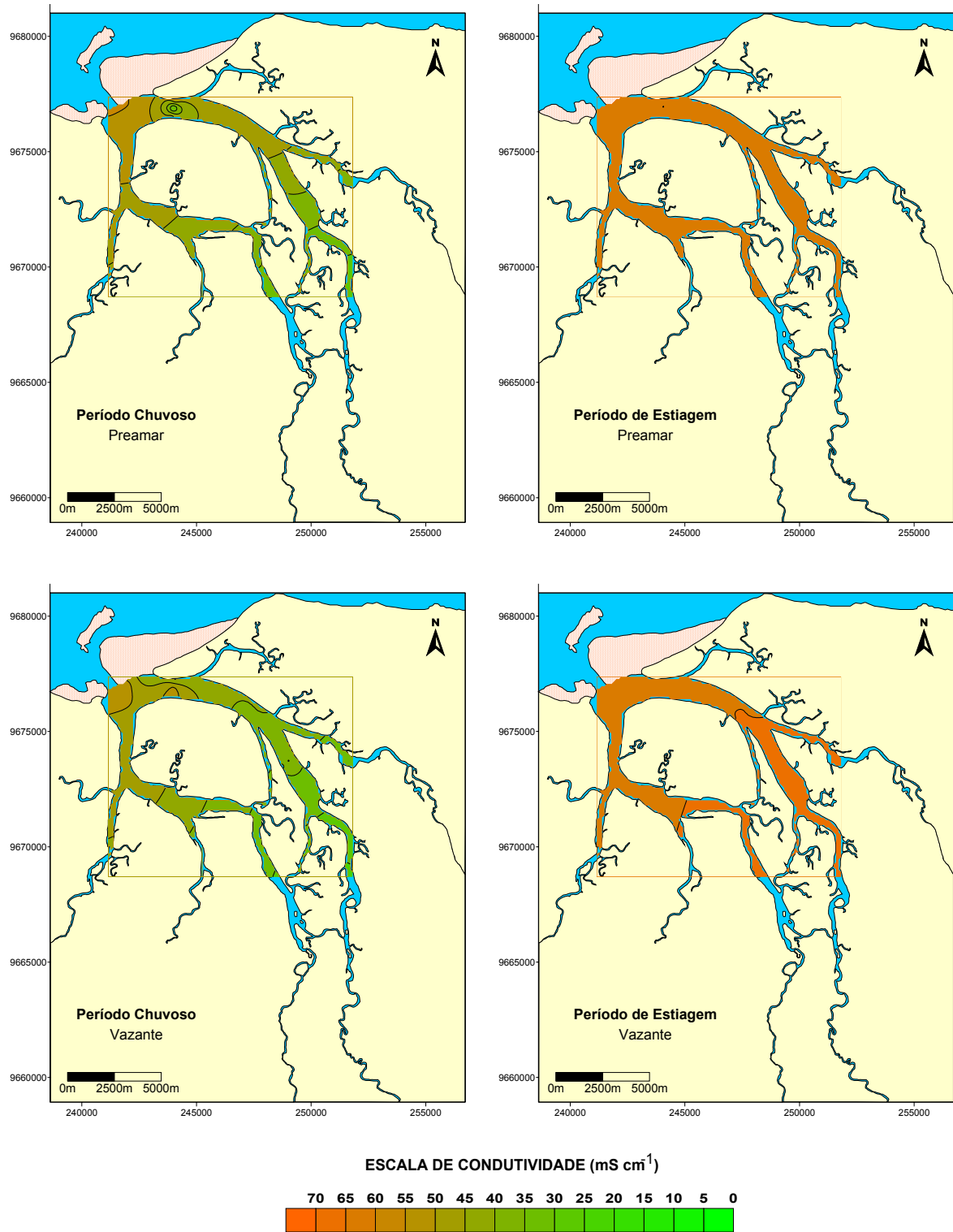


Figura 18: Distribuição horizontal da condutividade média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatuba durante a preamar e a vazante da maré nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.

Durante o período de estiagem a massa d'água estuarina não sofre alterações significativas na sua composição iônica, ao longo dos diferentes estágios da maré. No entanto, as altas concentrações de íons dissolvidos que permanecem no interior do sistema, durante praticamente todo o ciclo de maré, afetam diretamente suas características hidroquímicas e assim os processos de mistura.

### 6.3.3. Temperatura

A temperatura é a medida da concentração de calor de um elemento de volume. Essa propriedade termodinâmica apresenta variações no tempo e no espaço vinculadas aos processos advectivos e difusivos e às trocas de calor sensível e latente com a atmosfera (Miranda *et al.*, 2002).

Os valores de temperatura estão intimamente ligados às variações da temperatura do ar (Hoguane *et al.*, 1999), no entanto refletem também as variações da espessura da lâmina d'água e da origem das massas d'água. Em geral as massas d'água da plataforma continental tem temperaturas mais frias que as de estuários (Bérgamo, 2000).

Para a caracterização térmica do sistema estuarino foram avaliados os perfis verticais na coluna d'água dos rios Timonha e Ubatuba obtidos através de um CTD. A temperatura média da coluna d'água observada durante o período chuvoso foi de 27,9 °C com desvio padrão de 0,4 °C. No período de estiagem a massa d'água estuarina apresentou temperaturas mais elevadas o que parece ser uma resposta do sistema à combinação entre a diminuição da lâmina d'água e o aumento da insolação. A temperatura média desse período foi de 28,1 °C com desvio padrão de 0,3 °C.

Analisando as massas d'água do rio Timonha separadamente, observa-se que, durante o período chuvoso, a temperatura média da água, ao longo de um ciclo completo de maré, é a mesma calculada para o sistema como um todo (27,9 °C). As temperaturas mais baixas foram observadas durante a preamar (média de 27,4 °C) o que indicou a intrusão de águas da plataforma continental. No estófo da baixa-mar foram medidas as temperaturas mais altas (28,4 °C) indicando o domínio da descarga de água doce sobre as características hidrológicas do sistema.

Durante o período de estiagem, quando as condições de semi-aridez tornam-se mais severas e a lâmina d'água se reduz, a temperatura média da água foi de 28,2 °C. Os valores máximos da temperatura foram atingidos durante a baixa-mar (28,3 °C) e os mínimos durante a preamar (27,8 °C).

A estrutura vertical da coluna d'água do rio Timonha mostra que, mesmo durante o semestre chuvoso, a maioria das estações não apresenta uma termoclina definida. As maiores variações térmicas foram identificadas nos perfis realizados durante as fases de maré enchente e preamar sendo decorrentes do processo de entranhamento da água do mar (mais fria) junto ao piso estuarino.

As estações cujos perfis verticais encontram-se demonstrados nos gráficos da figura 19 correspondem às medidas do talvegue fluvial. Nas estações próximas às margens foram observadas temperaturas quase sempre mais elevadas do que as do talvegue demonstrando uma tênue estratificação lateral em virtude da diminuição da profundidade e/ou influência do aporte de água doce de rios afluentes.

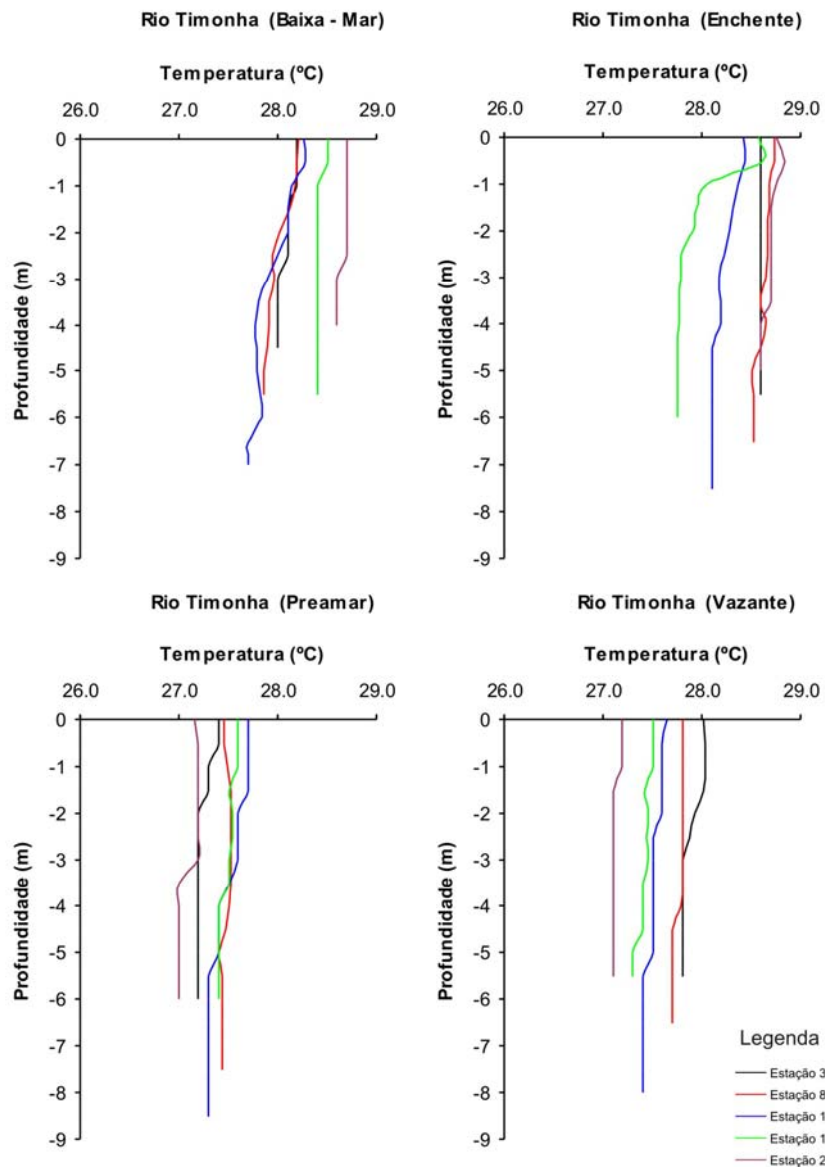


Figura 19: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período chuvoso de 2004.



Observa-se que, durante a enchente da maré do período chuvoso, a estação 17 apresenta uma termoclina temporária de 0,6 °C que se forma a apenas 0,5 m de profundidade. No entanto, esse fenômeno é local e parece está associado à barreira hidráulica constituída pela ilha dos passarinhos que força o desvio dos fluxos tanto estuário abaixo (fluvial) quanto estuário acima (maré).

Durante o período de estiagem a coluna d'água do rio Timonha apresentou-se ainda mais homogênea do ponto de vista térmico. Os gráficos de distribuição vertical da temperatura, ao longo de um ciclo de maré, para esse período estão apresentados na figura 20.

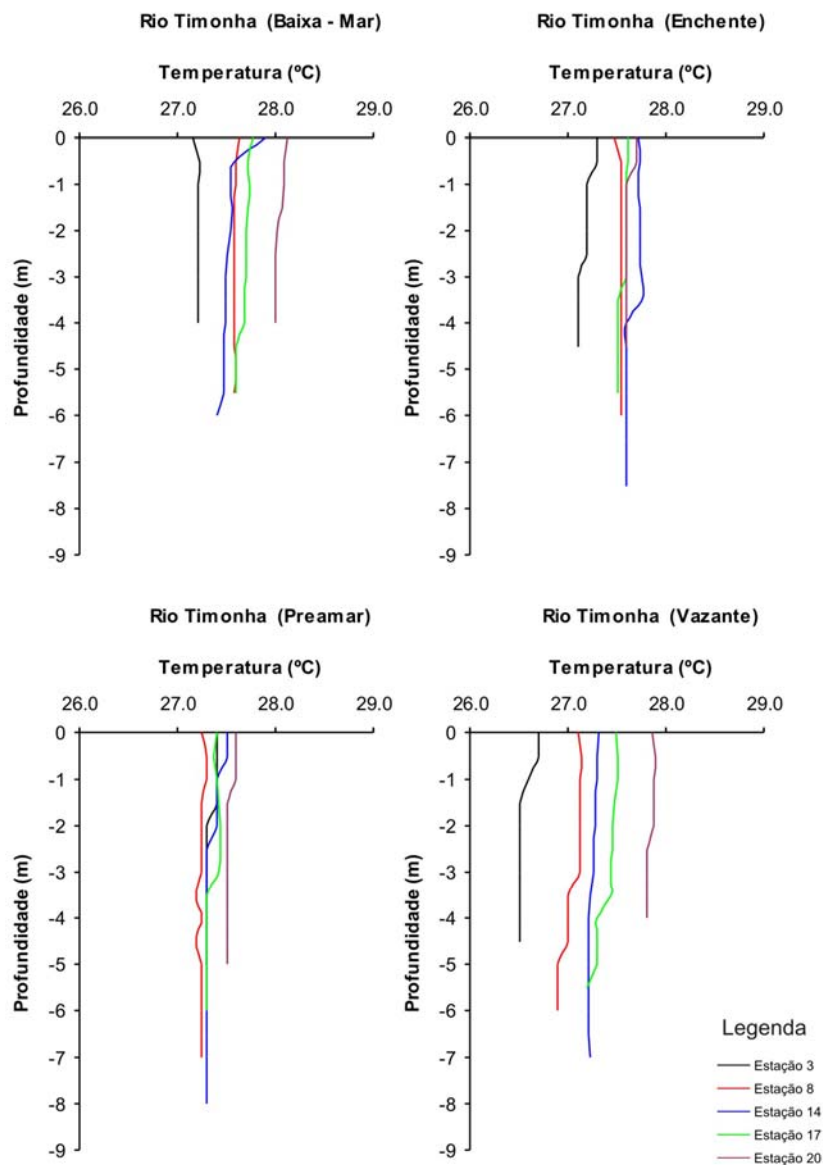


Figura 20: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Timonha ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período de estiagem de 2004.

Destacando-se em relação à tendência do sistema, a estação 14, apresenta uma suave variação vertical da temperatura. Nesse ponto do rio Timonha, durante a baixa-mar, há uma queda de 0,3 °C a 0,5 m de profundidade, diferença que cai para 0,2 °C a 4,0 m durante a enchente, e praticamente desaparece durante as outras fases da maré. Em geral essas tênues variações de temperatura estão associadas à ação da insolação sobre a área superficial da coluna d'água estuarina.

O comportamento térmico das massas de água do rio Ubatuba é muito semelhante ao das águas do rio Timonha. No entanto, a temperatura média desse rio não varia diante da sazonalidade hidroclimática local, assumindo valor médio de 28,0 °C durante praticamente todo o ano. As variações verticais de temperatura para as estações correspondentes ao talvegue do rio Ubatuba, durante o período de chuva estão expostas na figura 21.

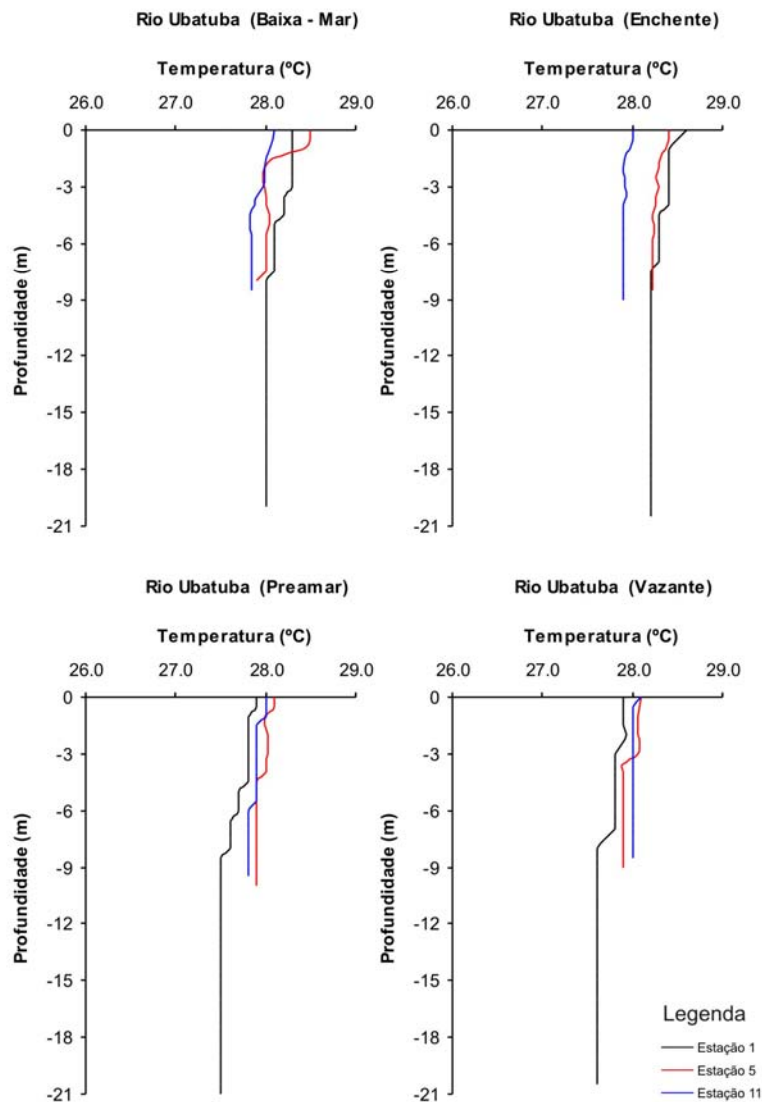


Figura 21: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Ubatuba ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período chuvoso de 2004.

Mesmo durante o semestre chuvoso o rio Ubatuba não apresenta estratificação térmica significativa. As maiores variações ocorreram durante a baixa-mar, especificamente na estação 5 (talvegue fluvial 1,2 km à montante da foz). Nessas circunstâncias foi observada uma queda de 0,3 °C na temperatura a apenas 1,0 m de profundidade.

Durante o período de estiagem a homogeneidade da temperatura ao longo da coluna d'água torna-se ainda mais forte. A ausência de descarga fluvial faz com que praticamente não exista mistura e as características térmicas do sistema sejam influenciadas quase que exclusivamente pelas condicionantes climáticas.

Os gráficos da figura 22 ilustram as variações da temperatura nas seções do talvegue do rio Ubatuba durante o período de estiagem.

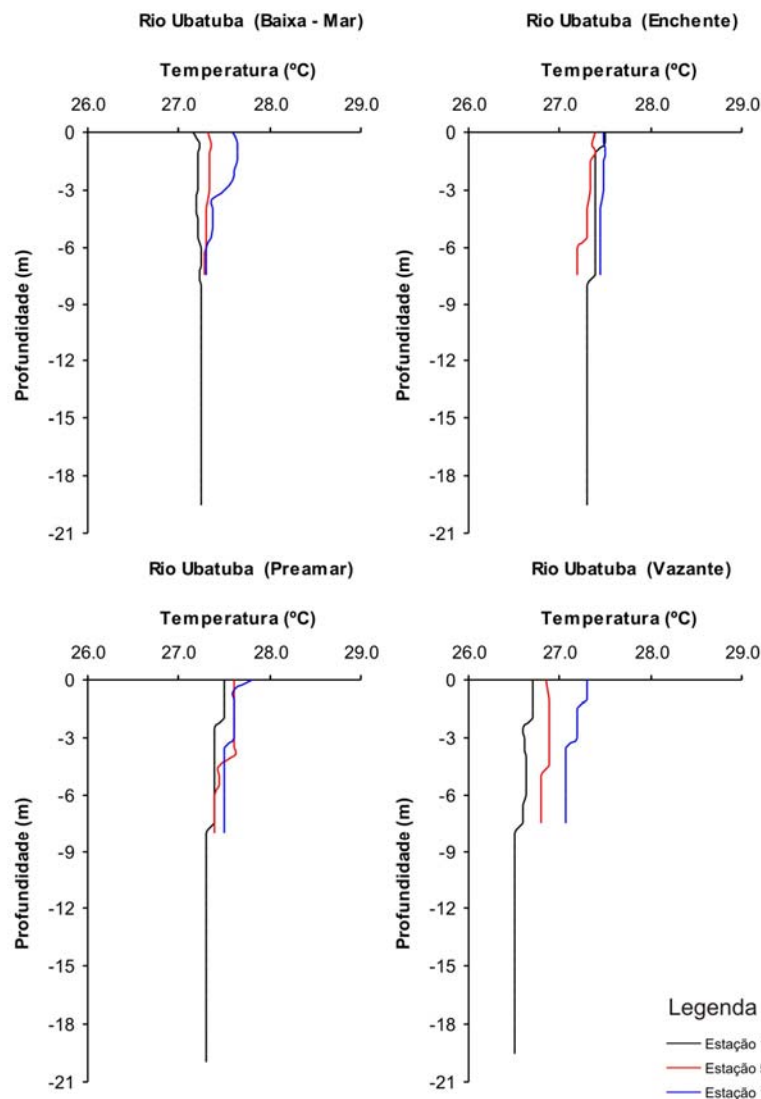


Figura 22: Perfis verticais da temperatura na coluna d'água do rio Ubatuba ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia durante o período de estiagem de 2004.

A distribuição horizontal das temperaturas médias mostra que, no interior estuarino, a baixa variabilidade climática e os processos de mistura proporcionam a homogeneidade térmica da massa d'água, como pode ser observado na figura 23.

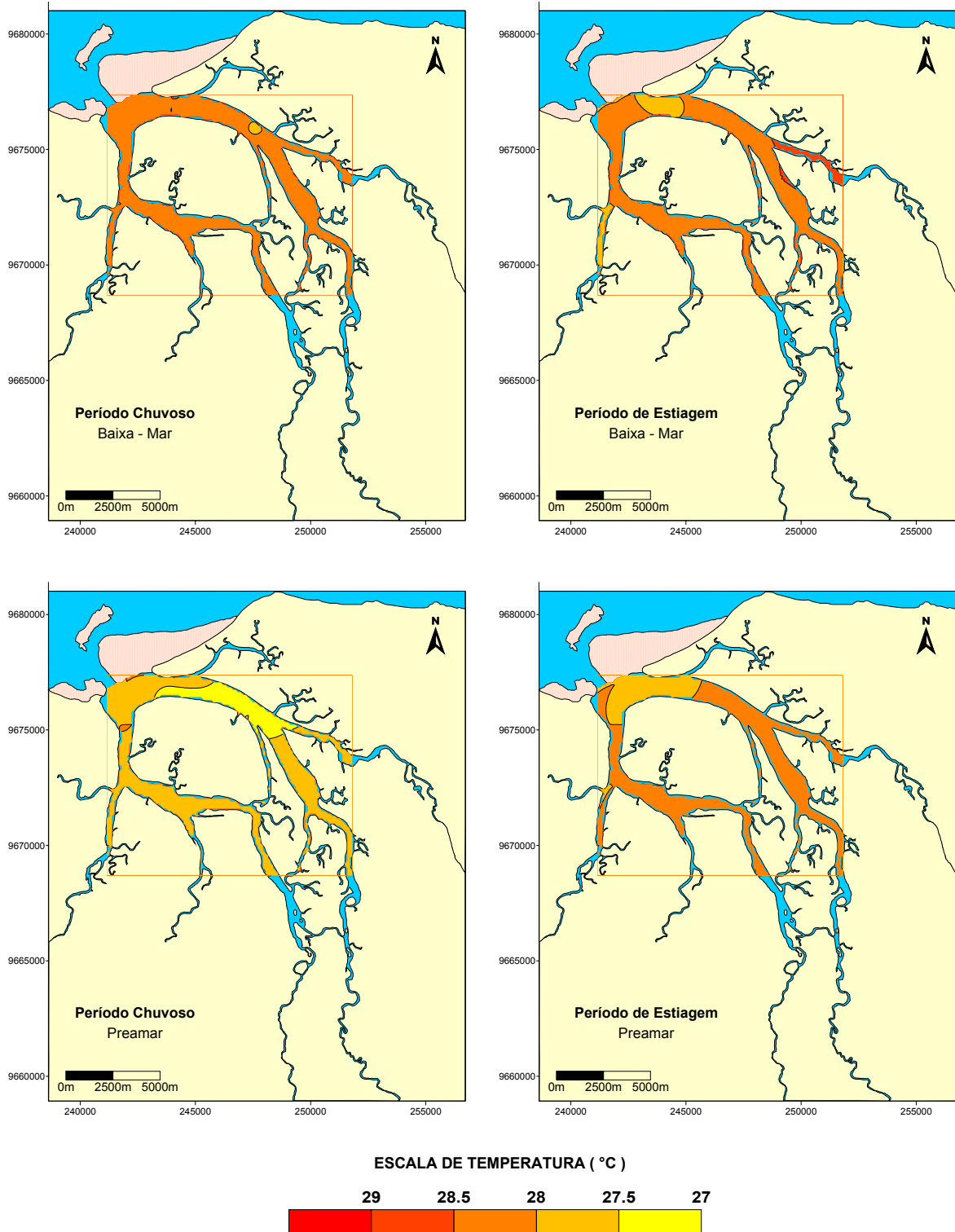


Figura 23: Distribuição horizontal da temperatura média da coluna d'água no sistema estuarino Timonha / Ubatauba durante a baixa-mar e preamar nos períodos de chuva e de estiagem do ano de 2004.

Mesmo nas áreas de confluência entre os rios principais e os tributários não foram evidenciados gradientes térmicos. Durante o período chuvoso as variações da temperatura estão associadas, sobretudo a penetração de massas d'água da plataforma continental durante a preamar. Já no período de estiagem a temperatura varia principalmente em função do aumento da temperatura do ar e da ausência de fluxos de água doce.

#### **6.4. Balanço de Sal**

O aumento e decréscimo exponencial dos valores médios da salinidade durante um ciclo completo de maré de sizígia em períodos de chuva e de estiagem estão organizados nas figuras 24 e 25. No período de estiagem, o estuário do rio Timonha apresentou características de balanço negativo com inversão da salinidade no interior do sistema. A influência da maré salina é verificada até 26,0 km. No período chuvoso, o estuário passou a ser positivo com diluição gradual e influência máxima até 13,6 km da foz, durante a preamar.

Como pode ser observada, a descarga do rio Timonha são responsáveis por um recuo da influência de maré salina de aproximadamente 12,4 km. No rio Ubatuba as curvas exponenciais do período chuvoso apresentaram o mesmo comportamento das verificadas no rio Timonha. No período de estiagem os processos de mistura e circulação não favoreceram o processo de inversão longitudinal da salinidade, porém, o estuário é negativo. Isso pode ser creditado a contribuição do rio.

Para se compreender a inversão de salinidade ao longo dos estuários foram calculados os volumes de sal exportados e importados durante um ciclo de maré completo. No estuário do rio Timonha, na maré de sizígia de fevereiro de 2004, foram importados cerca de 0,8 t de sal para o interior do rio Timonha. O volume exportado foi de 0,5 t demonstrando a capacidade de diluição do sistema. No rio Ubatuba foram importados e exportados cerca de 0,7 e 0,8 t, respectivamente. A salinidade média do rio Ubatuba no período de chuva é maior do que a verificada no rio Timonha.

No período de estiagem as cargas de sais importados e exportados para o rio Timonha foram de 0,4 e 0,4 t. Como pode ser observada na figura 31, a inversão de salinidade é observado a partir de 10 km da foz, o que explicaria as cargas de exportação inferiores as de importação. Os dados utilizados neste balanço foram os referentes à seção localizada na boca do sistema. As cargas importadas e exportadas no rio Ubatuba no período de estiagem foram de 0,4 e 0,6 toneladas em um ciclo completo de maré de sizígia.

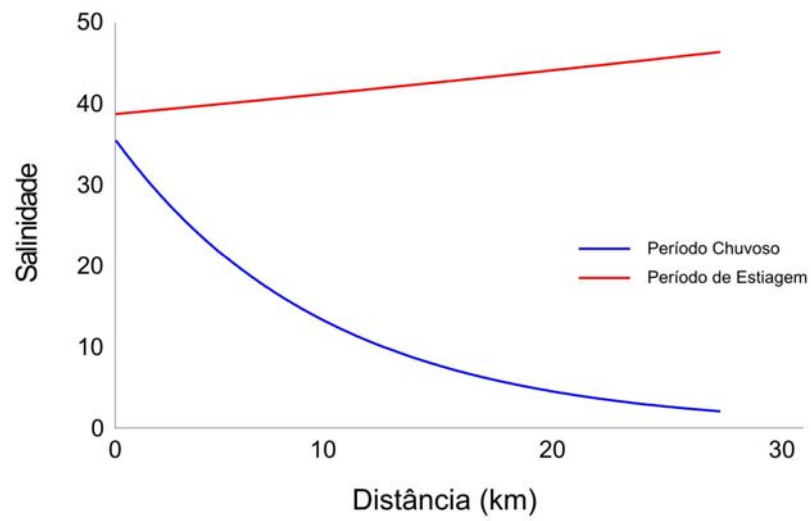


Figura 24: Aumento e decréscimo exponencial dos valores médios da salinidade longitudinal do estuário do rio Timonha em um ciclo completo de maré de sizígia nos períodos de chuva e estiagem de 2004.

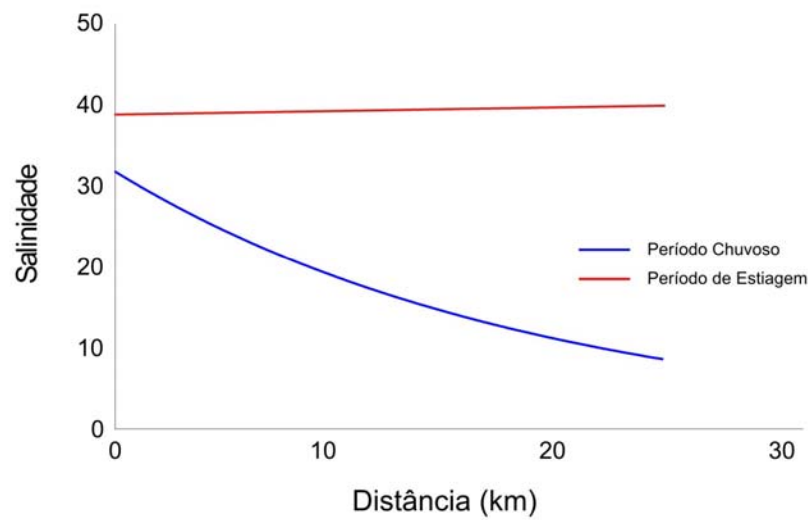


Figura 25: Aumento e decréscimo exponencial dos valores médios da salinidade longitudinal do estuário do rio Ubatuba em um ciclo completo de maré de sizígia nos períodos de chuva e estiagem de 2004.

## 6.5. Processos de Circulação e Mistura

### 6.5.1. Correntes

A determinação dos vetores de velocidade da corrente no sistema estuarino foi efetuada utilizando-se como referencial a orientação do leito em relação ao norte geográfico. No entanto, como os dados de direção fornecidos pelo correntômetro referiram-se ao desvio angular em relação ao norte magnético, fez-se necessária a correção da declinação magnética local, que é de  $23,65^\circ$  W, subtraindo-se esse valor de todas as direções mensuradas em campo.

O sistema de correntes do estuário dos rios Timonha e Ubatuba apresentou variações de direção e intensidade vinculadas, sobretudo às oscilações da maré. No entanto, fatores com a morfologia de fundo e a descarga fluvial também foram determinantes, sendo este último incisivo apenas durante o período chuvoso.

Nas duas campanhas em que foram realizados os experimentos, a circulação seguiu a mesma tendência à inversão de sentido durante as diferentes fases da maré, orientando-se estuário abaixo nos estágios de baixa-mar e vazante e estuário acima na preamar e enchente. A intensidade dos fluxos, no entanto, mostrou grande variabilidade assumindo valores mais altos durante o período chuvoso.

Em geral, as correntes são mais intensas na região da desembocadura, onde há maior interação entre os fluxos de origem fluvial e marinha, decrescendo em direção a zona do rio. Analisando comparativamente os padrões de circulação referentes aos rios Timonha e Ubatuba nota-se que, durante a estiagem, não existem diferenças significativas. A velocidade média do fluxo do rio Timonha nesse período foi de  $0,22 \text{ m s}^{-1}$ , enquanto que no rio Ubatuba foi de  $0,23 \text{ m s}^{-1}$ . Em contrapartida, durante o período chuvoso, o rio Ubatuba apresenta velocidade média do fluxo 23 % acima daquela observada no rio Timonha. A média calculada para esse período foi de  $0,30 \text{ m s}^{-1}$  no rio Timonha e  $0,37 \text{ m s}^{-1}$  no rio Ubatuba.

Nota-se que, enquanto a variação da intensidade média dos fluxos entre os períodos de chuva e de estiagem foi de 38% no rio Ubatuba, no rio Timonha foi de apenas 30%. Isso comprova o efeito do açude sob o controle das vazões de cheia e redução da força das correntes relacionadas à descarga fluvial.

As figuras 26 – 29 demonstram o padrão de circulação do sistema estuarino Timonha / Ubatuba e suas variações diante da influência da maré e da descarga fluvial.

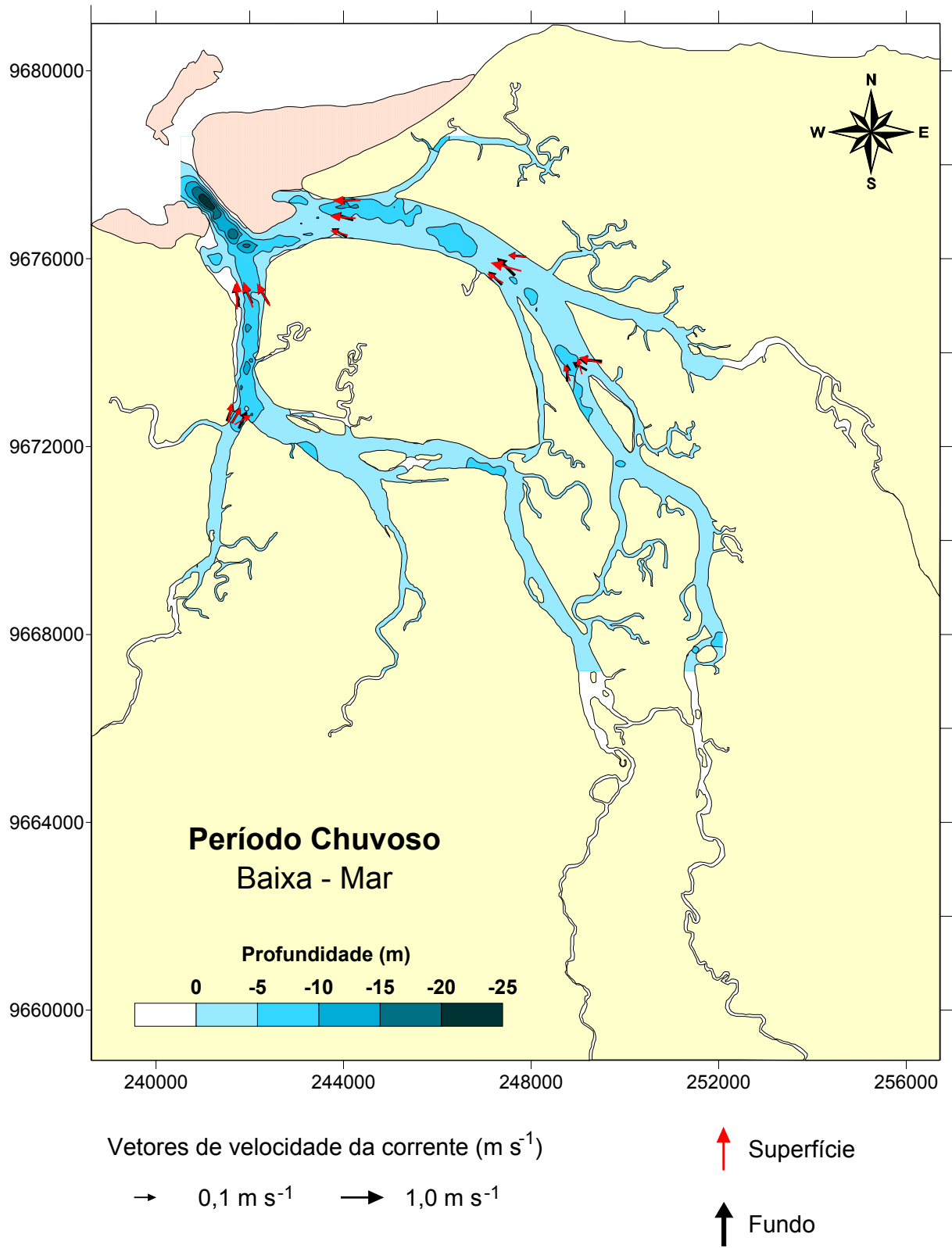


Figura 26: Direção e intensidade das correntes para baixa-mar de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.



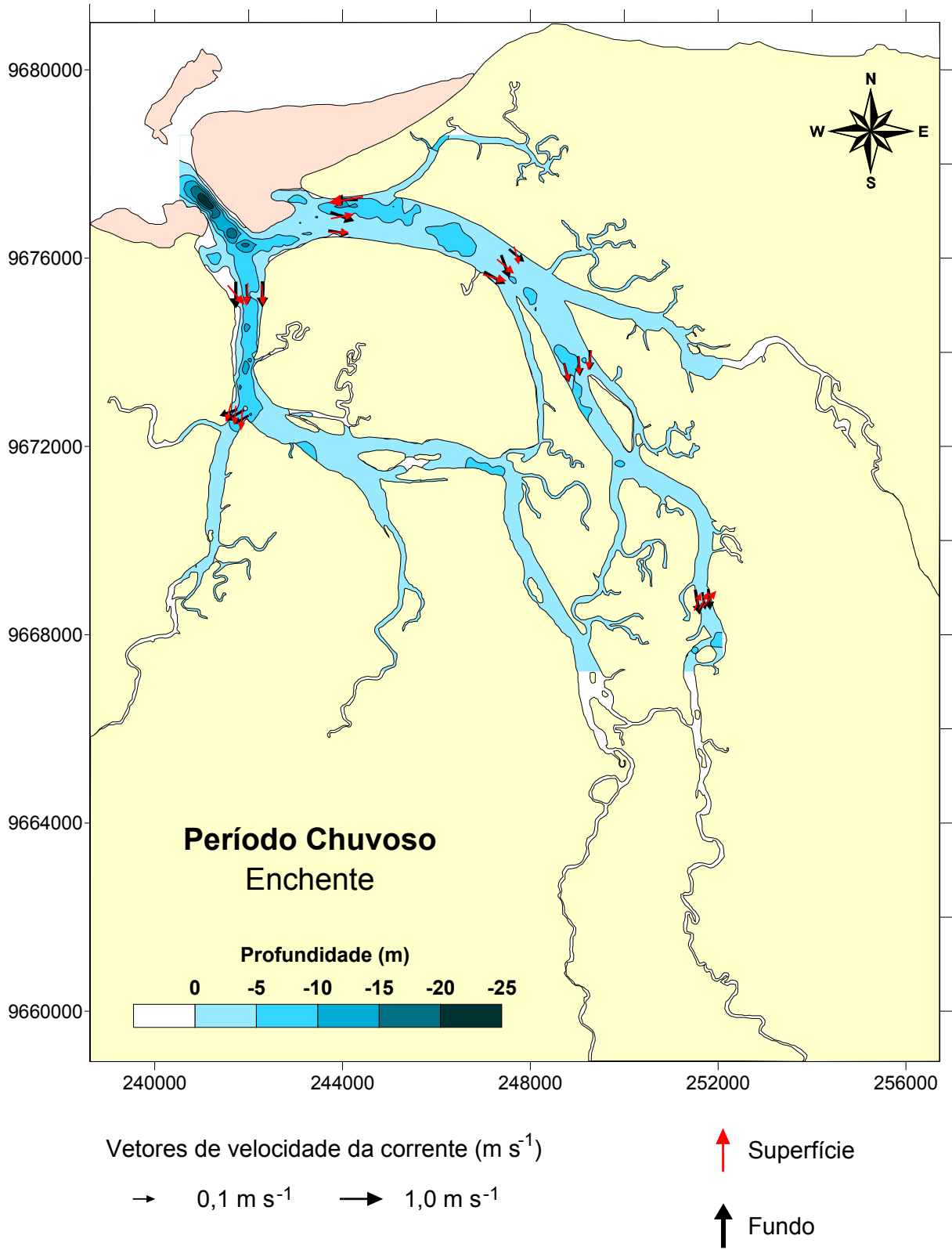


Figura 27: Direção e intensidade das correntes para fase de enchente da maré de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.

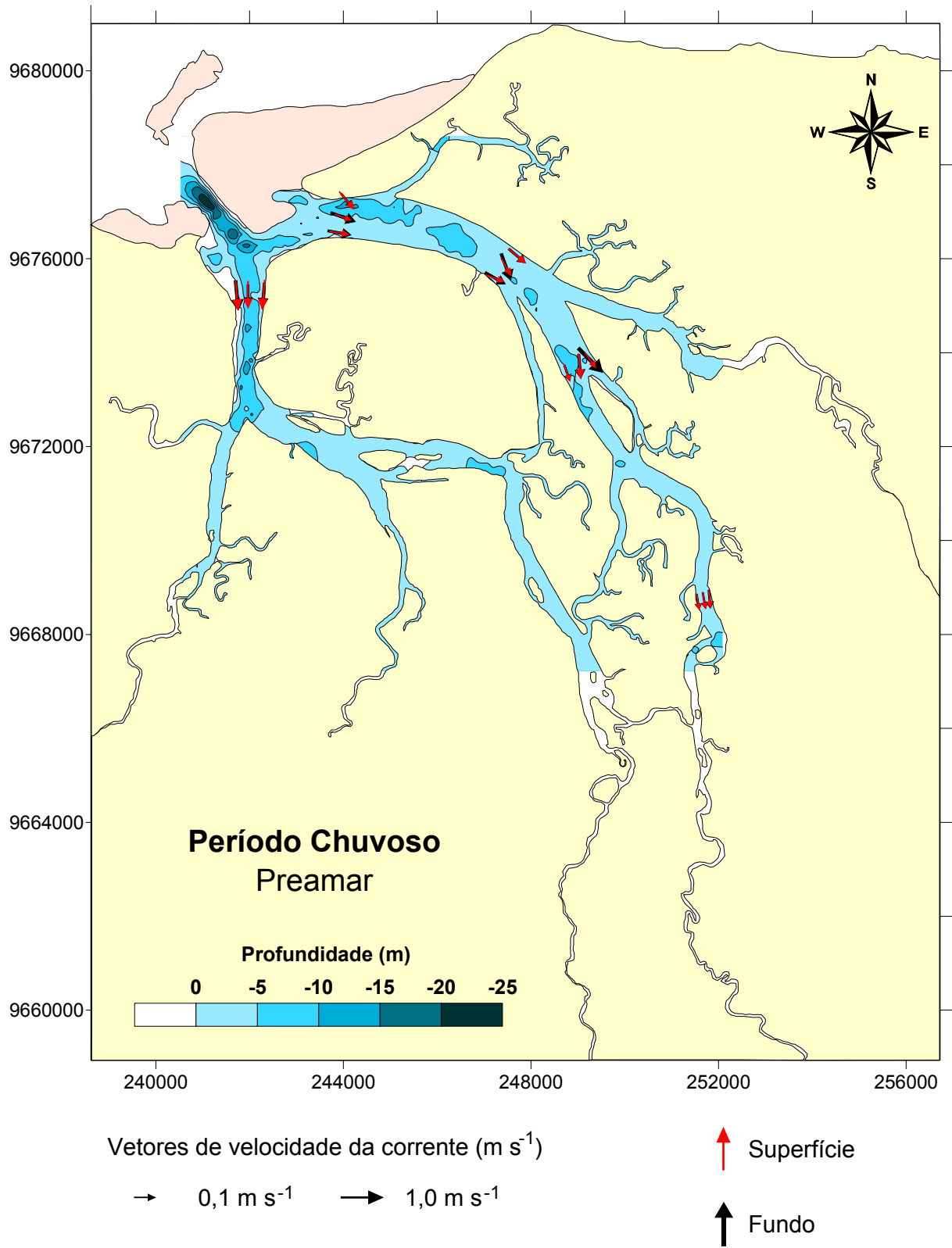


Figura 28: Direção e intensidade das correntes para preamar de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.

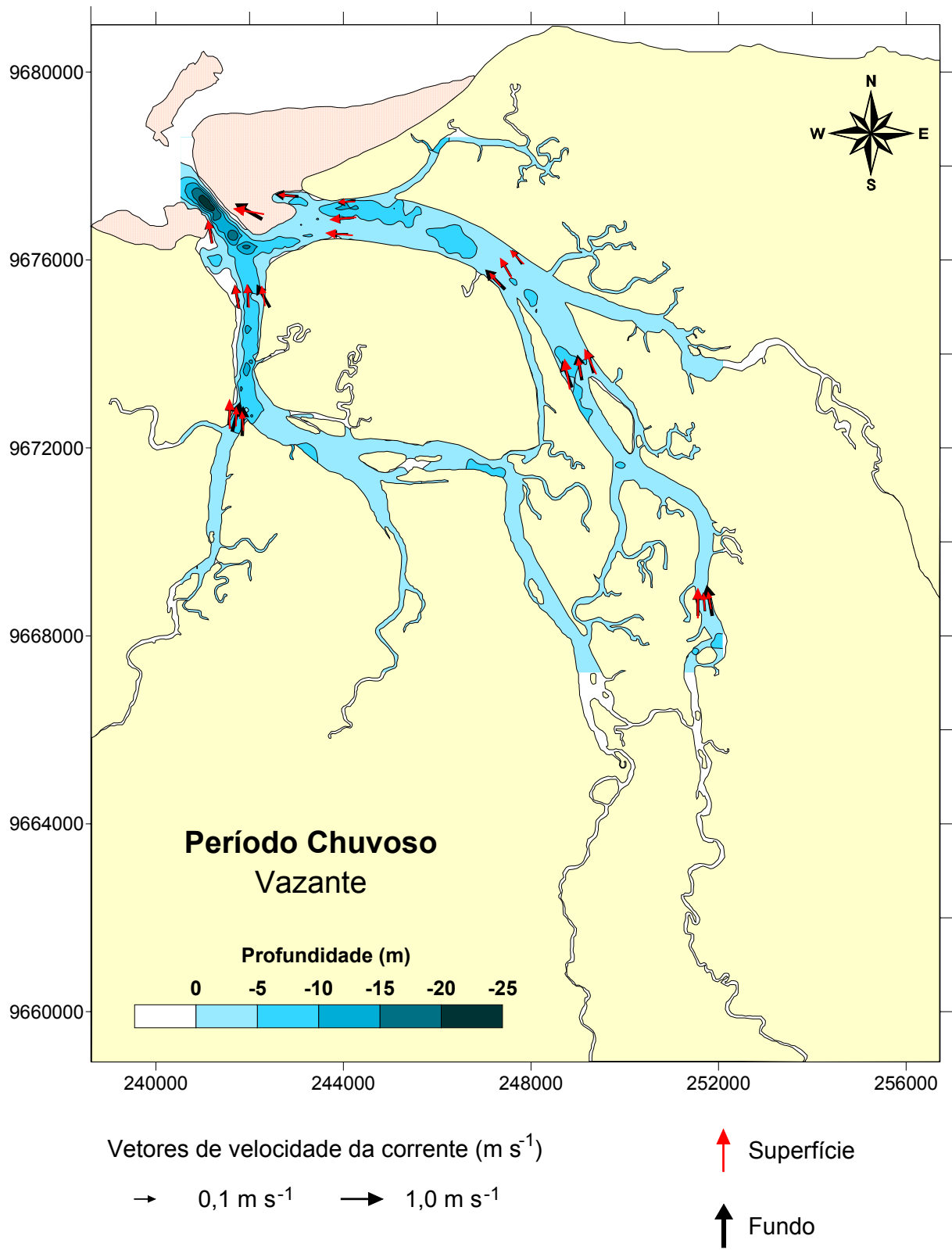


Figura 29: Direção e intensidade das correntes para fase de vazante da maré de sizígia referente ao período chuvoso de 2004.

Durante a baixa-mar do período chuvoso as correntes apresentaram velocidade média de  $0,25 \text{ m s}^{-1}$ , fluindo preferencialmente para o quadrante NW. A intensidade máxima foi observada na estação 14 ( $0,81 \text{ m s}^{-1}$ ) refletindo a eficiência da componente de velocidade gerada pela descarga fluvial do rio da Chapada sobre a circulação. Essa mesma corrente também formou uma área de remanso próxima à margem leste dessa seção transversal (estação 15) onde foi verificada a menor velocidade de corrente ( $0,10 \text{ m s}^{-1}$ ). As diferenças de velocidade ao longo da coluna d'água foram significativas, apresentando correntes de superfície mais intensas que as de fundo. A velocidade média na superfície foi de  $0,30 \text{ m s}^{-1}$  nas estações do rio Timonha e  $0,36 \text{ m s}^{-1}$  nas do rio Ubatuba demonstrando que a massa de água doce, que flui na superfície, é mais intensa no rio Ubatuba, onde a vazão fluvial é 23 % superior. No fundo, as correntes de ambos os rios apresentaram a mesma velocidade média ( $0,18 \text{ m s}^{-1}$ ).

Sob os efeitos da enchente da maré as correntes assumiram sentido inverso orientando-se em direção ao quadrante SW. A velocidade média no sistema estuarino durante esse estágio da maré foi de  $0,22 \text{ m s}^{-1}$  (12 % mais fracas que as verificadas na baixa-mar) com máxima ocorrendo na estação 4 ( $0,56 \text{ m s}^{-1}$ ) e mínima na estação 12 ( $0,03 \text{ m s}^{-1}$ ). Chama a atenção o fato de que, nas estações 19, 20 e 21, as correntes superficiais fluíram em sentido contrário as de fundo demonstrando o efeito da maré dinâmica sobre a base da coluna d'água. Na área da desembocadura fluvial do rio Timonha (estações 7, 8 e 8) os fluxos apresentaram uma variação lateral de sentidos. A massa d'água doce tendeu a fluir pela margem leste, favorecida pela geometria do canal, e as correntes forçadas pela penetração do prisma de maré, penetraram pelo canal estuarino através da margem oeste (contorno da Ilha Grande). No rio Timonha as correntes de superfície apresentaram velocidade média de  $0,27 \text{ m s}^{-1}$  e as de fundo  $0,30 \text{ m s}^{-1}$ . Em contrapartida, no rio Ubatuba, não houve variação de intensidade entre as correntes de superfície e de fundo, a média da coluna d'água foi  $0,28 \text{ m s}^{-1}$ .

Na preamar, o sistema de correntes se manteve sob os mesmos padrões da fase anterior (enchente) comprovando o controle da descarga de água doce sobre o avanço da maré. Os efeitos do bombeamento no estofo da preamar foram mais intensos sobre as correntes do rio Ubatuba que nessa fase, apresentou intensidade média na coluna d'água de  $0,58 \text{ m s}^{-1}$ . Este fato parece está associado ao controle da morfologia da foz na proteção da saída do canal do rio Timonha, constituindo-se num obstáculo a penetração do prisma de maré. Em compensação, no rio Ubatuba, a ocorrência de cotas batimétricas mais profundas (máxima de -24 m) facilita a subida da maré superpondo seu efeito ao da barreira hidráulica constituída pela descarga fluvial.

A intensidade média das correntes de preamar ao longo da coluna d'água, calculada para o sistema estuarino foi de  $0,35 \text{ m s}^{-1}$ . No rio Timonha a velocidade média das correntes foi de  $0,29 \text{ m s}^{-1}$  com máxima de  $0,48 \text{ m s}^{-1}$  observada na estação 8 (saída do canal do rio Timonha). No rio Ubatuba a velocidade máxima da coluna d'água foi de  $0,76 \text{ m s}^{-1}$ , mensurada na estação 4 (saída do canal do rio Ubatuba). A média das correntes superficiais do rio Timonha foi de  $0,21 \text{ m s}^{-1}$  enquanto que do rio Ubatuba foi  $0,49 \text{ m s}^{-1}$ . Para as correntes de fundo, as médias calculadas foram de  $0,36 \text{ m s}^{-1}$  e  $0,68 \text{ m s}^{-1}$  referentes, respectivamente, aos rios Timonha e Ubatuba.

A maior velocidade média calculada para o sistema estuarino Timonha / Ubatuba ocorreu durante a vazante da maré do período chuvoso ( $0,40 \text{ m s}^{-1}$ ). As velocidades máximas (média da coluna d'água) foram observadas nas estações 2 ( $0,81 \text{ m s}^{-1}$ ) e 16 ( $0,73 \text{ m s}^{-1}$ ) e a mínima de  $0,10 \text{ m s}^{-1}$  na estação 20. Destaca-se que esta última estação localiza-se em uma seção transversal cujo fluxo escoava preferencialmente junto à margem oeste (estação 19), onde a velocidade média foi de  $0,63 \text{ m s}^{-1}$ . Sob essas circunstâncias, a orientação das correntes para NW representou uma resposta do sistema ao recuo do prisma de maré, acentuada energia da descarga fluvial e delineamento do canal diante da emersão dos bancos de areia.

As correntes de vazante do rio Timonha tiveram intensidade média de  $0,37 \text{ m s}^{-1}$ . No fundo, a velocidade média foi de  $0,40 \text{ m s}^{-1}$ , com máxima ocorrendo na estação 21 ( $0,81 \text{ m s}^{-1}$ ). A estação 2 (desembocadura fluvial) apresentou os fluxos superficiais mais intensos durante essa fase da maré. A velocidade da corrente nesse ponto foi de  $0,81 \text{ m s}^{-1}$  (2,5 vezes maior que a média das velocidades de superfície calculada para esse rio).

No rio Ubatuba as correntes de superfície foram 25% mais lentas que as de fundo e a velocidade média na coluna d'água foi de  $0,44 \text{ m s}^{-1}$ . Os fluxos mais intensos ( $0,54 \text{ m s}^{-1}$  e  $0,49 \text{ m s}^{-1}$ ) ocorreram nas estações 10 e 11 (confluência entre os rios Ubatuba e Carpina) e os mais lentos na estação 6 ( $0,37 \text{ m s}^{-1}$ ), reflexo da pequena profundidade dessa estação. Assim como para baixa-mar, durante a vazante da maré fica clara a capacidade do escoamento do rio Ubatuba de gerar correntes direcionadas estuário abaixo.

A intensidade das correntes durante o período chuvoso, se relacionadas às de estiagem, apresentaram maior variabilidade. O desvio padrão entre as medidas de velocidade média da corrente na coluna d'água foi de  $0,24 \text{ m s}^{-1}$  para do período chuvoso, enquanto que, durante a estiagem se reduziu a  $0,18 \text{ m s}^{-1}$ . Fica claro então que, durante esse último período, a ausência de fluxo fluvial tem reflexos diretos sobre o sistema de correntes, influenciando a hidrodinâmica estuarina através do enfraquecimento dos processos de circulação, como mostram as figuras 30 – 33.

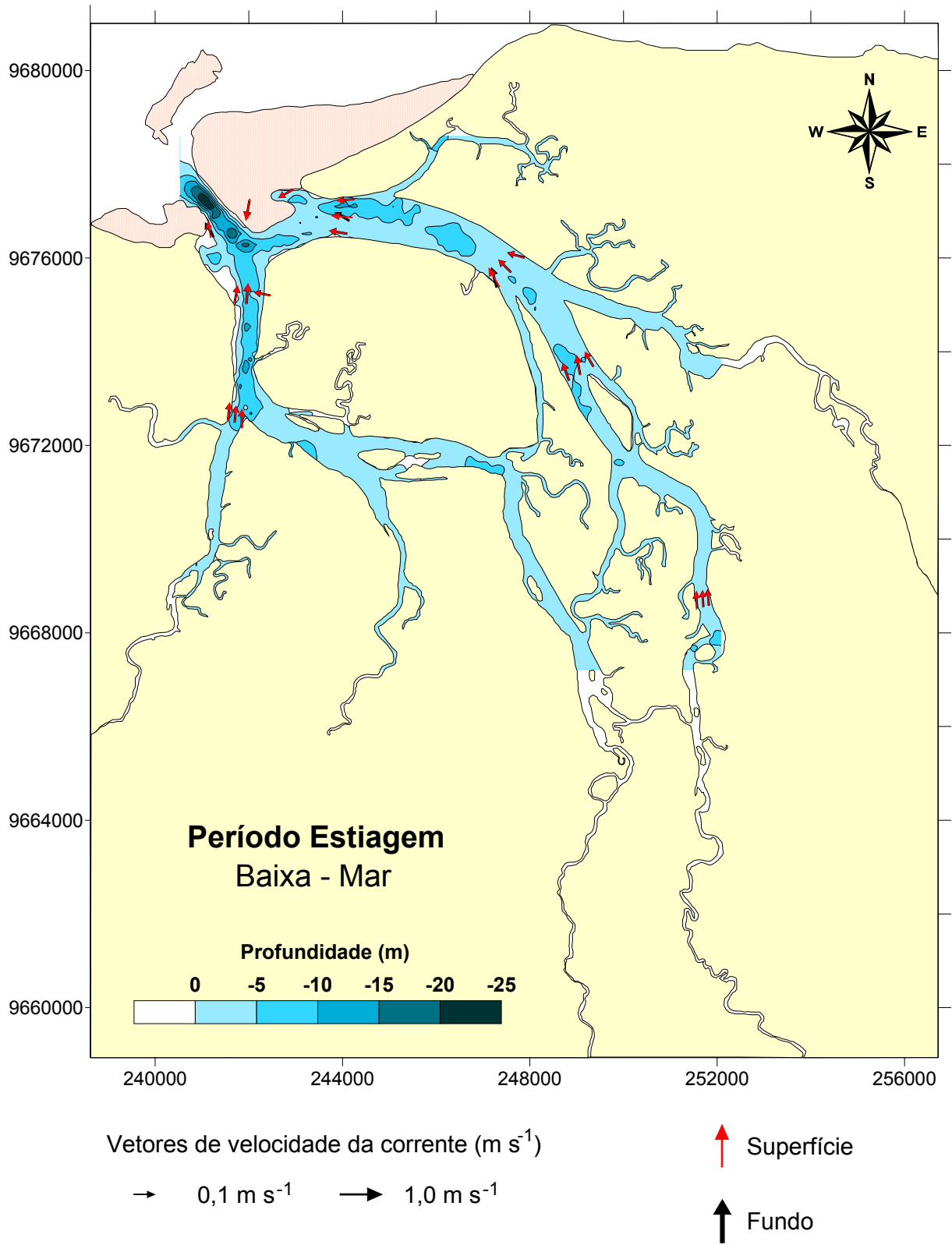


Figura 30: Direção e intensidade das correntes para baixa-mar de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.

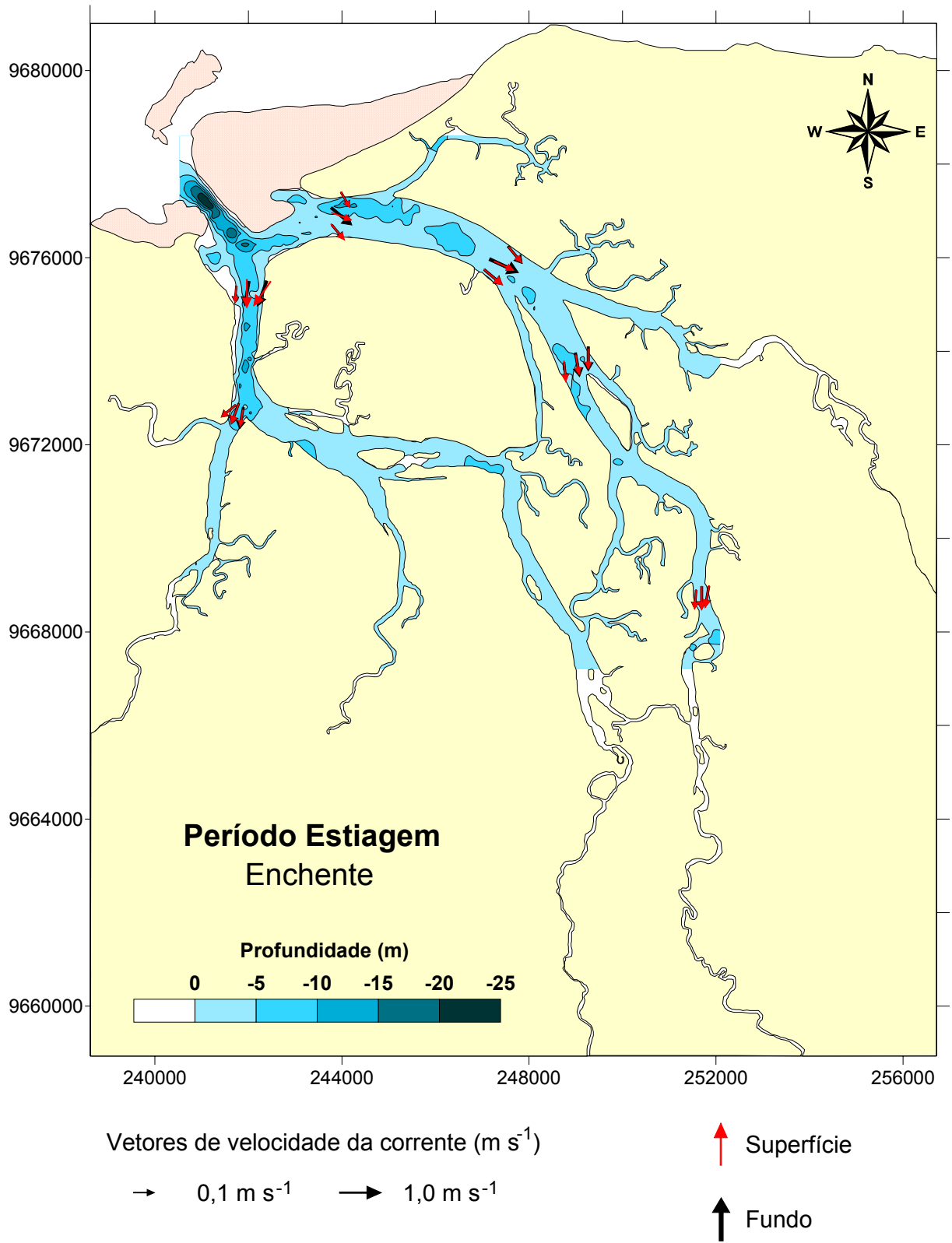


Figura 31: Direção e intensidade das correntes para fase de enchente da maré de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.

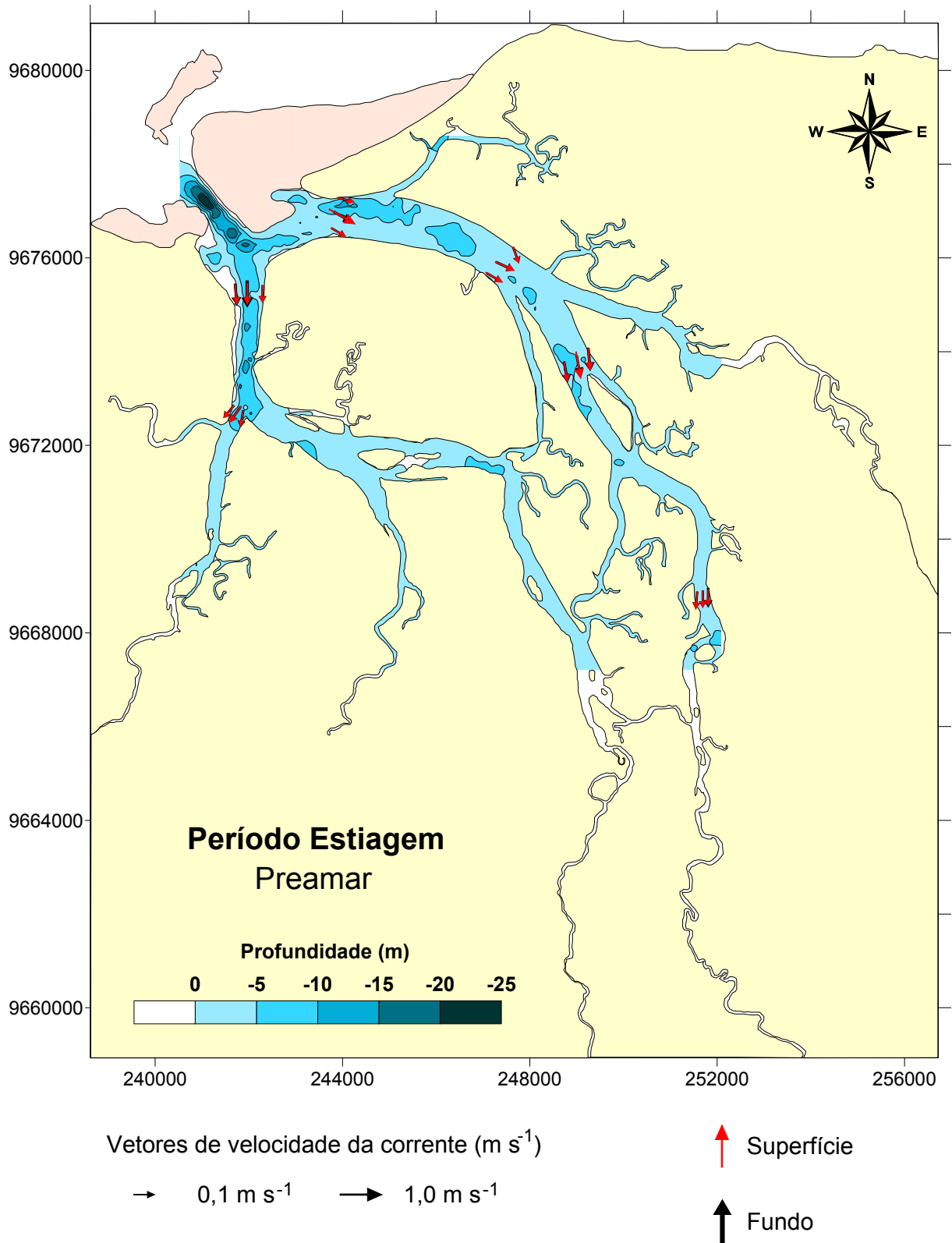


Figura 32: Direção e intensidade das correntes para preamar de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.



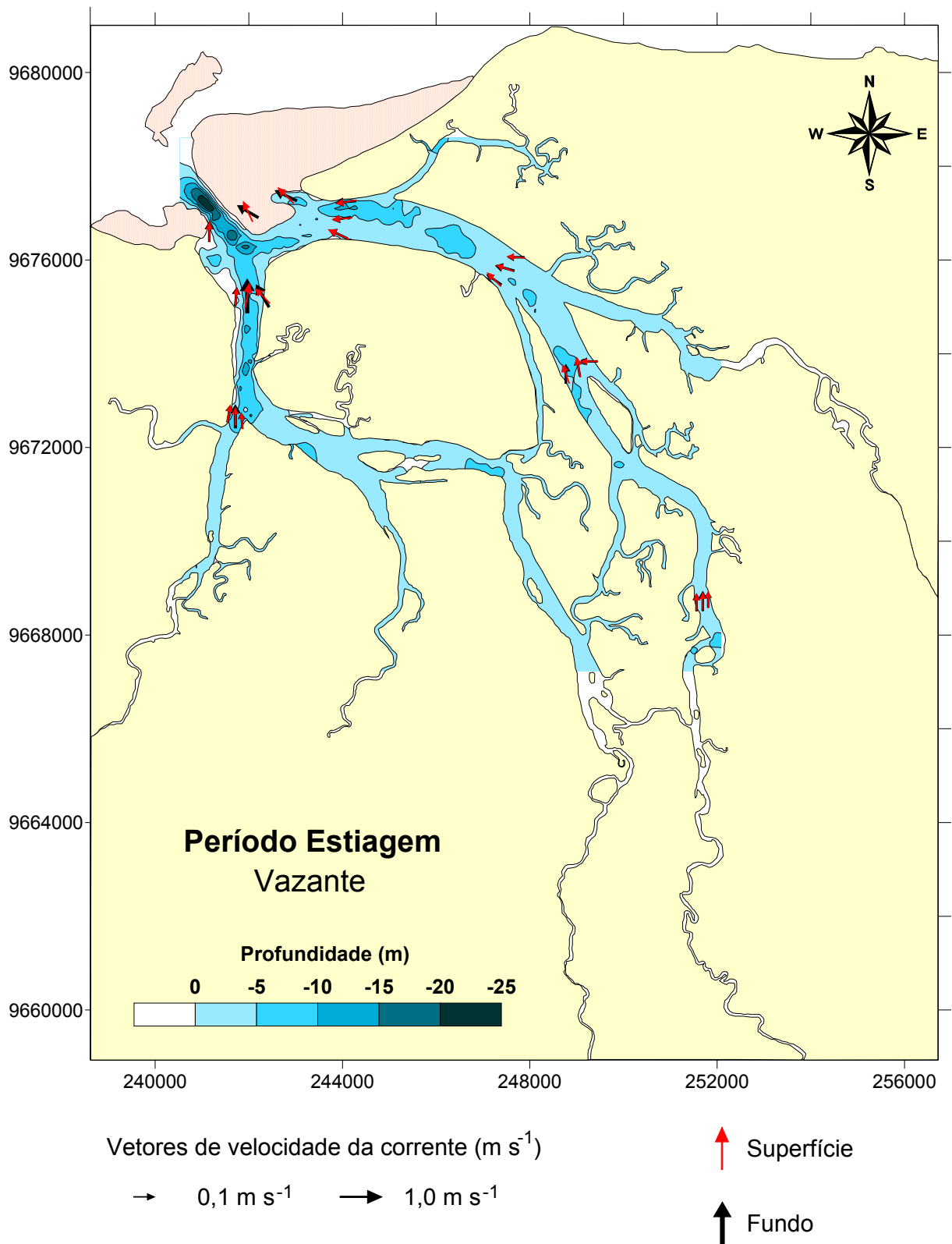


Figura 33: Direção e intensidade das correntes para fase de vazante da maré de sizígia referente ao período de estiagem de 2004.

Os estudos de circulação realizados durante a baixa-mar do período de estiagem evidenciaram uma drástica redução nos fluxos do sistema estuarino. A velocidade média das correntes foi de  $0,12 \text{ m s}^{-1}$  (redução de 52% em relação a média da mesma fase de maré referente ao período chuvoso) orientada primordialmente na direção NW. Nesse caso as correntes de fundo foram praticamente inexistentes (média de  $0,09 \text{ m s}^{-1}$ ) enquanto que as de superfície tiveram intensidade média quase duas vezes superior ( $0,16 \text{ m s}^{-1}$ ). Esse fenômeno pode ser justificado pela ausência circunstancial das principais forças geradoras de correntes em sistemas estuarinos (descarga fluvial e bombeamento da maré). Para as estações localizadas em Barra Grande, onde o espelho d'água é mais largo e a cobertura vegetal das margens menos densa, esse fenômeno pode está associado ao atrito do vento sobre a superfície da coluna d'água. Nas demais estações, o principal mecanismo gerador de corrente parece ser o gradiente topográfico.

Comparando os rios Timonha e Ubatuba nota-se que, nesse último, a velocidade média das correntes de baixa-mar é de 17% menor que as do primeiro. Os fluxos superficiais do rio Timonha fluem com velocidade média de  $0,15 \text{ m s}^{-1}$  enquanto que os do rio Ubatuba têm velocidade média de aproximadamente  $0,12 \text{ m s}^{-1}$ . A circulação de fundo dos dois rios apresenta velocidades médias semelhantes ( $0,09 \text{ m s}^{-1}$ ) sendo um reflexo da estagnação do sistema. Verifica-se que, sob essas condições, ocorre um represamento temporário das águas do rio Timonha no interior estuarino, formando uma zona de alta salinidade e pouca circulação.  $\text{m s}^{-1}$  As correntes superficiais mais intensas ocorreram na estação 13 ( $0,34 \text{ m s}^{-1}$ ) possivelmente associadas aos fluxos do canal existente entre a Ilha Grande e a Ilha do Guabiru. Nas estações 19, 20 e 21 a circulação ficou restrita apenas a superfície da coluna d'água assumindo valor médio de  $0,20 \text{ m s}^{-1}$ . É importante destacar que a caracterização dos campos de salinidade indicou que essa área apresenta acentuado processo de hipersalinização no período de estiagem.

Durante a enchente da maré a intensidade média das correntes praticamente triplicou em relação a média calculada para baixa-mar ( $0,35 \text{ m s}^{-1}$ ). As correntes de superfície e de fundo apresentaram intensidades semelhantes como consequência do movimento unidirecional na coluna d'água, orientado estuário acima. Os valores médios das correntes de superfície e de fundo, calculados para o rio Timonha, foram de  $0,32 \text{ m s}^{-1}$  e  $0,39 \text{ m s}^{-1}$ , ambos seguindo sentido preferencial S – SE. No rio Ubatuba as correntes superficiais tiveram velocidade média de  $0,35 \text{ m s}^{-1}$  e as de fundo  $0,36 \text{ m s}^{-1}$  predominantemente no sentido S. As correntes mais fortes ocorreram no talvegue fluvial onde a batimetria oferece menos resistência à penetração do prisma de maré. Os picos máximos de velocidade da corrente

foram verificados nas estações 6 ( $0,70 \text{ m s}^{-1}$ ) e 14 ( $0,60 \text{ m s}^{-1}$ ). A variação de  $0,50 \text{ m s}^{-1}$  entre as medidas de superfície ( $0,35 \text{ m s}^{-1}$ ) e de fundo ( $0,89 \text{ m s}^{-1}$ ) desta última estação foi reflexo da incursão da maré junto ao fundo que, por sua vez, foi favorecida pela profundidade do talvegue ( $-10,0 \text{ m}$ ).

As correntes no estófo da preamar tiveram intensidade média de  $0,20 \text{ m s}^{-1}$ . Os fluxos ocorreram principalmente na direção S, condicionados pela morfologia do canal. A velocidade média das correntes de superfície foi de  $0,22 \text{ m s}^{-1}$  e de fundo  $0,18 \text{ m s}^{-1}$ . Nessas circunstâncias a maré dinâmica atingiu seu máximo penetrando com maior intensidade pelo canal do rio Timonha ( $0,21 \text{ m s}^{-1}$ ) do que pelo do rio Ubatuba ( $0,19 \text{ m s}^{-1}$ ). Ressalta-se que, enquanto no rio Ubatuba a intensidade das correntes de fundo ( $0,21 \text{ m s}^{-1}$ ) foi superior a das correntes de superfície ( $0,16 \text{ m s}^{-1}$ ), no rio Timonha ocorreu o inverso. As correntes de superfície ( $0,26 \text{ m s}^{-1}$ ) foram 36% maiores que as de fundo e os fluxos mais intensos ocorreram na estação 7 ( $0,78 \text{ m s}^{-1}$ ). Destaca-se que as massas d'água hipersalinas retidas no interior estuarino tendem a fluir em direção às áreas menos saturadas gerando uma componente de força relacionada ao processo difusivo que exerce influência direta sobre os processos de circulação e mistura.

As correntes de vazante reproduziram o recuo do prisma de maré, apresentando velocidades 42 % menores do que as de enchente. O transporte líquido durante o período de estiagem pode então, ser considerado negativo, caracterizando o sistema como importador. A diferença média entre as medidas de superfície e fundo foi de  $0,10 \text{ m s}^{-1}$  com variação de até  $0,46 \text{ m s}^{-1}$  verificada na estação 5. Os fluxos ocorreram preferencialmente na direção NW com velocidade média superficial de  $0,19 \text{ m s}^{-1}$  em ambos os rios. Na base da coluna d'água as correntes foram mais fortes com valores aproximados de  $0,35 \text{ m s}^{-1}$  no rio Ubatuba e  $0,17 \text{ m s}^{-1}$  no rio Timonha.

### 6.5.2. Marés

A ação das marés exerce papel extremamente relevante sobre a hidrodinâmica costeira, sendo um dos principais responsáveis pela oscilação vertical da superfície de estuários. A propagação da maré em estuários envolve intenso processo advectivo numa região de topografia muitas vezes bastante complexa. As características morfológicas do sistema são importantes para obter as relações e diferenças de fase entre a propagação da onda, a corrente de maré e a variação da salinidade, e como subproduto, a excursão da maré (Miranda *et al.*, 2002).

Com o intuito de investigar o comportamento das marés no interior do sistema estuarino Timonha / Ubatuba foram realizados estudos comparativos entre as previsões da DHN para o porto de Luís Correia e os registros de campo. No entanto, diante da ausência de estudos específicos e sistemáticos sobre o regime de marés da região de Barra Grande, levou-se em consideração a caracterização elaborada por Moraes (1980) para a zona costeira de Fortaleza (a 340 km de distância da área). De acordo com esse autor, esta é uma região de mesomaré dominada por ondas semidiurnas com período médio de 12,4 hs.

Os dados referentes às previsões da DHN para o Porto de Luis Corrêa e os obtidos durante os experimentos de campo do período chuvoso de 2004 encontram-se na figura 34.

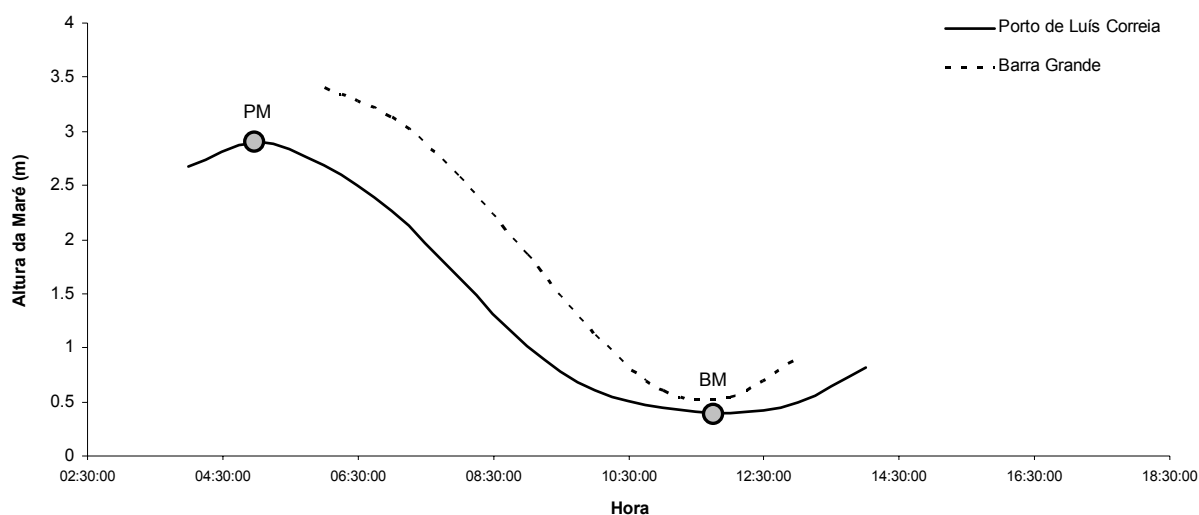


Figura 34: Variação da maré de sizígia no Porto de Luís Correia e em Barra Grande referente ao mês de fevereiro de 2004 – 07.02.04 (período chuvoso).

Não foram identificadas grandes diferenças entre as marés de Barra Grande e do Porto de Luís Correia. Durante os experimentos referentes ao período chuvoso, no entanto, observa-se que o nível da água no sistema estuarino permanece acima do nível médio da maré em Luís Correia durante todo o ciclo. Nessa época do ano, diante do incremento no aporte de água doce, observa-se o aumento do volume estuarino e, em consequência, um maior desnível entre a superfície da água em Barra Grande e o nível médio do mar.

O comportamento da maré no sistema estuarino durante os experimentos de chuva teve amplitude de 2,8 m enquanto que, em Luís Correia, a amplitude foi de 2,5 m e o período de 12,2 hs. Próximo ao estôfo da preamar o nível da água no estuário ficou 0,5 m acima do nível do mar e a lâmina d'água atingiu a cota máxima de 3,4 m acima do nível zero da DHN. Nesse período não foram identificados retardos de maré no interior estuarino.

Durante os experimentos de estiagem, a amplitude média da maré em Barra Grande e Luís Correia foi de 3,0 m e 3,1 m, respectivamente. As preamares (PM) e baixa-mares (BM) ocorreram nas duas regiões com a mesma magnitude, no entanto, foi verificado um retardo de aproximadamente 50 min, tanto na baixa-mar quanto na preamar, entre as regiões de Barra Grande e em Luís Correia. O gráfico da figura 35 mostra a oscilação da maré relativa ao período de estiagem.

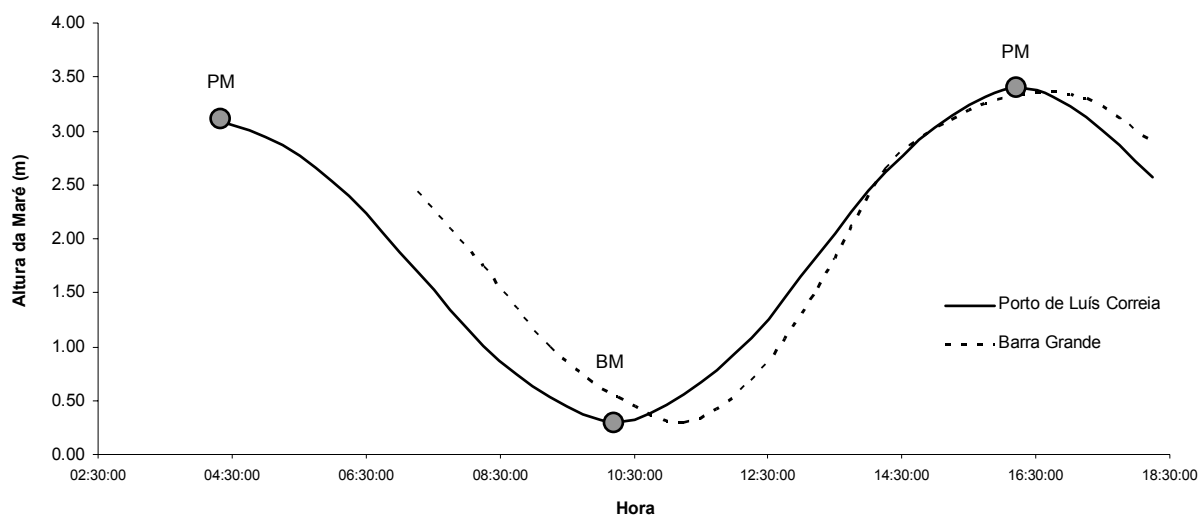


Figura 35: Variação da maré de sizígia no Porto de Luís Correia e em Barra Grande referente ao mês de novembro de 2004 – 11.11.04 (período de estiagem).

Esses estudos, associados aos dados de correntes e salinidade, comprovam que a excursão do prisma de maré durante o período chuvoso, penetra no canal do rio Timonha até uma distância superior a 13,6 km (estação mais distante da foz), não atingindo a estação 23 (a 26 km de distância do mar).

### 6.5.3. Regime de Ventos

O vento é uma das principais forças geradoras de movimento em sistemas oceânicos e costeiros, podendo exercer influência sobre a circulação e estratificação de estuários (Geyer, 1997). No estado do Ceará, a alternância entre os períodos de chuva e de estiagem coincide com a sazonalidade das velocidades do vento, atingindo variações máximas de aproximadamente 30% em relação a média anual (Bittencourt *et al.*, 1996).

Na região estuarina dos rios Timonha e Ubatuba os estudos de anemometria confirmaram essas variações sazonais. Durante o primeiro semestre (período chuvoso) a

intensidade média dos ventos foi  $5,2 \text{ m s}^{-1}$  sofrendo uma aceleração de 54% durante o período de estiagem (média de  $8,0 \text{ m s}^{-1}$ ).

A direção preferencial durante o semestre chuvoso foi E-NE orientando-se para N-NE durante o período de estiagem. As figuras 36 e 37 mostram as características dos ventos para região de Barra Grande durante o período chuvoso.

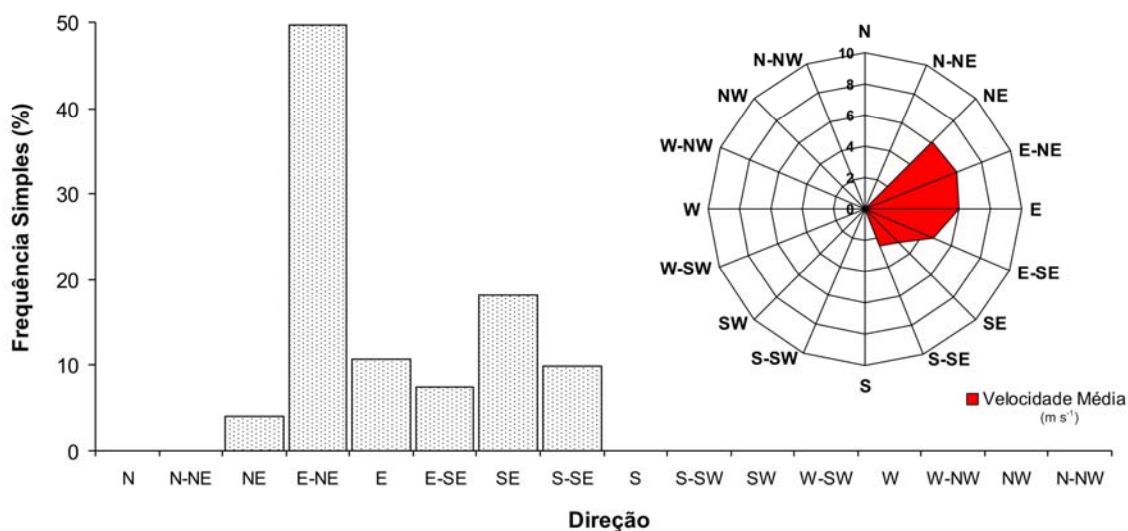


Figura 36: Direção e velocidade dos ventos na região de Barra Grande, obtidas durante os experimentos de chuva (fevereiro de 2004).

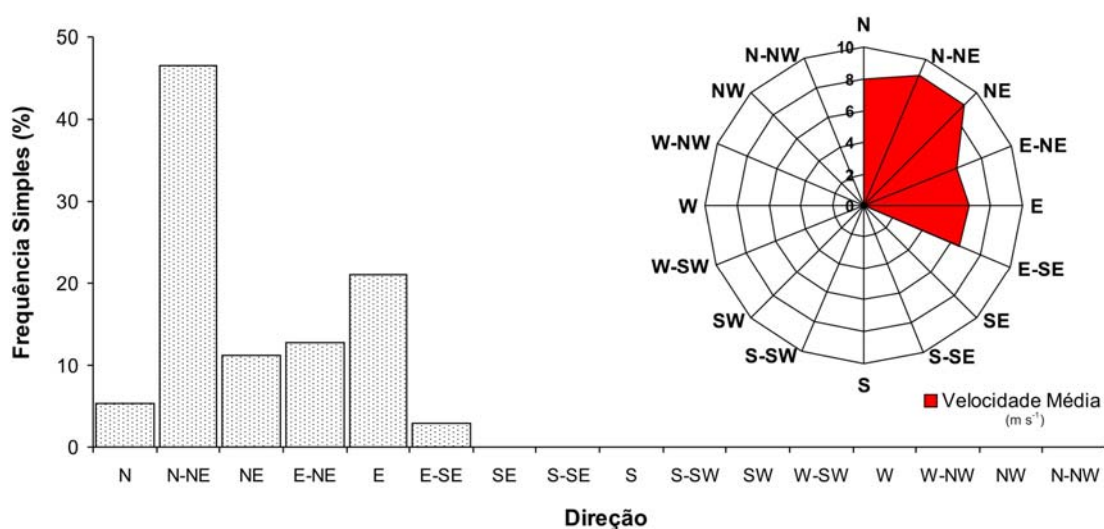


Figura 37: Direção e velocidade dos ventos na região de Barra Grande, obtidas durante os experimentos de estiagem (novembro de 2004).

A análise das características dos ventos durante os experimentos de estiagem mostrou rajadas de até  $12,5 \text{ m s}^{-1}$  enquanto que, no período chuvoso, os ventos mais intensos tiveram velocidade média de  $8,5 \text{ m s}^{-1}$ . Em ambos os casos, os picos de velocidade ocorreram associados à brisa marítima.

Apesar de fortes e relativamente constantes, os ventos atuantes sobre o sistema estuarino Timonha / Ubatuba não pareceram ter grande influência sobre os processos de circulação. Em geral, essa componente de força é mais ativa sobre estuários largos onde não existam obstáculos à sua ação sobre a superfície livre da água.

No entanto, durante a baixa-mar do período de estiagem, sob condições de estagnação das águas do rio Timonha, observou-se uma suave circulação superficial que pareceu está associada ao atrito gerado pelo vento. Destaca-se que, durante as medidas de correntes nesse mesmo período e estágio da maré, a velocidade dos ventos foi de  $6,5 \text{ m s}^{-1}$  (média) com rajadas de até  $9,4 \text{ m s}^{-1}$ .

## 6.6. Diagrama de Classificação

Diante da grande variabilidade dos campos de salinidade e padrões de circulação atuantes no sistema estuarino Timonha / Ubatuba, optou-se pela elaboração de diagramas de estratificação x circulação específicos para cada estágio da maré e estação do ano (figura 38).

Durante a baixa-mar do período chuvoso o sistema apresentou-se parcialmente misturado com fraca estratificação vertical (2a). No entanto, em algumas áreas, essa estratificação mostrou-se mais incisiva (2b) em decorrência de processos hidrodinâmicos locais (estações 10, 11 e 13). Vale ressaltar que as estações 6 e 14 assumiram características de transição para o tipo fiorde, sub-tipo altamente estratificado verticalmente (3b). Nesse mesmo estágio da maré, durante o período de estiagem, o estuário comportou-se como um sistema de transição entre os tipos bem misturado (1a) e parcialmente misturado (2a), praticamente sem estratificação vertical.

Na enchente da maré referente à época chuvosa o sistema mostrou-se parcialmente misturado (2a) apresentando estratificação vertical apenas nas estações 5, 10, 11 e 12 (2b). Em contrapartida, na época de estiagem, comportou-se praticamente todo como um estuário bem misturado e sem estratificação vertical significativa (1a).

O diagrama elaborado a partir dos dados relativos à preamar do período chuvoso evidenciou um estuário parcialmente misturado, sub-tipo fracamente estratificado (2a). As exceções ocorreram nas áreas correspondentes as estações 19 (tipo 1b) e 7, 8, 20 e 21 (tipo 2b) que apresentaram forte estratificação vertical da coluna d'água. Na área correspondente a saída do rio Ubatuba (estações 4, 5 e 6) o sistema assumiu características de fiorde (3b). A análise relativa ao período de estiagem demonstrou que, durante a preamar, o estuário assume características de transição entre os tipos bem misturado (1a) e parcialmente misturado (2a), sem estratificação vertical.

Durante a vazante da maré referente ao período chuvoso a maior parte das estações foi classificada como parcialmente misturada com fraca estratificação vertical da coluna d'água (2a). No entanto, as estações 20 e 21 apresentaram-se altamente estratificadas (2b) e as estações 8 e 19 com características do tipo fiorde altamente estratificado (3b). Durante a estiagem, o sistema mais uma vez comportou-se de maneira homogênea, assumindo características típicas da faixa de transição entre os tipos bem misturado (1a) e parcialmente misturado (2a) ambos sub-tipo fracamente estratificado.



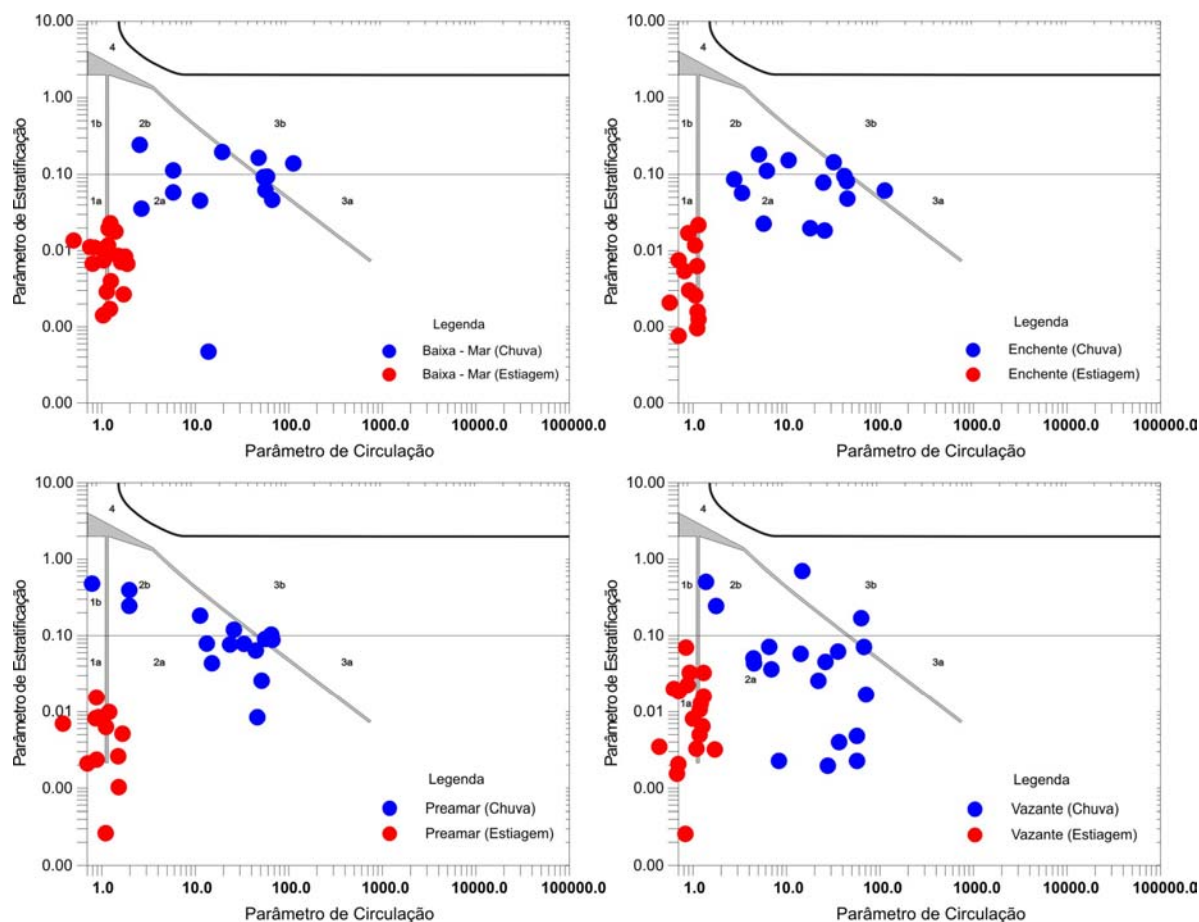


Figura 38: Diagramas de estratificação x circulação referentes a cada fase da maré e estação do ano elaborado a partir da proposta de Hansen & Rattray (1966).

De acordo com esses diagramas observa-se que, sob condições de estiagem, o sistema estuarino comporta-se de maneira bastante homogênea, mantendo as mesmas características durante quase todo o ciclo de maré. Entretanto, na época chuvosa, os processos de circulação e mistura parecem mais complexos variando significativamente entre as estações de monitoramento e estágios da maré.

De acordo com a classificação obtida através do diagrama de estratificação x circulação de Hansen & Rattray (1966), durante o período chuvoso o sistema comporta-se como o tipo 2 (parcialmente misturado) com áreas apresentando estratificação vertical e outras não. Os resultados dos experimentos de estiagem entretanto, evidenciaram que nesse período, o estuário assume características do tipo 1 (bem misturado) sem estratificação vertical em nenhuma estação.



### 6.7. Morfologia da Bacia Estuarina

Os estudos relativos à morfologia de fundo do sistema estuarino Timonha / Ubatuba basearam-se na carta batimétrica elaborada pela DHN no ano de 1964 (figura 40).

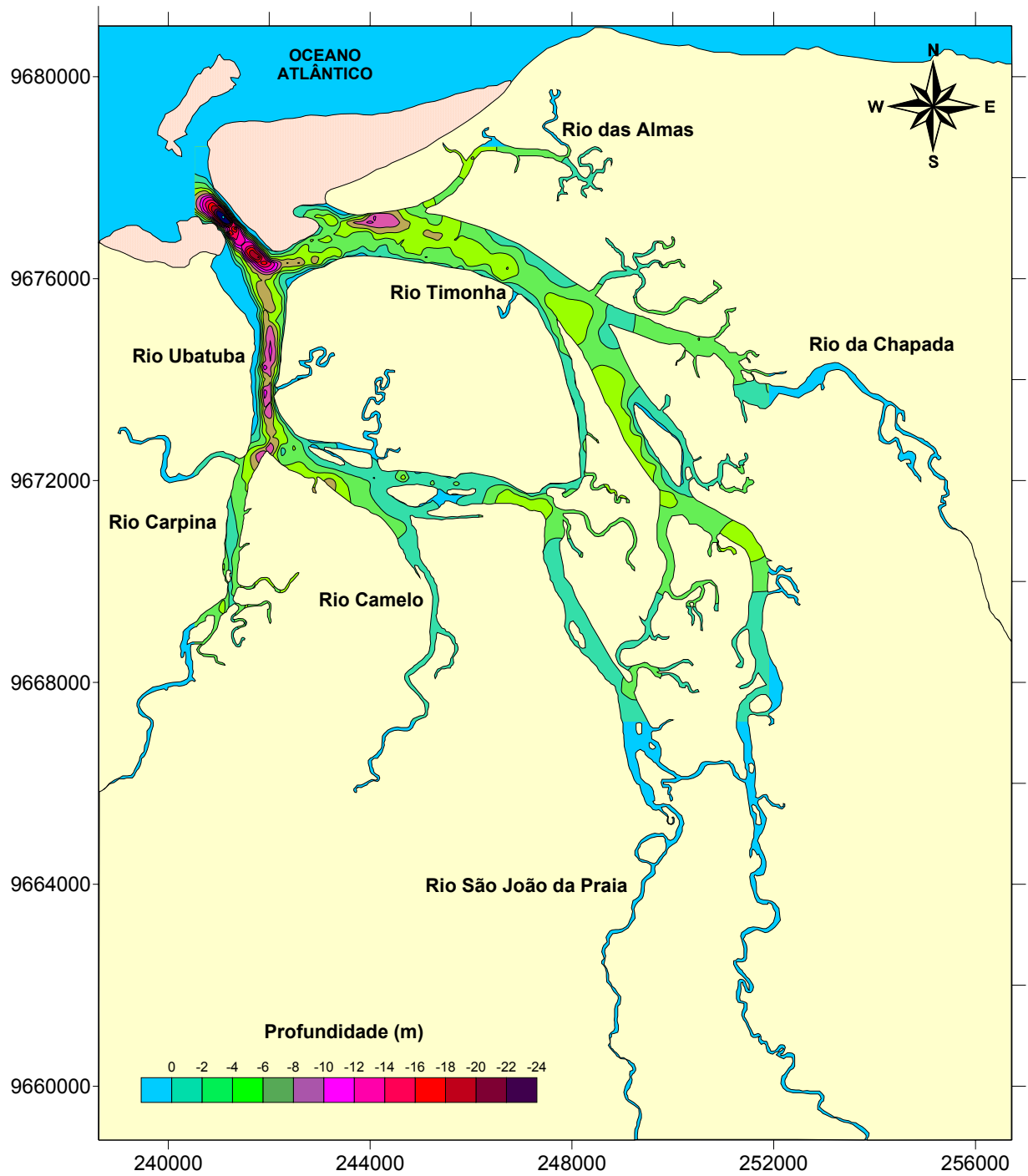


Figura 40: Batimetria do sistema estuarino Timonha / Ubatuba realizada pela DHN em 1964.

No entanto, diante da intensa atividade morfodinâmica e hidrodinâmica intrínseca às regiões estuarinas, fez-se necessária a atualização das cotas através de sondagens batimétricas. Vale ressaltar que as profundidades que constam na batimetria atualizada também referem-se ao nível zero da DHN.

Com base na batimetria atualizada e nos dados de oscilação média da coluna d'água durante o ciclo de maré de sizígia, foi possível determinar o volume do sistema estuarino. Nas seções transversais ao leito, onde foram estabelecidas as estações de monitoramento, os levantamentos batimétricos foram mais minuciosos. A determinação da área média de cada seção viabilizou o cálculo da vazão e assim, dos transportes de sal e de sedimentos ao longo dos canais dos rios Timonha e Ubatuba. As áreas calculadas para cada seção, considerando a profundidade média durante um ciclo de maré com amplitude de 3,0 m, encontram-se na tabela 16.

Tabela 16: Áreas médias das seções transversais dos rios Timonha e Ubatuba.

Seção transversal	Estações	Área média (km <sup>2</sup> )
A	1 – 2 – 3	9.847
B	4 – 5 – 6	3.353
C	7 – 8 – 9	3.366
D	10 – 11 – 12	1.332
E	13 – 14 – 15	4.142
F	16 – 17 – 18	2.652
G	19 – 20 – 21	589

Sob a mesma hipótese, o volume geométrico do sistema estuarino foi de aproximadamente 72.000.000 m<sup>3</sup> com espelho d'água ocupando uma área de 27 km<sup>2</sup>. A tabela 17 mostra as principais características morfométricas do sistema estuarino.

Tabela 17: Características morfométricas do sistema estuarino Timonha / Ubatuba.

Características Médias *	Rio Timonha	Rio Ubatuba	Total (Sistema Estuarino)
Profundidade média (m)	4,5	5,5	5,0
Profundidade máxima (m)	13	14	24
Largura máxima do canal (m)	800	650	2.500
Área do espelho d'água (km <sup>2</sup> )	14.500	12.200	26.700
Volume da bacia (m <sup>3</sup> )	45.400.000	26.700.000	72.100.000

\* Médias calculadas considerando que o sistema é forçado por marés com 3,0 m de amplitude.

A morfologia do sistema estuarino Timonha / Ubatuba é bastante complexa, principalmente na região da desembocadura, onde existem extensos bancos de sedimentação e

canais bastante profundos. No início da área estuarina, os rios Timonha e Ubatuba apresentam variações topográficas suaves com canais estreitos (largura média de 250 m) e profundidade média de 3,0 m. Na foz estuarina, as variações batimétricas são mais fortes e o talvegue mais profundo. Em Barra Grande as cotas atingem a profundidade máxima observada em todo o sistema (24,0 m). A figura 41 mostra a batimetria do sistema estuarino atualizada em 2004.

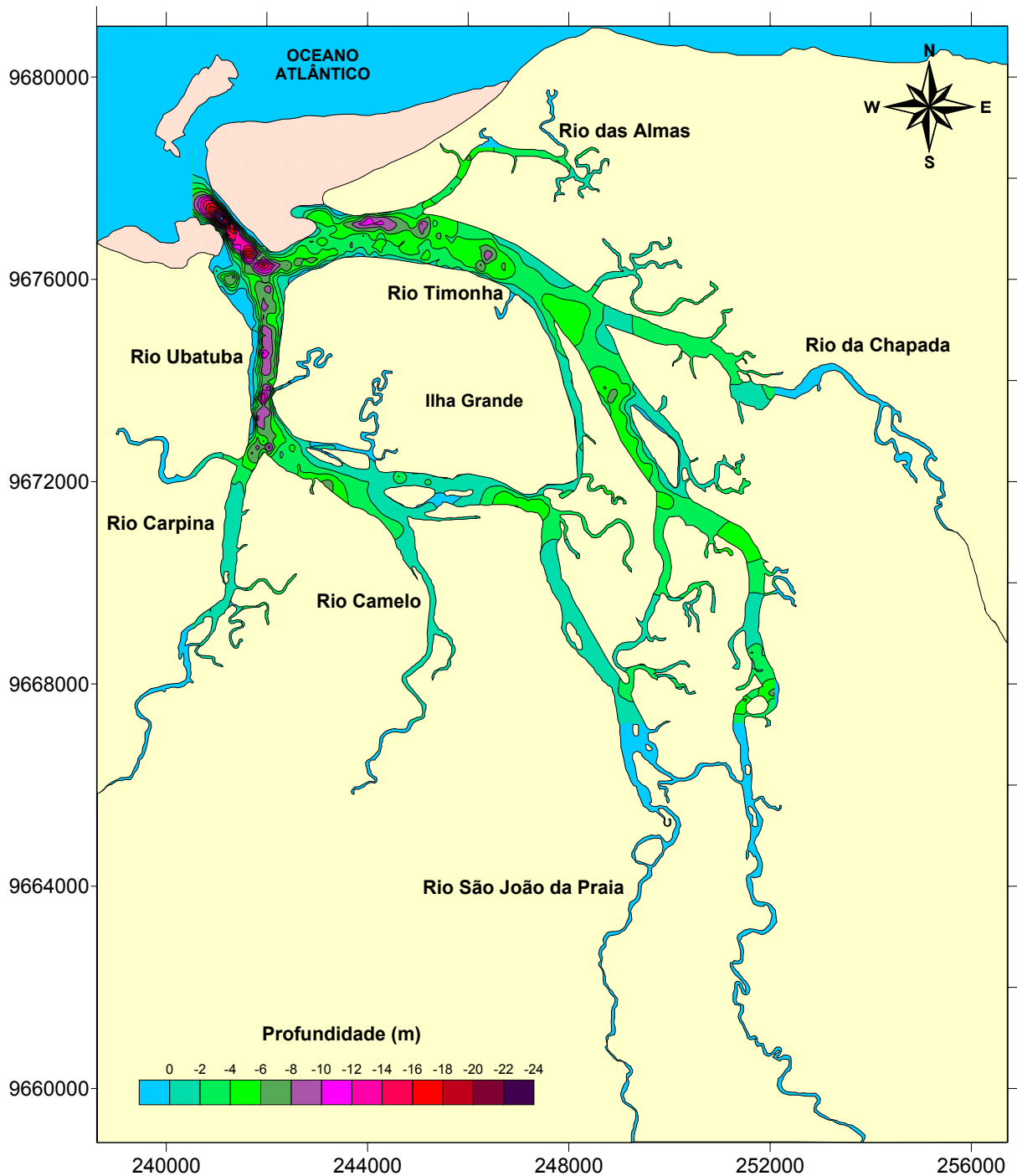


Figura 41: Batimetria referente ao ano de 2004 com cotas obtidas durante as sondagens de campo.

A figura 42 apresenta os perfis da morfologia de fundo referentes às seções transversais ao longo do sistema estuarino.

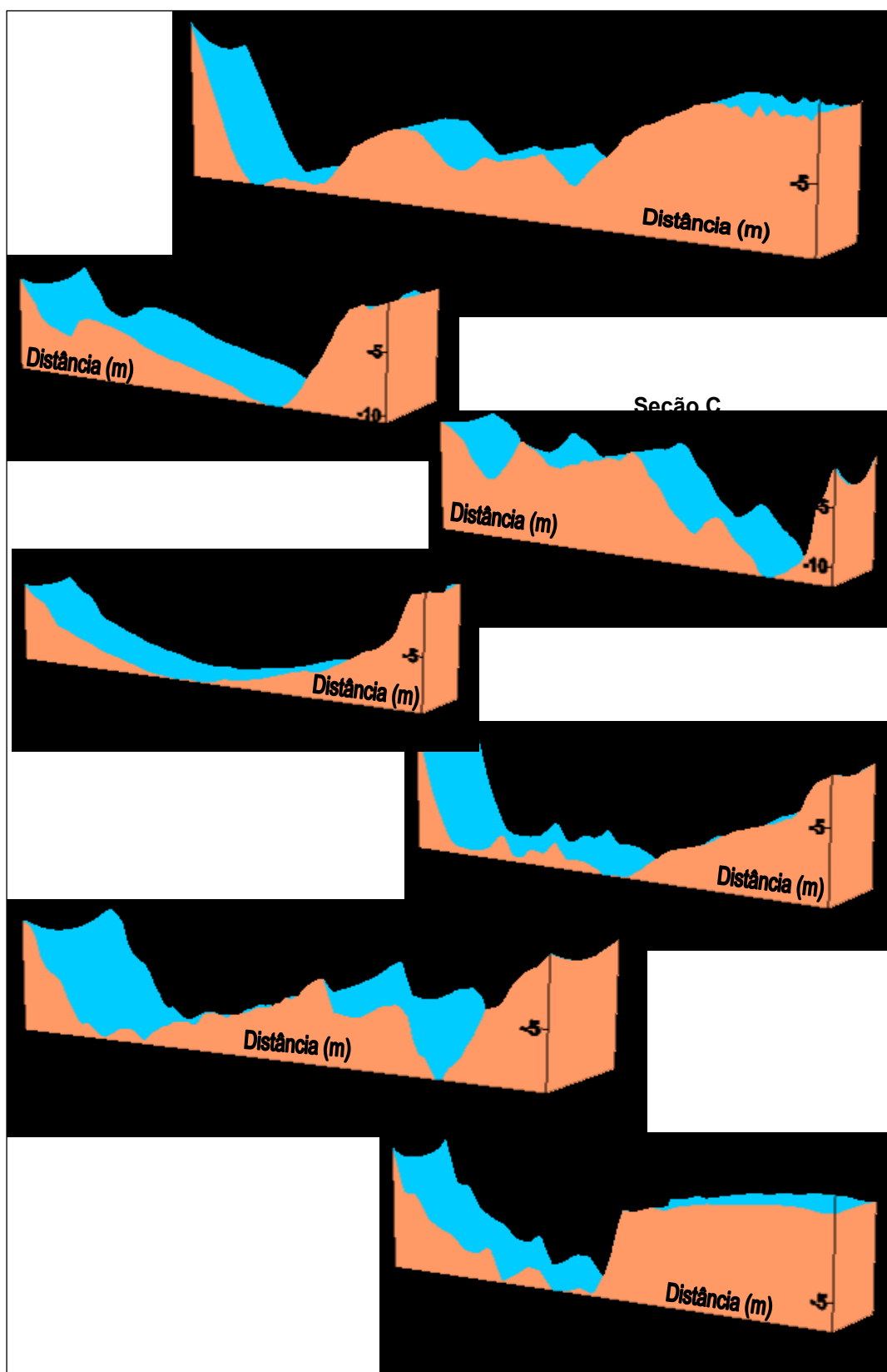


Figura 42: Perfis batimétricos das seções transversais ao leito fluvial dos rios Timonha e Ubatuba.

Observa-se que os canais de saída dos dois rios principais também são profundos. As cotas batimétricas máximas nessas áreas foram de -14,0 m tanto para a foz do rio Timonha quanto para a do rio Ubatuba.

O perfil da seção A demonstra a configuração do canal da desembocadura do sistema estuarino. As medidas partiram da margem localizada em Pontal das Almas (distância 0) e se estenderam até a margem localizada em Cajueiro da Praia, perfazendo uma distância de 2,5 km. A profundidade máxima dessa seção ocorre no ponto correspondente a estação 1 (9,0 m) onde observa-se um canal de aproximadamente 500 m de largura. Na porção central do perfil há uma extensa área (300 m) cuja profundidade média é de 4,5 m, representando a base do banco de sedimentação que barra a foz do sistema. Em direção à margem leste, o perfil novamente apresenta um suave declive (profundidade média de 6,0 m) para, em seguida, subir até a cota -1 m. Na figura 43 as fotografias ilustram a região da foz onde foi realizado o perfil batimétrico.

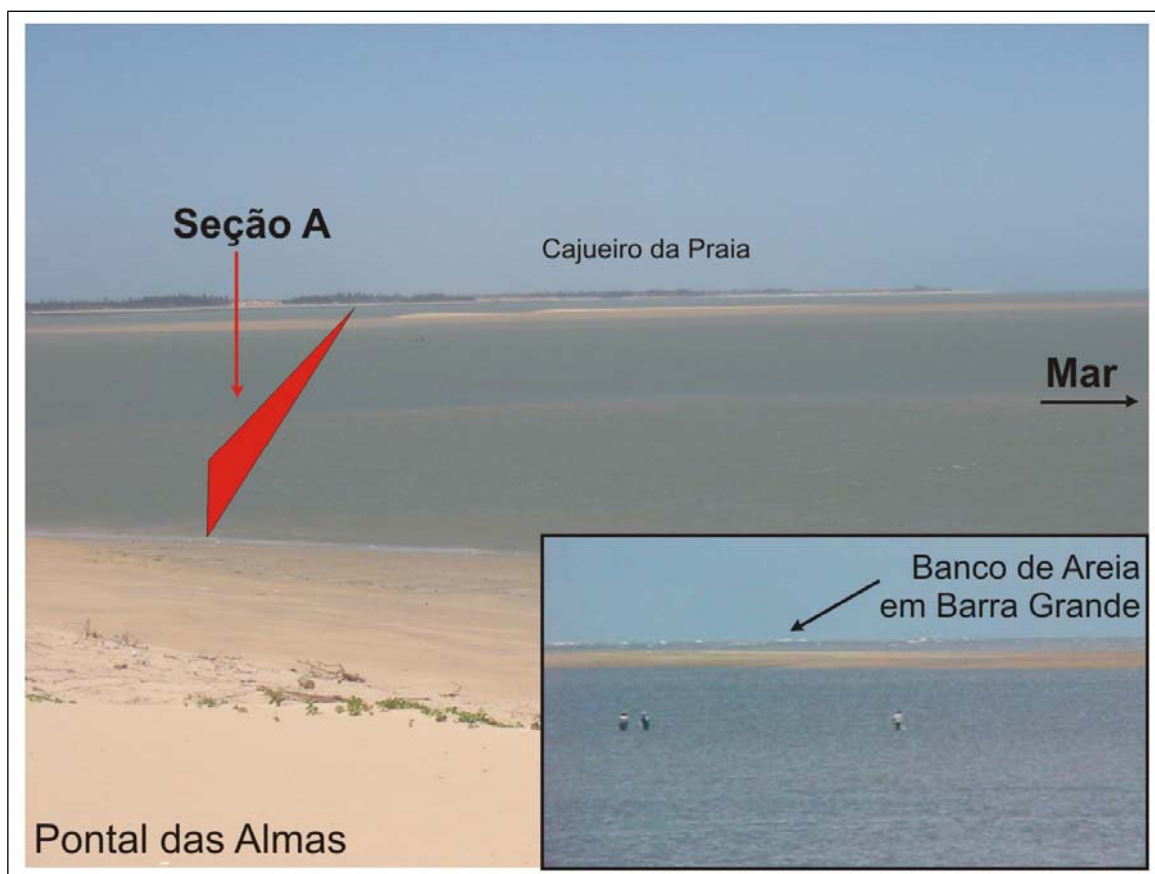


Figura 43: Bancos de sedimentação localizados na foz do sistema estuarino.

A seção B corresponde à saída do rio Ubatuba. Esse perfil está orientado para E com distância 0 localizada em Cajueiro da Praia. Observa-se que, nesse ponto, o talvegue fluvial apresenta topografia suave com profundidade média de 6,5 m. O canal tem aproximadamente 600 m de largura onde podem ser observadas cotas de até - 11,0 m.

Diferentemente do que foi verificado para o rio Ubatuba, o canal de saída do rio Timonha (seção C) apresentou variações morfológicas bastante abruptas. O perfil segue a direção NE – SW partindo da margem situada em Pontal das Almas e indo até a Ilha Grande. A seção tem 800 m de largura e profundidade média de 5,5 m, chegando à máxima de 12,0 m.

O perfil topográfico da seção D (orientado no sentido SE – NW) evidenciou uma morfologia de fundo bastante suave com canal fluvial em forma de U. Nessa área, correspondente a saída do rio Carpina na confluência com o rio Ubatuba, a profundidade média é de 6,0 m e a máxima 8,0 m.

As seções E, F e G referem-se aos perfis transversais realizados ao longo do canal do rio Timonha. Nesses pontos, as sondagens iniciaram-se na margem leste (distância 0) orientando-se perpendicularmente ao eixo principal do rio. Os diagramas da figura 42 demonstram que as profundidades médias decrescem em direção à montante (Seção E = 7,0 m / Seção F = 5,5 m / Seção G = 4,0 m) assim como a largura do canal (Seção E = 790 m / Seção F = 640 m / Seção G = 300 m). Em geral, a razão largura / profundidade desse rio é grande (média 125) aumentando estuário abaixo.

As margens do sistema estuarino apresentam topografia suave sendo recobertas por uma densa vegetação de mangue. Os canais principais têm características anastomosadas com eixos longitudinais orientados para N e NW. Observa-se que a desembocadura do sistema tende a migrar para oeste, sob a influência das correntes de deriva litorânea que contribuem para o desenvolvimento de um cordão arenoso a partir da praia de Pontal das Almas.

A análise da dinâmica evolutiva do sistema evidencia condições pretéritas com fortes descargas fluviais que foram responsáveis por eventuais bloqueios da deriva litorânea e, assim, pela formação de extensos bancos de sedimentação arenosa à leste da foz estuarina. Esses depósitos ocorrem desde Pontal das Almas, prolongando-se mar adentro, no sentido NW, por aproximadamente 3,0 km. Contrapondo-se a isso, em Cajueiro da Praia, pode ser observada uma extensa plataforma de abrasão marinha que reflete os efeitos da ação erosiva sobre a linha de costa (figura 44).



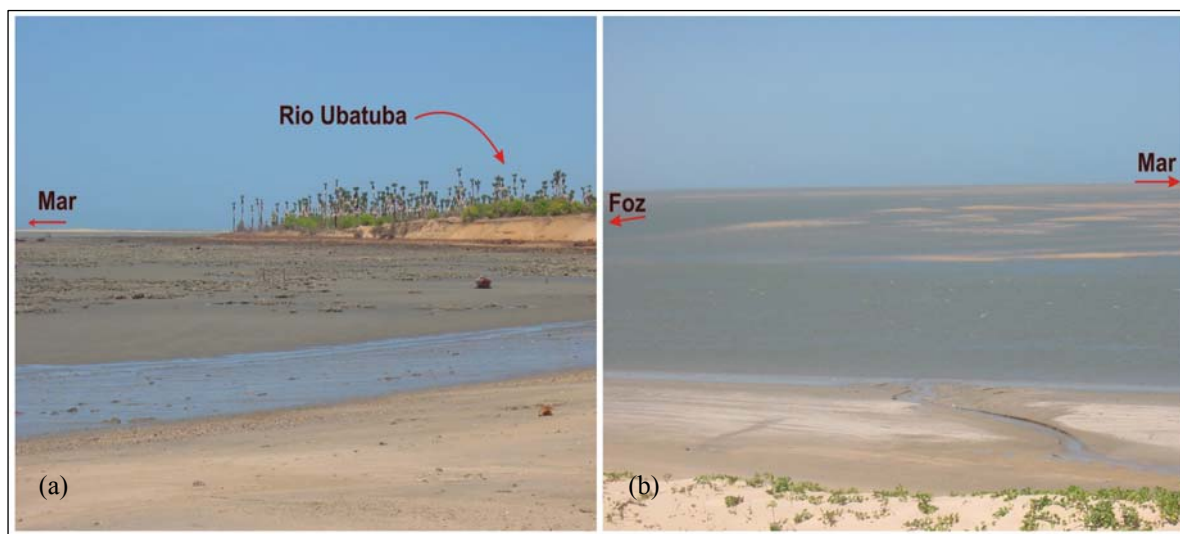


Figura 44: (a) – Evidências de erosão em Cajueiro da Praia. (b) – Bancos arenosos que bordejam a faixa de praia em Pontal das Almas.

Levando-se em consideração os últimos 45 anos, nota-se que a região apresentou relativa estabilidade que se manteve, mesmo diante da alternância entre processos de erosão e deposição. Esses processos ocorrem associados à função de espigão hidráulico exercida pelo fluxo fluvial e apresentam comportamento cíclico decorrente da sazonalidade hidroclimática da região.

De acordo com o esquema classificatório elaborado por Pritchard (1952) e Fairbridge (1980), podemos classificar o sistema estuarino Timonha / Ubatuba como um estuário construído por barra. A grande quantidade de sedimentos transportados pela deriva litorânea parece está associada aos processos erosivos desencadeados pelo efeito hidrodinâmico do promontório de Bitupitá. Os sedimentos erodidos pelas correntes difratadas são retrabalhados e transportados até a foz estuarina onde, em períodos de chuva, ficam barrados à leste do molhe hidráulico e, em períodos de estiagem, progradam o cordão arenoso ou são importados pelo sistema.

Nota-se que as descargas fluviais têm demonstrado grande eficiência em manter a configuração morfológica da foz, evitando seu barramento e migração lateral. No entanto, essa situação pode ser alterada como consequência da redução dos fluxos fluviais do rio Timonha. Por se tratar de uma obra recente (2001), os impactos do açude Itaúna ainda não se refletiram sobre o delineamento geomorfológico do sistema estuarino Timonha / Ubatuba, entretanto, são nitidamente perceptíveis sobre a disposição das feições texturais sedimentológicas.

## 6.8. Processos Hidrossedimentológicos

As características sedimentológicas dos estuários refletem claramente o funcionamento do sistema, evidenciando áreas-fonte, locais de perda e principais mecanismos de transporte. A dinâmica sedimentar do sistema estuarino Timonha / Ubatuba foi estudada sob o ponto de vista da disposição espacial das fácies sedimentadas e do volume de sedimentos transportado pelos canais fluviais. Assim, foi possível identificar a contribuição do estuário para o balanço sedimentar da zona costeira adjacente e as variações da cobertura sedimentar de fundo diante da irregularidade das descargas fluviais.

### 6.8.1. Características dos Depósitos Sedimentares

A análise granulométrica das amostras de sedimentos coletadas ao longo do rio Timonha, durante o período chuvoso, revelou a predominância das frações arenosas. A ocorrência de sedimentos finos ficou restrita a estação 14 (figura 45).

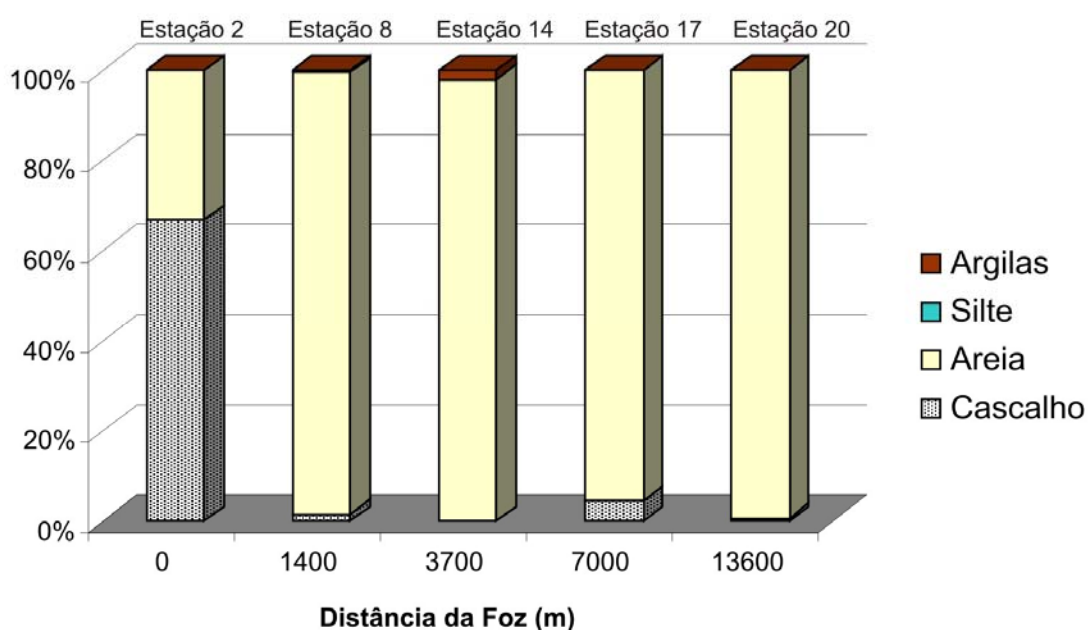


Figura 45: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Timonha coletadas durante o período chuvoso de 2004.

A distribuição espacial demonstra que a superfície de fundo da foz é composta predominantemente por partículas maiores que 2,00 mm. No entanto, a classificação granulométrica parece não ser a mais adequada para caracterizar esses depósitos. A cobertura

sedimentar dessa região é representada pela acumulação de biodetritos (fragmentos de conchas e carapaças) que são transportados estuário abaixo até Barra Grande (figura 46).

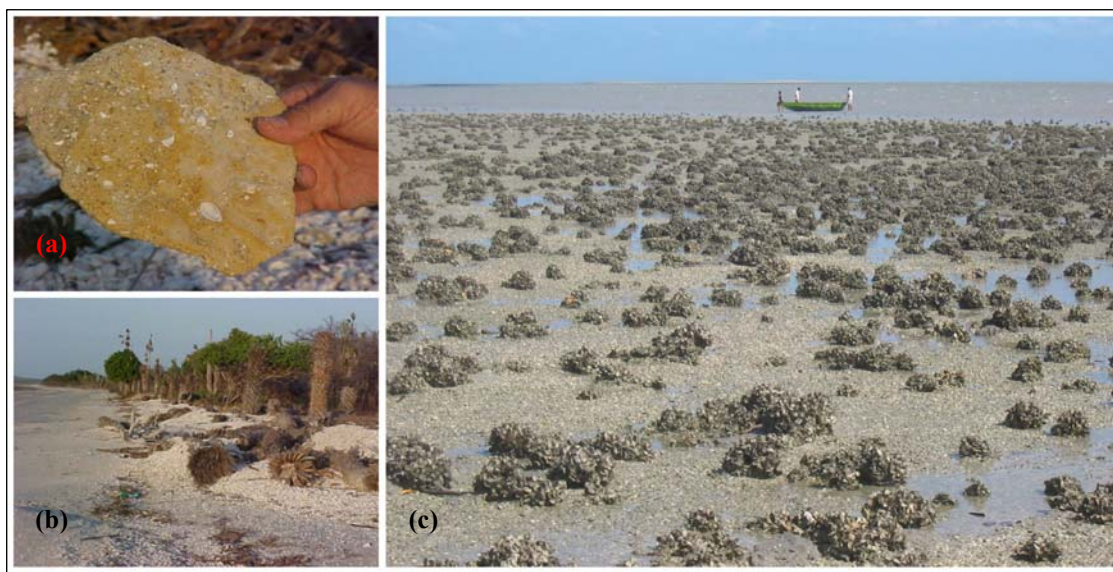


Figura 46: (a) – Associação de sedimentos bioclásticos possivelmente cimentados por calcita. (b) – Depósito de conchas na porção norte da Ilha Grande. (c) – Área de acumulação de biodetritos na margem oeste estuarina.

Avançando estuário acima, pelo curso principal do rio Timonha, observa-se a ocorrência de extensos depósitos de areia grossa (estações 8 e 14) e areia média (estações 17 e 20). Durante o período de estiagem, o padrão de sedimentação desse rio apresenta-se significativamente mais heterogêneo, como mostra a figura 47.

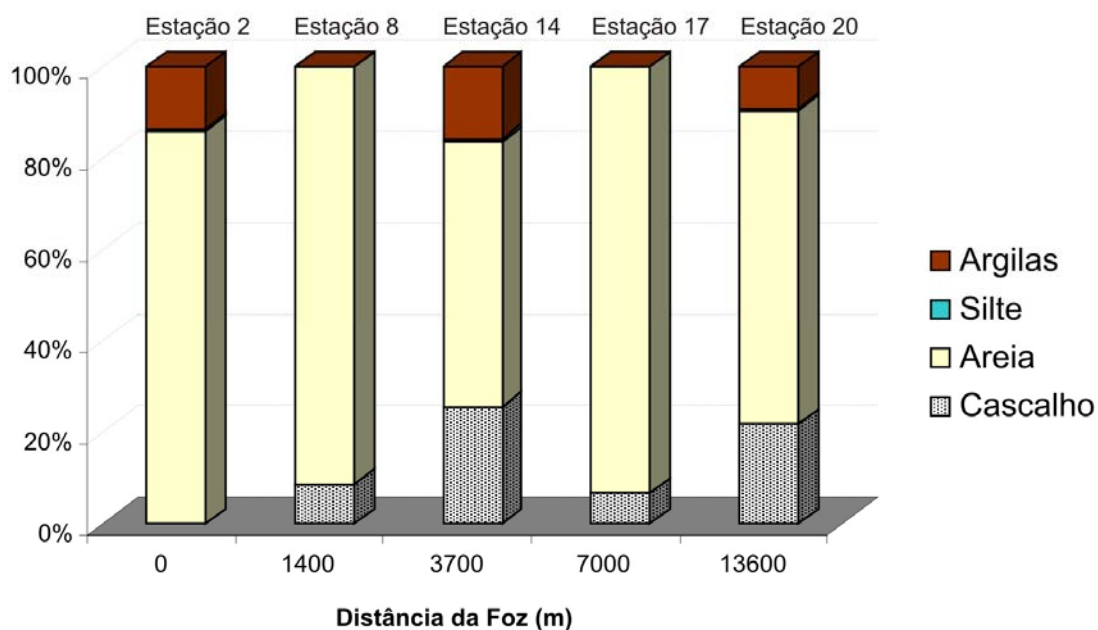


Figura 47: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Timonha coletadas durante o período de estiagem de 2004.

As areias ainda são predominantes, no entanto, observa-se a presença de sedimentos finos (silte e argila) em quantidades superiores às observadas durante o semestre chuvoso. A ausência de fluxo fluvial e redução dos processos turbulentos favorecem a formação de um depósito de areia muito fina na região da foz, no entanto, não alteram a composição de fundo na área da estação 8 (saída do rio Timonha) que apresenta a mesma cobertura sedimentar durante os períodos de chuva e de estiagem. A 3,7 km de distância do mar (estação 14) a areia grossa depositada durante o período chuvoso apresenta-se recoberta por uma camada de areia média que se estende, a partir desse ponto, até a estação 20 (a 13,6 km de distância do mar).

Na análise dos sedimentos de fundo do rio Ubatuba, observa-se a presença de frações finas tanto em períodos de chuva quanto de estiagem. Entretanto, durante o período chuvoso, predomina a deposição de sedimentos arenosos (figura 48).

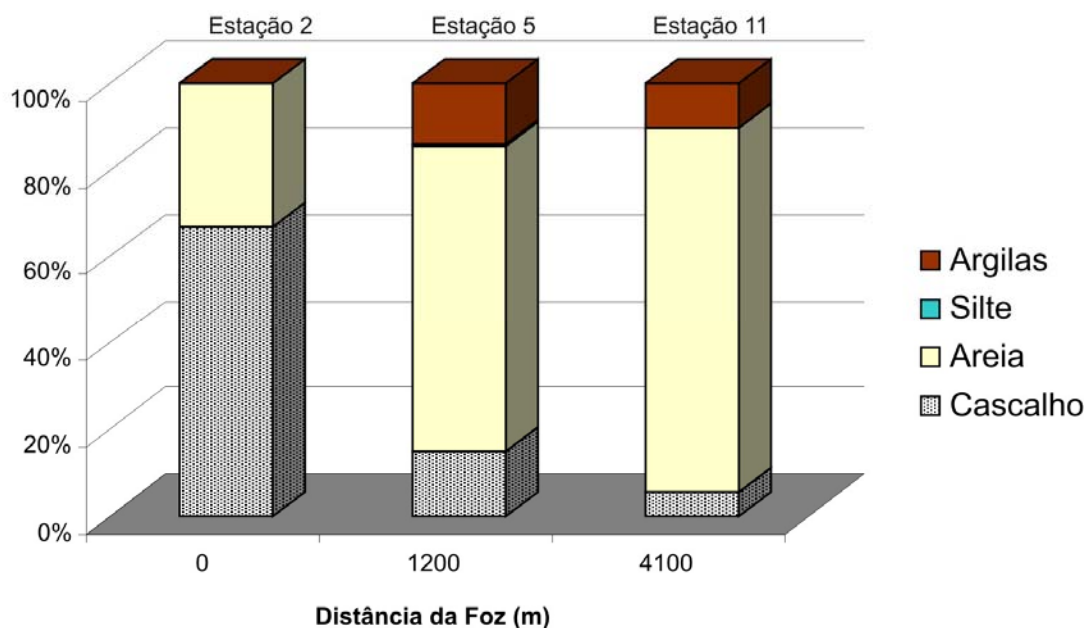


Figura 48: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Ubatuba coletadas durante o período chuvoso de 2004.

Durante o semestre chuvoso o canal fluvial do rio Ubatuba apresentou-se recoberto primordialmente por areias médias, sem variações entre as estações monitoradas. Em contrapartida, durante a estiagem, as fácies sedimentares de fundo variaram entre areia média (na foz) e silte médio (na estação 11). A deposição de sedimentos finos, na região de confluência entre os rios Ubatuba e Carpina, comprova a redução da energia da descarga fluvial durante essa época do ano (Figura 49).

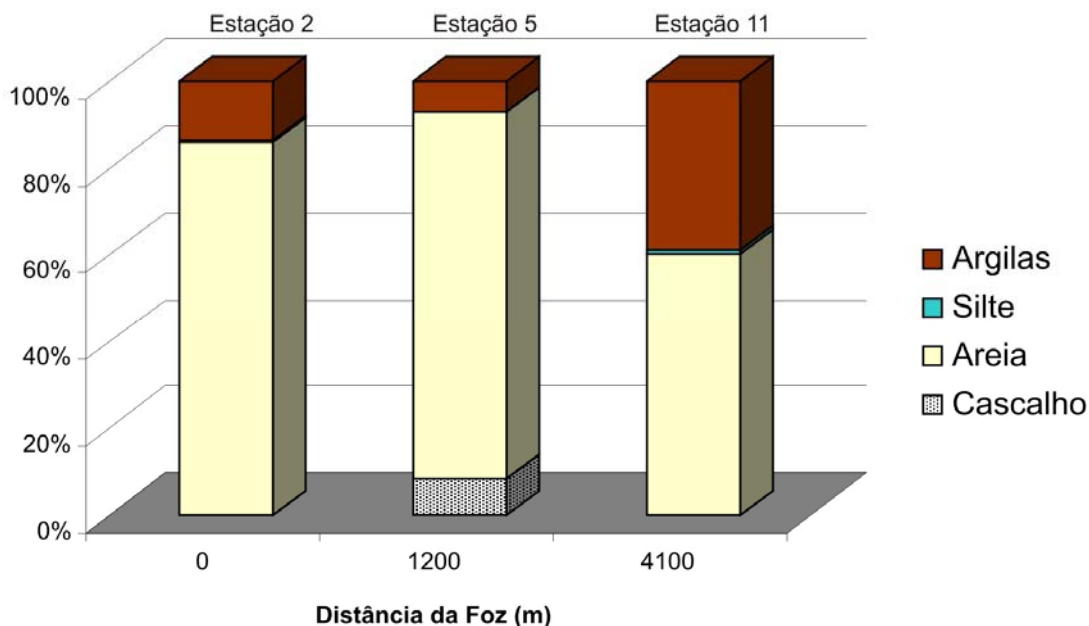


Figura 49: Percentuais das frações granulométricas referentes às amostras de sedimentos de fundo do rio Ubatuba coletadas durante o período de estiagem de 2004.

O aumento da concentração de areia na área da estação 2, durante o período de estiagem, é um indício de que, nessa época do ano, há entrada de sedimentos da deriva litorânea para o interior estuarino. A redução da concentração de biodetritos, nessa mesma seção, corrobora com essa afirmativa à medida que evidencia a redução da capacidade da descarga fluvial em transportar esses fragmentos estuário abaixo.

Nota-se que, durante o período em que ocorrem grandes descargas fluviais, a hidrodinâmica dificulta a deposição de sedimentos finos, fazendo com que estes sejam transportados para fora do sistema estuarino. Diante da redução dos fluxos fluviais, característica da época de estiagem, os processos responsáveis pelo transporte de sedimentos tornam-se mais fracos, facilitando a deposição de silte e argila. Por isso, esses dois últimos componentes sedimentares são mais abundantes durante o segundo semestre do ano.

Tanto no período de chuva quanto no de estiagem, as concentrações de sedimentos finos nas amostras do rio Ubatuba foram maiores do que nas do rio Timonha. Esse fato parece está associado ao efeito do barramento sobre o volume de sedimentos transportados por esse último rio. Para a bacia do rio Timonha a principal fonte de sedimentos finos está relacionada à contribuição do rio da Chapada.

Por ser uma obra recente, ainda não foi constatada necessidade de se realizar dragagens no açude Itaúna, onde fica retida grande parte dos sedimentos que provavelmente

chegariam ao estuário. Desse modo, os reflexos do barramento sobre a geologia da área poderão ser observados mais nitidamente a médio e longo prazo.

Com base nos valores de assimetria, a distribuição longitudinal dos sedimentos do rio Timonha revela valores variando entre muito positiva e muito negativa, tanto para períodos de chuva quanto de estiagem. A assimetria muito positiva está relacionada à presença de sedimentos finos, enquanto que a muito negativa indica a presença de material grosseiro (Mabesoone, 1983). A figura 50 mostra a variação dos valores de assimetria dos sedimentos de fundo coletados ao longo do canal do rio Timonha.

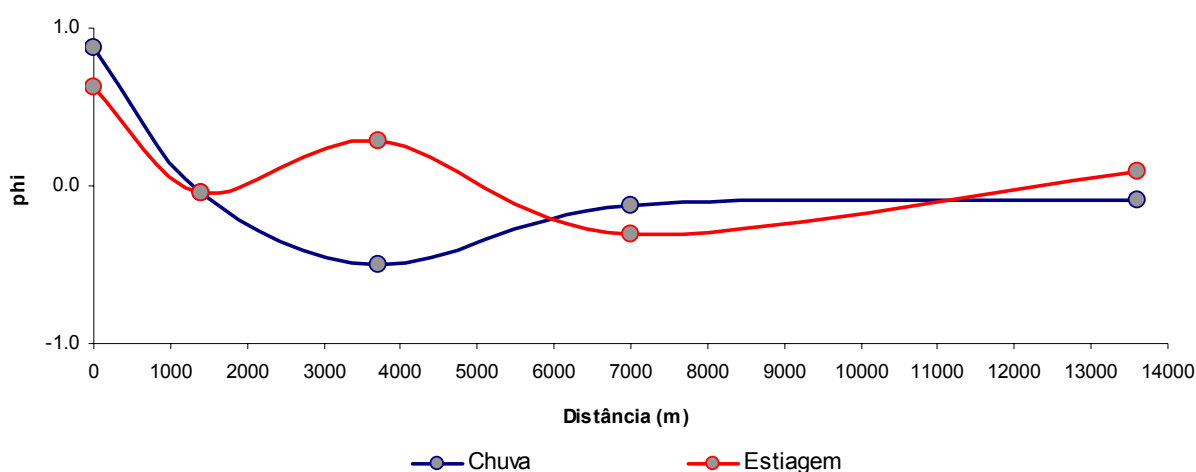


Figura 50: Distribuição longitudinal dos valores de assimetria dos sedimentos de fundo do rio Timonha durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

Observa-se que, durante o período chuvoso, as amostras com assimetria muito positiva ocorrem na região da desembocadura fluvial. Os sedimentos com assimetria muito negativa encontram-se depositados à aproximadamente 4,0 km da desembocadura fluvial. A partir desse ponto, em direção à montante, as partículas sedimentares tornam-se aproximadamente simétricas.

Analisando esse mesmo rio, sob condições de estiagem, nota-se que a distribuição dos valores de assimetria é praticamente a mesma verificada durante o período chuvoso. Entretanto, na estação 14 a assimetria passa de muito negativa (inverno) para positiva (estiagem) evidenciando a deposição de sedimentos finos.

No rio Ubatuba o grau de assimetria dos sedimentos de fundo revelou grande homogeneidade longitudinal durante o período chuvoso (assimetria muito positiva). No entanto, variou de muito positiva a aproximadamente simétrica na época de estiagem (figura 51).



Durante o período chuvoso, na seção localizada na saída do rio Ubatuba, os sedimentos apresentaram assimetria positiva. As amostragens sedimentológicas realizadas nessa mesma área, durante a época de estiagem, evidenciaram a deposição de sedimentos aproximadamente simétricos. Na estação 11 os valores de assimetria passaram de positivo (estação chuvosa) para muito positivo (estação seca).

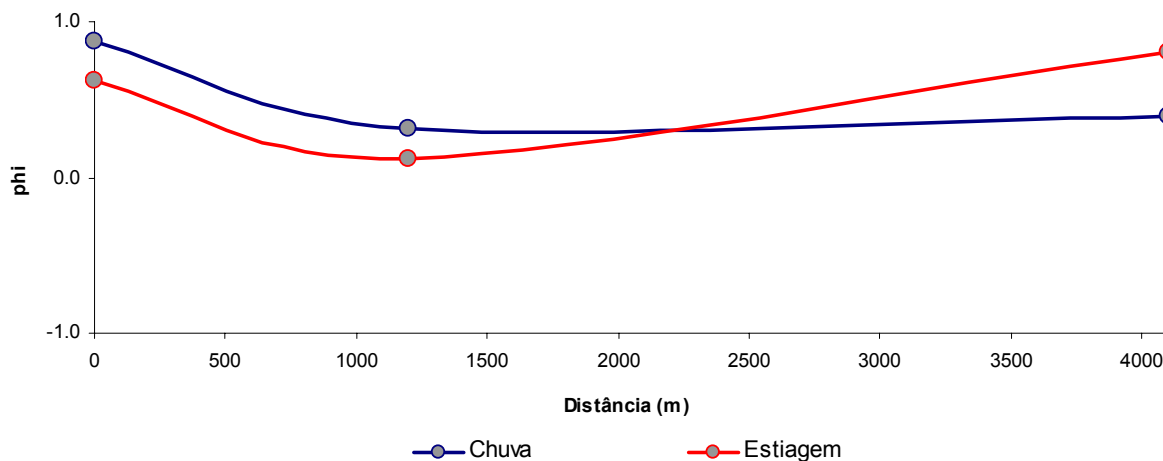


Figura 51: Distribuição longitudinal dos valores de assimetria dos sedimentos de fundo do rio Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

Sob o ponto de vista sedimentológico, valores de curtose muito altos ou muito baixos podem sugerir que o tipo de material analisado foi selecionado em ambiente de alta energia, sendo então transportado, sem mudanças das características, para um outro ambiente onde se misturou com sedimentos selecionados em diferentes condições (Pinheiro, 2003b).

Os valores de curtose das amostras do rio Timonha encontraram-se numa faixa entre platicúrtica e leptocúrtica, durante o período chuvoso, e mesocúrtica e extremamente leptocúrtica durante a estiagem (figura 52).

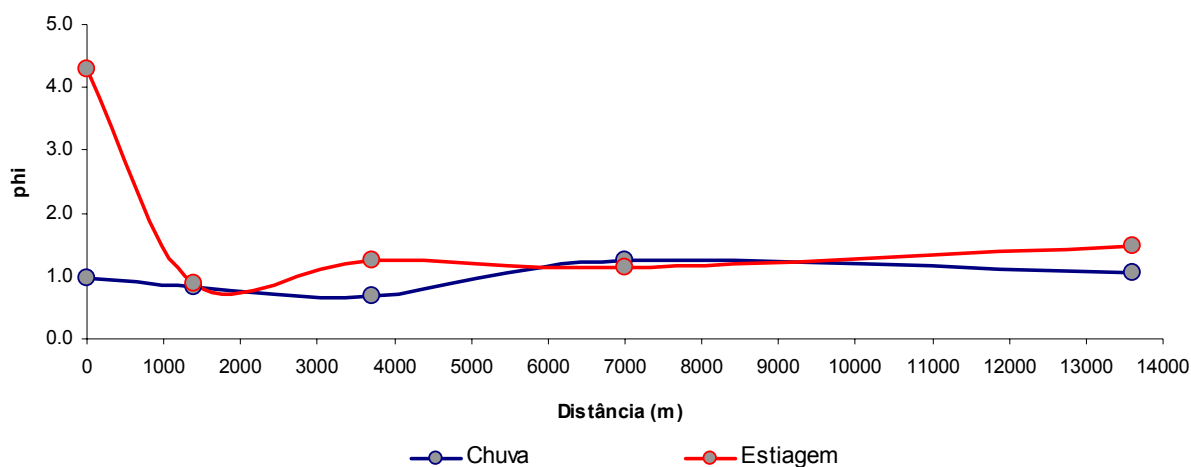


Figura 52: Distribuição longitudinal dos valores de curtose dos sedimentos de fundo do rio Timonha durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

Durante o período de chuva, a área da foz concentra sedimentos classificados como mesocúrticos que durante a estiagem, são substituídos por frações extremamente leptocúrticas. Isso revela que, durante o período seco, os sedimentos que se depositam nessa região foram selecionados em ambiente de alta energia (possivelmente o mar). No entanto, a curtose não parece ser um parâmetro significativo para as amostras de chuva (composta por areias grossas bioclásticas) visto que a granulometria desse material se refere ao tamanho dos indivíduos (moluscos) e não dos grãos propriamente ditos.

Em épocas de chuva, entre as estações 8 e 14 predominam sedimentos platicúrticos, e nas estações 17 e 20, leptocúrticos e mesocúrticos, respectivamente. Durante a estiagem, o canal de saída do rio Timonha é recoberto por sedimentos mesocúrticos. Estuário acima (estações 8, 14, 17 e 20) são observados depósitos de sedimentos leptocúrticos que se estendem até aproximadamente 14 km de distância da foz.

No que se refere ao rio Ubatuba, foram constatados depósitos de sedimentos cuja curtose variou de leptocúrtica a muito leptocúrtica, no semestre chuvoso, e muito platicúrtica a muito leptocúrtica, durante a estiagem (figura 53).

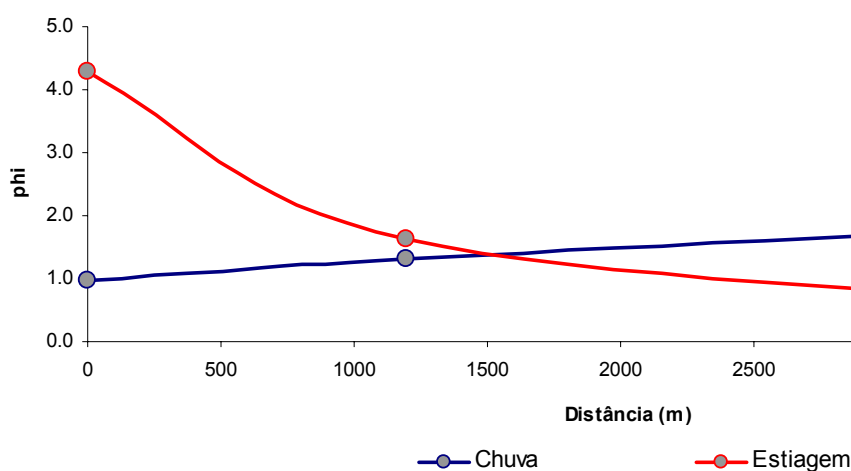


Figura 53: Distribuição longitudinal dos valores de curtose dos sedimentos de fundo do rio Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

Na foz do rio Ubatuba foi observada uma cobertura de fundo composta por sedimentos leptocúrticos, durante o período de chuva, e muito leptocúrticos, durante a estiagem. Na estação 11 a classificação quanto a curtose variou de muito leptocúrtica a muito platicúrtica entre os períodos de chuva e estiagem, respectivamente.

O grau de seleção reflete principalmente as características do meio pelo qual o sedimento chegou à um determinado ambiente. Alguns agentes de transporte têm mais



capacidade de seleção do que outros e, nas áreas onde predomina um determinado tipo de transporte, os sedimentos tendem a ser mais selecionados (amostras mais homogêneas).

Na região de Barra Grande (estação 2), as amostras coletadas durante o período de chuva apresentaram-se muito pobremente selecionadas. A presença de sedimentos moderadamente selecionados durante o período de estiagem, é mais um indício de que essa área recebe sedimentos marinhos nessa época do ano. Ao longo do rio Timonha o grau de seleção variou de bem selecionado a pobremente selecionado, durante o período de chuva, e muito pobremente selecionado a moderadamente selecionado, durante a estiagem (figura 54).

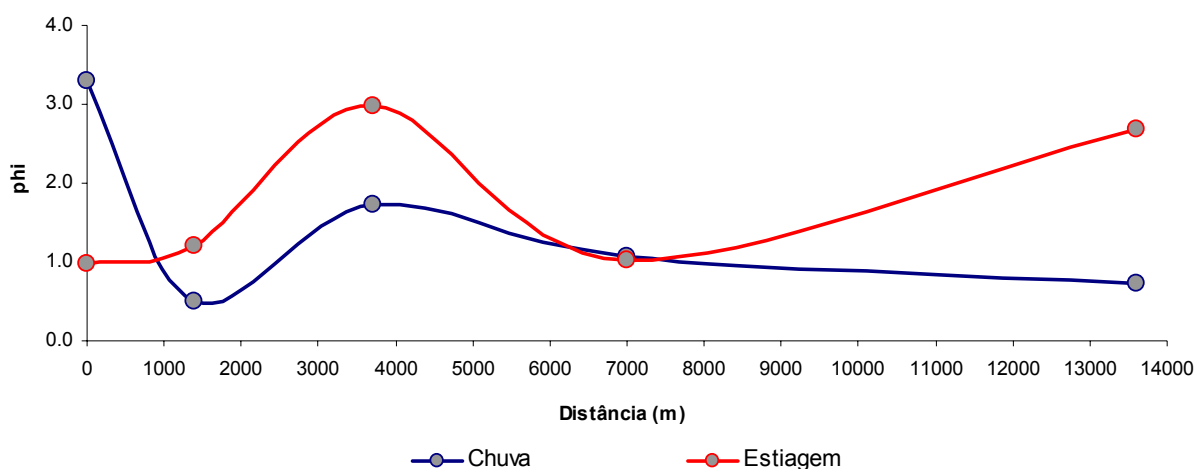


Figura 54: Distribuição longitudinal dos valores do grau de seleção dos sedimentos de fundo do rio Timonha durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

Observa-se que, durante o período chuvoso, os sedimentos bem selecionados se acumulam na área da foz do rio Timonha (a 1,4 km do mar). A partir da região de confluência entre os rios Timonha e da Chapada até as proximidades da Ilha dos Passarinhos (estação 17) a superfície de fundo apresenta-se composta por sedimentos pobremente selecionados. Na região mais próxima da zona do rio, as amostras coletadas durante a época chuvosa foram classificadas como moderadamente selecionadas.

Em períodos de estiagem, os sedimentos de fundo do rio Timonha são preenchidos por fácies muito pobremente selecionadas e pobremente selecionadas que se intercalam ao longo do canal fluvial. Na estação 20 (a 13,6 km de distância da foz estuarina) os depósitos sedimentares moderadamente selecionados que ocorrem durante o semestre chuvoso, são substituídos por sedimentos muito pobremente selecionados.

As amostras sedimentológicas coletadas no rio Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem apresentaram distribuição longitudinal do grau de seleção bastante homogênea.

Em geral as fácies sedimentares desse rio são muito pobremente selecionadas sem variações significativas ao longo do ano (Figura 55).

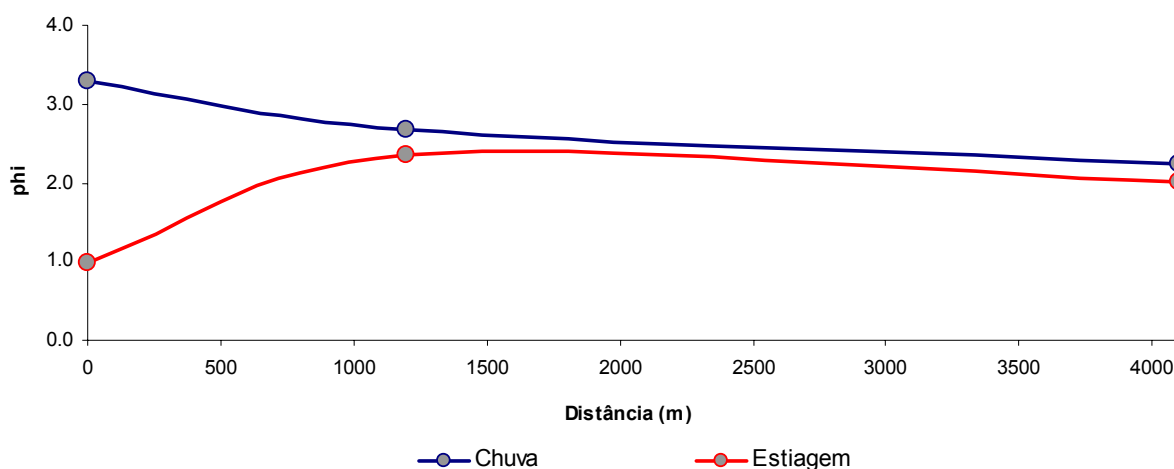


Figura 55: Distribuição longitudinal dos valores do grau de seleção dos sedimentos de fundo do rio Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

A classificação de cada uma das amostras de fundo foi feita a partir do conhecimento das características granulométricas. Para tanto foi utilizado o sistema classificatório elaborado por Folk (1959). A classificação dos sedimentos de fundo do sistema estuarino Timonha / Ubatuba encontra-se na tabela 18.

Tabela 18: Classificação dos sedimentos de fundo do sistema estuarino Timonha / Ubatuba de acordo com Folk (1959).

Estação	Classificação de Folk (1959)	
	Período Chuvoso - 2004	Período de Estiagem - 2004
2	Cascalho arenoso	Areia argilosa
5	Areia lamosa com cascalho	Areia com cascalho esparso
8	Areia com cascalho esparso	Areia com cascalho esparso
11	Areia lamosa com cascalho esparso	Areia lamosa com cascalho esparso
14	Areia com cascalho	Areia lamosa com cascalho
17	Areia com cascalho esparso	Areia com cascalho esparso
20	Areia com cascalho esparso	Areia lamosa com cascalho

Para análise das fácies sedimentares do sistema estuarino Timonha / Ubatuba, também foram avaliadas as características dos depósitos acumulados nas margens e na porção norte da Ilha Grande. No entanto essas amostragens ficaram restritas ao período de estiagem, época em que a deposição de sedimentos é mais expressiva.

Os resultados demonstram que as margens são recobertas predominantemente por areias muito finas. Em Pontal das Almas, na área próxima ao cordão arenoso, observam-se sedimentos bem selecionados, leptocúrticos e com assimetria negativa. Esses parâmetros indicam que o mar é a origem mais provável dessas areias. Na porção interna da margem leste os depósitos são representados por sedimentos muito bem selecionados, muito platicúrticos e com assimetria muito positiva. A deposição ocorre principalmente em função da redução da energia do meio, sendo favorecida pela morfologia.

Na margem correspondente a Cajueiro da Praia as areias muito finas também são predominantes. Em geral a cobertura sedimentar é composta por sedimentos pobremente selecionados, leptocúrticos e com assimetria positiva. Na parte interna da margem oeste, acompanhando o curso fluvial do rio Ubatuba, existe um extenso depósito de biodetritos que ocorrem misturados ao material lamosos.

A porção norte da Ilha Grande é constituída por areias finas pobremente selecionadas, mesocúrticas e com assimetria muito negativa. Nessa área também existem grandes depósitos de biodetritos.

Os resultados indicam que, durante a estiagem, há entrada de sedimentos marinhos trazidos pelas correntes de deriva litorânea para o interior estuarino. Entretanto, esse processo é bastante discreto, ocorrendo principalmente na região de Barra Grande. Nos canais dos rios Timonha e Ubatuba os processos de sedimentação são ditados pela hidrodinâmica. Os sedimentos depositados ao longo do canal do rio Timonha parecem ser oriundos das sub-bacias diretamente ligadas à sub-bacia litorânea. Esse fenômeno pode ser considerado uma evidência de que, grande parte da carga proveniente das sub-bacias localizadas à montante do açude Itaúna, realmente fique retida nessa represa, gerando déficit no balanço de sedimentos do rio Timonha.

### **6.8.2. Transporte de Sedimentos**

Os mecanismos que governam a circulação de sedimentos em sistemas estuarinos são subordinados, sobretudo, às oscilações da maré. De um modo geral, durante as fases de enchente e vazante ocorre erosão do leito e, durante a baixa-mar e preamar, deposição de partículas suspensas. A concentração de sedimentos na coluna d'água é um importante controlador dos processos de deposição. Em suspensões muito concentradas, os flocos encontram-se tão próximos que o fluido é forçado a escoar para cima, diminuindo a

velocidade de queda. Assim, os sedimentos erodidos durante a enchente e/ou vazante podem permanecer em suspensão por muito tempo (Pinheiro, 2003a).

As concentrações de sólidos suspensos totais (SST) do sistema estuarino Timonha / Ubatuba determinadas para um ciclo completo de maré de sizígia, durante os períodos de chuva e de estiagem, encontram-se na tabela 19.

Tabela 19: Variação sazonal das concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg l}^{-1}$ ) no sistema estuarino Timonha / Ubatuba (2004).

Estação	Período Chuvoso				Período de Estiagem			
	Baixa-mar	Enchente	Preamar	Vazante	Baixa-mar	Enchente	Preamar	Vazante
1	-	-	-	21.2	17.8	-	-	72.2
2	-	-	-	48.0	48.0	-	-	69.6
3	-	-	-	9.4	27.4	-	-	47.2
4*	22.8	6.4	8.0	62.0	45.8	44.6	31.6	52.6
5*	7.0	5.2	8.0	12.2	26.6	27.0	28.2	62.4
6*	5.6	2.0	20.2	17.6	39.4	53.0	67.4	61.4
7	11.0	29.4	48.2	112.4	13.8	57.2	57.2	25.6
8	8.4	24.4	23.8	48.4	16.8	119.2	35.4	40.8
9	10.4	28.2	36.4	99.4	14.6	43.2	41.2	48.4
10*	7.6	8.4	-	46.0	25.4	25.8	24.6	21.4
11*	18.8	7.2	-	0.8	7.4	16.0	24.8	14.6
12*	12.4	12.0	-	16.2	10.8	23.4	18.2	17.6
13	13.0	37.4	20.8	44.8	24.6	66.6	35.8	27.8
14	5.4	12.8	13.4	21.6	6.0	38.0	22.2	10.4
15	14.0	29.8	44.2	132.4	9.0	35.4	22.4	8.4
16	10.6	9.0	18.6	96.2	15.4	38.8	17.6	8.0
17	3.2	7.0	10.4	52.0	5.2	52.2	13.8	16.2
18	3.4	16.6	3.4	112.4	12.0	35.4	19.2	5.4
19	-	11.6	17.0	11.6	4.0	8.2	9.6	7.4
20	-	8.2	22.0	17.0	5.8	10.0	6.2	8.2
21	-	7.8	20.0	19.2	6.0	10.0	5.8	6.8
<b>Média</b>	10.2	14.6	21.0	47.7	18.2	39.1	26.7	30.1
<b>Máxima</b>	22.8	37.4	48.2	132.4	48.0	119.2	67.4	72.2
<b>Mínima</b>	3.2	2.0	3.4	0.8	4.0	8.2	5.8	5.4
<b>Desvio Padrão</b>	5.5	10.4	13.0	40.0	13.2	26.2	16.4	23.2

(-) Dados não coletados. / \* Estações referentes ao rio Ubatuba.

Durante o período chuvoso, a concentração média de SST no sistema estuarino foi de  $23,4 \text{ mg l}^{-1}$ . Em geral, os maiores valores ocorreram durante a vazante da maré (média de  $47,7 \text{ mg l}^{-1}$ ) e os menores durante a baixa-mar (média de  $10,2 \text{ mg l}^{-1}$ ). No rio Timonha, a concentração média de SST foi de  $28,3 \text{ mg l}^{-1}$ , com as maiores verificadas na área sob influência direta do rio da Chapada (estação 15). Durante a vazante da maré esse ponto apresentou  $132,4 \text{ mg l}^{-1}$  de SST que se reduziram a  $14,0 \text{ mg l}^{-1}$  na baixa-mar. O maior volume

de sedimentos em suspensão no rio Ubatuba foi verificado na estação 4 (saída do rio Ubatuba) durante a vazante da maré ( $62,0 \text{ mg l}^{-1}$ ). Nesse mesmo ponto, na preamar, a concentração de SST foi de  $8,0 \text{ mg l}^{-1}$ . A média calculada para o rio Ubatuba, referente ao período chuvoso, foi de  $15,0 \text{ mg l}^{-1}$ , ou seja, 47% menor que a do rio Timonha. No entanto, apesar do rio Timonha apresentar maiores concentrações de SST, o rio Ubatuba teve maior capacidade de exportação (transporte de enchente de  $6,2 \text{ g s}^{-1}$  e de vazante  $40,0 \text{ g s}^{-1}$ ).

A figura 56 evidencia a predominância das descargas sólidas de vazante sobre as de enchente verificadas durante o período de chuvas. Nota-se que, apesar das taxas de transporte do rio Timonha serem mais fortes, as diferenças entre as descargas de enchente e vazante do rio Ubatuba são mais acentuadas o que gera uma descarga final maior.

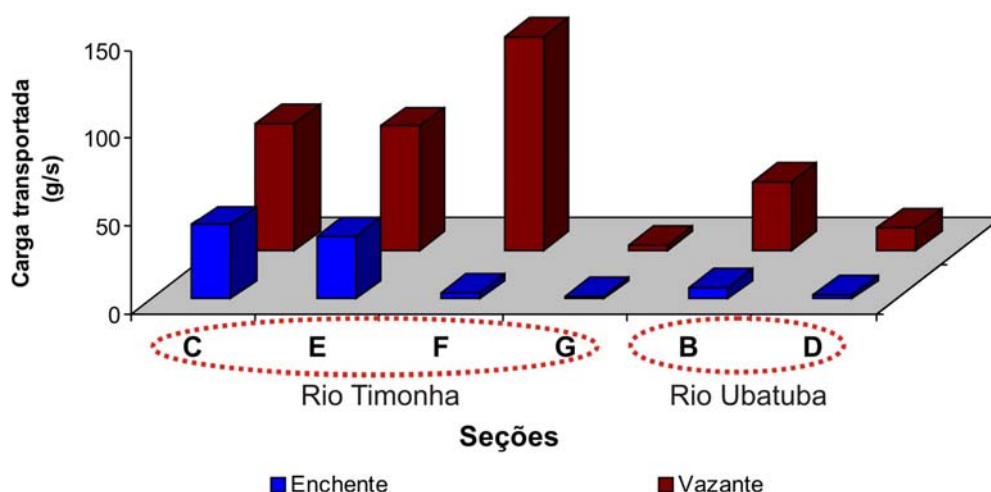


Figura 56: Descarga de sólidos suspensos totais do complexo estuarino Timonha / Ubatuba referente ao período chuvoso de 2004.

Durante o primeiro semestre do ano, a descarga de SST do rio Ubatuba representa a maior parte dos sedimentos exportados pelo sistema estuarino. Considerando o balanço entre as fases de enchente e vazante, referentes ao período em que foram realizados os experimentos de chuva (fevereiro / 2004), verifica-se que esse rio lança para região de Barra Grande, ao final de um ciclo completo de maré, o volume correspondente a 370 kg de SST, enquanto que o rio Timonha responde por 336 kg desse material.

No período de estiagem, observa-se que o sistema apresenta tendência à importação de sedimentos em suspensão. O maior valor médio, calculado por fase de maré, foi de  $39,1 \text{ mg l}^{-1}$ , durante a enchente, e o menor de  $18,2 \text{ mg l}^{-1}$ , verificado na baixa-mar. A concentração média de SST do sistema estuarino correspondeu a  $28,5 \text{ mg l}^{-1}$ , aproximadamente 18% maior

do que a referente ao período chuvoso. Inversamente ao que ocorre em épocas de chuva, sob condições de estiagem, o rio Ubatuba apresentou concentração média de SST 30% acima da obtida para o rio Timonha. Os maiores valores de SST foram observado nas estações 6 (saída do rio Ubatuba) e 8 (saída do rio Timonha) em resposta a turbulência gerada pela subida da maré. A média ao longo do ciclo de maré para essas estações foi de  $55,3 \text{ mg l}^{-1}$  (estação 6) e  $53,1 \text{ mg l}^{-1}$  (estação 8).

Observa-se que durante a estiagem o transporte de sedimentos de enchente é superior ao de vazante em todas as seções. No entanto, a figura 57 deixa claro que o balanço entre entrada (enchente) e saída (vazante) na foz do rio Ubatuba é praticamente zero (resíduo de  $0,36 \text{ g s}^{-1}$  importados). Os efeitos da penetração de SST de origem marinha são mais fortes sobre as seções C, E, F, localizadas no rio Timonha a 1,4 km, 3,7 km e 7,0 km de distância do mar, respectivamente.

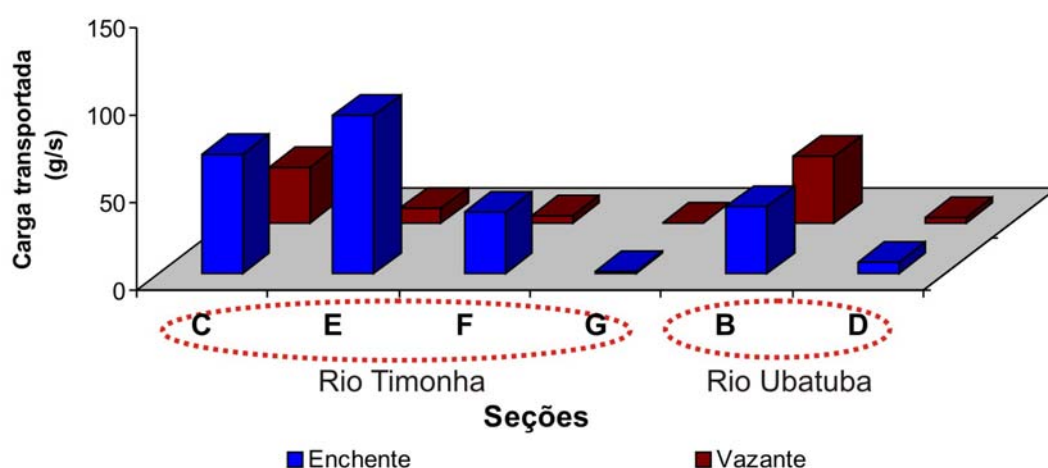


Figura 57: Descarga de sólidos suspensos totais do complexo estuarino Timonha / Ubatuba referente ao período de estiagem de 2004.

A análise dos dados relacionados ao período de estiagem revela que, ao final de um ciclo completo de maré, o rio Timonha retém 404 kg de SST e o rio Ubatuba apenas 4 kg. A maré enchente lança aproximadamente 757 kg de sólidos em suspensão no canal do rio Timonha sendo 353 kg exportados durante a vazante. O transporte verificado no rio Ubatuba, sobre as mesmas condições, foi de 428 kg de SST carregados estuário acima pela maré enchente e 424 kg estuário abaixo pela vazante. Isso indica que o efeito da importação de sedimentos em suspensão é mais forte sobre o canal do rio Timonha. No entanto, com base na análise das frações sedimentadas (discutidas no sub-tópico anterior), observa-se que esses materiais não encontram condições favoráveis à deposição na área localizada na saída do rio

Timonha. Em geral, os SST penetram por esse canal depositando-se gradativamente à medida que se afastam da região geradora de turbulência. Isso pode ser comprovado pela redução das concentrações médias de SST durante a enchente da maré conforme aumenta a distância em relação ao mar.

Outro aspecto importante é a drástica redução das descargas sólidas dos rios afluentes verificada durante a estiagem. Os valores discriminados por estação demonstram que as principais entradas de sedimentos em suspensão para o rio Timonha são representadas pelos rios da Chapada e das Almas. A concentração de SST na região sobre influência do rio da Chapada (estação 15) sofreu uma redução de 94% entre os períodos de chuva e de estiagem. Já na área representativa das descargas sólidas do rio das Almas essa redução foi de aproximadamente 51%.

Uma outra fonte provável de SST parece está relacionada aos processos erosivos associados à ação da descarga fluvial sobre as margens da Ilha dos Passarinhos (seção F). Próximo a essa área, durante a vazante da maré do período chuvoso, são observados valores de 112,4 mg l<sup>-1</sup> enquanto que na preamar e baixa-mar (fases em que predomina a deposição) essa concentração se reduz a 3,4 mg l<sup>-1</sup>.

Durante todo o ano as menores concentrações de SST são observadas na baixa-mar. Em épocas de chuva, a redução do volume de materiais em suspensão nesse estágio da maré, parece está vinculada à pequena contribuição das descargas provenientes da bacia de drenagem. Em contrapartida, na estiagem, a baixa concentração de SST é um reflexo também da deposição desses sedimentos ao longo dos canais estuarinos.

Considerando que o comportamento de poluentes na fase particulada está associado ao transporte de sedimentos finos, nota-se que o sistema estuarino é pouco vulnerável ao despejo de efluentes. No entanto, durante o período de estiagem, algumas áreas do rio Timonha apresentam forte tendência ao acúmulo de sedimentos, o que pode significar retenção de poluentes no interior estuarino até o início do semestre chuvoso.

A avaliação do balanço de sedimentos em suspensão no sistema estuarino foi feita com base nas taxas de transporte durante as fases de enchente e vazante da maré. Os resultados, obtidos para cada seção transversal aos rios Timonha e Ubatuba estão demonstrados na figura 58.

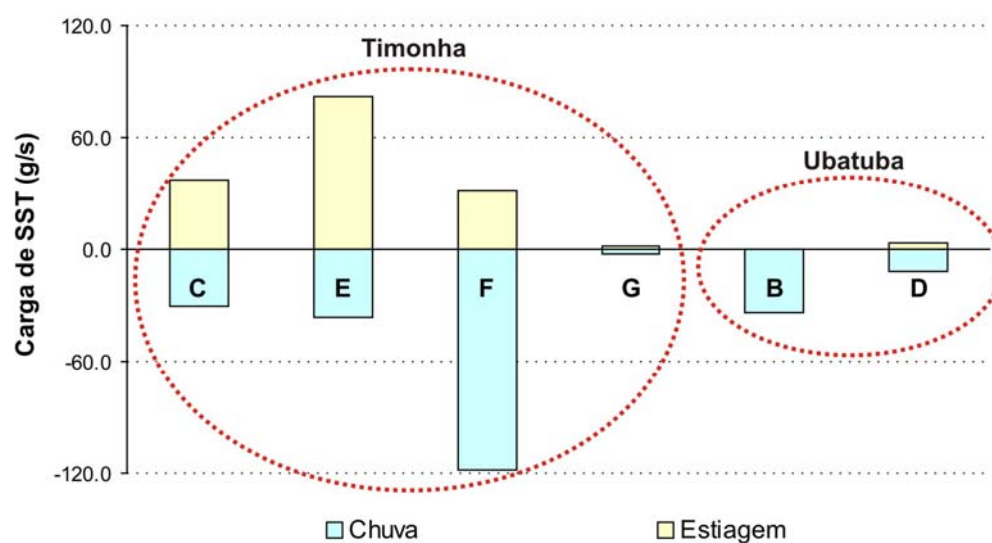


Figura 58: Balanço entre as descargas de enchente e vazante do sistema estuarino Timonha e Ubatuba durante os períodos de chuva e de estiagem de 2004.

Nota-se que, no canal do rio Timonha, a 13,6 km de distância do mar o transporte de SST é praticamente nulo. Pode-se dizer, com base nos resultados acima, que a ausência de materiais em suspensão é um reflexo da retenção desses sólidos na represa Itaúna. A vazão fluvial de  $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (período chuvoso) parece não ser capaz de solubilizar camadas de solo e rochas fazendo com que a contribuição do rio Timonha para a sedimentação estuarina seja muito pequena. A evolução sedimentológica dessa porção da planície fluvio-marinha está subordinada, sobretudo a descarga dos rios da Chapada e das Almas.

A estimativa da contribuição total do sistema para o balanço sedimentar da zona costeira, elaborada para o ano de 2004, baseou-se na soma entre as descargas de materiais em suspensão provenientes dos rios Timonha e Ubatuba. Para tanto, as taxas de descarga de fevereiro foram consideradas representativas para todo o período chuvoso e as de novembro para o de estiagem.

Os resultados indicam que, durante o semestre chuvoso os rios Timonha e Ubatuba exportam aproximadamente 250 t de SST enquanto que, no período de estiagem, importam 150 t, ou seja, 58% do volume exportado durante o primeiro semestre do ano. Isso demonstra que a descarga de SST do sistema estuarino Timonha / Ubatuba para a zona costeira adjacente, ao final de um ano, corresponde a aproximadamente 100 t.



### 6.9. Capacidade de Diluição e suas Implicações Ambientais

O comportamento do prisma de maré é um dos aspectos mais importantes a ser analisado, quando se pretende avaliar a capacidade de suporte de um sistema estuarino ao lançamento de efluentes. Os processos que ocorrem vinculados à incursão da maré no canal estuarino, além de determinar o transporte de materiais, também desencadeiam alterações de natureza biogeoquímica nas substâncias dissolvidas que, por sua vez, refletem-se sobre a saúde ambiental do ecossistema.

Outro fator determinante está relacionado às descargas de água doce de origem fluvial. Nesse caso, foram avaliadas as frações de água doce presentes entre as seções de monitoramento e o mar, assim como o tempo associado à retenção dessas massas d'água no interior do sistema estuarino. Vale salientar que a descarga de água doce representa um dos principais meios pelos quais substâncias naturais e/ou tóxicas aportam em ambientes estuarinos e o tempo de residência é um dos indicadores de fragilidade mais adequados à análise da vulnerabilidade de estuários.

Para atender aos objetivos dessa pesquisa a capacidade de diluição foi estimada considerando-se as características do sistema, em ciclos completos de sizígia correspondentes aos períodos de chuva e de estiagem. A análise comparativa entre os rios Timonha e Ubatuba tornou possível a determinação das áreas críticas em se tratando da emissão de poluentes.

O volume relacionado ao prisma de maré ao longo do canal do rio Timonha, foi de aproximadamente  $3,6 \times 10^7 \text{ m}^3$ , enquanto que no rio Ubatuba correspondeu a  $4,3 \times 10^7 \text{ m}^3$ . Esses resultados demonstram que os efeitos da oscilação a maré são mais fortes sobre o canal estuarino do rio Ubatuba.

A análise relativa ao período chuvoso demonstra que a capacidade de renovação das águas do rio Ubatuba corresponde ao dobro da apresentada pelo rio Timonha. Considerando que o sistema se comporta de maneira linear com tempo de residência diminuindo uniformemente em direção ao mar, o período necessário para renovação das águas do estuário do rio Timonha seria de aproximadamente 1 dia enquanto que no rio Ubatuba seria de apenas 0,5 dia.

Durante a estiagem o tempo residência do sistema estuarino aumenta (em média 3,5 dias) tornando-o mais susceptível ao acúmulo de substâncias em seu interior. Mesmo sob essas circunstâncias, o sistema estuarino em questão apresenta alta capacidade de diluição se comparado com a maioria dos estuários de regiões tropicais. No rio Timonha a água doce lançada no início da área estuarina durante a estiagem demora aproximadamente 5 dias para

aportar na zona costeira adjacente enquanto que, no rio Ubatuba, esse tempo é de apenas 2 dias.

Observa-se que o efeito da descarga fluvial exerce papel fundamental sobre o tempo de residência do sistema estuarino. Entre os rios Timonha e Ubatuba, as diferenças relacionadas ao tempo de retenção da massa d'água doce é determinada também pela morfologia dos canais. Nesse caso, a configuração do canal do rio Ubatuba parece ser mais propícia à penetração da massa d'água marinha, contribuindo para o aumento da capacidade de depuração desse estuário.

O volume de água doce retido na zona de mistura, ao final de um ciclo de maré, durante o período chuvoso, foi de  $8,7 \times 10^6 \text{ m}^3$  no rio Timonha e  $5,2 \times 10^6 \text{ m}^3$  no rio Ubatuba. Na estiagem, quando o balanço hídrico foi negativo, a renovação das águas estuarinas foi determinada apenas pelas oscilações vinculadas à penetração do prisma de maré.

Considerando o tempo de residência calculado para cada segmento dos canais estuarinos dos rios Timonha e Ubatuba observa-se que o modelo linear não é o mais representativo para análise da capacidade de diluição do sistema (figuras 59 e 61).

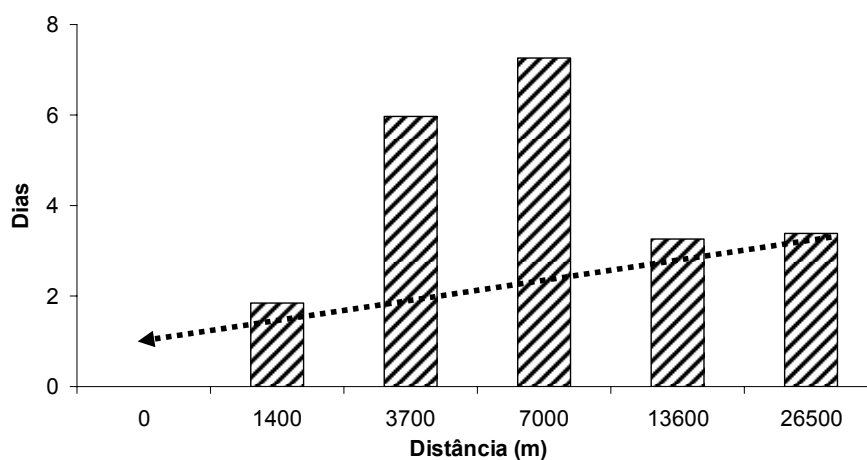


Figura 59: Tempo de residência acumulado determinado para cada segmento do canal do rio Timonha referente ao período de chuvoso.

A variação longitudinal dos tempos de residência demonstra que o padrão de descarga ao longo do canal estuarino do rio Timonha não é linear. A 26,5 km de distância da foz estimou-se que a massa de água doce levaria 3,5 dias para se renovar. No entanto, na área situada entre 3,7 km e 7,0 km de distância do mar o rio assumiu forte tendência à retenção de água chegando a um tempo de residência equivalente a quase uma semana. Nesse sentido,

destaca-se que a morfologia do canal do rio Timonha contribui para o acúmulo de água no interior estuarino e assim, para o aumento do tempo de residência (figura 60).

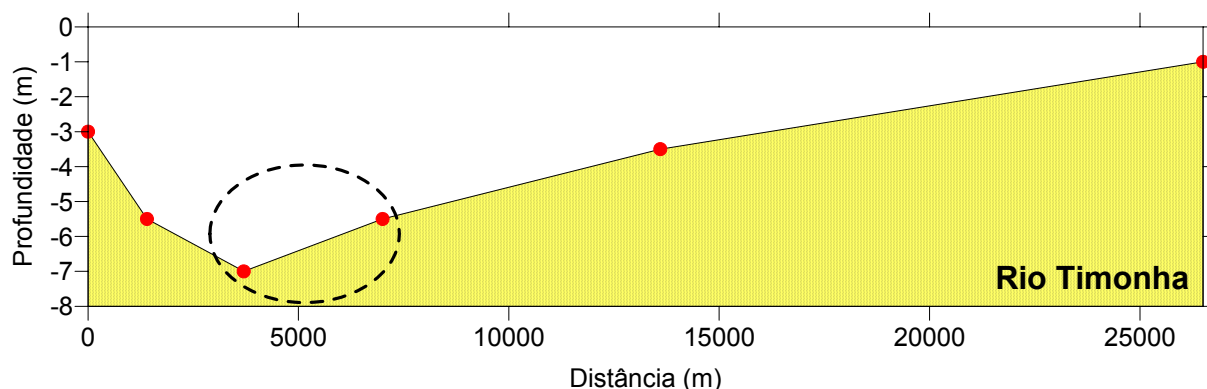


Figura 60: Perfil morfológico longitudinal do canal estuarino do rio Timonha com estaque para a área com maior tempo de residência.

No rio Ubatuba, em contraposição ao que ocorre no rio Timonha, o tempo de residência decresce estuário abaixo. Durante o período chuvoso o tempo médio necessário para renovação das águas desse estuário foi de 1,5 dias com máximo ocorrendo na área a 4,0 km de distância da foz (figura 61).

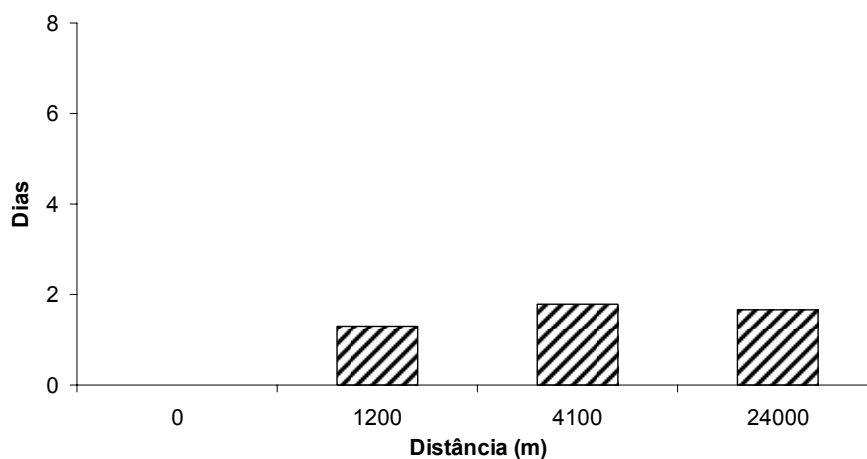


Figura 61: Tempo de residência acumulativo determinado para cada segmento do canal do rio Ubatuba referente ao período de chuvoso.

De um modo geral o sistema estuarino Timonha / Ubatuba apresenta grande capacidade de renovação de suas águas. No entanto, durante o período de estiagem, o tempo de residência sofre um acréscimo possivelmente associado à ausência de descarga fluvial. Comparando os dois principais rios do sistema estuarino observa-se que no rio Timonha a

renovação das águas é mais lenta que no rio Ubatuba o que torna esse último menos susceptível ao acúmulo de poluentes e processos de eutrofização.

Nota-se que o modelo segmentado de determinação do tempo de residência é o mais adequado à análise da capacidade de suporte do sistema. No entanto, diante da ausência de descargas fluviais, a aplicação desse método tornou-se inviável em se tratando das estimativas referentes ao período de estiagem.

## 7. CONCLUSÕES

A contextualização hidroclimática evidenciou que o sistema estuarino Timonha / Ubatuba é controlado por um regime irregular de chuvas concentradas nos primeiros seis meses do ano. As altas taxas de evaporação as quais a área está submetida também contribuem para manutenção de uma forte tendência ao déficit hídrico. A rede de postos pluviométricos dispostos ao longo da bacia de drenagem demonstrou que a maior parte da chuva incidente sobre a bacia estuarina concentra-se nas sub-bacias onde se localizam as nascentes, na área estuarina o volume de chuvas é 39% menor do que o verificado nas serras. Do ponto de vista pluviométrico constatou-se que o ano de 2004 foi atípico. As médias históricas demonstram que a precipitação pluviométrica anual incidente sobre a bacia estuarina é de 917 mm. No entanto, em 2004, o total precipitado foi de 1.390 mm o que representou um aumento de 52% em relação a média histórica de chuvas para região.

A avaliação das características hidrológicas mostra um sistema bastante marcado pelos efeitos da sazonalidade hidroclimática. Praticamente toda a água doce que chega ao sistema estuarino no decorrer de um ano, escoa durante o primeiro semestre. O deflúvio, correspondente a aproximadamente 37% durante o período chuvoso, se reduz a praticamente zero durante a estiagem.

Se mantidas as médias históricas o rio Timonha seria responsável por aproximadamente 50% da água que efetivamente abasteceria o sistema. No entanto, diante da construção do açude Itaúna, constatou-se uma redução de 83% na capacidade de descarga fluvial desse rio. Com base nos dados de 2004 nota-se que o sistema recebeu aproximadamente  $8,3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , sendo que 96,0% desse total correspondem às descargas fluviais ocorridas durante os seis meses da época chuvosa. Nesse caso, o volume escoado pelo rio Timonha foi de apenas 33% da descarga efetiva calculada para 2004.

A construção do açude Itaúna, apesar de ter reduzido significativamente a descarga fluvial da bacia de drenagem, garantiu o aporte de água doce para a bacia litorânea durante todo o ano, diminuindo assim os efeitos da sazonalidade do regime hídrico da região.

No rio Timonha a zona do rio foi delimitada à aproximadamente 26 km de distância da foz enquanto que no rio Ubatuba essa mesma zona foi estabelecida a 24 km do mesmo referencial. No período chuvoso, o sistema como um todo apresentou grande poder de diluição, empurrando a zona de mistura para fora dos domínios geomorfológicos do estuário.

A morfologia de fundo do canal estuarino do rio Timonha constitui-se numa barreira à excursão da maré. Durante o período de estiagem esse sistema retém grande quantidade de

água passando a apresentar características de hipersalinização. Em contrapartida, no rio Ubatuba a interação entre as massas d'água marinha e fluvial é favorecida pela ocorrência de canais bastante profundos.

A contribuição dos rios afluentes ao sistema estuarino parece exercer pouca influência sobre a distribuição da salinidade. Somente a área sobre influência do rio das Almas demonstra uma ligeira variação da salinidade possivelmente associada à descarga fluvial desse rio.

Quanto à estratificação de salinidade (classificação de Pritchard, 1955) os rios Timonha e Ubatuba formam um sistema estuarino do tipo bem misturado e lateralmente homogêneo. No entanto, durante o período chuvoso, algumas áreas apresentaram características de transição para outros tipos de estratificação salina.

Durante o período chuvoso as variações verticais da condutividade foram mais fortes do que aquelas observadas durante a estiagem. Nesse último período os efeitos da diluição sobre as variações da condutividade são praticamente desprezíveis. Em geral a distribuição horizontal da condutividade evidencia processos de diluição e/ou concentração de íons dissolvidos semelhantes ocorrendo nos rios Timonha e Ubatuba.

A estrutura vertical da coluna d'água do rio Timonha demonstra que, mesmo durante o semestre chuvoso, não há uma termocline definida. As principais variações térmicas ao longo da coluna d'água estão associadas a penetração do primas de maré. Não foram observadas variações significativas entre o comportamento térmico do rio Timonha e Ubatuba que, de um modo geral, é controlado pela severidade das características climáticas da área.

O balanço de sal demonstra uma inversão de salinidade ditada pela sazonalidade hidroclimática. Durante o período chuvoso, em ambos os rios, foi constatada uma redução das frações de sal no sentido estuário acima. Em contrapartida, durante a estiagem, o rio Timonha apresentou comportamento inverso, com salinidade aumentando com a distância em relação ao mar.

Durante o período chuvoso, ao final de um ciclo de maré, o rio Timonha exporta aproximadamente 0,24 t de sal enquanto que no rio Ubatuba essa taxa é de apenas 0,6 t. Sob condições de estiagem o rio Timonha importa cerca de 0,3 t de sal e o rio Ubatuba exporta 0,2 t ao final de um ciclo de maré.

O sistema de correntes do estuário dos rios Timonha e Ubatuba apresentou variações de direção e intensidade vinculadas, sobretudo às oscilações da maré. No entanto, fatores com a morfologia de fundo e a descarga fluvial também se mostraram determinantes, sendo este último incisivo apenas durante o período chuvoso.

As correntes foram mais intensas na área da desembocadura estuarina especialmente durante o período chuvoso. Nota-se que, enquanto a variação da intensidade média dos fluxos entre os períodos de chuva e de estiagem foi de 38% no rio Ubatuba, no rio Timonha foi de apenas 30%. Isso comprova o efeito do açude sob o controle das vazões de cheia e redução da força das correntes relacionadas à descarga fluvial.

Durante o período de estiagem as correntes de vazante reproduziram o recuo do prisma de maré, apresentando velocidades 42 % menores do que as de enchente. O transporte líquido durante o período de estiagem pode então, ser considerado negativo, caracterizando o sistema como importador.

Não existem diferenças entre as marés de Barra Grande e do Porto de Luís Correia. Durante os experimentos referentes ao período chuvoso, no entanto, observou-se que o nível da água no sistema estuarino permaneceu acima do nível médio da maré em Luís Correia durante todo o ciclo em virtude do aumento do volume estuarino. Na época de chuvas não foi observado retardo da maré em relação do Porto de Luís Correia enquanto que na estiagem houve um atraso de aproximadamente 50 min. A amplitude de maré verificada na área foi de aproximadamente 3,0 m e o período de 12 hs representando valores médios anuais.

Em virtude das dimensões físicas do sistema estuarino Timonha / Ubatuba o vento parece exercer pouca influência sobre os processos hidrodinâmicos. No entanto, durante o período de estiagem, demonstram capacidade de gerar ondas de superfície na região de Barra Grande, contribuindo para a mistura estuarina nessa área.

Os estudos de anemometria revelaram uma forte sazonalidade no regime de ventos. Durante o período chuvoso a velocidade média observada foi de  $5,2 \text{ m s}^{-1}$  sofrendo um aumento de 54% durante o período de estiagem (média de  $8,0 \text{ m s}^{-1}$ ). A direção preferencial durante o semestre chuvoso foi E-NE orientando-se para N-NE durante o período de estiagem.

De acordo com a classificação obtida através do diagrama de estratificação x circulação de Hansen & Rattray (1966), durante o período chuvoso o sistema comporta-se como o tipo 2 (parcialmente misturado) com áreas apresentando estratificação vertical e outras não. Os resultados dos experimentos de estiagem entretanto, evidenciaram que nesse período, o estuário assume características do tipo 1 (bem misturado) sem estratificação vertical em nenhuma estação.

Com base na classificação geomorfológica elaborada por Pritchard (1952) e Fairbridge (1980), o sistema estuarino Timonha / Ubatuba é classificado como um estuário construído por barra.

A morfologia do sistema estuarino Timonha / Ubatuba é bastante complexa, principalmente na região da desembocadura, onde existem extensos bancos arenosos e canais bastante profundos. A disposição desses bancos coloca-se como um obstáculo à navegação principalmente em períodos de baixa descarga fluvial quando a deposição de sedimentos é favorecida.

No início da área estuarina, os rios Timonha e Ubatuba apresentam variações topográficas suaves com canais estreitos (largura média de 250 m) e profundidade média de 3,0 m. À medida que se aproximam do mar, as variações batimétricas tornam-se mais fortes e o talvegue mais profundo chegando a profundidade máxima de 24m.

As descargas fluviais têm demonstrado grande eficiência em manter a configuração morfológica da foz, evitando seu barramento e migração lateral. No entanto, essa situação pode ser alterada como consequência da redução dos fluxos fluviais do rio Timonha. Por se tratar de uma obra recente (2001), os impactos do açude Itaúna ainda não se refletiram sobre o delineamento geomorfológico do sistema estuarino Timonha / Ubatuba, entretanto, são nitidamente perceptíveis sobre a disposição das feições texturais sedimentológicas.

As margens do sistema estuarino são recobertas por areias muito finas. Durante a estiagem, o estuário atuou como sumidouro de sedimentos. Ao longo dos canais dos rios principais a sedimentação mostrou-se controlada, sobretudo pela hidrodinâmica. Os sedimentos depositados ao longo do canal do rio Timonha parecem ser oriundos das sub-bacias diretamente ligadas à sub-bacia litorânea. Esse fenômeno pode ser considerado uma evidência de que, grande parte da carga proveniente das sub-bacias localizadas à montante do açude Itaúna, realmente fique retida nessa represa, gerando déficit no balanço de sedimentos do rio Timonha.

Durante todo o ano a superfície de fundo do rio Timonha é constituída primordialmente por areias ricas em biodetritos. No entanto, no segundo semestre são encontradas maiores quantidades de sedimentos finos. No Rio Ubatuba também predominam sedimentos arenosos sendo que as partículas finas são mais abundantes. Tanto no período de chuva quanto no de estiagem, as concentrações de sedimentos finos nas amostras do rio Ubatuba foram maiores do que nas do rio Timonha. Esse fato parece está associado ao efeito do barramento sobre o volume de sedimentos transportados por esse último rio. Para a bacia do rio Timonha a principal fonte de sedimentos finos está relacionada à contribuição do rio da Chapada.

O balanço de sedimentos no sistema estuarino Timonha / Ubatuba demonstra que, durante a época chuvosa, predomina a exportação de SST e durante a estiagem a importação



desse material. As menores concentrações de SST são observadas na baixa-mar. Em épocas de chuva, a redução do volume de materiais em suspensão nesse estágio da maré, parece está vinculada à pequena contribuição das descargas provenientes da bacia de drenagem. Em contrapartida, na estiagem, a baixa concentração de SST é um reflexo também da deposição desses sedimentos ao longo dos canais estuarinos.

Durante o primeiro semestre do ano, a descarga de SST do rio Ubatuba representa a maior parte dos sedimentos exportados pelo sistema estuarino. Verifica-se que esse rio lança para região de Barra Grande, ao final de um ciclo completo de maré, o volume correspondente a 370 kg de SST, enquanto que o rio Timonha responde por 336 kg desse material.

Durante o período de estiagem, ao final de um ciclo completo de maré, o rio Timonha retém 404 kg de SST e o rio Ubatuba apenas 4 kg. Isso indica que o efeito da importação de sedimentos em suspensão é mais forte sobre o canal do rio Timonha.

A estimativa da contribuição total do sistema para o balanço sedimentar da zona costeira, elaborada para o ano de 2004, indicou que, durante o semestre chuvoso, os rios Timonha e Ubatuba exportam aproximadamente 250 t de SST enquanto que, no período de estiagem, importam 150 t, ou seja, 58% do volume exportado durante o primeiro semestre do ano. Isso demonstra que a descarga de SST do sistema estuarino Timonha / Ubatuba para a zona costeira adjacente, ao final de um ano, corresponde a aproximadamente 100 t.

O volume residual médio de água no estuário do rio Timonha em um ciclo completo de maré é de aproximadamente  $37,57 \times 10^6 \text{ m}^3$ . No rio Ubatuba o volume residual é de  $32,80 \times 10^6 \text{ m}^3$ . O tempo de residência no período de estiagem é de aproximadamente 4,40 dias e no período chuvoso é de 0,90 dias. Como pode ser observado, a capacidade de diluição do estuário do rio Timonha é alta e a descarga fluvial tem um papel importante na diminuição do tempo de residência de substâncias no interior do sistema.

A ausência de monitoramento para a correção das vazões liberadas pelo Açude Itaúna em períodos de estiagem prolongados poderá representar o principal vetor de comprometimento da capacidade de suporte do estuário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANB - ÁGUAS DO NORDESTE DO BRASIL. Governo do Estado do Ceará – Secretaria dos Recursos Hídricos. *Estudo de Impacto Ambiental do Açude Público Itaúna*. Fortaleza. 1997.
- Andrews, T. J.; Clough, B. F.; Muller, G. J. Photosynthetic Gas Exchange Properties and Carbon Isotope Ratios of Some Mangroves in North Queensland. In: *Physiology and Management of Mangroves*. Teas, H. J. (Eds.). Dr. W. Junk Publisher. p. 15 – 23. 1984.
- Ayup, R. N. O Comportamento dos Sedimentos em Suspensão no Rio De la Plata Exterior e Proximidades. *Pesquisas*, v. 18. p. 36 – 68. 1986.
- Barros, A. N. S. S. *A Capacidade de Transporte nos Escoamentos de Maré no Estuário do Rio Potengi*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 242 p. 1984.
- Bérgamo, A. L. *Características da Hidrografia, Circulação e Transporte de Sal: Barra de Cananéia, Sul do Mar de Cananéia e Baía do Trapandé*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 254 p. 2000.
- Bittencourt, A. C. S. P.; Martin, L; Vilas Boas, G. S; Flexor, J. M. *Quaternary Marine Formations of the State of Bahia, Brazil*. Atas do International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary. p. 242 – 253. São Paulo. 1979.
- Bittencourt, R.; Almeida, G.; Carpentieri, E. *Potencial Eólico no Litoral do Ceará e Rio Grande do Norte para Geração de Energia Elétrica*. Relatório (DEFA – EO – RT – CHESF – 002/96). 1996.
- Brasil. Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000 Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal. *Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza*. 2000.

- Caddy, J. F.; Sharp, G. D. An Ecological Framework for Marine Fishery Investigations. FAO *Fish. Tech. Pap*, v. 283. 152 p. 1986.
- Cameron, W. M.; Pritchard, D. W. Estuaries. In: *The Sea – Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. Hill, M. N. (Eds.). Interscience, p. 306 – 324. New York. 1963.
- Carvalho, A. M.; Maia, L. P. *Estudo dos Sedimentos Cenozóicos da Região de Paracuru – CE*. Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará. 86 p. 1990.
- Ceará. Secretaria de Planejamento. *Projeto Áridas*. Relatório Final. 1994.
- Christofolletti, A. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. Ed. Edgard Blucher. 256 p. São Paulo. 1999.
- CIRM – *Comissão Internacional para os Recursos do Mar*. III Plano Básico de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. I Plano Setorial para os Recursos do Mar (1982-1985). 105 p. Brasília. 1981.
- COGERH – COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ. Monitoramento. Disponível em: [www.cogerh.com.br](http://www.cogerh.com.br). Acesso: 27 de dezembro de 2004.
- Consórcio BIRD, IEPRO, FUNCEME, SRH. Governo do Estado do Ceará. *Projeto Diagnóstico Geoambiental e Socioeconômico para Elaboração do Plano de Monitoramento das Áreas Estuarinas e de Manguezais dos Rios Jaguaribe, Malcozinhado, Catu e Timonha, Ceará*. Relatório Parcial. 2004.
- Costa, M. J.; França, J. B. de; Bacchiega, I. F.; Habekost, C. R.; Cruz, W. B. da. *Geologia da Bacia Jaibaras: Ceará, Piauí e Maranhão*. Projeto Jaibaras. DNPM / CPRM. Relatório Final, v.5, Recife, 1973.
- Coutinho, P. N. Sugestões para Gerenciamento de Estuários. In: *Arquivos de Ciências do Mar*, v. 25, p. 77 – 86, Fortaleza, 1986.

- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS. *Atlas Digital de Geologia e Recursos Minerais do Ceará*. CD-ROM. Fortaleza. 2003.
- Dalrymple, R. W.; Zaitlin, B. B.; Boyd, R. A Conceptual Model of Estuarine Sedimentation. In: *Journal of Sedimentology and Petrology*, v. 62. p. 1130 – 1146. 1992.
- Davies, J. L. A Morphogenic Approach of World Shorelines. In: *Zeit für Geomorph*, v. 8. 127 p. 1964.
- Davis Jr., R. A. *Coastal Sedimentary Environments*. 2<sup>a</sup> ed. Spring – Verlag. 716 p. New York. 1985.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). Marinha do Brasil. *Carta Batimétrica*. Escala 1:50.000. 1964
- Dobereiner, C. E. Importância do Comportamento de Suspensões no Assoreamento de Portos e Estuários. In: *Revista Brasileira de Engenharia*, v. 4. p. 61 – 74. 1983.
- Dominguez, J. M. L.; Bittencourt, A. C. S. P.; Martin, L. Controls on Quaternary Coastal Evolution of the East-Northeastern Coast of Brazil: Roles of Sea-Level History, Trade Winds and Climate. In: *Sedimentary Geology*, v. 80. p. 217 – 232. 1992.
- Drever, J. I. *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice – Hall. 436 p. New Jersey. 1988.
- Dyer, K. R.; Gong, W. K.; Ong, J. E. The Cross Sectional Salt Balance in a Tropical Estuary during a Lunar Tide and a Discharge Event. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 34. p. 579 – 591. 1992.
- Dyer, K. R. Sediment Transport Processes in Estuaries. In: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Perillo, G. M. E. (Eds.). Developments in Sedimentology 53, Elsevier, p. 423 – 449. 1995.
- Dyer, K. R. *Estuaries: A Physical Introduction*. 2<sup>a</sup> ed. Wiley. Chichester. 195 p. 1997.

- Esteves, F. A. *Fundamentos de Limnologia*. 2<sup>a</sup> ed. Interciência. Rio de Janeiro. 602 p. 1998.
- Fairbridge, R. W. The Estuary: Its Definition and Geodynamic Cycle. In: *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*. Olausson, E.; Cato, I. (Eds.). Wiley. p. 1 – 35. New York. 1980.
- Fidelman, P. I. J. *Impactos Causados por Tensores de Origem Antrópica no Sistema Estuarino do rio Santana, Ilhéus, Bahia*. Semana Nacional de Oceanografia. Anais. p. 438. Rio de Janeiro. 1999.
- Fischer, H. B.; List, E. J.; Koh, R. C. I.; Imberg, J.; Brooks, N. H. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, 482 p. New York. 1979.
- Freire, G. S. S. *Etude Hydrologique et Sedimentologique de L'Estuaire du Rio Pacoti (Fortaleza – Ceará – Brésil)*. These de Doctorat. Universite de Nantes. 211 p. 1989.
- Freire, G. S. S.; Maia, L. P.; Gomes, D. F. *Evidências da Variação do Nível do Mar na Plataforma Continental Interna do Estado do Ceará*. Simpósio de Geologia do Nordeste, Natal. 1993.
- Folk, R. L. Practical Petrographic Classification of Limestones. *Bulletin American Association Petroleum Geologists*, v. 43. p. 1 – 38. 1959.
- FUNCEME - FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Monitoramento Hidroambiental. Disponível em: [www.funceme.br](http://www.funceme.br). Acesso: 15 de janeiro de 2005.
- Geophysics Study Committee. Overview and Recommendations: Estuaries, Geophysics and the Environmental. *National Academy of Sciences*, p. 1- 10. Washington. 1997.
- Geyer, W. R. Influence of Wind on Dynamics and Flushing of Shallow Estuaries. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 44. p. 713 – 722. 1997.

- Hansen, D. V.; Rattray Jr., M. New Dimensions in Estuarine Classification. In: *Limnology and Oceanography*, v. 11. p. 319 – 326. 1966.
- Hoguane, A. M.; Hill, A. E.; Simpson, J. H.; Bowers, D. G. Diurnal and Tidal Variation of Temperature and Salinity in the Ponta Rasa Mangrove Swamp, Mozambique. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 49. p. 251 – 264. 1999.
- Holland, H. D. *The Chemistry of the Atmosphere and Oceans*. John Wiley and Sons. 351 p. New York. 1978.
- Ketchum, B. H. Hydrographic Factors Involved in the Dispersion of Pollutants Introduced into Tidal Waters. In: *Journal Boston Society of Civil Engineers*, v. 37. p. 296 – 314. 1950.
- Kjerfve, B. Estuarine Characteristics, Circulation and Physical Processes. In: *Estuarine Ecology*. Day Jr., J. W. (Eds.). John Wiley and Sons, p. 47 – 78. New York. 1989.
- Kjerfve, B. *Manual for Investigation of Hydrological Processes in Mangrove Ecosystems*. UNESCO / UNDP, 79p. New Delhi. 1990.
- Kjerfve, B.; Schettini, C. A. F.; Knoppers, B.; Lessa, G. C.; Ferreira, H. O. Hydrology and Salt Balance in a Large, Hypersaline Coastal Lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 42. p. 701 – 725. 1996.
- Lessa, G. C. Dinâmica de Maré e Transporte de Sedimentos no Canal de Itajuru – Laguna de Araruama (RJ). In: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21. p. 378 – 386. 1991.
- Lins, P. A. M. *Hidrologia e Hidrodinâmica do Baixo Estuário do Rio Ipojuca, PE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 75 p. 2002.
- Mabesoone, J. M. *Sedimentologia*. 2ª ed. Editora da UFPE. 475 p. Recife. 1983.

- Maia, L. P. *Controle Tectônico e Evolução Geológica / Sedimentar da Região da Desembocadura do Rio Jaguaribe*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 144 p. 1993.
- Maia, L. P. *Procesos Costeros y Balance Sedimentario a lo Largo de Fortaleza (NE – Brasil): Implicaciones para una Gestión Adecuada de la Zona Litoral*. Tese de Doutorado. Programa de Doctorado de Ciencias del Mar. Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona. 269 p. 1998.
- Marins, R. V.; Lacerda, L. D.; Abreu, I. M.; Dias, F. J. S. Efeitos da Açudagem no Rio Jaguaribe. In: *Revista Química Nova*, v.33, n. 197, p. 66-70. 2003.
- Martin, L.; Flexor, J. M.; Vilas Boas, G. S.; Bittencourt, A. C. S. P.; Guimarães, M. M. M. *Curbe de Variation du Niveau Relative de la Mer au Cours des 7000 Derniers Annees sur un Secteur Homogene du Littoral Bresilien (nord de Salvador)*. Atas do International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary. p. 264 – 274. São Paulo. 1979.
- Martin, L.; Suguio, K. *Excursion Route Along the Coastal Plains of the States of Parana and Santa Catarina*. International Symposium on Sea Level Changes and Quaternary Shorelines. Special Publication N° 1. 124 p. São Paulo. 1986.
- Medeiros, C.; Kjerfve, B. Hydrology of a Tropical Estuarine System: Itamaracá, Brazil. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 36. p. 495 – 515. 1993.
- Meireles, A. J. A. *Mapeamento Geológico - Geomorfológico do Quaternário Costeiro de Icapuí – Extremo Leste do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 133 p. 1991.
- Miranda, P. T. C.; Martins, M. L. R.; Soares, Z. M. L. *Levantamento e Quantificação das Áreas de Manguezais no Estado do Ceará (Brasil) Através de Sensoriamento Remoto*. V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais, v. 1. p. 90 – 94. Natal. 1988.

- Miranda, L. B. *Sistemas Estuarinos de Planície Costeira: Estrutura Dinâmica, Processos de Mistura e Aplicações*. II Simpósio de Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileira. ACIESP, p. 1- 46. 1990.
- Miranda, L. B. de; Castro, B. M. de; Kjerfve, B. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Edusp. 417 p. São Paulo. 2002.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Rio Parnaíba*. CD-ROM. Brasília. 2002.
- Morais, J. O. de. *Aspectos da Geologia Ambiental Costeira no Município de Fortaleza – Ceará*. Tese de Professor Titular. Universidade Federal do Ceará. 318 p. 1980.
- Morais, J. O. de; Meireles, A. J.; Freire, G. S. S. *Processos Hidrodinâmicos e Material em Suspensão no Estuário do Rio Pacoti, Ceará*. 35º Congresso Brasileiro de Geologia. Anais, v. 2. p. 581 – 591. Belém. 1988.
- Morais, J. O. de. *Processos e Impactos Ambientais em Zonas Costeiras*. In: *Revista de Geologia*, v. 9, p. 191 – 242, Fortaleza, 1996.
- Officer, C. B. *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*. Wiley. 465 p. New York. 1976.
- Patchineelam, S. M.; Kjerfve, B.; Gardner, L. R. A Preliminary Sediment Budget for the Winyah Bay Estuary, South Carolina, USA. In: *International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics*. Marine Geology 162, Elsevier, p. 133 – 144. 1999.
- Pinheiro, L. S. *Riscos e Gestão Ambiental no Estuário do Rio Malcozinhado, Cascavel – Ceará*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 232 p. 2003a.
- Pinheiro, R. D. *Análise do Comportamento Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário do Rio Pirangi – Ceará (NE / Brasil)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 108 p. 2003b.



- Pritchard, D. W. *Estuarine Hydrography. Advances in Geophysics*. Academic Press, v. 1. p. 243 – 280. New York. 1952.
- Pritchard, D. W. Estuarine Circulation Patterns. In: *Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, v. 81. N° 717. p. 1 – 11. 1955.
- Pritchard, D. W. Estuarine Classification – A Help or a Hindrance. In: *Estuarine Circulation*. Neilson, B. J.; Kuo, A.; Brubaka, J. (Eds.). Humana. p. 1 – 38. Clifton. 1989.
- Ridd, P. V.; Stieglitz, T. Dry Season Salinity Changes in Arid Estuaries Fringed by Mangroves and Salt Flats. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 54. p. 1039 – 1049. 2002.
- Roy, P. S.; Talukdar, G.; Joshi, P. K. Landscape Ecology Approach for Spatial Biodiversity Characterization. In: *The Botanical*, v. 51. p. 1 – 17. 2001.
- Schoellhamer, D. H. Factors Affecting Suspended – Solids Concentrations in South San Francisco Bay – California. In: *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n° C5, p. 12087 – 12095. 1996.
- Schoellhamer, D. H. Influence of Salinity, Bottom Topography, and Tides on Locations of Estuarine Turbidity Maxima in Northern San Francisco Bay. *Elsevier Science B. V.* p. 343 – 357. 2001.
- Schreiber, P. Über die Beziehungen Zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mittleeuropa. In: *Meteorologische Zeitschrift*, v. 21. p. 441 – 452. 1904.
- SEMACE – SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *SEMACE Notícias: Informativo mensal*. p. 4 – 5. Outubro de 2004.
- Smith, N. P. Water, Salt and Heat Balance of Coastal Lagoons. In: *Coastal Lagoon Processes*. Kjerfve, B. (Eds.). Elsevier Oceanography Series, v. 60. p. 69 – 101. 1994.

- Sotchava, V. B. Définition de Quelques Notions et Termes de Geographie Physique. *Dokl Institute de Géographie de la Sibérie et Extreme Orient*, v. 3. p. 94 – 117. 1962.
- Souza, M. J. N. de. *Análise Geoambiental e Ecodinâmica das Paisagens do Estado do Ceará*. Tese de Professor Titular. Universidade Estadual do Ceará. 250 p. 1998.
- Souza, M. J. N. de. Bases Naturais e Esboço do Zoneamento Geoambiental do Estado do Ceará. In: *Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará*. Lima, L. C.; Morais, J. O. de; Souza, M. J. N. de (Eds.). FUNECE. Fortaleza, p. 6 – 98. 2000.
- SRH – SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ. *Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos e Meteorológicos do Ceará*. Disponível em: [www.srh.ce.gov.br](http://www.srh.ce.gov.br). Acesso: 05 de agosto de 2004.
- Suguio, K.; Martin, L.; Bittencourt, A. C. S. P.; Dominguez, J. M. L.; Flexor, J. M.; Azevedo, A. E. G. Flutuações do Nível Relativo do Mar Durante o Quaternário Superior ao Longo do Litoral Brasileiro e suas Implicações na Sedimentação Costeira. In: *Revista Brasileira de Geologia*, v. 15. p. 273 – 286. 1985.
- Suguio, K. *Introdução à Sedimentologia*. Ed. Edgard Blucher. 317 p. São Paulo. 1973.
- Torquato, J. R. A Geologia do Noroeste do Ceará (Uma Visão Histórica). In: *Revista de Geologia*, v. 8, p. 7 – 183, Fortaleza, 1985.
- Tricart, J. *Ecodinâmica*. Fundação IBGE. 91 p. Rio de Janeiro. 1977.
- Trujillo, A.; Thurman, H. *Essential of Oceanography*. 7<sup>a</sup> ed. Prentice – Hall. 524 p. New Jersey. 2001.
- Wentworth, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. In: *Journal of Geology*, v. 30. p. 377 – 392. Chicago. 1922.