

Cássia Pianca Barroso

**Dinâmica de bancos e pontais arenosos
associados à desembocadura do estuário de
Caravelas, BA**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico
da Universidade de São Paulo, como parte dos requi-
sitos para obtenção do título de Mestre em Ciências,
Área de Oceanografia Geológica.

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Siegle

São Paulo

2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO**

**Dinâmica de bancos e pontais arenosos associados à
desembocadura do estuário de Caravelas, BA**

Cássia Pianca Barroso

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Oceanografia Geológica.

Julgada em ____ / ____ / _____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Sumário

| | |
|---|-------------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | v |
| Abstract | vii |
| Lista de Figuras | xiii |
| Lista de Tabelas | xv |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 11 |
| 2 Área de Estudo | 12 |
| 3 Métodos | 22 |
| 3.1 Comportamento do pontal arenoso ao longo dos últimos anos | 22 |
| 3.2 Coleta de dados | 23 |
| 3.3 Processamento dos dados para utilização no modelo | 26 |
| 3.3.1 Análise granulométrica | 26 |
| 3.3.2 Batimetria e Área dos Manguezais | 26 |
| 3.3.3 Clima de Ondas | 27 |
| 3.3.4 Corrente, Maré e Descarga Fluvial | 28 |
| 3.4 Modelagem numérica | 30 |
| 3.4.1 Domínio do modelo | 30 |
| 3.4.2 Módulo de onda | 32 |
| 3.4.3 Módulo hidrodinâmico | 33 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.4.4 | Módulo de transporte de sedimentos | 33 |
| 3.4.5 | Experimentos Numéricos | 34 |
| 4 | Resultados | 37 |
| 4.1 | Imagens de satélites | 37 |
| 4.2 | Sedimentologia | 41 |
| 4.3 | Clima de ondas | 46 |
| 4.4 | Aplicação do modelo numérico | 50 |
| 4.4.1 | Calibração e Validação do modelo | 50 |
| 4.4.2 | Módulo Hidrodinâmico | 52 |
| 4.4.3 | Módulo de Ondas | 62 |
| 4.5 | Experimentos de modelagem numérica | 63 |
| 4.5.1 | Ondas | 63 |
| 4.5.2 | Hidrodinâmica | 67 |
| 4.5.3 | Transporte de sedimentos | 71 |
| 4.5.4 | Comportamento dos bancos e do pontal arenoso | 75 |
| 4.5.5 | Sumário dos Resultados | 80 |
| 5 | Discussão | 82 |
| 6 | Considerações Finais | 91 |
| 6.1 | Conclusões | 91 |
| 6.2 | Sugestões para trabalhos futuros | 93 |
| | Referências Bibliográficas | 94 |
| A | Transporte de sedimentos | 101 |
| B | Mudança do fundo | 108 |

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Prof. Eduardo Siegle pelo suporte e apoio à execução da minha dissertação, por todas as milhares de dúvidas respondidas, pelas lições de oceanografia, pelo apoio, pelos momentos de descontração e longas conversas.

Ao apoio financeiro concedido pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Instituto Oceanográfico pela infra-estrutura fornecida.

A todos os professores que contribuíram enormemente para meu aprendizado através das disciplinas.

Ao Prof. Miranda, pela grande amizade, pela ajuda e apoio, e pelos ensinamentos durante essa minha jornada.

Ao Prof. Guto Schettini pela grande amizade e apoio, pela ajuda e pelos churrascos.

Aos Profs. Ilson da Silveira e Paulo Polito pelos bate-papos descontraídos.

As Prof(a)s. Ilana Wainer e Sueli Godoi pela sempre cordialidade, simpatia e bate-papos.

Aos Profs. Moysés Tessler e Michel Mahiques por contribuírem para minha formação e pela amizade.

Ao Prof. Rubens da Figueira pela ajuda e pelos bate-papos.

A todo o pessoal da biblioteca, da secretaria do DOF e da secretaria de pós (Ana Paula e Silvana) pela cordialidade e ajuda de sempre.

A todos que participaram das coletas em Caravelas: Marçal, Tom, Fernando, Camila, Franci, Wilson Natal, Pablo, Marta, Prof. Mário e Prof. Carlos Augusto. Ao Betinho, pela grande ajuda na dissertação. Ao Edilson, pela grande ajuda nas análises de granulometria.

A todos, novos e velhos, amigos do LDC (Laboratório de Dinâmica Costeira) pelo

bom convívio, amizade, pela ajuda e pelos momentos de descontração: Cláudia Omachi, Mari, Léo, Gabi, Lú Abissalonsen, Rafa, Maanape, Dezinha, Mário, Paulo Henrique, Gilberto, aos pequeninos integrantes, Bruno e Lucas e em especial, à Ana Amélia pela grande ajuda na etapa final com as correções, dicas, impressão e apoio.

A todos os 40 da minha turma de graduação (turma II do IOUSP), e a todos meus amigos e colegas que me acompanham em toda essa minha jornada.

A todos os amigos que me acompanharam ao longo do mestrado, nos muitos momentos bons e outros, como diria o República, 'densos': Nati, Zezinha, Jú, Rafa Soutelino, Luís Felipe, Márcio, Marin, Sandro, Fabíola, Raquel, Francisco, República, Fabrício, Rafa R2, Mare, Sebastian, Bruno Ferrero, Marcos Mineiro, Vitor, Hebe, Jussara, Roga, Wellington (Petrobrás), Vini, Tom, Ana Cláudia, Dani, Luiza, Hermes, Augusto.

Aos meus pais, Alcides e Ana, por sempre terem me amado, apoiado, e acreditado em mim durante toda minha vida, a minha avó, Adelina pelo grande amor e carinho e aos avós que não estão mais aqui, Francisca, Pedro e Diogo, pelo carinho. Ao meu irmão Rafael e a Ana Paula, as tias Iris, Maria e Anita, ao tio Roberto e a Tuca. E aos novos integrantes da quase-família: Sônia, Décio, vó Isa, Dedé e Wanda, e a todos outros familiares por terem me dado amor e apoio.

E finalmente para a pessoa que tem sido sempre um grande companheiro em todos os momentos, que é sempre amoroso, atencioso, dedicado e sincero, por confiar, apoiar e acreditar em mim, e o qual amo: Piero.

Resumo

As desembocaduras são ambientes altamente dinâmicos com suas feições sedimentares representando a complexa interação entre as correntes de maré, descarga fluvial, ondas e a batimetria local. Essas feições arenosas possuem uma forte influência na troca sedimentar das regiões costeiras, afetando a estabilidade das regiões adjacentes como as praias e os sistemas estuarinos. O objetivo do presente trabalho é entender a relativa influência dos principais processos que controlam a evolução morfológica dos bancos arenosos e dos pontais arenosos associados a desembocadura do sistema estuarino do rio Caravelas. Este sistema é formado por diversos canais meandrantos conectados com o oceano através de duas desembocaduras, e está localizado em frente ao parcel de Abrolhos no sul da Bahia. Baseado na coleta de dados de duas campanhas de 16 dias no sistema estuarino, o modelo numérico MIKE21-FM (DHI Water & Environment) foi aplicado e validado a fim de avaliar quantitativamente os processos que controlam o sistema. Os módulos hidrodinâmico, propagação de ondas e de transporte de sedimentos do modelo numérico foram utilizados neste estudo. O modelo inclui a retroalimentação das mudanças morfológicas nos cálculos da hidrodinâmica, ondas e transporte de sedimentos. Os experimentos numéricos tem como objetivo avaliar a importância relativa das forçantes físicas no ambiente. Foram elaborados dez experimentos numéricos incluindo condições energéticas extremas, alta energia (alta altura de ondas, descargas e maré de sizígia) e baixa energia (pequena altura de ondas, descarga e maré de quadratura) para um intervalo de direções de ondas; e dois períodos adicionais que incluem as condições medidas na coleta de dados (Período 2008 e Período 2007). Imagens de satélites LANDSAT e CBERS também foram utilizadas para observação das mudanças morfológicas do pontal arenoso e da linha de costa adjacente ao longo dos últimos anos. Os resultados para a calibração e validação do modelo numérico aplicado demonstraram que na região de inter-

esse e na plataforma interna o modelo consegue reproduzir o padrão da hidrodinâmica de forma adequada. Os resultados mostraram que a morfodinâmica local é controlada pela interação dos principais processos físicos, entretanto a importância relativa de cada um varia ao longo das diferentes regiões do sistema. A morfologia do canal principal e o transporte de sedimentos são controlados pelos fluxos de maré. Os bancos arenosos são também controlados pela maré, porém as correntes geradas por ondas atuando sobre estes bancos, geram um transporte de sedimentos em direção à costa. O pontal arenoso Ilha do Pontal do Sul é influenciado pelas ondas e pela maré. O mecanismo de transporte de sedimentos no pontal deve-se principalmente a corrente de deriva litorânea gerada pelas ondas e a maneira como os sedimentos são depositados e transportados ao longo do pontal deve-se aos fluxos de maré. Pelas imagens de satélites, observou-se que ao longo dos anos, o pontal apresentou uma acresção em seu comprimento, um afinamento da largura e sua extremidade encurvou-se. Este formato do pontal é consequência da corrente longitudinal a qual varia em diferentes escalas de tempo: variação diária devido à maré e variação sazonal devido à mudanças na direção da incidência das ondas.

Abstract

Tidal inlets are highly dynamic environments with their sedimentary features representing the complex interaction of tidal currents, river discharge, waves and the local bathymetry. These sedimentary features have a strong influence in morphological changes of coastal regions, affecting the stability of the adjacent environment such as beaches and estuarine systems. The aim of this study is to better understand the relative influence of the main processes controlling the morphological evolution of sandbars and sandspits associated to the inlet system of the Caravelas estuary. The Caravelas estuarine system comprises several meandering channels connected to the ocean by a double inlet system located in front of the Abrolhos reef in the south of Bahia. Based on the data collected during two 16-day field experiments in the estuarine system, the numerical model MIKE21 FM (DHI Water & Environment) has been applied and validated in order to assess quantitatively the processes that control the system. The hydrodynamic, wave propagation and sediment transport modules of the numerical model were used in this study. The model includes the feedback of morphological changes on hydrodynamic, wave and sediment transport calculations. Numerical experiments aiming to assess the relative importance of the physical forcings on the environment include ten sets of boundary conditions. These include the extreme energetic conditions, for high (large wave heights, river discharge and spring tides) and low energy (small wave heights, river discharge and neap tides) under a range of wave directions; and two additional periods that include the measured conditions (2008 period and 2007 period). Satellite images (LANDSAT and CBERS) were also used to observe the morphological changes of the sandspits and adjacent coastline during the last years. The results from the calibration and validation of the numerical model showed that in the region of interest and the inner shelf the model represents the hydrodynamic patterns. Results show that the local morphodynamics is

controlled by the interaction of the main physical processes, being however its relative importance variable along the different regions of the system. Tidal flows control the sediment transport and morphology of the main inlet channel. The sandbars that form the ebb-tidal delta are also tide-dominated, although wave driven currents drive an onshore sediment transport component. The sandspit is influenced by waves and tides. The sediment transport along the sandspit is controlled by longshore drift and then redistributed by tidal currents. Satellite images show the sandspit growing in length, and becoming narrower with a recurved tip. The design of the recurved spits that comprise the inlet is a consequence of the wave generated longshore drift which varies at different time scales: a daily cross-shore variation due to the varying water level and seasonally due to variations in the direction of wave incidence.

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Componentes primários envolvidos na morfodinâmica costeira. | 2 |
| 1.2 | Definição das escalas temporal e espacial na evolução costeira, com exemplos de feições sedimentares segundo Cowell & Thom (1994) | 3 |
| 1.3 | Morfologia geral de uma desembocadura estuarina, segundo Davis (1994) . | 5 |
| 1.4 | Classificação dos deltas de maré vazante mostrando as variações produzidas pela interação de processos gerados por maré e ondas, segundo Davis (1994) | 5 |
| 1.5 | Diagrama esquemático da interação entre as correntes de maré e a deriva litorânea em uma desembocadura, segundo Oertel (1988) | 6 |
| 1.6 | Processos envolvidos na migração dos pontais arenosos. A) largura e direção de expansão de um pontal e B) cenário para o crescimento de um pontal, adaptado de Petersen <i>et al.</i> (2008) | 9 |
| 2.1 | Área de estudo. | 13 |
| 2.2 | Principais unidades geológicas/geomorfológicas e feições da plataforma continental do Extremo sul da Bahia. Fonte: Santos (2006) | 15 |
| 2.3 | Pontal arenoso, Ilha Pontal do Sul, associado a desembocadura do Rio Caravelas e um dos bancos arenosos associados ao delta de maré vazante no Canal do Tomba. | 16 |
| 2.4 | Deriva litorânea potencial anual, ao longo da área de estudo, segundo Piana (2007). Os valores próximos às setas indicam a intensidade da deriva para cada setor da costa. | 18 |
| 2.5 | Principais elementos da circulação atmosférica ao longo da costa do Estado da Bahia. Fonte: Santos (2006) | 19 |
| 3.1 | Localização das estações (A, B, C e D) de coleta sinóticas de 13hs. | 23 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.2 | Equipamentos utilizados nas coletas sinóticas : correntômetro Valeport e ADCP fixo ao barco. | 24 |
| 3.3 | Diagrama dos fundeios instalados no estuário do Rio Caravelas (Miranda, 2009). | 24 |
| 3.4 | Localização dos pontos de coleta de sedimentos de janeiro de 2008 (em vermelho) e os pontos de outubro de 2008 (em azul). | 25 |
| 3.5 | Dados históricos de vazão média para o rio Caravelas (Dados de 1975 até 2008). | 29 |
| 3.6 | Malha computacional e batimetria original para o módulo hidrodinâmico e de sedimentos | 31 |
| 3.7 | Malha computacional e batimetria para o módulo hidrodinâmico e de sedimentos | 32 |
| 3.8 | Malha computacional e batimetria para o módulo de ondas | 32 |
| 4.1 | Evolução temporal do pontal arenoso e da linha de costa adjacente, com todos os anos juntos. | 38 |
| 4.2 | Evolução temporal do pontal arenoso e da linha de costa adjacente para os anos de 1997 a 2003. | 39 |
| 4.3 | Evolução temporal do pontal arenoso e da linha de costa adjacente para os anos de 2005 a 2008. | 40 |
| 4.4 | Diagramas de Shepard, gerados pelo programa Sysgran, mostrando a distribuição das amostras de sedimento coletadas. | 42 |
| 4.5 | Mapa da distribuição granulométrica dos sedimentos na área de estudo. . . | 45 |
| 4.6 | Histogramas direcionais do clima de ondas para a região de estudo entre os anos de 1997 a 2008. | 47 |
| 4.7 | Histogramas direcionais sazonais das alturas e dos períodos de onda na região de estudo entre os anos de 1997 a 2008. | 48 |
| 4.8 | Distribuição combinada de altura e período da onda, entre os anos de 1997 a 2008, com os contornos de porcentagem de ocorrência. Estes estão representados em intervalos de 1%. | 49 |
| 4.9 | Variação anual da energia de onda (P) baseada em 12 anos de dados. . . . | 49 |
| 4.10 | Variação mensal da energia de onda (P) baseada em 12 anos de dados. . . | 50 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.11 | Dados para maré observada e altura de onda (NWW3) da campanha 2007. | 54 |
| 4.12 | Dados para maré observada e altura de onda (NWW3) da campanha 2008. | 54 |
| 4.13 | Séries temporais dos dados de maré para o experimento escolhido referente a campanha de 2008, nas estações A e C, respectivamente. | 55 |
| 4.14 | Séries temporais dos dados de corrente para o experimento escolhido referente a campanha de 2008, na estação A durante 16 dias. | 55 |
| 4.15 | Séries temporais dos dados de maré para o experimento escolhido referente a campanha de 2007, nas estações A e C, respectivamente. | 57 |
| 4.16 | Séries temporais dos dados de corrente transversal para o experimento escolhido durante a máxima da sizígia (13hs) referente a campanha de 2007, nas estações A e C, respectivamente. | 57 |
| 4.17 | Séries temporais dos dados de corrente transversal para o experimento escolhido durante a máxima da quadratura (13hs) referente a campanha de 2007, nas estações A e C, respectivamente. | 58 |
| 4.18 | Séries temporais dos dados de maré para o experimento de validação referente a campanha de 2008, nas estações A e C, respectivamente. | 60 |
| 4.19 | Séries temporais dos dados de corrente para o experimento de validação referente a campanha de 2008, na estação A durante 16 dias. | 60 |
| 4.20 | Séries temporais dos dados de corrente longitudinal localizados na plataforma continental adjacente à desembocadura. | 61 |
| 4.21 | Simulação para CALM-1S, mostrando a direção e altura significativa de onda. | 65 |
| 4.22 | Simulação para STORM-1S, mostrando a direção e altura significativa de onda. | 65 |
| 4.23 | Simulação para CALM-2S, mostrando a direção e altura significativa de onda. | 66 |
| 4.24 | Simulação para STORM-2S, mostrando a direção e altura significativa de onda. | 66 |
| 4.25 | Sentido da deriva litorânea ao longo da costa. As setas pretas representam a maioria dos casos, e as setas coloridas representam algumas exceções conforme a condição em determinados pontos. | 67 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.26 | Simulação para o período de 2008 durante corrente de enchente, vazante e estofa, respectivamente, na maré de quadratura. | 69 |
| 4.27 | Simulação para o período de 2008 durante corrente de enchente, vazante, respectivamente, na maré de sizígia. | 70 |
| 4.28 | Localização dos perfis horizontais extraídos para o módulo de sedimentos. Os bancos arenosos estão representados na figura pelas feições com contornos de cor branca. | 71 |
| 4.29 | Diagrama esquemático para o transporte médio de sedimentos para as condições: STORM-2Q, STORM-2S, CALM-2Q, CALM-2S, CALM-1Q e CALM-1S. | 74 |
| 4.30 | Localização dos pontos extraídos no pontal arenosos e nos bancos ao redor da desembocadura. | 75 |
| 4.31 | Diagrama esquemático para a mudança do fundo para as condições: STORM2-Q, STORM-2S, CALM-2Q, CALM-2S, CALM-1Q e CALM-1S. | 79 |
| 4.32 | Diagrama esquemático da mudança de fundo por dia e do transporte de sedimentos para os períodos de 2007 (acima) e 2008 (abaixo). | 81 |
| 5.1 | Diagrama esquemático da morfologia de um pontal recurvado sobre influência da deriva litorânea e de direções de ondas diferentes. (Fonte: Bird (2007)). | 85 |
| 5.2 | Diagrama esquemático da morfologia de um canal dominado por maré (Fonte: Komar (1996)). | 88 |
| 5.3 | Resumo das áreas de relativa influência das marés e das ondas sobre o transporte de sedimentos, na região de Caravelas. | 90 |
| A.1 | Condições de contorno e transporte médio de sedimentos por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita). | 102 |
| A.2 | Transporte médio de sedimentos por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita). | 103 |
| A.3 | Condições de contorno e transporte médio de sedimentos por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita). | 104 |

| | | |
|-----|---|-----|
| A.4 | Transporte médio de sedimentos por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita). | 105 |
| A.5 | Condições de contorno e transporte médio de sedimentos por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita). | 106 |
| A.6 | Transporte médio de sedimentos por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita). | 107 |
| B.1 | Mudança do fundo por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita). | 109 |
| B.2 | Mudança do fundo por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita). | 110 |
| B.3 | Mudança do fundo por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita). | 111 |
| B.4 | Mudança do fundo por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita). | 112 |
| B.5 | Mudança do fundo por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita). | 113 |
| B.6 | Mudança do fundo por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita). | 114 |
| B.7 | Mudança do fundo por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita). | 115 |
| B.8 | Mudança do fundo por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita). | 116 |
| B.9 | Mudança do fundo por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita). | 117 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Condições utilizadas nos experimentos de modelagem numérica | 36 |
| 4.1 | Resultados das análises estatísticas baseados em Folk & Ward (1957) das 11 amostras coletadas em janeiro de 2008. Os valores obtidos estão em milímetros. | 43 |
| 4.2 | Resultados das análises estatísticas baseados em Folk & Ward (1957) das 22 amostras coletadas em outubro de 2008. Os valores obtidos estão em milímetros. | 44 |
| 4.3 | Qualificação dos intervalos de RMAE para velocidade baseados em Van-Rijn <i>et al.</i> (2003). | 52 |
| 4.4 | Experimentos feitos para a calibração dos parâmetros viscosidade e resistência do fundo no módulo hidrodinâmico. | 53 |
| 4.5 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de maré e velocidade total para o experimento de calibração para o ano de 2008 durante o período de 16 dias, nas estações A e C. | 56 |
| 4.6 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de velocidade para os experimentos de calibração no ano de 2007 durante a máxima da quadratura (13hs). | 58 |
| 4.7 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de velocidade para os experimentos de calibração no ano de 2007 durante a máxima da sizígia (13hs). | 59 |
| 4.8 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de maré para os experimentos de calibração no ano de 2007 durante o período de 16 dias. | 59 |
| 4.9 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de velocidade total para a validação durante o período de 16 dias. | 60 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.10 | Comparação entre alturas e médias obtidas pelo MIKE21-SW e por Lessa <i>et al.</i> (2005) para a área de estudo. | 63 |
| 4.11 | Sumário dos principais processos físicos que atuam em cada perfil e banco. | 80 |

Capítulo 1

Introdução

A zona costeira é um ambiente altamente dinâmico e sensível, e seus diversos ecossistemas estão entre os mais complexos e produtivos, sendo também uma importante fonte de recursos. As regiões costeiras estão entre as mais povoadas, existindo cerca de 70% da população mundial habitando estes ambientes ou vivendo próximo a eles, o que aumenta o risco de problemas ambientais gerados por fatores antrópicos como, por exemplo, a erosão costeira (Charfas (1990); Komar (1998)).

Para entendermos os ambientes costeiros, precisamos antes compreender de que forma a evolução ocorre nestes ambientes. A evolução costeira é o produto dos processos morfodinâmicos que ocorrem em resposta a mudanças nas condições externas. A morfodinâmica costeira é definida como o "ajuste mútuo da topografia e dinâmica de fluidos envolvendo o transporte de sedimentos" (Wright & Thom, 1977). O transporte de sedimentos fornece o mecanismo de acoplamento pelo qual o ajuste ocorre. A dinâmica de fluidos dirige o transporte de sedimentos resultando em mudanças morfológicas ao longo do tempo (Figura 1.1). Mudanças progressivas da topografia alteram as condições de contorno para a dinâmica de fluidos, produzindo mudanças nos padrões de sedimentos e seus produtos deposicionais (Carter & Woodroffe, 1994).

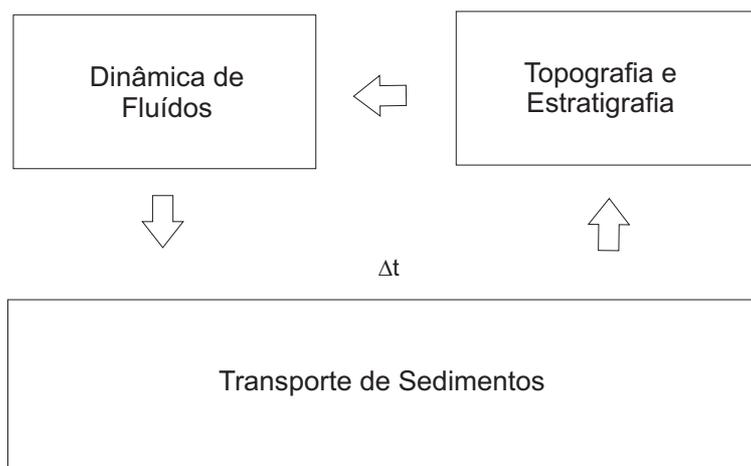


Figura 1.1: Componentes primários envolvidos na morfodinâmica costeira.

As propriedades essenciais dos processos morfodinâmicos costeiros são atribuídos a essa retroalimentação entre topografia e dinâmica de fluidos que dirigem o transporte de sedimentos produzindo mudanças morfológicas. Esta retroalimentação pode ser positiva ou negativa. Esta confere propriedades de auto-regulação em resposta a menores perturbações e a positiva significa crescimento de instabilidades e confere propriedades de auto-organização, o qual resulta em novos modelos de operação (Carter & Woodroffe, 1994). Os processos morfodinâmicos ocorrem em diferentes escalas espaciais e temporais (Figura 1.2) sendo agrupados em 4 classes: instantâneos que ocorrem durante um ciclo de atuação dos agentes primários; de eventos que levam a formação das unidades sedimentares fundamentais e sequências deposicionais; de engenharia (e histórica) que envolvem a evolução morfológica que levam à alterações nos processos responsáveis pelo transporte de sedimentos; e geológica na qual a importância de flutuações individuais é pequena, sendo resultado de uma média das condições ambientais sobre milênios.

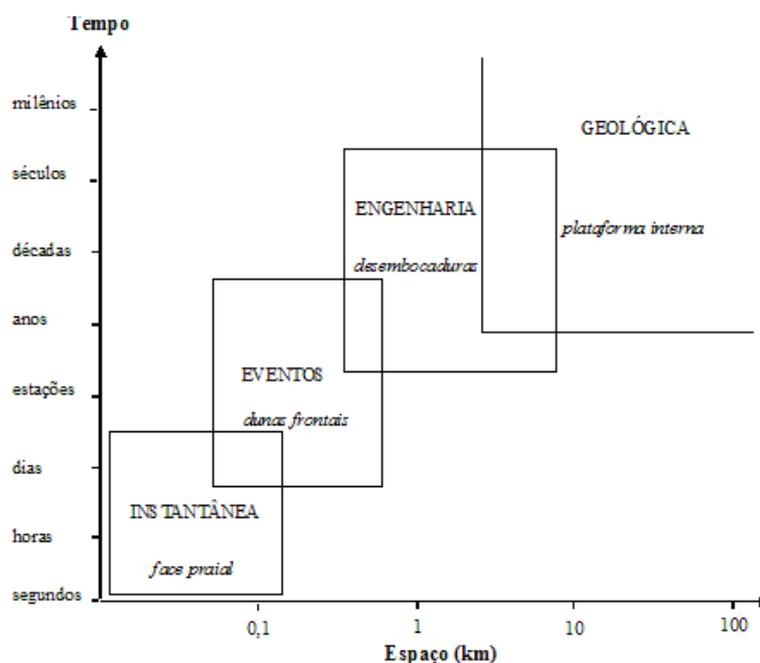


Figura 1.2: Definição das escalas temporal e espacial na evolução costeira, com exemplos de feições sedimentares segundo Cowell & Thom (1994)

Um dos mais complexos ambientes da zona costeira são os estuários. Esses ambientes são muito comuns ao longo das zonas costeiras ao redor do mundo, sendo altamente importantes por promover troca de material entre o continente e o oceano. Segundo a definição clássica de Pritchard (1955):

”Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”

A forma dos estuários é bastante variada, entretanto em todos eles encontramos: a cabeça do estuário, onde o rio entra no estuário; as margens estuarinas que definem os lados dos estuário e a desembocadura do estuário, onde o estuário encontra com o mar (Haslett, 2000). A morfologia de um estuário e de sua desembocadura é determinada ao longo do tempo pela dinâmica do transporte de sedimentos e esta por sua vez depende da propagação das marés no estuário, do aporte fluvial e da atuação das ondas sobre o estuário.

A influência e o estudo de desembocaduras estuarinas sobre os ambientes adjacentes, assim como sua importância econômica e ecológica, tem proporcionado considerações especiais dentro das ciências costeiras (Mehta, 1996). A pressão antrópica nesses

sistemas tem resultado em sérias consequências ambientais. Algumas das alterações ou atividades que afetam essa região incluem construções costeiras desordenadas, dragagens, mudanças no fluxo do rio, poluição, obras de engenharia, entre outras. Adicionalmente, a pressão natural também tem aumentado devido às mudanças globais (Huntley *et al.*, 2001), necessitando o gerenciamento e entendimento dos processos que ocorrem nessas áreas.

As desembocaduras são sistemas dinâmicos, e a geometria do canal e dos corpos sedimentares associados a esses ambientes é controlada pela altura da maré, pelo aporte de sedimentos, pela ação de ondas incidentes, pelo aporte de água doce (descarga dos rios), pela batimetria local e pelas correntes. Em conjunto, esses processos, promovem a entrada de energia que forma e modifica os ambientes, erodindo, transportando e depositando sedimentos (Bird, 1996).

Podemos classificar as desembocaduras, de acordo com o processo costeiro predominante: sobre condições de domínio da maré, o canal principal é fundo e relativamente estável, com fortes correntes de maré removendo os sedimentos depositados (Boothroyd, 1985) e assim podemos dizer que a desembocadura é estável ; com o aumento da influência das ondas, o canal torna-se menos estável e tende a migrar de acordo com o sentido predominante da corrente de deriva litorânea e portanto podemos dizer que a desembocadura é instável, em alguns casos esta migração pode ocorrer no sentido oposto a deriva litorânea (FitzGerald (1988); Davis (1994)).

Geralmente as desembocaduras, além do canal, apresentam dois elementos principais: os deltas de maré vazante e os deltas de maré enchente (Figura 1.3). De acordo com o processo costeiro predominante, estas feições serão mais ou menos desenvolvidas. Em desembocaduras dominadas por marés, o delta de maré vazante será bem desenvolvido e o delta de maré enchente será pequeno ou quase inexistente. Já em canais dominados por ondas, o delta de maré vazante sofrerá influência de forma direta e portanto será pequeno, pois seus sedimentos serão erodidos pelas ondas e estes passarão para dentro do canal através dos fluxos de maré, sendo acumulados no delta de maré enchente que será bem desenvolvido neste caso. Segundo Davis (1994), os deltas de maré vazante podem ser classificados de acordo com os processos envolvidos em sua formação e manutenção (Figura 1.4): os deltas dominados por maré são caracterizados por canais compridos e

orientados transversalmente à costa e os deltas dominados por ondas se dividem em três tipos, dois com condições fortes de deriva litorânea e outro com fraca deriva litorânea. Os deltas de maré enchente, geralmente, apresentam uma morfologia sob a forma de uma plataforma em rampa.

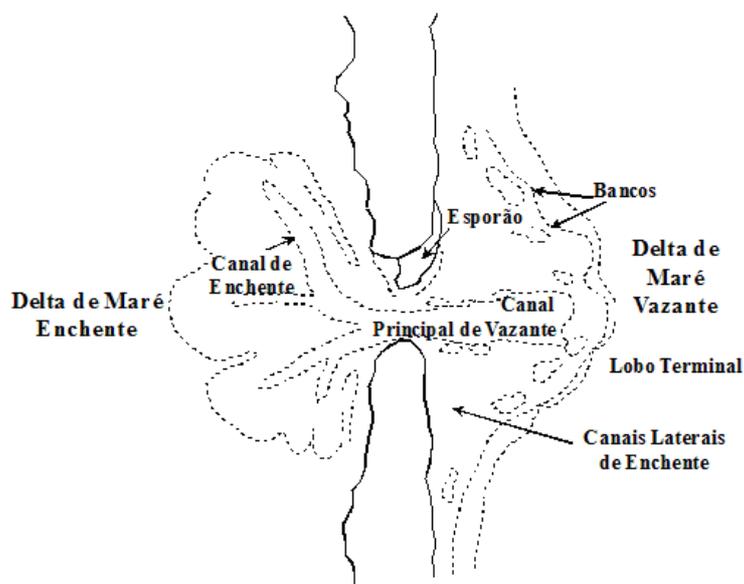


Figura 1.3: Morfologia geral de uma desembocadura estuarina, segundo Davis (1994)

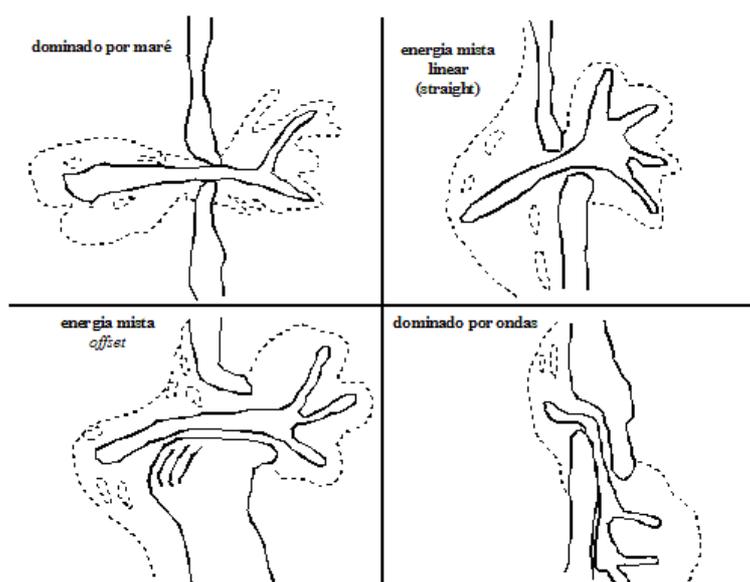


Figura 1.4: Classificação dos deltas de maré vazante mostrando as variações produzidas pela interação de processos gerados por maré e ondas, segundo Davis (1994)

A interação entre os padrões de transporte de sedimentos em uma desembocadura e a deriva litorânea foi descrita por Oertel (1988). Segundo este autor, nos períodos de estofa os sedimentos são depositados no canal podendo este sofrer assoreamento; nos períodos de maré enchente, os sedimentos são transportados para dentro do canal e pode ocorrer o aumento do esporão arenoso associado aos bancos dentro do canal, reduzindo a largura deste; e nos períodos de vazante, os sedimentos do canal e da deriva litorânea são transportados e acumulados no delta de maré vazante (Figura 1.5).

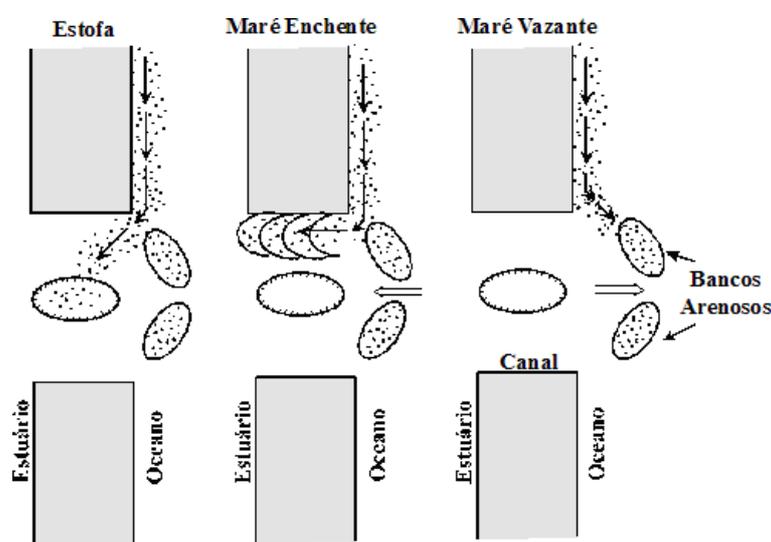


Figura 1.5: Diagrama esquemático da interação entre as correntes de maré e a deriva litorânea em uma desembocadura, segundo Oertel (1988)

O estudo da estabilidade de desembocaduras tem sido de grande importância uma vez que estes ambientes estão relacionados com canais de navegação, marinas e portos, atividades estas tanto recreacionais quanto econômicas que necessitam de um ambiente estável. Assim como, também podemos relacionar aspectos ecológicos, devido a troca de substâncias dissolvidas e particuladas controlando a qualidade de água e ecologia dos ambientes associados (Goodwin, 1996). Devido a esta importância, muitos estudos tiveram como objetivo entender os processos que controlam a estabilidade de desembocaduras considerando uma relação empírica entre morfologia e processos hidrológicos e.g. LeConte (1905); O'Brien (1931); O'Brien (1969); Escoffier (1940); Bruun & Gerritsen (1960); Jarret (1976); Walton & Adams (1976); Hume & Herdendorf (1988); Van-Kreeke (1992).

As feições arenosas associadas às desembocaduras, além dos deltas de maré vazante e enchente, incluem os bancos marginais associados aos deltas e os pontais arenosos. Estas

feições possuem uma forte influência na troca sedimentar das regiões costeiras, afetando a estabilidade das regiões adjacentes como as praias e os sistemas estuarinos. Além disso, a presença de pontais e bancos arenosos em desembocaduras, influenciam fortemente a distribuição da energia de ondas ao longo das zonas costeiras adjacentes.

A evolução de bancos arenosos é uma resposta devido a variações sazonais nas forçantes (Siegle *et al.* (2004), Siegle *et al.* (2007)), por exemplo, uma tempestade que produz erosão do fundo marinho, ou erosão de uma região costeira, transporta este material erodido tanto por carga de fundo como de suspensão podendo formar um banco. Os bancos arenosos são feições presentes em muitas regiões costeiras, e sua localização depende da presença de correntes de maré ou outras correntes capazes de mover o sedimento, no caso, a areia e a disponibilidade desta na região. A presença dessas feições são mais comuns onde as elipses de maré tendem a ser circulares, já os bancos arenosos lineares onde as correntes são retilíneas (Dyer & Huntley, 1999). Geralmente estas feições são formadas por areias médias ou grossas, entretanto quando as correntes de maré são suficientemente fortes e existe uma fonte de cascalho, podemos ter a formação de bancos de cascalhos.

Os bancos arenosos são considerados de grande importância uma vez que aqueles localizados perto da costa podem fornecer a esta uma fonte de sedimentos, interagir com as ambientes praias e ajudar a estabilizar estes. A dissipação da onda devido a refração ao redor dos bancos pode ser crucial na manutenção da forma da linha de costa e proteger esta da erosão em tempestades (Dyer & Huntley, 1999). Contudo, os bancos arenosos podem ser perigosos para a navegação principalmente quando formados em regiões próximas a entrada de canais e desembocaduras.

Pontais arenosos podem ser formados pela ação construtiva das ondas sobre um fundo suavemente inclinado onde o transporte ao longo da costa constrói um perfil costeiro e em cujo caso o pontal assemelha-se com uma barreira e tende a ser normal às ondas que chegam (Petersen *et al.*, 2008), ou as correntes levam o sedimento para dentro de uma feição deposicional subaérea prolongada estendendo-se para fora de um promontório em erosão ou outra fonte de areia. Para a evolução de um simples pontal arenoso, o suprimento de material produzido por um promontório é suficiente para ser depositado em uma feição mais ou menos paralela à linha de costa. A areia transportada ao longo

do pontal é depositada em sua extremidade sobre o fundo, permitindo o crescimento e/ou aumento do pontal. Porém, se este suprimento de areia for baixo, existirá uma tendência deste material ser transportado para dentro de uma baía, formando uma praia no interior desta ao invés de um pontal ou ainda se essa taxa for realmente muito pequena, formará somente uma praia na entrada da baía (Dean & Dalrymple, 2004).

Em muitos casos, entretanto, os pontais são formados como uma forma de acumulação sobre abrigo (proteção) de um promontório ou uma ilha. Tais pontais crescem primariamente devido à deposição de sedimentos ocasionada pelo transporte longitudinal e formam um ângulo com as ondas que chegam. O pontal formado pelo transporte longitudinal pode ter uma forma complexa, por exemplo, serem recurvados ou em forma de gancho se o clima de ondas tiver um amplo intervalo de direções. Os processos básicos envolvidos na migração de pontais arenosos estão ilustrados na figura 1.6. Segundo Zenkovitch (1967), considerando a relação entre o ângulo da onda e a capacidade de transporte longitudinal, para que exista depósito de sedimentos para o crescimento dos pontais, o ângulo da onda em relação ao pontal deverá ser maior do que 45° , onde o transporte de sedimentos é máximo. Os tipos diferentes de pontais e suas características são tratados extensivamente na literatura geomorfológica.

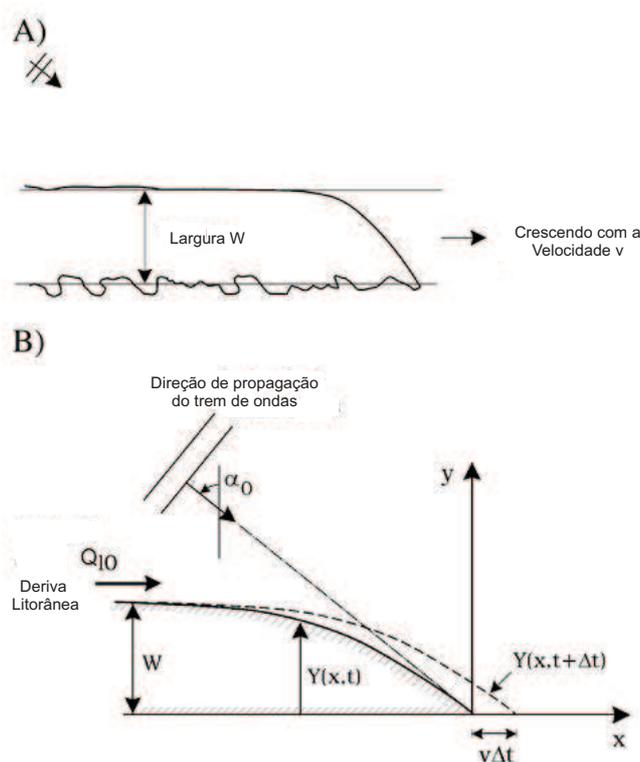


Figura 1.6: Processos envolvidos na migração dos pontais arenosos. A) largura e direção de expansão de um pontal e B) cenário para o crescimento de um pontal, adaptado de Petersen *et al.* (2008)

O crescimento de pontais arenosos pode causar erosão na linha de costa das regiões adjacentes uma vez que os sedimentos passam a ser retidos pelos pontais, no sentido da deriva litorânea, gerando uma perda de suprimentos de sedimentos, do outro lado do pontal (a sotamar) onde a deriva não consegue chegar, e consequentemente causando erosão nas praias que estão deste lado (Dominguez & Bittencourt, 1996). Contudo, são importantes estruturas da dinâmica costeira e representam formas geomorfológicas complexas as quais são muito comuns ao longo de costas irregulares (Komar, 1998)

O presente trabalho visa entender a morfodinâmica de pontais e bancos arenosos associados a desembocadura do Rio Caravelas através do uso de modelagem numérica. O trabalho faz parte do projeto "Produtividade, sustentabilidade e utilização do ecossistema do banco de Abrolhos" (Pró-Abrolhos) do Programa Institutos do Milênio (CNPq), do subprojeto "Dinâmica do Sistema Estuarino do rio Caravelas", cujo objetivo foi fornecer subsídios para o entendimento dos processos costeiros na região adjacente ao estuário do rio Caravelas.

A aplicação de modelagem numérica em áreas costeiras é uma importante ferra-

menta que em conjunto com dados *in situ* pode melhorar o entendimento desses ambientes. Os resultados modelados podem ajudar a preencher espacialmente e temporalmente as lacunas dos dados medidos em campo (Siegle, 2003).

As atividades humanas sobre as zonas costeiras contribuem para a alteração dos padrões de circulação e do volume de sedimentos colocados a disposição do ambiente costeiro, contribuindo para o aumento da instabilidade desses ambientes. Portanto, estudos nesses locais são necessários visando o correto gerenciamento desses sistemas costeiros.

1.1 Objetivos

Geral

O objetivo geral do presente trabalho é entender os processos que governam a evolução morfológica dos bancos arenosos e dos pontais arenosos associados a desembocadura do estuário do rio Caravelas (BA), fornecendo assim subsídios para o melhor entendimento da morfodinâmica costeira da região.

Específicos

- aplicar e validar o modelo numérico MIKE21-FM com o uso de três módulos (o módulo de ondas, o módulo hidrodinâmico e o módulo de transporte de sedimentos) na área de interesse;
- entender as forçantes que controlam a dinâmica envolvida na formação dos bancos arenosos e do pontal;
- analisar a influência e a importância dos bancos e do pontal na evolução costeira da região;

Capítulo 2

Área de Estudo

O sistema estuarino do rio Caravelas (SERC) é um ambiente de planície costeira situado no extremo sul da Bahia (Figura 2.1), formando um complexo de canais rasos ao redor da Ilha da Caçumba. Na região costeira adjacente, aproximadamente 70 km a leste da costa de Caravelas, está localizado o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. Esta região é caracterizada por uma batimetria bastante complexa devido a presença dos Bancos de Royal Charlotte e do Banco de Abrolhos. A largura da plataforma continental na região apresenta uma variação grande: na parte norte a largura é de 35km, perto do Royal Charlotte tem largura de 110km (Pereira *et al.*, 2005), e em Caravelas tem largura de aproximadamente 246 km em direção ao Banco de Abrolhos (Dominguez *et al.*, 2009).

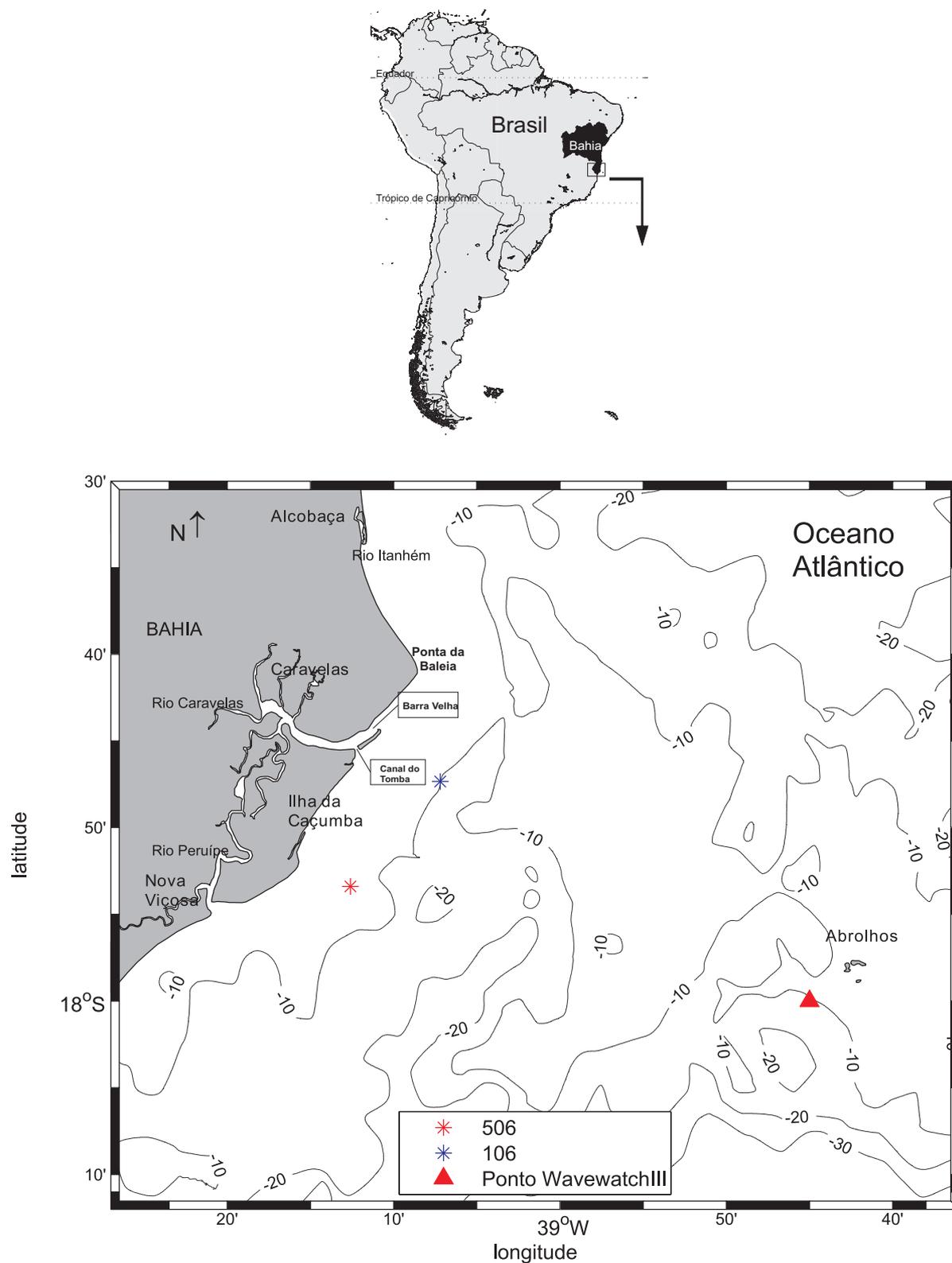


Figura 2.1: Área de estudo.

O Banco de Abrolhos constitui uma das mais importantes feições da parte sul da plataforma continental do Estado da Bahia, com área de aproximadamente 48.000 km^2 . Em sua porção mais interna, até cerca de 20 m de profundidade, observa-se uma topografia suave, porém, nas suas porções média e externa, são observados numerosos bancos rasos, canais estreitos de paredes escarpadas, inúmeras construções biogênicas (recifes) e feições vulcânicas aflorantes que constituem as cinco ilhas do Arquipélago (Leão, 1999).

O SERC é um ambiente de transição complexo com manguezais e restingas remanescentes da Mata Atlântica, forçado por processos que ocorrem na região oceânica, na plataforma continental e no continente, podendo-se destacar a maré, a descarga fluvial e o vento como responsáveis pelo balanço de energia, circulação-estratificação e processos de mistura (Miranda, 2009). Portanto, as características físicas deste estuário dependem de variações devido à oscilação da maré e a modulação quinzenal, à sazonalidade da descarga fluvial, dos ventos e da circulação costeira adjacente. A distância entre o canal norte em Caravelas e o sul em Nova Viçosa é de aproximadamente 27 km. Esses canais estuarinos estão interligados por um canal sinuoso, com geometria bastante complexa ao longo de uma distância de aproximadamente 20 km (Miranda, 2009). A linha de costa de Caravelas é formada por um terraço arenoso bem desenvolvido entre a Ponta da Baleia e a praia da Barra de Caravelas, enquanto que a linha de costa da ilha da Caçumba é formada por planícies de maré, onde estão presentes os manguezais.

Ao longo do Quaternário, a evolução geomorfológica desta região tem sido fortemente controlada pelas variações do nível médio do mar (Figura 2.2). Estas, por sua vez, modularam o desenvolvimento de recifes de corais que influenciam fortemente o padrão de circulação costeira e representam um obstáculo ao livre fluxo de sedimentos. Assim a planície costeira de Caravelas, ao contrário das outras planícies da costa leste do Brasil, tem sua formação associada ao desenvolvimento de recifes de corais e não a existência de um rio com grande vazão (Andrade *et al.*, 2003).

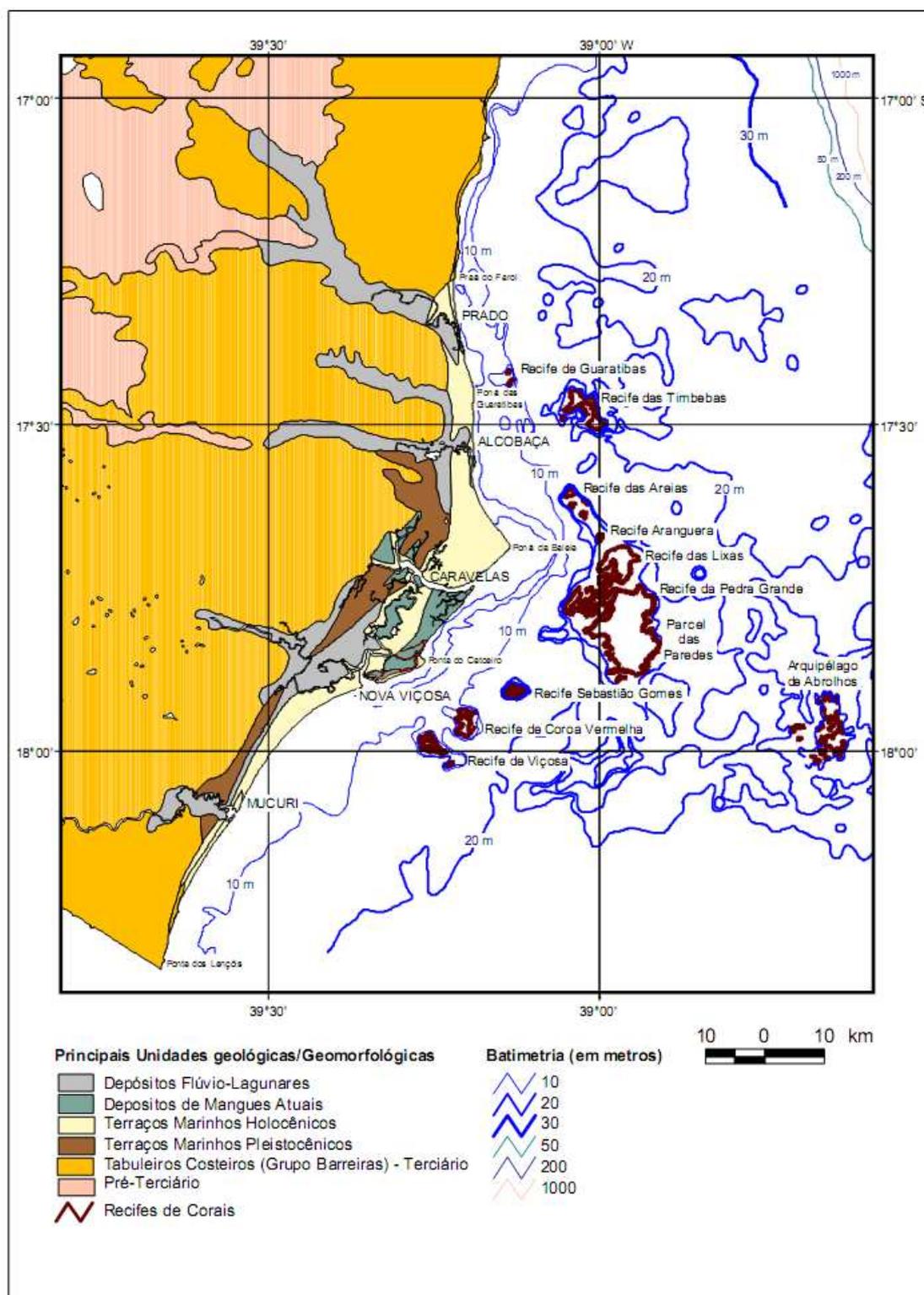


Figura 2.2: Principais unidades geológicas/geomorfológicas e feições da plataforma continental do Extremo sul da Bahia. Fonte: Santos (2006)

O SERC está conectado com o oceano através de duas desembocaduras: o Canal do Tomba e a Barra Velha. Possui, também um pontal arenoso, conhecido como Ilha Pontal do sul (Figura 2.3a), e diversos bancos arenosos (Figura 2.3b) associados a estes dois canais. As formas de fundo observadas ao longo dos bancos arenosos podem representar a direção predominante do transporte de sedimentos. A Ilha Pontal do Sul possui em seu entorno uma vegetação de manguezais. A existência dessa vegetação diminui a dinâmica do pontal arenoso.



(a) Ilha Pontal do Sul



(b) Banco arenoso

Figura 2.3: Pontal arenoso, Ilha Pontal do Sul, associado a desembocadura do Rio Caravelas e um dos bancos arenosos associados ao delta de maré vazante no Canal do Tomba.

A planície costeira de Caravelas apresenta uma série de feixes de cordões arenosos com inúmeros truncamentos e mudanças de orientação. Essas feições são indicadores geomorfológicos de inversões no sentido da deriva litorânea ocorridas ao longo do Quaternário (Bittencourt *et al.*, 2000). Feições como a Ilha da Caçumba e a grande cúspide de Caravelas são responsáveis por mudanças acentuadas na orientação da linha de costa, sendo observadas duas orientações preferenciais: uma, na direção de norte-noroeste/sul-sudeste, estendendo-se do limite norte da área de estudo até a Ponta da Baleia e, outra, com orientação de nordeste/sudoeste, da Ponta da Baleia até Mucuri (Santos, 2006). Segundo Silva (1999) e Bittencourt *et al.* (2000), o sentido da deriva efetiva entre Prado e a Ponta da Baleia é de norte para sul, enquanto que entre o limite sul do Estado da Bahia e a Ponta da Baleia a deriva predominante é de sul para norte. Resultados similares também foram obtidos por Pianca (2007), onde ao longo da costa de estudo a deriva litorânea apresenta uma direção predominantemente de sul para norte, com alguns locais de inversões, criando zonas divergentes significativas (Figura 2.4).

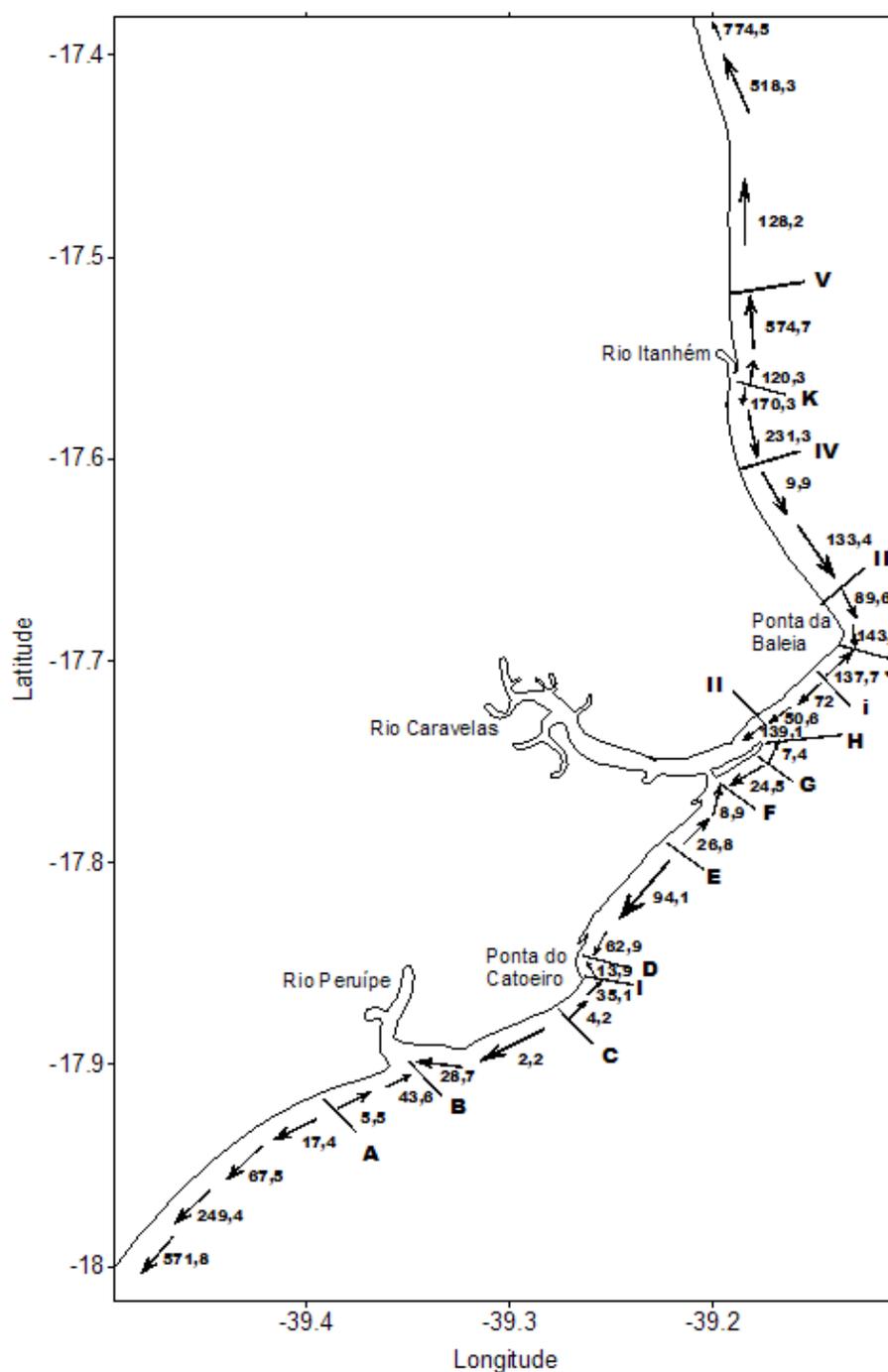


Figura 2.4: Deriva litorânea potencial anual, ao longo da área de estudo, segundo Pianca (2007). Os valores próximos às setas indicam a intensidade da deriva para cada setor da costa.

A migração sazonal da célula anti-ciclônica do Atlântico Sul, influencia a variação da circulação atmosférica da região estudada (Figura 2.5), ocorrendo o predomínio de ventos de E-NE na primavera e verão e E-SE no outono e inverno. Os avanços das massas de ar polar, episodicamente, adicionam um componente sul-sudeste ao regime dos ventos (Azevedo *et al.*, 2005). Dutra (2003) obteve dados sobre a intensidade e a direção dos

ventos e estes mostraram a existência de ventos dominantes de nordeste, com velocidades variando de $3,6 \text{ m/s}$ a $8,2 \text{ m/s}$, de outubro a fevereiro e ventos de leste, com intensidade de $2,0 \text{ m/s}$ a $5,1 \text{ m/s}$, nos meses de março a setembro. Existe um aumento no percentual de ventos de sul e sudeste nos meses de março a setembro, caracterizando a chegada de frentes frias na região de estudo, com velocidades médias dos ventos variando entre $3,6 \text{ m/s}$ e $10,8 \text{ m/s}$.

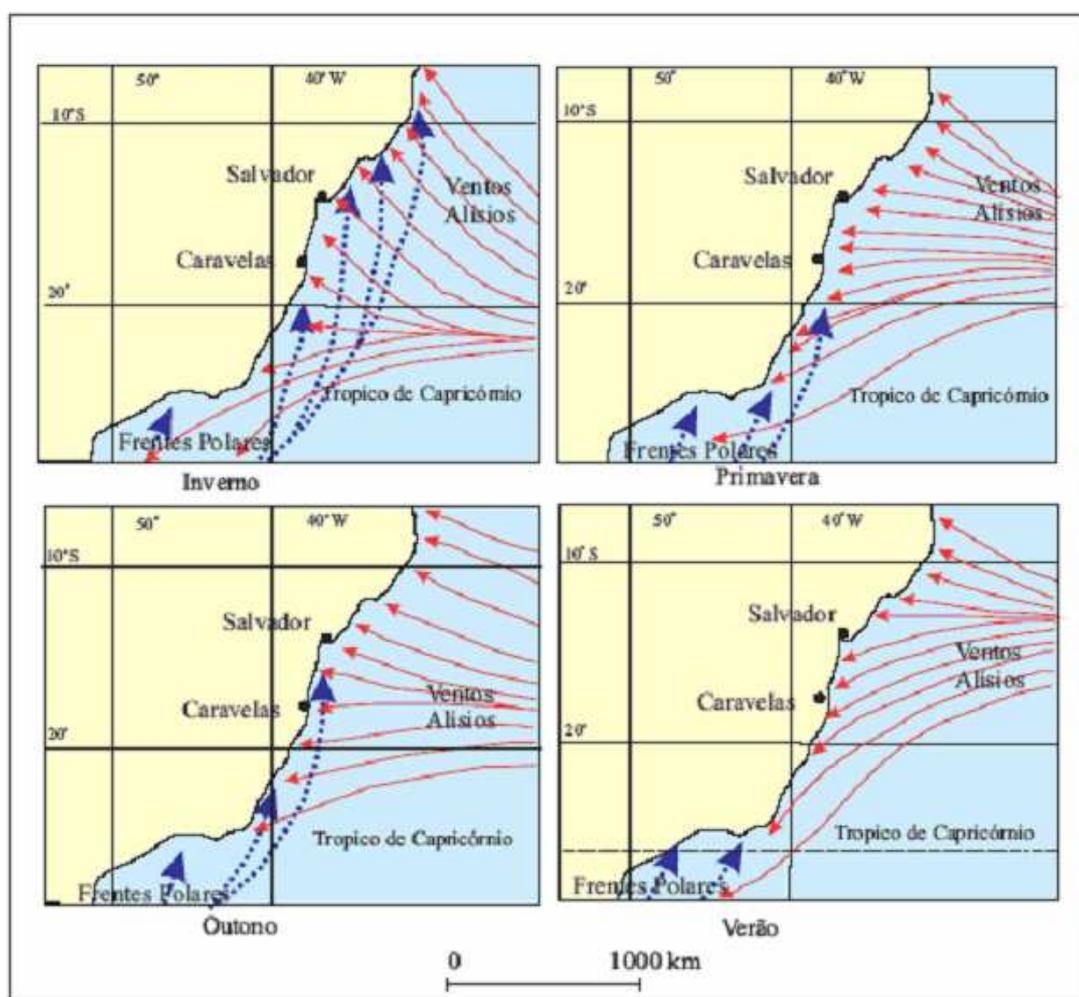


Figura 2.5: Principais elementos da circulação atmosférica ao longo da costa do Estado da Bahia. Fonte: Santos (2006)

Informações gerais sobre o clima de ondas para o litoral da Bahia, levando-se em consideração as direções médias dos principais ventos que atuam na região, foram obtidas por Bittencourt *et al.* (2000), Bittencourt *et al.* (2002), Bittencourt *et al.* (2003), Bittencourt *et al.* (2005), Dutra (2003), Leão (1999), USNavy (1978) e Azevedo *et al.*

(2005). Segundos estes autores, há duas sequências de ondas na região que coincidem com o regime de ventos: as ondas que ocorrem durante a primavera/verão são dirigidas pelos ventos de nordeste e leste e chegam a alcançar alturas de 1 m e períodos de 5 s; na sequência de outono/inverno dominam as ondas de sudeste e sul-sudeste com alturas significativas de 1,5 m e períodos de 6,5 s, observando-se também a presença das ondas de leste durante este período.

O regime de maré na região costeira de Caravelas é do tipo meso-maré, com característica semi-diurna (dois ciclos de maré vazante e dois de maré enchente durante 24 horas), com altura máxima de aproximadamente 2,9 m durante a sizígia e mínima ao redor de 0,4 m durante a quadratura.

A bacia hidrográfica do rio Caravelas apresenta uma área total de 597 km^2 . Segundo dados históricos da Agência Nacional de Águas (ANA), desde de 1975 até 2008, a vazão média do Rio Caravelas foi de 4,08 m^3/s e a vazão máxima e mínima foi 22,72 m^3/s e 0,35 m^3/s , respectivamente.

Segundo Miranda (2009), as características termohalinas do estuário no entorno da desembocadura, analisadas com o Diagrama T-S, apresentam uma notável diferença entre as condições de quadratura e sizígia, variando nos seguintes intervalos: $33,8 < S < 36,6$ e $23,8^\circ C < T < 26,0^\circ C$ em períodos de baixa descarga, e, $33,2 < S < 36,7$ e $26,5^\circ C < T < 29,5^\circ C$, em épocas de alta descarga. As intensidades da componente longitudinal de velocidade na sizígia e condições de vazante ($u > 0$) e enchente ($u < 0$) variam no seguinte intervalo: $-0,8 m/s < u < 1,4 m/s$; e para as condições de quadratura, variam no intervalo: $-0,35 m/s < u < 0,60 m/s$. O canal estuarino de Caravelas foi classificado como Tipo 2a (parcialmente misturado com fraca estratificação vertical) de acordo com o critério analítico de Hansen & Rattray (1966). As características do transporte de sal estuário acima, gerados por difusão turbulenta e pela influência advectiva do componente baroclínico da força de gradiente de pressão, são fracamente alteradas pela modulação quinzenal da maré e pela descarga fluvial.

A batimetria, ao longo das duas desembocaduras do Rio Caravelas, é relativamente rasa. Em 2001, a empresa Aracruz Celulose em vias de instalar um terminal de barcaças no Rio Caravelas, propôs ao governo da Bahia um plano de dragagem do Canal do Tomba, o qual começou a ser implementado a partir de janeiro de 2002. As draga-

gens normalmente ocorrem de janeiro a março, sendo que o período de licença dado pelo IBAMA é de dezembro a março. O volume dragado é variável de ano a ano, e na fase atual a empresa esta realizando dragagens de manutenção para manter a profundidade do canal (com aproximadamente 4 km de comprimento) em 5 m, limite dado pelo IBAMA. A área de descarte fica a 1 km da área dragada, entre Caravelas e Nova Viçosa.

Capítulo 3

Métodos

3.1 Comportamento do pontal arenoso ao longo dos últimos anos

Para podermos visualizar as variações geomorfológicas do pontal arenoso e das regiões adjacentes à desembocadura nas últimas décadas, imagens dos satélites Landsat5-TM e CBERS-2B-CCD, na banda 4, foram obtidas da página do INPE. Esta banda foi escolhida devido à nitidez da interface oceano-continente e portanto promover uma melhor visualização da linha de costa. O satélite Landsat5-TM possui projeção UTM, datum SAD69 e resolução espacial de 30 metros. O CBERS-2B-CCD está referenciado também no datum SAD69, projeção UTM porém sua resolução espacial é de 20 metros.

Foram selecionadas 13 imagens para este estudo, referentes aos anos de 1984, 1997 a 2008. A imagem de 1984 é a mais antiga obtida pelo satélite e portanto serviu de base para o georreferenciamento das outras imagens. Como o clima de ondas utilizado neste trabalho é referente aos anos de 1997 à 2008, foram selecionados os mesmos períodos para as imagens.

Após a obtenção das imagens, elas foram georreferenciadas com o programa Global Mapper através da coleta de pontos de controle obtidos de imagens do programa Google Earth. Em seguida, foi realizado o mapeamento da linha de costa e do pontal arenoso nas imagens georreferenciadas, utilizando o programa Didger. Através da interpretação visual destes resultados é possível a análise da variabilidade temporal da posição do pontal arenoso e da linha de costa adjacente, entre os anos de 1997 a 2008.

3.2 Coleta de dados

Para a coleta de dados, duas campanhas foram realizadas em épocas do ano distintas a fim de caracterizarmos a região no período de alta e de baixa descargas fluviais. A primeira campanha foi realizada na época de baixa descarga entre os dias 20/08/07 e 31/08/07 e a segunda campanha foi realizada na época de alta descarga fluvial nos dias 14/01/08 a 29/01/08. Nas duas campanhas foram realizados fundeios (Figura 3.3) de ADCPs, CTDs e marégrafos em diferentes pontos do estuário. Também foram realizadas coletas sinóticas (13h) em quatro posições ao longo do estuário (Figura 3.1) durante condições de maré de sizígia e de quadratura em ambas as campanhas. Nessas coletas foram feitas medições de salinidade, temperatura e turbidez utilizando CTD's e de correntes através do uso de ADCP (Sontek) preso ao barco (Figura 3.2) e de correntômetros (Valeport e Falmouth), com medições a cada 30 minutos totalizando 26 perfis verticais. No presente trabalho, os dados obtidos pelos CTD's não foram utilizados.

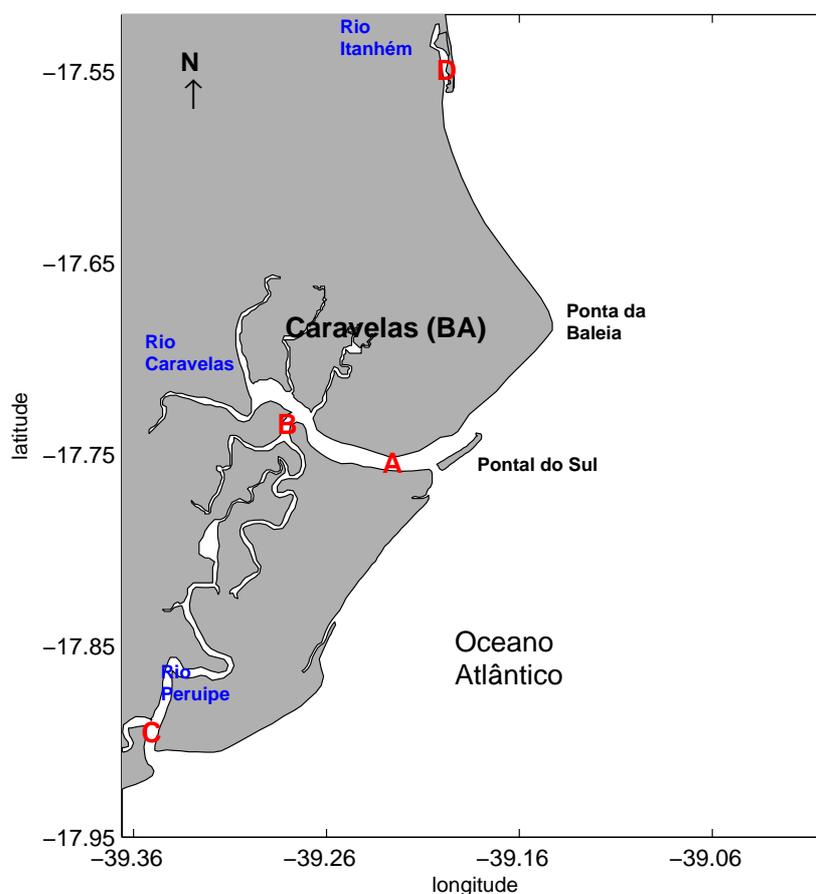


Figura 3.1: Localização das estações (A, B, C e D) de coleta sinóticas de 13hs.

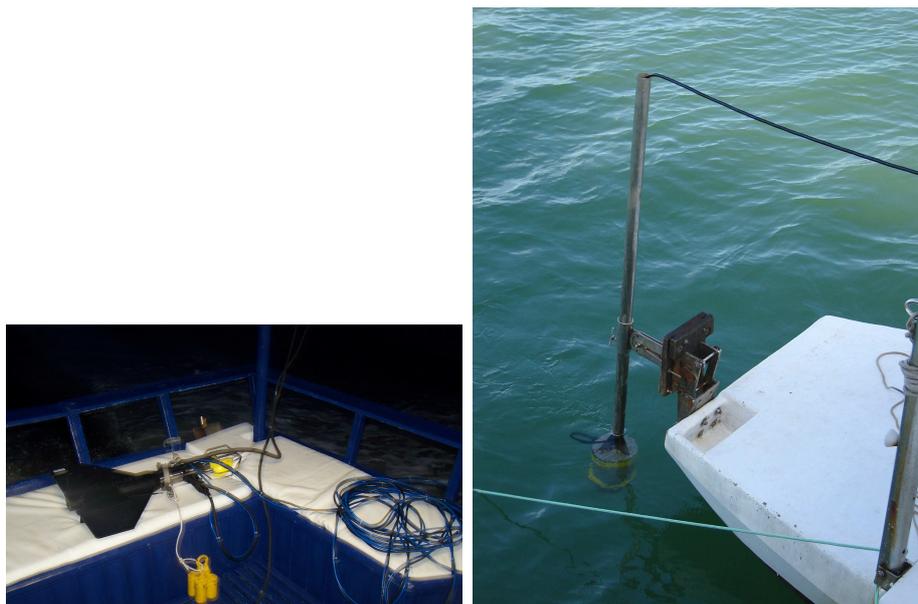


Figura 3.2: Equipamentos utilizados nas coletas sinóticas : correntômetro Valeport e ADCP fixo ao barco.

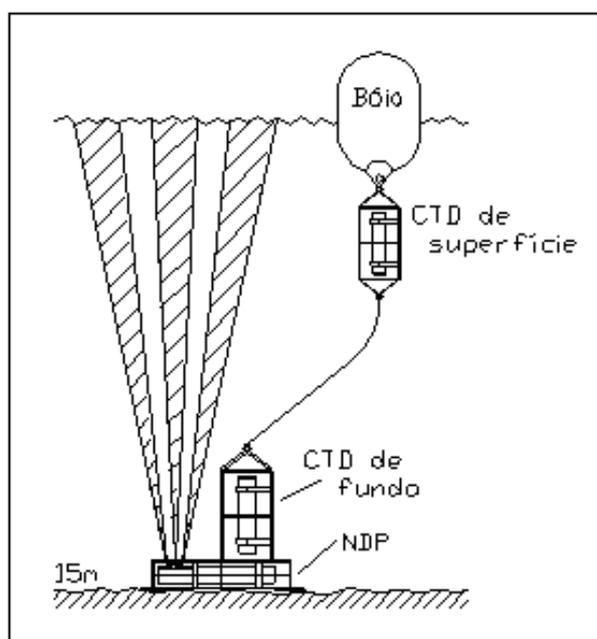


Figura 3.3: Diagrama dos fundeios instalados no estuário do Rio Caravelas (Miranda, 2009).

Medições das vazões dos rios Itanhém e Peruípe também foram realizadas utilizando um fluxômetro ao longo da seção transversal dos rios. Utilizando uma ecossonda foram feitas medições da batimetria do canal principal e dos canais secundários do Estuário de Caravelas.

Na segunda campanha foram feitas coletas de sedimentos, nos pontos indicados na figura 3.4, totalizando 11 pontos de coleta. Durante o mês de outubro de 2008, outras amostras de sedimentos foram coletadas ao longo do canal principal do estuário. A localização destas amostras esta indicada também na figura 3.4. Todas as amostras foram processadas com o objetivo de caracterizar a sedimentologia local.

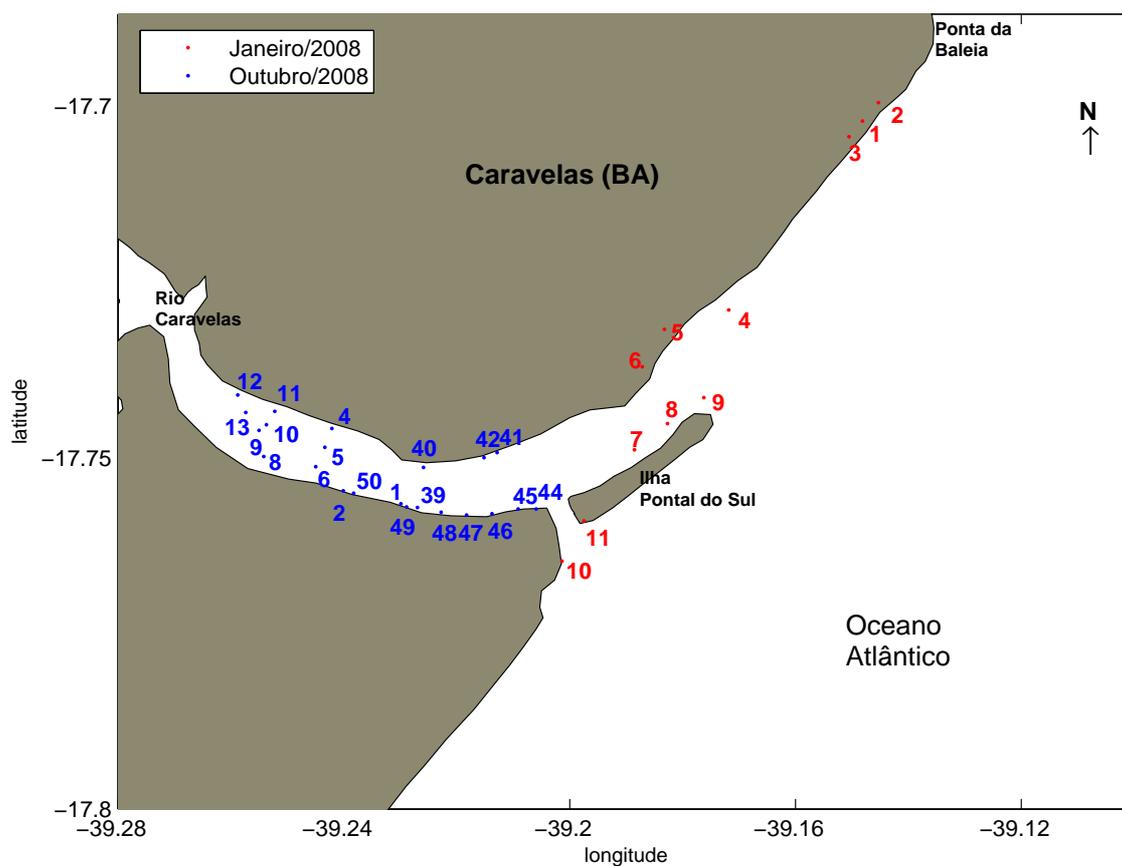


Figura 3.4: Localização dos pontos de coleta de sedimentos de janeiro de 2008 (em vermelho) e os pontos de outubro de 2008 (em azul).

3.3 Processamento dos dados para utilização no modelo

3.3.1 Análise granulométrica

As amostras de sedimentos coletadas durante a segunda campanha (janeiro/2008) e as amostras de setembro de 2008, foram analisadas no Laboratório de Sedimentologia Marinha do Instituto Oceanográfico. A metodologia aplicada baseia-se no método de peneiramento mecânico utilizando um agitador de peneiras denominado Rotape.

Antes da aplicação do peneiramento, foi necessária a eliminação da matéria orgânica (MO) e do carbonato de cálcio (CaCO_3) presente nas amostras para que não houvessem erros na granulometria final. A eliminação tanto da matéria orgânica quanto dos carbonatos foi feita através da utilização de ácidos, sulfúrico e clorídrico, respectivamente.

Após as amostras estarem preparadas, ou seja, livres de MO e CaCO_3 , a análise granulométrica, conforme mencionado acima, foi realizada pelo método de peneiramento mecânico. O intervalo entre as peneiras foi de $1/2 \phi$ da escala de Wentworth (1922). Cada amostra permaneceu no Rotape por 10 minutos. O material retido em cada peneira foi pesado e os resultados foram apresentados segundo a interpretação granulométrica de Folk & Ward (1957), que considera a classificação, selecionamento, achatamento e tendência, com base nas curvas de frequência simples e acumulada.

Os parâmetros considerados na análise estatística que servirão para a modelagem numérica são: o tamanho médio do grão (d_{50}) e desvio geométrico definido como ($\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$). Os parâmetros estatísticos foram obtidos através da utilização do programa SYSGRAN3 (Camargo, 2005), seguindo a análise estatística baseado em Folk & Ward (1957).

3.3.2 Batimetria e Área dos Manguezais

Para a confecção da malha batimétrica, cartas náuticas da DHN foram digitalizadas utilizando os softwares Didger, Surfer e Global Mapper. As cartas náuticas foram obtidas de http://www.mar.mil.br/dhn/chm/cartas/download/cartasbsb/cartas_eletronicas_

Internet.htm, georrefenciadas e os pontos batimétricos digitalizados. Adicionalmente, foram utilizados os dados de cartas náuticas da DHN que foram digitalizadas em uma mesa digitalizadora.

Os dados de batimetria, dentro dos canais do estuário, foram obtidos através de levantamentos batimétricos realizados durante as duas campanhas de coletas. Para esses dados foram feitos os seguintes procedimentos, utilizando o programa MATLAB 7.0:

1. Os dados considerados espúrios foram retirados;
2. Os dados restantes foram devidamente corrigidos com o nível da maré de acordo com o dia e a hora da amostragem;
3. Os dados corrigidos foram salvos em formato XYZ para posterior utilização no modelo MIKE21-FM;

Para a definição da malha do modelo, foi necessário definir as áreas de manguezais, uma vez que, são áreas influenciadas pela variação da maré e não podem ser consideradas como linha de costa. As áreas de manguezais foram definidas através do uso de imagens de satélite e digitalizadas no programa Global Mapper 9. Posteriormente, os dados foram importados para o ambiente de geração de malhas (Mesh Generator) do MIKE Zero, do modelo MIKE21. O Mesh Generator fornece um ambiente de trabalho para criar malhas para serem usadas com os módulos hidrodinâmico e de onda.

3.3.3 Clima de Ondas

Para obter uma climatologia para a região de Caravelas, bem como séries temporais de onda durante as campanhas de coletas, dados do modelo WAVEWATCHIII - NWW3 (Tolman, 2002) foram obtidos de <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/> e tratados no programa MATLAB 7.0. Estes dados serão utilizados como condições iniciais para o modelo MIKE21-FM - Spectral Wave. Assim, um banco de dados de 11 anos das características das ondas foram obtidos com os dados tratados.

O WAVEWATCH-III é um modelo desenvolvido pelo National Center for Environmental Prediction (NCEP) do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos Estados Unidos (Tolman, 1999). O modelo resolve a equação do balanço

de densidade espectral para o espectro direcional de onda. O crescimento, refração e decaimento para cada frequência e direção específica é resolvida, dando as características completas e realísticas do campo de onda transiente. Os processos físicos que estão incluídos neste modelo são: refração e as deformações no campo de ondas devido a variações temporais e espaciais da profundidade média da água e da corrente, crescimento de onda e decaimento devido à ação do vento, interações não-lineares, dissipação devido ao efeito do vento na quebra da onda (*white-capping*) e a fricção com o fundo.

Este modelo possui um banco de dados desde de 1997, contendo altura significativa, período e direção das ondas em diversos pontos ao redor do globo, de maneira que o modelo possui resolução espacial de $1^\circ \times 1.25^\circ$ na latitude e longitude respectivamente, com uma grade de $77^\circ N$ a $77^\circ S$, com profundidade mínima de 25 m, e usa diferentes campos de ventos como entrada do modelo, disponíveis em intervalos de 3 horas, retirados do Global Data Assimilation Scheme (GDAS). Mais detalhes sobre o modelo WAVEWATCH-III, podem ser encontrados em Tolman (1999).

3.3.4 Corrente, Maré e Descarga Fluvial

O processamento dos dados hidrodinâmicos tem por base a metodologia descrita em Miranda *et al.* (2002). Todos os dados foram tratados utilizando o programa MATLAB 7.0.

Os dados de intensidade (em m/s) e direção (em graus) da corrente foram decompostos em componentes longitudinais (u) e transversais (v) em relação a um referencial local Oxy, com Ox orientado positivamente estuário abaixo, exceto para a estação B cuja orientação foi escolhida para permitir calcular as eventuais trocas com a região sul. Para cada ciclo semidiurno da maré foram obtidos de 26 a 28 perfis Eulerianos dos componentes da velocidade [$u=u(z,t)$ e $v=v(z,t)$].

Durante as duas campanhas realizadas (2007 e 2008), conforme comentado na seção 3.2, foram fundeados marégrafos ao longo do estuário. Estes dados foram analisados a fim de obtermos uma série temporal da maré representando as variações desta na região. A maré depois de referenciada, também foi utilizada para o cálculo final da batimetria obtida pela ecossonda. Para estes dados do marégrafo foram feitos os seguintes procedimentos:

1. Retirados os dados considerados espúrios ou *spikes*;
2. Os dados restantes foram referenciados baseados em dois bancos de dados de maré: o WXTIDE e a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN);
3. Comparação entre os resultados da maré referenciada utilizando estes dois dados;
4. Escolha da maré referenciada por um dos dois bancos de dados.

Os resultados utilizando a DHN e o WXTIDE foram muito similares e portanto para a análise final foram selecionados apenas os dados referenciados com a DHN, por ser um banco de dados nacional, e também porque as cartas náuticas utilizadas neste trabalho são referenciadas pela DHN.

A descarga fluvial foi obtida através de séries históricas retiradas da Agência Nacional de Águas (ANA). Contudo, esta agência não possui uma estação no rio Caravelas, mas sim nos rios Peruípe e Itanhém (Figura 2.1), entretanto o rio Caravelas está localizado entre estes dois rios, e portanto deve apresentar comportamento semelhante. Para tanto foi calculada a área total dos três rios através da digitalização de imagens de satélite (Pereira *et al.*, submetido). Os dados de vazão foram extrapolados para a área total do rio Caravelas de acordo com sua proporção em relação ao rio Peruípe (Figura 3.5).

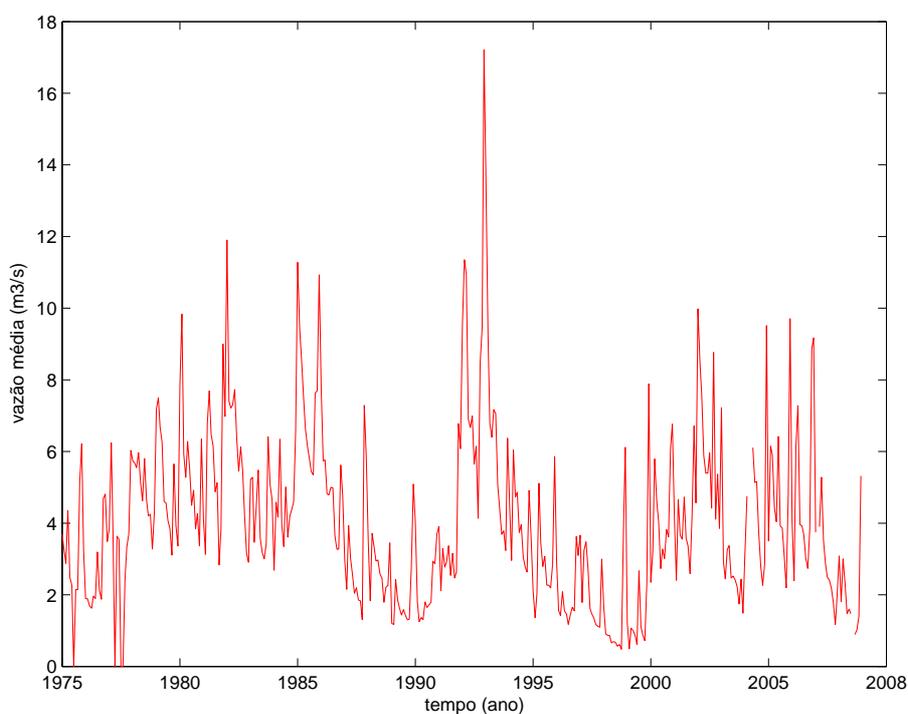


Figura 3.5: Dados históricos de vazão média para o rio Caravelas (Dados de 1975 até 2008).

3.4 Modelagem numérica

O modelo numérico utilizado é o MIKE21-FM, desenvolvido pela DHI Water & Environment ((Abbott *et al.*, 1988), (Abbott & Larsen, 1985)). Este modelo é baseado nos princípios físicos (conservação de massa; momento; energia, etc.) e usa equações matemáticas para descrever ondas, correntes, transporte de sedimentos e mudanças no fundo. Este tipo de modelo é conhecido como modelo baseado em processos. Os conceitos básicos deste tipo de modelo são o acoplamento dos modelos padrões das constituintes físicas (ondas, correntes, transporte de sedimentos) com um módulo de evolução do fundo baseado na conservação dos sedimentos (Vriend *et al.*, 1993). Isto quer dizer que, existe uma retroalimentação da topografia de fundo dentro do módulo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos através de um sistema de retroalimentação os quais descrevem a dinâmica da evolução temporal do fundo.

Durante este estudo nenhuma mudança foi feita na formulação e nos algoritmos do modelo. A autora esteve envolvida no pré e pós-processamento dos dados e dos resultados modelados nos experimentos, na preparação das simulações e no ajuste dos parâmetros relevantes para a calibração do modelo numérico.

3.4.1 Domínio do modelo

O modelo utilizado possui duas dimensões, ou seja, é um modelo no qual os fluxos da superfície livre estão representados no espaço 2D e a estratificação vertical pode ser negligenciada, assumindo que os fluxos sejam barotrópicos, ou seja, não representando forçamentos de natureza baroclínica. O estuário de Caravelas e a área de interesse podem ser classificados como homogêneos. De acordo com Miranda (2009) e Pereira *et al.* (submetido) o canal estuarino de Caravelas foi classificado com fraca estratificação vertical. A coordenada utilizada pelo modelo no domínio horizontal é a cartesiana.

A grade do modelo foi criada no Mesh Generator do MIKE ZERO, ambiente este que permite a criação de malhas flexíveis, ou seja, que permite a alteração de qualquer contorno do modelo. Foram criadas duas malhas diferentes para os módulos hidrodinâmico e de sedimentos e uma malha para o módulo de ondas.

A malha original (Figura 3.6) foi gerada utilizando uma resolução detalhada,

incluindo todos os canais secundários do rio Caravelas. A segunda malha (Figura 3.7) foi gerada utilizando uma resolução menos detalhada que a original, sem a inclusão dos canais secundários, substituídos por um reservatório de água com uma área similar a estes canais. A malha para o módulo de ondas (Figura 3.8), foi gerada apenas com a presença da linha de costa, ou seja, sem a inclusão dos canais e do reservatório.

Para o módulo hidrodinâmico e de sedimentos foi escolhida a segunda malha pois a substituição dos canais de drenagem por um reservatório de água de área similar fez com que o tempo computacional do modelo fosse reduzido, viabilizando o uso deste para o objetivo de estudo. Já para o módulo de ondas, como a propagação das ondas dentro dos canais estuarinos são insignificantes, não houve a necessidade de incluir estes canais na malha do modelo e assim o tempo computacional para este módulo, também foi reduzido.

As duas grades finais escolhidas possuem cerca de 148 *km* na direção zonal e aproximadamente 60 *km* na direção meridional. Os dados batimétricos variam de +2.9 *m* até -54 *m*. Os contornos sul, norte e leste foram mantidos abertos onde as condições de onda das regiões oceânicas e a variação da maré foram especificadas. Nas regiões rasas e próximas ao estuário, ou seja, na área de interesse, foi utilizada uma alta resolução espacial e temporal e na parte regional utilizou-se uma resolução relativamente mais grosseira.

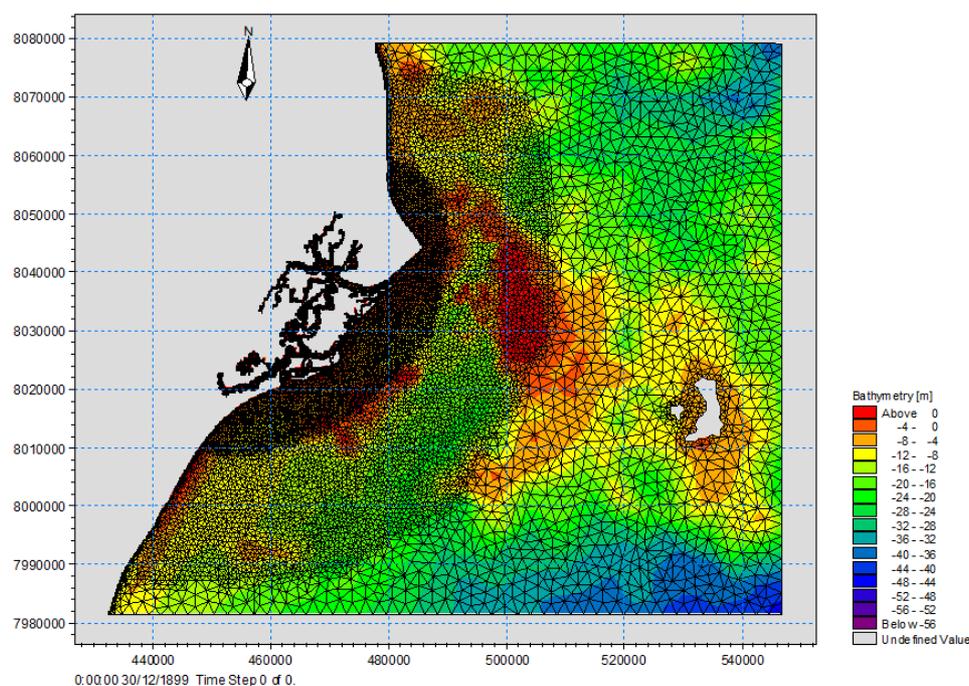


Figura 3.6: Malha computacional e batimetria original para o módulo hidrodinâmico e de sedimentos

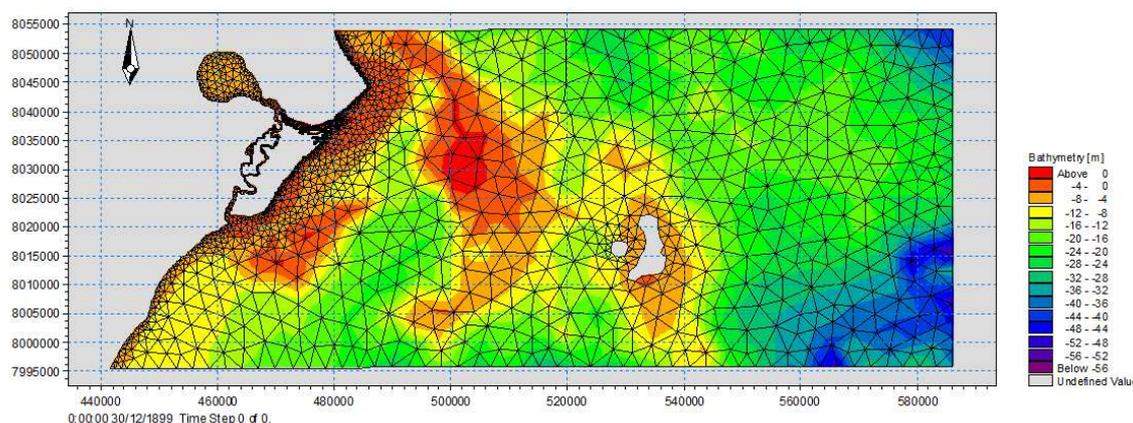


Figura 3.7: Malha computacional e batimetria para o módulo hidrodinâmico e de sedimentos

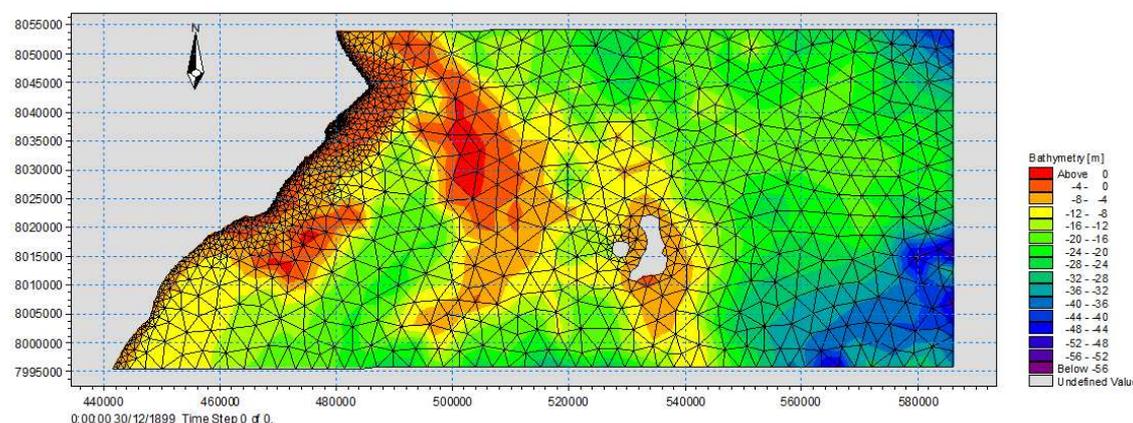


Figura 3.8: Malha computacional e batimetria para o módulo de ondas

3.4.2 Módulo de onda

O módulo de onda descreve o crescimento, decaimento e transformação das ondas geradas por vento e marulho (*swell*) em áreas costeiras e oceânicas. Os seguintes fenômenos físicos são incluídos: efeitos de refração e empinamento devido a variações batimétricas; geração de ondas devido ao vento, dissipação de energia devido ao atrito com o fundo, dissipação devido a quebra de onda induzida pelo fundo, interação não-linear entre ondas, dissipação devido a quebra da crista da onda por efeito do vento (*white-capping*), interação entre corrente e onda e efeito da variação temporal da profundidade da água (enchente e seca). Os dados básicos necessários para a implementação desse módulo são os dados batimétricos e a condição de contorno externa. A obtenção destes dados já foi descrita anteriormente nas seções 3.3.3 e 3.3.2. Neste módulo o parâmetro relevante para

o ajuste do modelo foi a fricção com o fundo, pois esta em áreas dominadas por areia, depende do tamanho do grão do sedimento e da presença de formas de fundo (Nielsen (1979); Raudkivi (1988)).

O MIKE21-SW é usado para avaliação do clima de ondas em áreas costeiras e oceânicas, nos modos de validação e previsão. O módulo de onda é também usado em conexão com o cálculo do transporte de sedimentos, o qual em grande parte é determinado pelas condições de onda e associado com as correntes induzidas pelas ondas. Estas correntes são geradas por gradientes na tensão radial que ocorrem na zona de surfe. Assim, o módulo de onda é usado para calcular as condições de ondas e as tensões radiais associadas.

3.4.3 Módulo hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico simula a variação do nível de água e de escoamento, em resposta a uma variedade de forçantes. Os níveis de água e escoamentos são analisados nos pontos de uma malha retangular que cobre a área de interesse. As condições iniciais para este módulo são: os dados topográficos (batimetria), coeficientes de atrito com o fundo, campos de ventos, maré e descarga fluvial.

A obtenção dos dados de batimetria, maré e descarga fluvial estão descritas nas seções 3.3.2 e 3.3.4, respectivamente. Os campos de ventos não foram incluídos na modelagem, pois não foram realizadas medidas de vento na região e os seus efeitos seriam desprezíveis na escala de abordagem. O coeficiente de atrito com fundo será definido de acordo com o número de Chézy variando através da grade do modelo e a viscosidade será dada de acordo com o coeficiente de Eddy variando também através da grade do modelo.

3.4.4 Módulo de transporte de sedimentos

O módulo de transporte de sedimentos avalia as taxas de transporte destes e relaciona as taxas de mudanças dos sedimentos não-coesivos do fundo devido à ação de correntes ou destas combinadas com a ação das ondas. O MIKE21-ST calcula as taxas de transporte em uma grade retangular cobrindo toda a área de interesse com base nos dados obtidos do módulo hidrodinâmico e os parâmetros de ondas calculados com o módulo de onda, em conjunto com as informações sobre as características do material de

fundo (características do sedimento). O modelo leva em conta a influência dos seguintes fenômenos na simulação das taxas de transporte: a) ação de correntes ou combinação destas com a ação das ondas, b) direção arbitrária de propagação das ondas com respeito à direção do escoamento, c) quebra e/ou não-quebra de ondas, d) grau e/ou uniformidade do material de fundo, e) situação do fundo (plano ou ondulado).

Os parâmetros básicos deste módulo são as características dos sedimentos e as forçantes como onda e corrente. Para as características dos sedimentos, estas foram obtidas de acordo com a seção 3.3.1 e os resultados obtidos foram plotados em um mapa contendo o tamanho do grão e o desvio padrão geométrico. As forçantes foram obtidas dos resultados do módulo hidrodinâmico e de onda. A resistência de fundo usada no módulo de sedimentos foi a mesma utilizada no módulo hidrodinâmico, com o número de Chézy variando através da grade do modelo de acordo com a profundidade (isto será explicado na seção 4.4.1).

3.4.5 Experimentos Numéricos

Para os experimentos numéricos foram realizados no total 14 condições diferentes, sendo que destes apenas 10 foram escolhidos. Essas condições incluem a combinação de diferentes condições dos processos costeiros atuantes afim de caracterizarmos os agentes responsáveis pelas mudanças geomorfológicas na região. As condições escolhidas incluem períodos de: quadratura em condições calmas (baixa energia de onda) e baixa descarga fluvial, condições de tempestades (alta energia de onda) e alta descarga do rio e condições calmas de onda porém com altura significativa e direção constantes e condições de tempestades também com onda constante; sizígia em condições iguais a da quadratura; e dois períodos de 16 dias com as condições correspondentes às campanhas de coletas de 2008 e 2007. Todas as condições descritas estão demonstradas na tabela 3.1 com os respectivos valores escolhidos.

Para as condições de onda constante, os valores foram retirados do banco de dados obtidos através do WAVEWATCHIII (seção 3.3.3), de maneira que, foi retirado o menor valor de H_{sig} e seu período correspondente para a condição calma e o maior valor para a condição de tempestade. As direções de menor e maior energia de onda foram obtidas através dos histogramas direcionais das características de onda, que serão

descritos nos resultados na seção 4.3. Para as condições calmas e de tempestades em que os valores de onda não são constantes, os valores foram também retirados do mesmo banco de dados, entretanto foram escolhidos através dos 12 anos de dados, séries temporais com maior energia de onda e menor energia, para representar um período de tempestade e de calma, respectivamente.

Tabela 3.1: Condições utilizadas nos experimentos de modelagem numérica

| Simulação | Maré (m) | Descarga (m^3/s) | Onda | | |
|-----------|----------------------|----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|
| | | | $H_{sig}(m)$ | T (s) | direção (°) |
| CALM-1Q | quadratura | 0.35 | 0.48 | 5.75 | 45 |
| CALM-2Q | quadratura | 0.35 | $0.55 < H < 2$ | $7.35 < T < 14.23$ | $66.5 < dir < 200.85$ |
| CALM-1S | sizígia | 0.35 | 0.48 | 5.75 | 45 |
| CALM-2S | sizígia | 0.35 | $0.55 < H < 2$ | $7.35 < T < 14.23$ | $66.5 < dir < 200.85$ |
| STORM-1Q | quadratura | 22.72 | 3.55 | 7.98 | 135 |
| STORM-2Q | quadratura | 22.72 | $2.14 < H < 4.79$ | $8.12 < T < 15.38$ | $81.24 < dir < 204.54$ |
| STORM-1S | sizígia | 22.72 | 3.55 | 7.98 | 135 |
| STORM-2S | sizígia | 22.72 | $2.14 < H < 4.79$ | $8.12 < T < 15.38$ | $81.24 < dir < 204.54$ |
| período08 | quadratura e sizígia | 3.61* | $1.21 < H < 1.89$ | $4.63 < T < 12.28$ | $40.71 < dir < 193.56$ |
| período07 | quadratura e sizígia | 2.38 | $1.33 < H < 2.72$ | $6.99 < T < 12.26$ | $87.61 < dir < 206.90$ |

*A coleta para caracterizar o período chuvoso na região, infelizmente, foi feita durante uma condição atípica, com pouca chuva.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Imagens de satélites

As imagens obtidas dos satélites LANDSAT e CBERS, conforme comentada na seção 3.1, foram utilizadas para a observação da evolução do pontal arenoso e da linha de costa adjacente ao pontal. A figura 4.1, apresenta a evolução temporal da linha de costa e do Pontal do Sul durante 10 anos, para os anos de 2002 e 2004, não foram obtidas as imagens, pois para 2002 não havia imagens para a região e em 2004 a região estava toda coberta de nuvens, não sendo possível a visualização do pontal. A linha de 1984, serviu como base para os outros anos.

Observou-se que o pontal arenoso, ao longo dos anos analisados (Figuras 4.2 e 4.3), apresenta uma tendência de crescimento de sua extremidade em direção ao nordeste. Entre 1997 e 1984, ou seja, entre 13 anos, o pontal teve uma acresção de sua extremidade, um afinamento na sua largura e erosão em sua base. Ao longo dos anos, observou-se uma tendência de erosão na parte voltada para o oceano, deposição na parte voltada para a Barra Velha e erosão da base voltada para a Ilha da Caçumba. Nota-se, que ao longo do tempo, a extremidade do pontal tem encurvado-se para noroeste.

Na linha de costa oposta a base do pontal, ou seja, localizada na Ilha da Caçumba, observou-se que entre 1984 e 1997 ocorreu uma regressão da costa voltada para oceano e o deslocamento do canal, que vai em direção ao interior da ilha, para o norte. Entre os anos de 1997, 1998 e 1999 o padrão da linha de costa manteve-se o mesmo. Para os anos de 2000 e 2001, em relação aos anteriores, ocorreu a volta do canal para a mesma posição de

1984 e notou-se uma pequena regressão da ponta da ilha voltada para o Canal do Tomba. Nos anos de 2003, 2004 e 2006, observou-se novamente um recuo um pouco maior da ponta da ilha em relação aos anos anteriores e finalmente nos anos de 2007 e 2008 este recuo foi mais intenso tanto na ponta da Ilha quanto na linha de costa voltada para o oceano. Na costa oposta ao pontal arenoso, não foram observadas mudanças significativas entre os anos analisados.

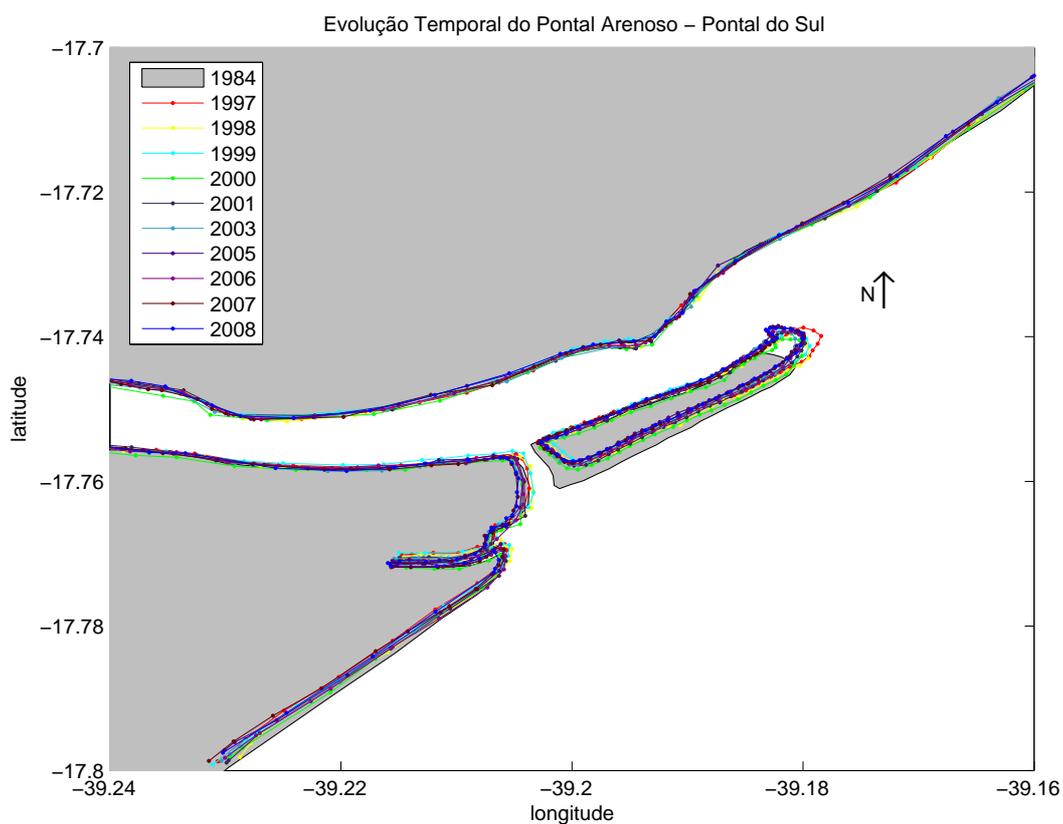


Figura 4.1: Evolução temporal do pontal arenoso e da linha de costa adjacente, com todos os anos juntos.

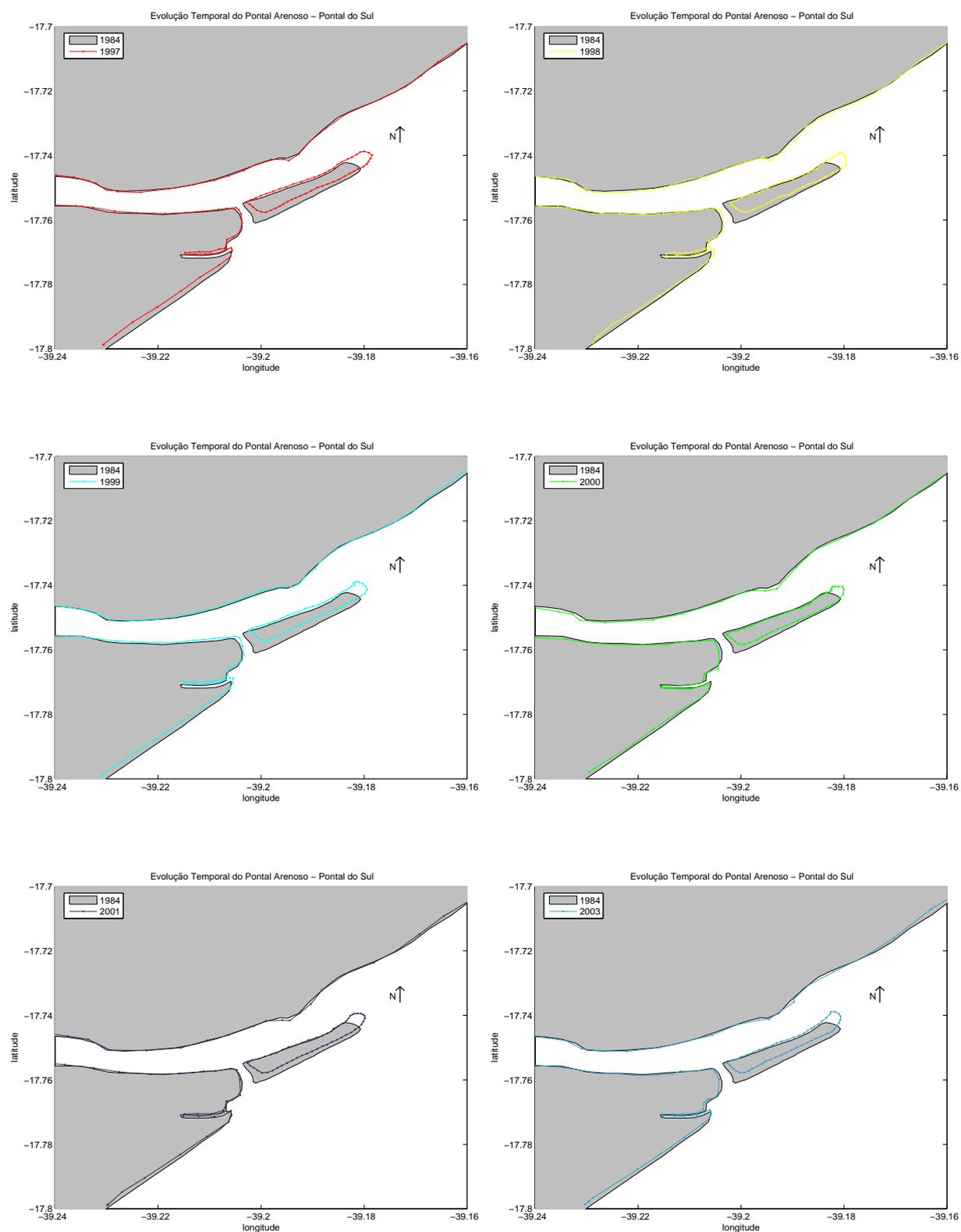


Figura 4.2: Evolução temporal do pontal arenoso e da linha de costa adjacente para os anos de 1997 a 2003.

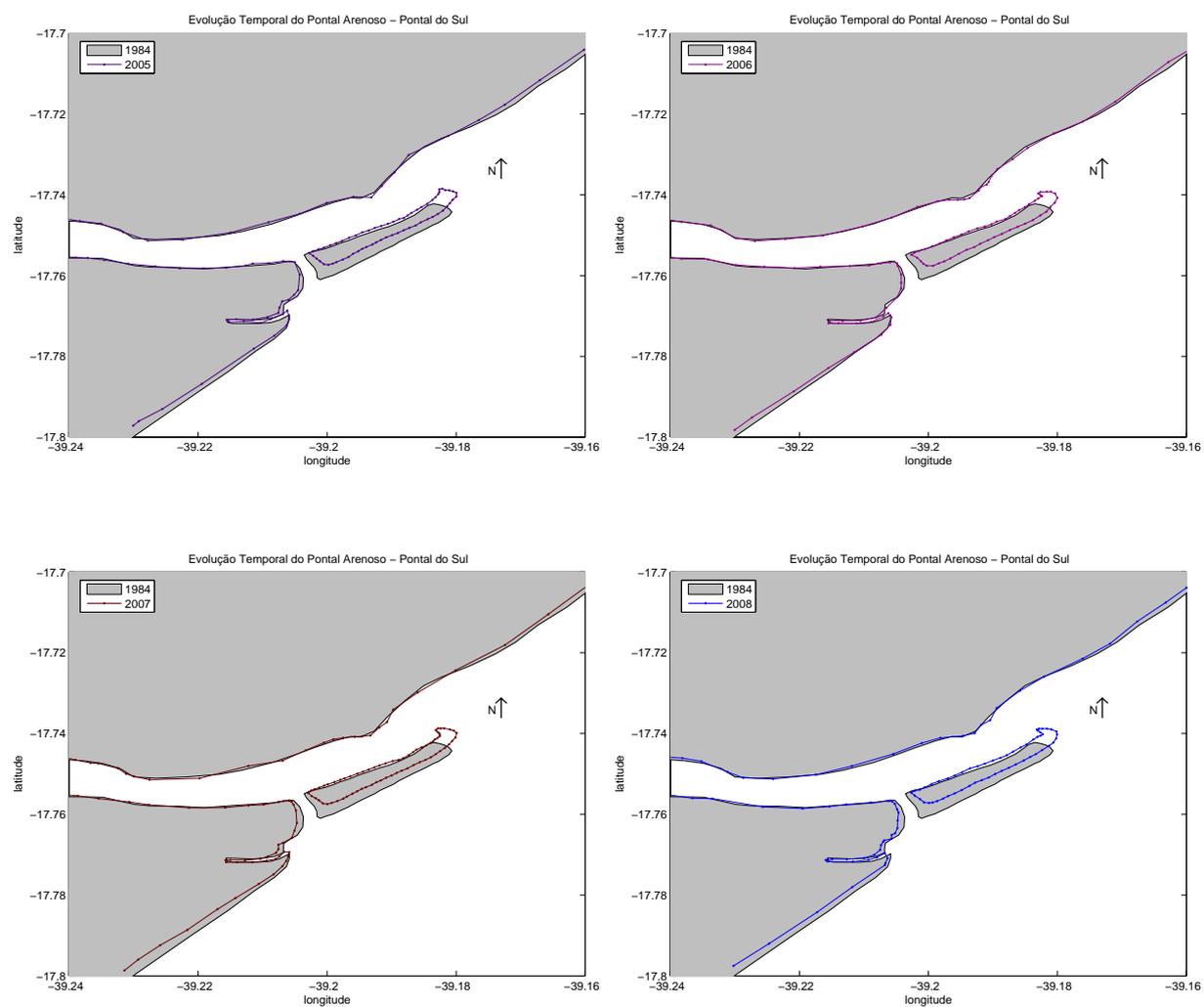
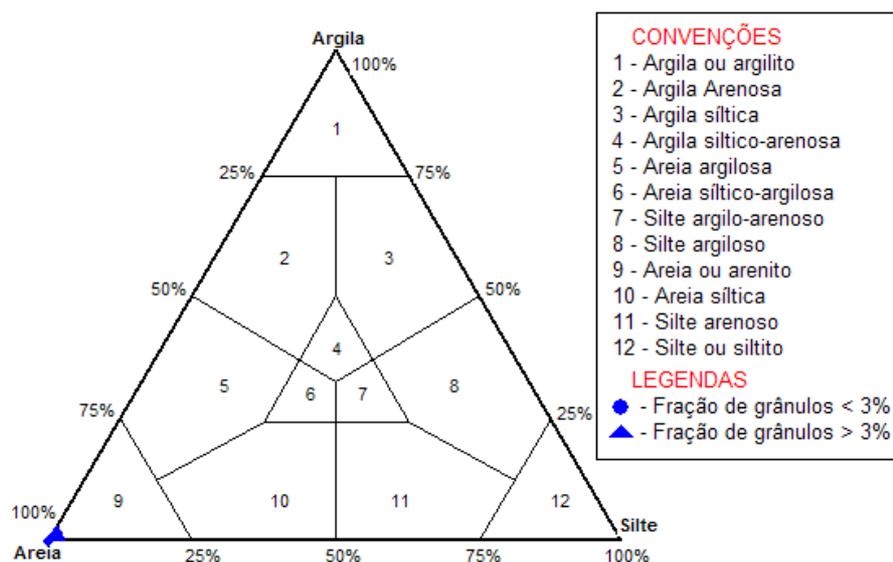


Figura 4.3: Evolução temporal do pontal arenoso e da linha de costa adjacente para os anos de 2005 a 2008.

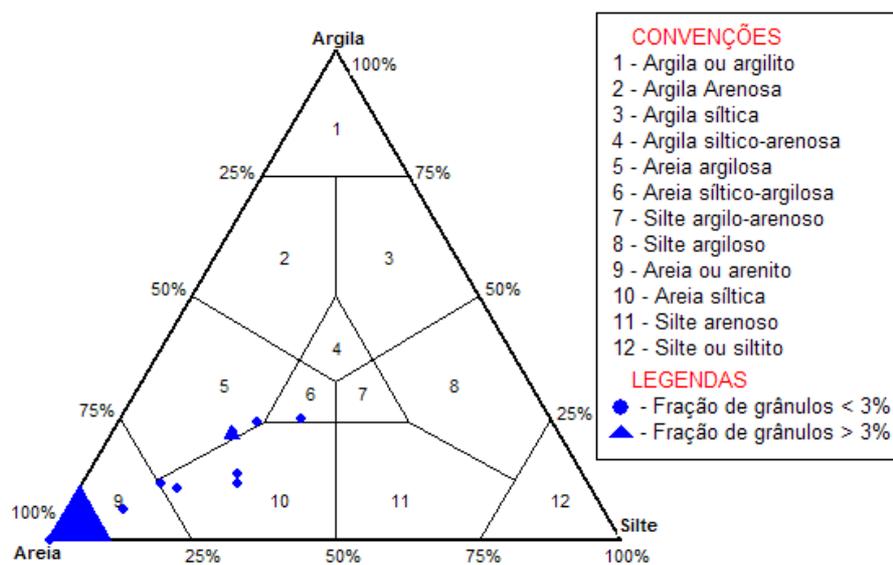
4.2 Sedimentologia

Os parâmetros estatísticos obtidos através da utilização do programa SYSGRAN3 (Camargo, 2005), como comentado na seção 3.3.1, estão representados nas tabelas 4.1 e 4.2. Através destas tabelas, observou-se que a distribuição espacial do tamanho médio de grão das amostras variou de areia grossa (0.5mm) à silte médio (0.02mm). O selecionamento das amostras variou de muito pobremente selecionado até muito bem selecionado, sendo que a maioria das amostras foram moderadamente selecionadas (0.5 a 1). Em relação à assimetria a maioria das amostras foram aproximadamente simétricas (-0.10 a +0.10) ou assimetria positiva (+0.10 a +0.30), esta assimetria positiva indica uma desvio tendente para os grãos finos.

A distribuição das amostras no diagrama de Shepard (1954) (Figura 4.4) mostrou a existência de apenas uma classe predominante, a classe das areias, nas amostras coletadas em janeiro que estão localizadas nas praias adjacentes à desembocadura e no pontal arenoso. Já nas amostras coletadas dentro do canal principal, porém localizadas nos arredores da desembocadura, notou-se a presença de areia siltica, areia argilosa e areia siltico-argilosa.



(a) amostras de janeiro 2008



(b) amostras de outubro 2008

Figura 4.4: Diagramas de Shepard, gerados pelo programa Sysgran, mostrando a distribuição das amostras de sedimento coletadas.

Tabela 4.1: Resultados das análises estatísticas baseados em Folk & Ward (1957) das 11 amostras coletadas em janeiro de 2008. Os valores obtidos estão em milímetros.

| Amostra | Média | d_{50} | d_{84} | d_{16} | Descrição | | | |
|---------|-------|----------|----------|----------|--------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| | | | | | Classe | Seleção | Assimetria | Agudez |
| 1 | 0,54 | 0,56 | 0,41 | 0,67 | areia grossa | muito bem selecionado | positiva | mesocúrtica |
| 2 | 0,49 | 0,48 | 0,37 | 0,64 | areia média | bem selecionado | aproximadamente simétrica | mesocúrtica |
| 3 | 0,59 | 0,59 | 0,49 | 0,70 | areia grossa | muito bem selecionada | aproximadamente simétrica | leptocúrtica |
| 4 | 0,54 | 0,70 | 0,20 | 1,16 | areia grossa | pobrememente selecionado | muito positiva | muito leptocúrtica |
| 5 | 0,64 | 0,81 | 0,25 | 1,31 | areia grossa | pobrememente selecionado | muito positiva | muito leptocúrtica |
| 6 | 0,47 | 0,61 | 0,14 | 1,25 | areia média | pobrememente selecionado | positiva | muito platicúrtica |
| 7 | 0,20 | 0,20 | 0,14 | 0,29 | areia fina | moderadamente selecionado | aproximadamente simétrica | mesocúrtica |
| 8 | 0,19 | 0,19 | 0,13 | 0,28 | areia fina | moderadamente selecionado | aproximadamente simétrica | leptocúrtica |
| 9 | 0,52 | 0,55 | 0,28 | 0,90 | areia grossa | moderadamente selecionado | positiva | leptocúrtica |
| 10 | 0,14 | 0,13 | 0,10 | 0,24 | areia fina | moderadamente selecionado | muito negativa | muito leptocúrtica |
| 11 | 0,69 | 0,65 | 0,51 | 0,99 | areia grossa | moderadamente selecionado | negativa | leptocúrtica |

Tabela 4.2: Resultados das análises estatísticas baseados em Folk & Ward (1957) das 22 amostras coletadas em outubro de 2008. Os valores obtidos estão em milímetros.

| Amostra | Média | d_{50} | d_{84} | d_{16} | Descrição | | | |
|---------|-------|----------|----------|----------|------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|
| | | | | | Classe | Seleção | Assimetria | Agudez |
| 1 | 0,73 | 0,74 | 0,45 | 1,17 | areia grossa | moderadamente selecionado | aproximadamente simétrica | leptocúrtica |
| 2 | 0,24 | 0,18 | 0,10 | 0,78 | areia fina | pobrememente selecionado | muito negativa | platicúrtica |
| 4 | 0,35 | 0,33 | 0,13 | 1,00 | areia média | pobrememente selecionado | negativa | platicúrtica |
| 5 | 0,47 | 0,48 | 0,31 | 0,70 | areia média | moderadamente selecionado | aproximadamente simétrica | Leptocúrtica |
| 6 | 0,33 | 0,31 | 0,21 | 0,54 | areia média | moderadamente selecionado | negativa | platicúrtica |
| 8 | 0,65 | 0,68 | 0,40 | 1,00 | areia grossa | moderadamente selecionado | positiva | leptocúrtica |
| 9 | 0,27 | 0,23 | 0,11 | 0,80 | areia média | pobrememente selecionado | negativa | platicúrtica |
| 10 | 0,58 | 0,57 | 0,38 | 0,91 | areia grossa | moderadamente selecionado | negativa | leptocúrtica |
| 11 | 0,65 | 0,66 | 0,39 | 1,06 | areia grossa | moderadamente selecionado | aproximadamente simétrica | mesocúrtica |
| 12 | 0,32 | 0,31 | 0,21 | 0,52 | areia média | moderadamente selecionado | negativa | leptocúrtica |
| 13 | 0,85 | 0,93 | 0,37 | 1,81 | areia grossa | pobrememente selecionado | positiva | platicúrtica |
| 39 | 0,44 | 0,48 | 0,25 | 0,70 | areia média | moderadamente selecionado | positiva | mesocúrtica |
| 40 | 0,04 | 0,09 | 0,00 | 0,13 | silte grosso | muito pobrememente selecionado | muito positiva | platicúrtica |
| 41 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,13 | silte médio | muito pobrememente selecionado | positiva | muito platicúrtica |
| 42 | 0,07 | 0,13 | 0,01 | 0,21 | areia muito fina | muito pobrememente selecionado | muito positiva | leptocúrtica |
| 44 | 0,14 | 0,13 | 0,10 | 0,22 | areia fina | moderadamente selecionado | muito negativa | muito leptocúrtica |
| 45 | 0,05 | 0,09 | 0,01 | 0,15 | silte grosso | muito pobrememente selecionado | muito positiva | leptocúrtica |
| 46 | 0,03 | 0,07 | 0,00 | 0,14 | silte médio | muito pobrememente selecionado | muito positiva | muito platicúrtica |
| 47 | 0,15 | 0,16 | 0,07 | 0,34 | areia fina | pobrememente selecionado | positiva | muito leptocúrtica |
| 48 | 0,33 | 0,33 | 0,13 | 0,83 | areia média | pobrememente selecionado | aproximadamente simétrica | platicúrtica |
| 49 | 0,06 | 0,09 | 0,00 | 0,61 | silte grosso | muito pobrememente selecionado | positiva | platicúrtica |
| 50 | 0,05 | 0,10 | 0,01 | 0,14 | silte grosso | pobrememente selecionado | muito positiva | mesocúrtica |

A figura 4.5, mostra a distribuição dos sedimentos na área de estudo. Pode-se notar que nas praias adjacentes e ao redor do pontal arenoso os sedimentos foram constituídos de areia grossa à média. Na desembocadura teve-se a presença de sedimentos desde areia fina até silte médio, sendo que no Canal do Tomba e na Barra Velha (nas duas saídas da desembocadura) notou-se a presença de areia fina e nos primeiros quilômetros do canal, silte médio. Logo após o silte médio, observou-se a presença de areias novamente.

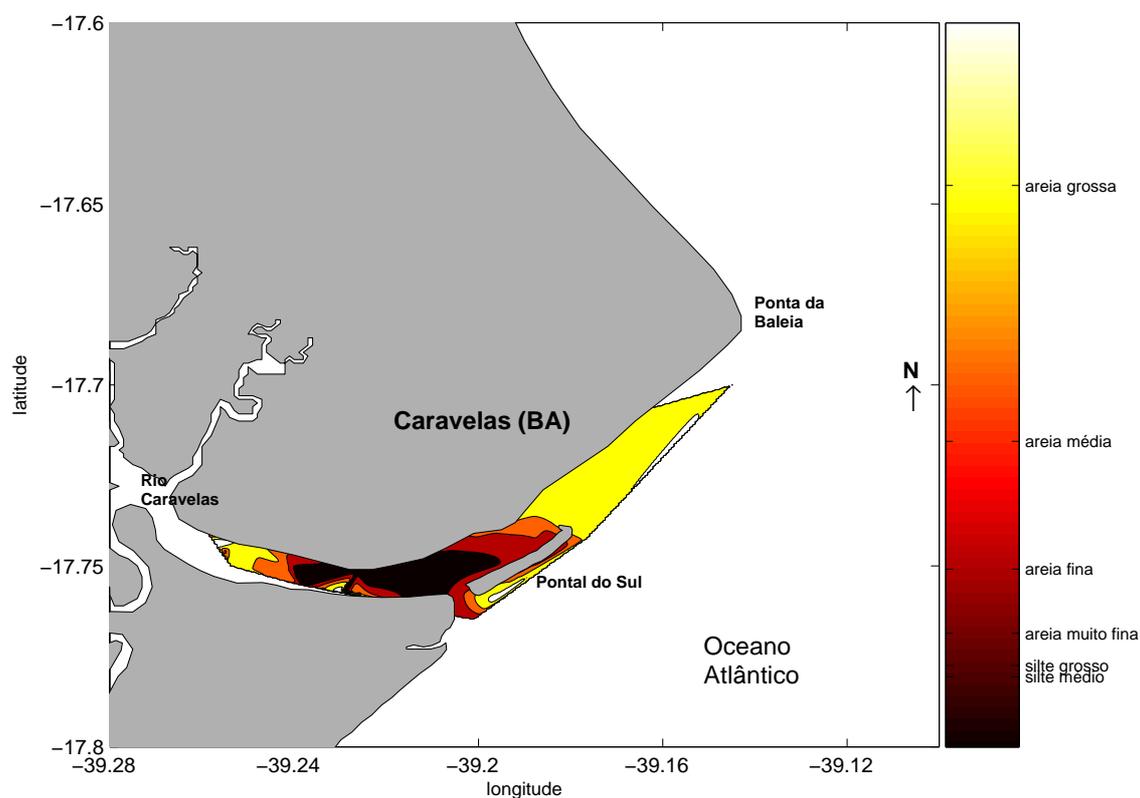


Figura 4.5: Mapa da distribuição granulométrica dos sedimentos na área de estudo.

4.3 Clima de ondas

O clima de ondas como mencionado na seção 3.3.3, foi obtido do modelo WAVE-WATCHIII da NOAA. A figura 4.6, mostra a altura e o período de onda para a região em doze anos de dados, retirados do ponto do modelo mais próximo à costa (Figura 2.1 - página 13). Observou-se que na região o clima de ondas predominante foram as ondas vindas de leste, nordeste e sudeste.

A presença das ondas de leste e nordeste, durante o ano todo ao longo da costa da Bahia, é devido aos ventos alíseos ocasionados pela célula Anti-ciclônica do Atlântico Sul, e portanto as ondas geradas por esses ventos influenciam fortemente os processos costeiros na região de estudo. Pela figura, notou-se que as alturas e períodos predominantes dessas ondas são de 1 m até 2 m e 6 s até 8 s para as ondas de leste e 1 m até 1.5 m e 3 s até 5 s para as ondas de nordeste. As ondas propagadas de sudeste, foram as segundas em importância na região, e são ocasionadas devido ao avanço periódico de massas de ar polar. Essas ondas, foram as mais energéticas com alturas de 1.5 m até 3 m e períodos que vão de 6 s até 13 s. Devido à essa variação sazonal no regime de ondas, ocorre uma sazonalidade também no transporte de sedimentos, com reversões ao longo da costa.

A figura 4.7 apresenta o regime de ondas sazonal para altura e período, em doze anos de dados na região. Notou-se a presença das ondas de leste, em todas as épocas do ano. No outono e inverno, observou-se a presença das ondas de sudeste, e na primavera e verão a presença das ondas de nordeste.

A figura 4.8 apresenta a distribuição da altura e período de onda, plotados juntos. Através dessa figura, pode-se observar qual é o intervalo de altura e período em que as ondas na região de estudo estão concentradas. Dessa forma para a região, as alturas de ondas estão concentradas no intervalo de 1 m a 2 m e para o período de 5s a 8s. As figuras 4.9 e 4.10, representam a variação anual e mensal, respectivamente, da força da onda (*wave power*) ao longo de 12 anos na região de estudo. A força da onda (P) é a taxa na qual a energia é fornecida à um local particular, uma praia por exemplo, sendo o produto entre a velocidade de grupo (c_g) e a energia de onda (E), calculada a partir da equação:

$$P = \frac{(\rho g^2 H^2 T)}{32\pi} \quad (4.1)$$

onde ρ é a densidade da água (1027 Kg/m^3), g é a aceleração devido a gravidade, H é a altura da onda (m) e T é o período da onda (s). P é dado em W/m .

Pela figura 4.9, notou-se que os anos que tiveram maior energia foram 1997, 1999, 2005, 2006 e 2007, alcançando máximos de $11 \times 10^5 W/m$, $10.5 \times 10^5 W/m$, $9.8 \times 10^5 W/m$, $10 \times 10^5 W/m$, $10.3 \times 10^5 W/m$, respectivamente. Os anos que tiveram menor energia foram 1998, 2000, 2002 e 2003, alcançando máximos de $6.2 \times 10^5 W/m$, $7 \times 10^5 W/m$, $6.7 \times 10^5 W/m$, $7 \times 10^5 W/m$, respectivamente. A média de energia de onda para a região no período considerado foi de $1.8 \times 10^5 W/m$. Na figura 4.10, observou-se que o período onde ocorreu a maior energia de onda na região, foram os meses relacionados ao outono e inverno (de maio a agosto), exatamente quando os sistemas frontais são mais frequentes na costa brasileira.

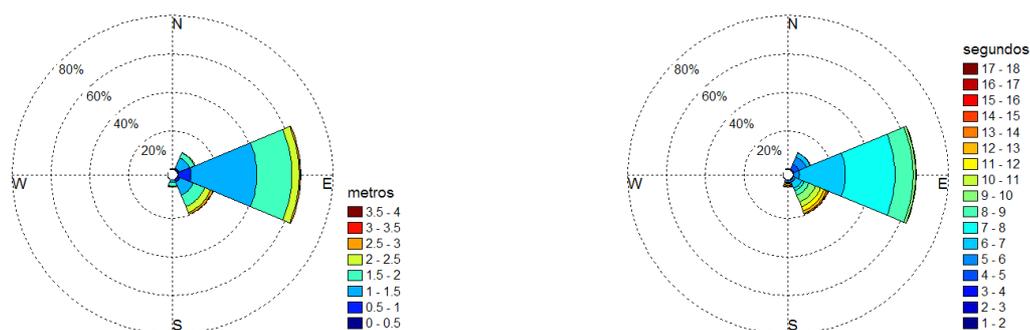


Figura 4.6: Histogramas direcionais do clima de ondas para a região de estudo entre os anos de 1997 a 2008.

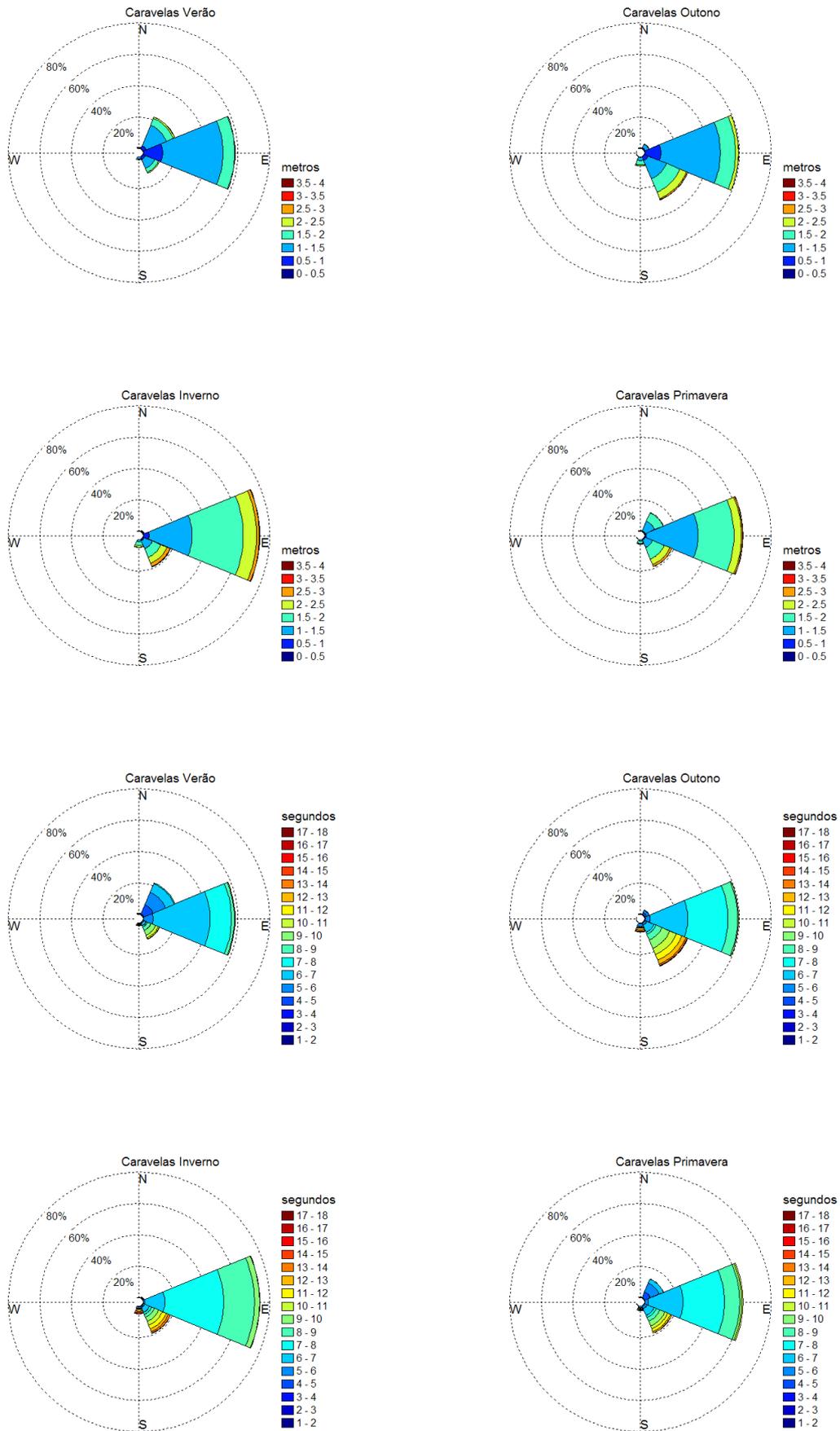


Figura 4.7: Histogramas direcionais sazonais das alturas e dos períodos de onda na região de estudo entre os anos de 1997 a 2008.

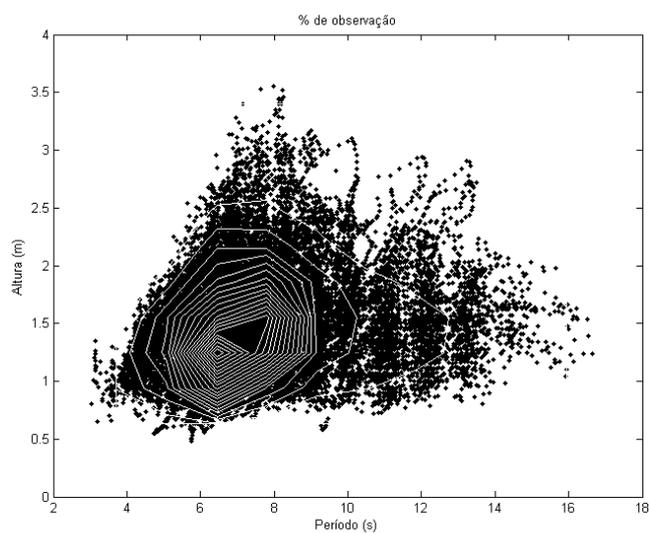


Figura 4.8: Distribuição combinada de altura e período da onda, entre os anos de 1997 a 2008, com os contornos de porcentagem de ocorrência. Estes estão representados em intervalos de 1%.

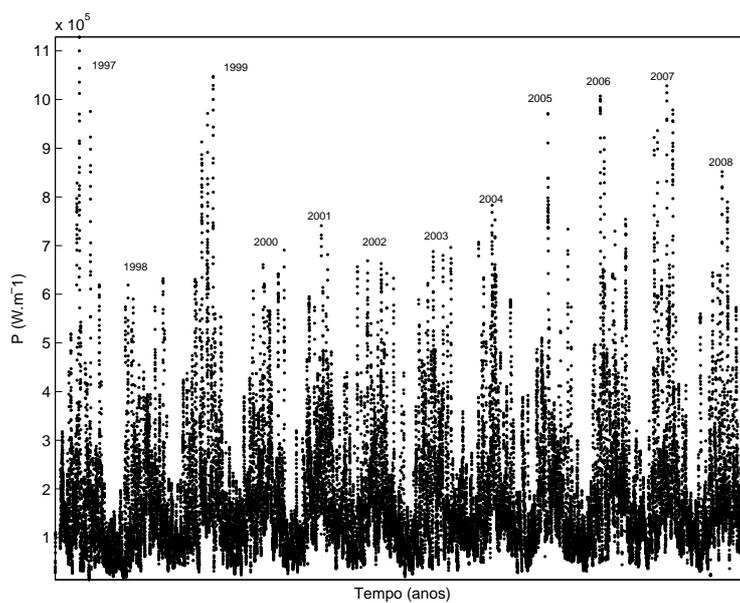


Figura 4.9: Variação anual da energia de onda (P) baseada em 12 anos de dados.

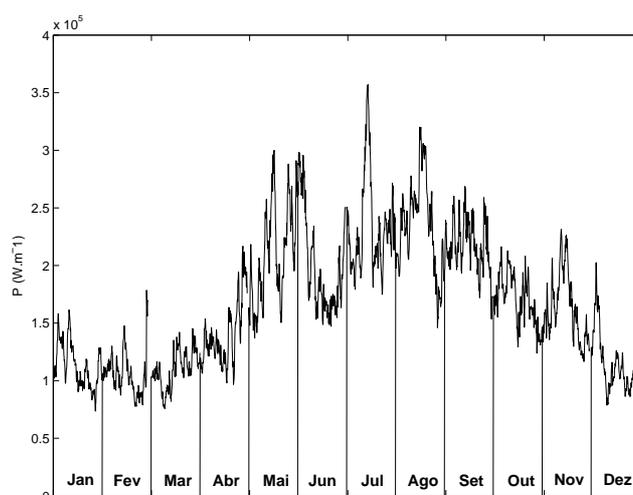


Figura 4.10: Variação mensal da energia de onda (P) baseada em 12 anos de dados.

4.4 Aplicação do modelo numérico

4.4.1 Calibração e Validação do modelo

Para que a modelagem numérica seja uma ferramenta válida, é necessário que haja uma calibração e validação com dados medidos ou observados para qualquer modelo numérico utilizado. Tipicamente, a calibração e validação de um modelo é feita utilizando-se uma comparação qualitativa com séries temporais de dados de maré ou velocidades produzidas pela modelagem numérica com dados medidos no mesmo local e período de tempo (Cheng *et al.*, 1993) e uma comparação quantitativa através dos cálculos do erro absoluto médio relativo (RMAE). Portanto, neste trabalho, a análise qualitativa dos dados modelados contra os dados medido foi feita através da visualização e comparação de séries temporais das variações do nível da água e das velocidades das correntes e para a análise quantitativa dos dados modelados contra os dados medidos foi aplicado o erro absoluto médio relativo (RMAE)(Sutherland *et al.* (2001); Van-Rijn *et al.* (2003)).

A calibração foi considerada como o processo de ajuste do modelo para obter resultados que reproduzam da melhor maneira possível as observações e a validação foi a aplicação destes ajustes do modelo sobre diferentes períodos para verificar sua validade. A calibração e a validação, propriamente ditas, foram feitas apenas no módulo

hidrodinâmico, entretanto para o módulo de onda foi feita uma comparação dos dados modelados do MIKE21 com os dados obtidos por Lessa *et al.* (2005). Para os dados hidrodinâmicos, os dados modelados foram comparados com os dados obtidos nas duas campanhas de coletas (seção 3.2).

O erro absoluto médio relativo (RMAE)(Sutherland *et al.* (2001); Van-Rijn *et al.* (2003)) é baseado nos valores absolutos médios das correntes modeladas e medidas. O valor absoluto médio do dados medidos(X) e modelados (Y) é dado por:

$$MAX = \langle |X| \rangle \quad (4.2)$$

e

$$MAY = \langle |Y| \rangle \quad (4.3)$$

onde $\langle \rangle$ denota uma média e $||$ é o módulo de X e de Y . O erro médio absoluto é:

$$MAE = \langle |Y - X| \rangle \quad (4.4)$$

E finalmente a qualidade dos resultados modelados é dada pelo erro absoluto médio relativo (RMAE):

$$RMAE = \frac{\langle |Y - X| - ME \rangle}{\langle |X| \rangle} \quad (4.5)$$

onde o ME é o erro do equipamento utilizado nas medições *in situ*. Os erros dos equipamentos usados nas coletas de dados foram retirados dos manuais dos fabricantes. Assim, para os ADCP's da Nortek e da Sontek o erro é 0.005 m/s ; para os correntômetros da Valeport o erro dos equipamentos varia de acordo com um intervalo de velocidades: se a velocidade média está entre 0.15 m/s e 5 m/s o erro é $< 1.5\%$ da leitura e se a velocidade média for de 0.1 m/s a 0.15 m/s o erro é 0.002 m/s ; para o equipamento CTD XBR (aqui incluímos os dados de maré) o erro é de 0.05 .

É importante ressaltar que a diferença absoluta entre os valores medidos e modelados menos o erro ($\langle |Y - X| - ME \rangle$) não poderá ser negativa. Se, por acaso, esta diferença for negativa dizemos então que é igual a zero, e portanto tem-se uma combinação perfeita entre os dados modelados e medidos, pois se o resultado for igual a zero,

significa que os valores computados estão dentro da banda de erro dos dados medidos (Van-Rijn *et al.*, 2003). Os valores de RMAE obtidos para este estudo foram analisados de acordo com Van-Rijn *et al.* (2003), seguindo a tabela 4.3.

Tabela 4.3: Qualificação dos intervalos de RMAE para velocidade baseados em Van-Rijn *et al.* (2003).

| Qualificação | Velocidade |
|--------------|------------|
| excelente | < 0.1 |
| bom | 0.1 - 0.3 |
| razoável | 0.3 - 0.5 |
| pobre | 0.5 - 0.7 |
| ruim | > 0.7 |

4.4.2 Módulo Hidrodinâmico

Os principais fatores de calibração utilizados na presente aplicação foram a resistência do fundo e o coeficiente de viscosidade (Eddy). Estes fatores foram avaliados através da combinação de diferentes valores e os resultados avaliados através da comparação de séries temporais e dos RMAE obtidos. Cada parâmetro foi ajustado separadamente, com o coeficiente de viscosidade mantido constante enquanto a resistência de fundo era ajustada e vice-versa.

Os períodos de calibração incluem dois períodos de 16 dias (campanhas de 2008 e de 2007), em dois pontos do estuário correspondendo as estações A e C conforme localizadas na Figura 3.1 (página 23). Foram feitas 6 tipos de combinações diferentes apresentadas na tabela 4.4. A escolha de variar o número de Chézy através do domínio do modelo com baixos valores de resistência nas regiões profundas e altos valores nas regiões mais rasas, assim como a escolha dos valores de $0.16 \text{ m}^2/\text{s}$ dentro do estuários e regiões próximas e $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ nas regiões oceânicas para o coeficiente de Eddy, foram retirados de Siegle (2003).

Tabela 4.4: Experimentos feitos para a calibração dos parâmetros viscosidade e resistência do fundo no módulo hidrodinâmico.

| Experimentos | Viscosidade | Resistência do Fundo |
|--------------|---|---|
| 1 | Smagorinsky = 0.28 | Manning = $32 m^{\frac{1}{3}}/s$ |
| 2 | Eddy = $0.002 m^2/s$ | Chézy = $34 m^{\frac{1}{2}}/s$ |
| 3 | Eddy = $0.002 m^2/s$ | Chézy = $32 m^{\frac{1}{2}}/s$ |
| 4 | Smagorinsky = 0.28 | Chézy = $32 m^{\frac{1}{2}}/s$ |
| 5 | Eddy E = $0.16 m^2/s$, O = $0.5 m^2/s$ | Chézy = $32 m^{\frac{1}{2}}/s$ |
| 6 | Eddy E = $0.16 m^2/s$, O = $0.5 m^2/s$ | Chézy R = $32 m^{\frac{1}{2}}/s$, F = $38 m^{\frac{1}{2}}/s$ |
| 7 | Eddy E = $0.16 m^2/s$, O = $0.5 m^2/s$ | Chézy = $25 m^{\frac{1}{2}}/s$ |

E = estuário, O = oceânicas, R = regiões rasas e F regiões fundas.

O dados medidos de maré e altura de onda, que foram utilizados para calibrar o modelo, estão representados na figura 4.11, para o ano de 2007 e na figura 4.12 para o ano de 2008. As séries temporais para os dados de maré e os dados de corrente do experimento escolhido, estão representados nas figuras 4.13 e 4.14.

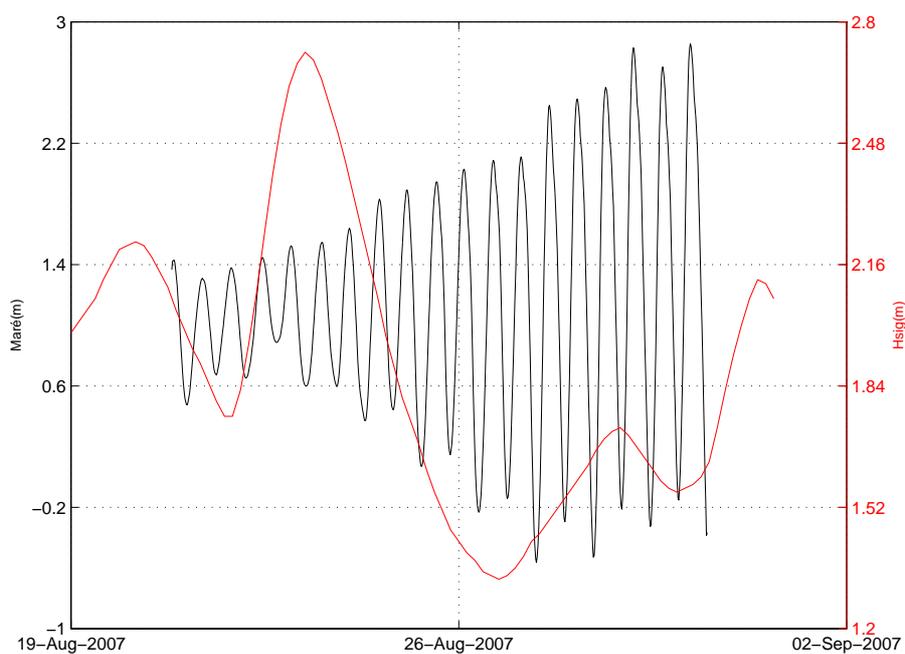


Figura 4.11: Dados para maré observada e altura de onda (NWW3) da campanha 2007.

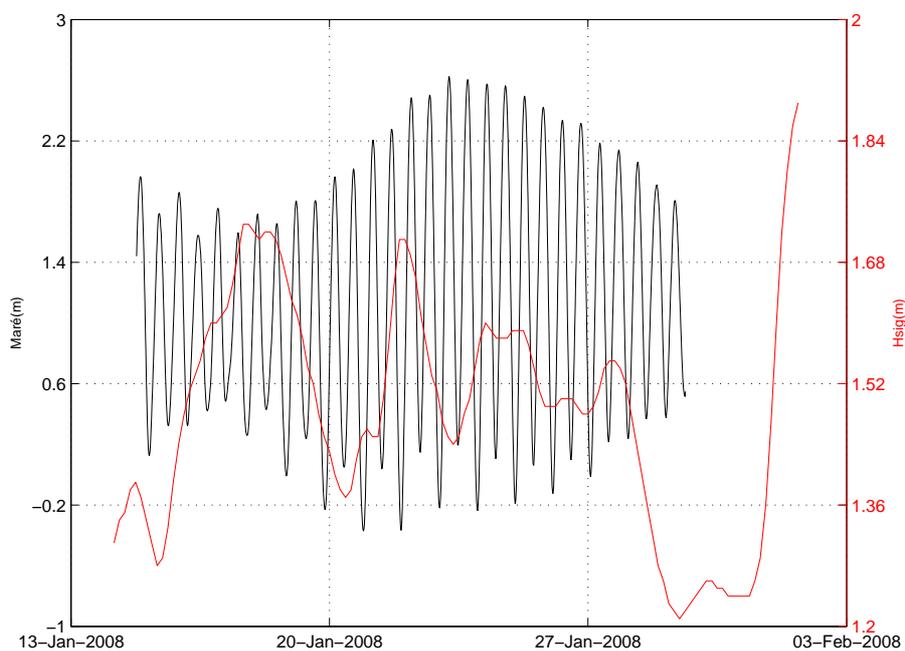


Figura 4.12: Dados para maré observada e altura de onda (NWW3) da campanha 2008.

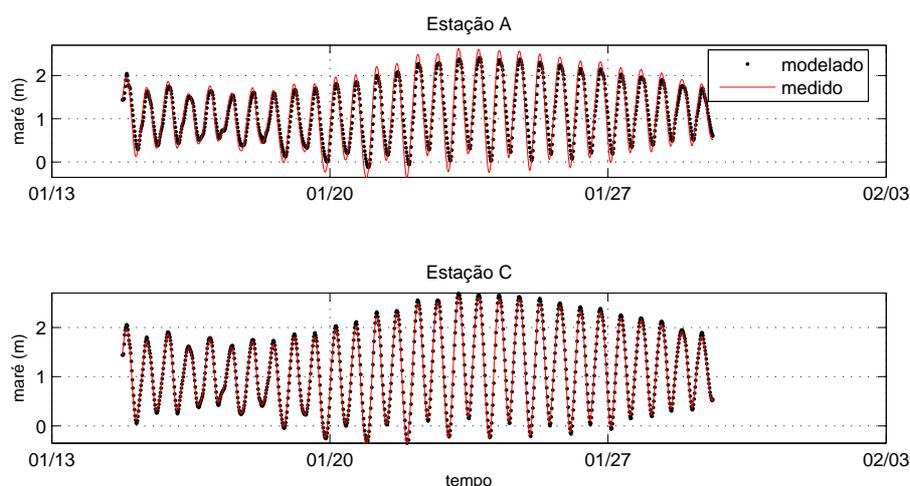


Figura 4.13: Séries temporais dos dados de maré para o experimento escolhido referente a campanha de 2008, nas estações A e C, respectivamente.

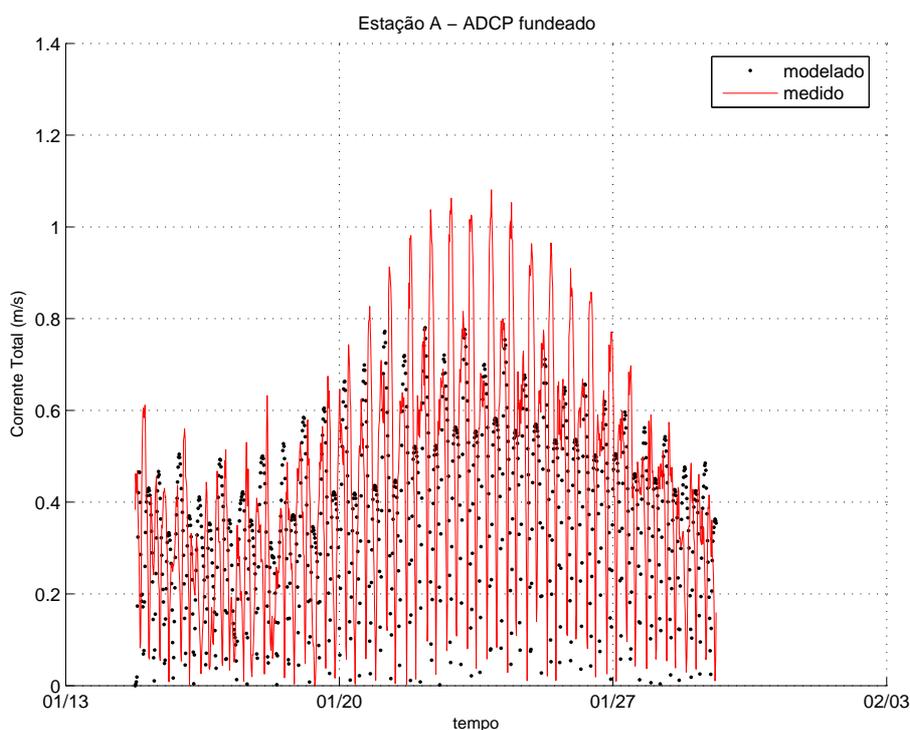


Figura 4.14: Séries temporais dos dados de corrente para o experimento escolhido referente a campanha de 2008, na estação A durante 16 dias.

Observando a figura 4.13, notou-se que a maré foi bem representada pelo modelo nas estações A e C. Para os dados de corrente (obtida apenas para a estação A), observou-se que o modelo, de uma forma geral, reproduziu as velocidades. Contudo, as velocidades máximas em relação aos valores medidos foram subestimadas. O fato da corrente não ter

sido bem representada em relação as velocidades máximas dentro do estuário, é devido a resolução da grade do modelo, que em alguns pontos pode não cobrir as características batimétricas de pequena escala, uma vez que o ambiente estudado possui uma complexa batimetria, com muitos bancos rasos tanto na costa quanto dentro dos canais estuarinos e portanto tendo um padrão hidrodinâmico complexo, podendo gerar erros nas medidas.

Para a análise quantitativa, ou seja, através do cálculo dos RMAEs, o resultado está representado na tabela 4.5. Observou-se novamente que a maré foi muito bem representada pelo modelo, tendo qualificação excelente para ambas estações. E para a corrente medida na estação A, durante os 16 dias de coleta, apresentou o valor, de acordo com Van-Rijn *et al.* (2003), de qualificação excelente.

Tabela 4.5: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de maré e velocidade total para o experimento de calibração para o ano de 2008 durante o período de 16 dias, nas estações A e C.

| Período 16 dias | Maré | Qualificação | Velocidade | Qualificação |
|-----------------|--------|--------------|------------|--------------|
| A | 0.0052 | excelente | 0.1817 | bom |
| C | 0.0177 | excelente | - | - |

A série temporal para os dados de maré para o experimento escolhido durante o período de 2007, está representada na figura 4.15. As séries temporais das correntes estão representadas nas figuras 4.16 e 4.17 também para o período de 2007. É importante ressaltar que, os dados do fundeio de ADCP na estação A foram perdidos para esta campanha, pois o equipamento apresentou um problema durante as coletas. Dessa maneira, para a comparação entre os dados de corrente, foram utilizados os dados medidos nas estações sinóticas de 13hs para cada estação.

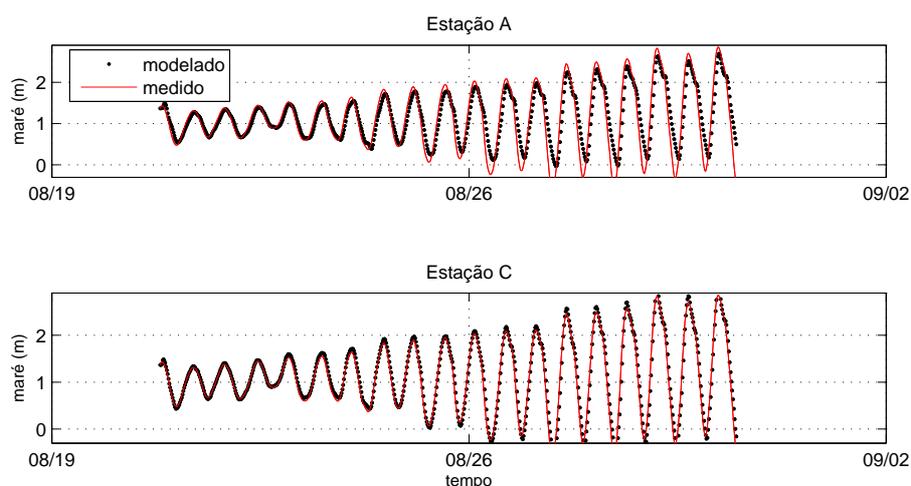


Figura 4.15: Séries temporais dos dados de maré para o experimento escolhido referente a campanha de 2007, nas estações A e C, respectivamente.

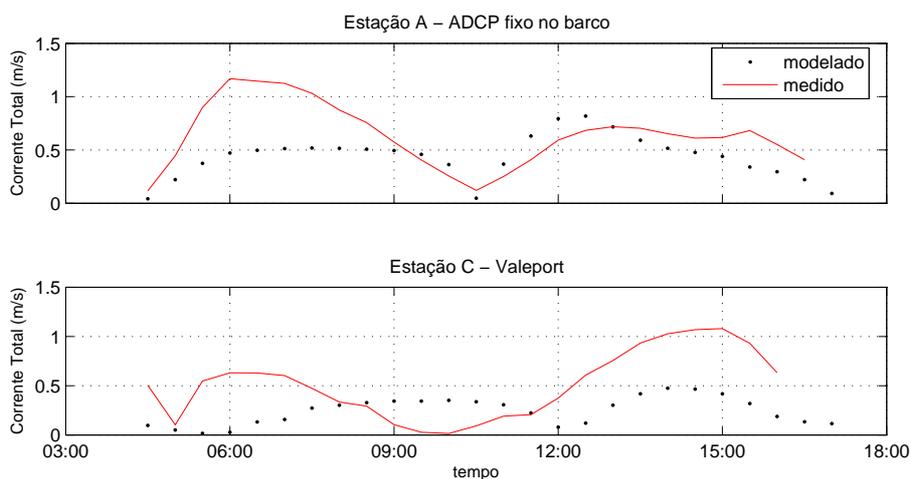


Figura 4.16: Séries temporais dos dados de corrente transversal para o experimento escolhido durante a máxima da sizígia (13hs) referente a campanha de 2007, nas estações A e C, respectivamente.

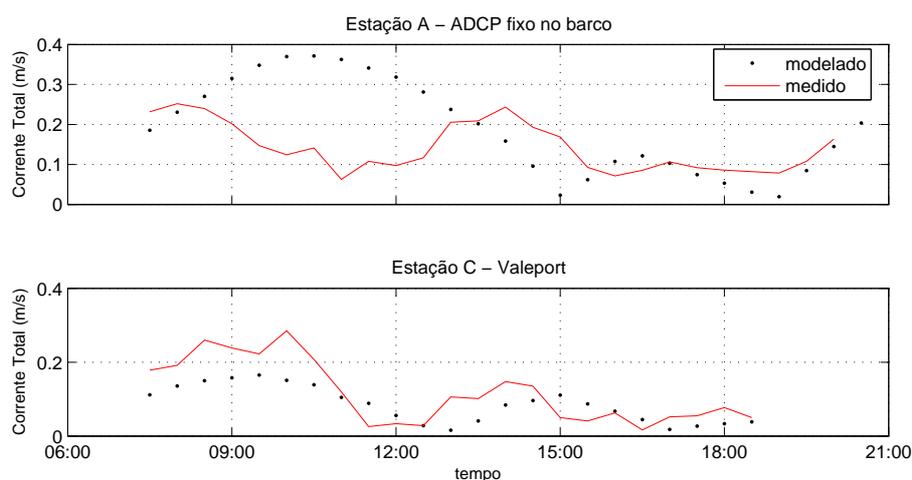


Figura 4.17: Séries temporais dos dados de corrente transversal para o experimento escolhido durante a máxima da quadratura (13hs) referente a campanha de 2007, nas estações A e C, respectivamente.

Observando a figura 4.15 para o período de 2007, notou-se que a maré foi novamente muito bem representada para o experimento pelo modelo. Para a corrente, o modelo subestimou as velocidades tanto para a sizígia quanto para a quadratura. A corrente na estação C foi melhor representada do que na estação A. Pelo fato da estação C estar localizada em uma região menos abrigada (próxima à desembocadura do Rio Peruípe) as correntes são melhores representadas do que na estação A que está localizada dentro do estuário do rio Caravelas onde o gradiente batimétrico e o padrão hidrodinâmico são mais complexos.

As tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, mostram os resultados para a análise quantitativa deste período de calibração. As correntes para os períodos de quadratura e sizígia, variaram de bom a razoável, dependendo do caso. Para a maré, o modelo apresentou o valor, de acordo com Van-Rijn *et al.* (2003), de qualificação excelente.

Tabela 4.6: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de velocidade para os experimentos de calibração no ano de 2007 durante a máxima da quadratura (13hs).

| Quadratura | Velocidade | Qualificação |
|------------|------------|--------------|
| A | 0.2940 | bom |
| C | 0.2730 | bom |

Tabela 4.7: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de velocidade para os experimentos de calibração no ano de 2007 durante a máxima da sizígia (13hs).

| Sizígia | Velocidade | Qualificação |
|---------|------------|--------------|
| A | 0.3032 | razoável |
| C | 0.2920 | bom |

Tabela 4.8: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de maré para os experimentos de calibração no ano de 2007 durante o período de 16 dias.

| Período 16 dias | Maré | Qualificação |
|-----------------|--------|--------------|
| A | 0.0062 | excelente |
| C | 0.0206 | excelente |

Para avaliar a qualidade da calibração, um experimento de validação foi feito utilizando os mesmos parâmetros do experimento de calibração que teve o melhor resultado, o experimento 6, para o período de 2008. Do mesmo modo que na calibração, os dados *in situ* foram comparados com os dados modelados através de séries temporais e do RMAE. As figuras 4.18 e 4.19 mostram as séries temporais de maré e velocidades para os períodos de calibração. A tabela 4.9, apresenta os parâmetros estatísticos obtidos através do cálculo do RMAE para a calibração e a validação. Notou-se através da figuras e da tabela que para o período de validação a maré foi bem representada pelo modelo com valores de RMAE excelentes. Para os dados de corrente, durante o período relacionado a 16 dias de simulação, a corrente foi bem representada tendo valor de RMAE de qualificação 'bom'.

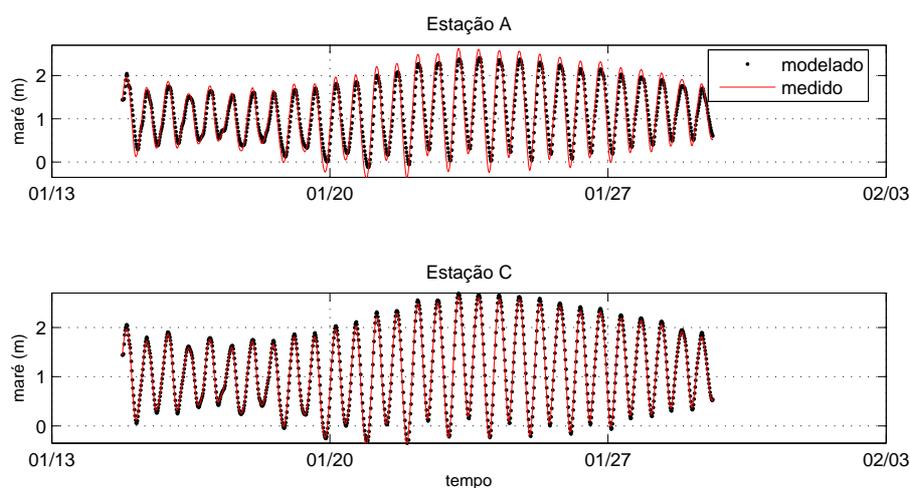


Figura 4.18: Séries temporais dos dados de maré para o experimento de validação referente a campanha de 2008, nas estações A e C, respectivamente.

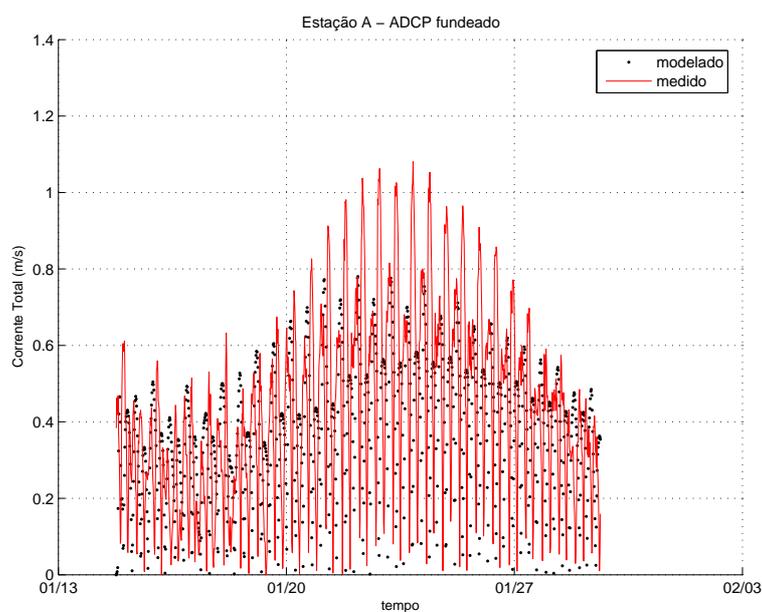


Figura 4.19: Séries temporais dos dados de corrente para o experimento de validação referente a campanha de 2008, na estação A durante 16 dias.

Tabela 4.9: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de velocidade total para a validação durante o período de 16 dias.

| | Período 16 dias | Maré | Qualificação | Velocidade | Qualificação |
|------------|-----------------|--------|--------------|------------|--------------|
| Calibração | A | 0.0052 | excelente | 0.1817 | bom |
| | C | 0.0177 | excelente | - | - |
| Validação | A | 0.0045 | excelente | 0.1234 | bom |
| | C | 0.0179 | excelente | - | - |

Como a área de interesse do presente trabalho está localizada na desembocadura do rio Caravelas, ou seja, na região onde a interação entre os processos marinhos e estuarinos são mais intensos, foram extraídos dois pontos (baseados nos trabalhos de Lessa *et al.* (2005) e Teixeira (2006) nas estações #506 e #106 representadas na figura 2.1 (página 13) ao longo da plataforma adjacente à desembocadura. Analisando as séries temporais de correntes do modelo extraídas para estes pontos (Figura 4.20) e comparadas com dados medidos, observou-se que o modelo reproduz as correntes na plataforma e nas imediações da desembocadura. Os valores de RMAE obtidos para estas duas estações foram: 0,25 para a #506 e 0.32 para a #106, sendo classificados, segundo Van-Rijn *et al.* (2003), como bom e razoável, respectivamente. Dessa forma pode-se concluir que para dentro do estuário o modelo não consegue reproduzir de uma forma adequada, as intensidades das correntes devido à complexidade batimétrica da região estuarina em questão. E para a área de interesse, o modelo consegue reproduzir, de uma melhor forma, o padrão geral das velocidades das correntes.

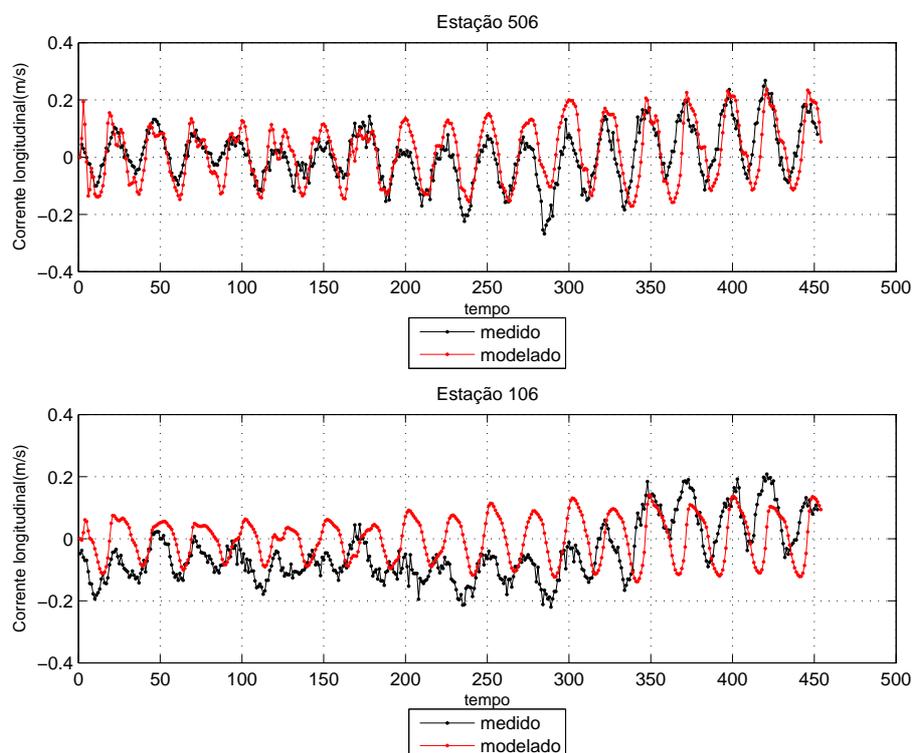


Figura 4.20: Séries temporais dos dados de corrente longitudinal localizados na plataforma continental adjacente à desembocadura.

4.4.3 Módulo de Ondas

Para os dados de ondas, a calibração foi feita de forma qualitativa utilizando diferentes valores de fricção com o fundo e os valores comparados com o trabalho de Lessa *et al.* (2005), o qual teve como objetivo a investigação da variabilidade temporal e espacial da turbidez na zona costeira de Caravelas ao longo de três anos de monitoramento com coletas contínuas de informações sobre o campo de corrente, onda e turbidez, em dois pontos fixos na plataforma continental. A figura 2.1 (página 13) apresenta a localização das estações realizada por Lessa *et al.* (2005). Este autor, obteve as maiores alturas e períodos de ondas para a estação #506, por ser mais externa e exposta. Os dados de ondas modelados, foram comparados com o trabalho mencionado acima para esta estação.

Foram feitos 3 experimentos com valores diferentes do parâmetro de fricção com o fundo através do *Nikuradse roughness* e um experimento sem fricção com o fundo, ou seja, o valor da fricção era pequeno e foi desprezado. A tabela 4.10, apresenta os resultados com as médias obtidas por Lessa *et al.* (2005) e as médias obtidas pelo modelo MIKE21-SW nos 4 experimentos diferentes.

Tabela 4.10: Comparação entre alturas e médias obtidas pelo MIKE21-SW e por Lessa *et al.* (2005) para a área de estudo.

| | $H_{sig}(m)$ | Fricção |
|--------|--------------|------------------------------|
| Lessa | 0.40 | - |
| MIKE21 | 0.078 | Nikuradse roughness = 0.04m |
| MIKE21 | 0.25 | Nikuradse roughness = 0.02m |
| MIKE21 | 0.24 | Nikuradse roughness = 0.005m |
| MIKE21 | 0.42 | sem fricção |

Pela tabela, notou-se que o experimento que mais se aproximou dos valores obtidos por Lessa *et al.* (2005), foi aquele em que a fricção com o fundo foi considerada desprezível, o experimento 4. Para a altura média de onda, desse experimento, os resultados foram muito parecidos com apenas uma diferença de 0.02m. Desse modo, as condições obtidas no experimento 4 foram as escolhidas para as simulações com o módulo de onda. É interessante ressaltar que, para os dados de período os resultados foram um pouco diferentes com uma desigualdade de 2s. Isto, é devido ao fato das condições de contorno impostas ao modelo (as séries temporais do WAVEWATCH) estarem em um intervalo de 5-8s.

4.5 Experimentos de modelagem numérica

4.5.1 Ondas

Para o módulo hidrodinâmico, os resultados obtidos são as características da onda (altura, direção e período) e as tensões radiais. As figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, apresentam algumas das simulações para as condições CALM-1S, STORM-1S, CALM-2S e STORM-2S, respectivamente. Através das figuras, observa-se que a região é caracterizada como de baixa energia de onda, contudo notou-se a propagação de ondas de tempestades chegando nos arredores da desembocadura com alturas entre 0.5m e 1 m (STORM2). A ausência de um clima de onda mais energético na região de Caravelas é devido a existência de inúmeros parcéis e bancos ao longo da costa, impedindo com que as ondas alcancem diretamente a costa, dissipando sua energia e criando assim uma zona de sombra, onde

ocorre dispersão e acumulação de sedimentos ao longo da região.

De acordo com o clima de ondas (altura da onda e ângulo de incidência desta na costa) e da direção do transporte de sedimentos ou das correntes, pode-se estimar a direção da deriva litorânea ao longo da costa. A figura 4.25 apresenta as direções da deriva estimada para cada caso utilizado na modelagem numérica. Para todas as condições, desconsiderando as exceções que serão comentadas abaixo, observou-se que na desembocadura da Barra Velha e do Canal do Tomba, o transporte litorâneo teve sentido para dentro do canal, na costa da Ilha da Caçumba apresentou sentido para o norte, na Praia da Barra Velha teve sentido para o norte e na Ponta da Baleia para o sul, no pontal na parte voltada para o canal, teve sentido para o sul e na parte para o oceano, no meio do pontal existe uma divergência da deriva: em direção à extremidade do pontal apresentou sentido para o norte, e em direção à base do pontal teve sentido para o sul. Este padrão geral da deriva litorânea, assim como esta divergência da deriva no pontal arenoso, foi obtido também por Pianca (2007).

Para alguns lugares, dependendo da condição, notaram-se algumas diferenças. Para o período de 2008, na região do pontal na parte voltada para o estuário, houve um balanço entre a deriva litorânea e na desembocadura da Barra Velha teve sentido para fora do canal. Na praia da Barra Velha, durante condições de quadratura para as etapas simuladas, exceto para 2007 e 2008, o transporte teve sentido para o sul. Na ponta da Baleia, sob condições de STORM-2S (ondas com alturas variando vindas do quadrante sul durante a sizígia) o transporte apresentou sentido para o norte. Nas condições calmas de quadratura, na parte da base do pontal voltada para o oceano, houve um balanço entre a deriva.

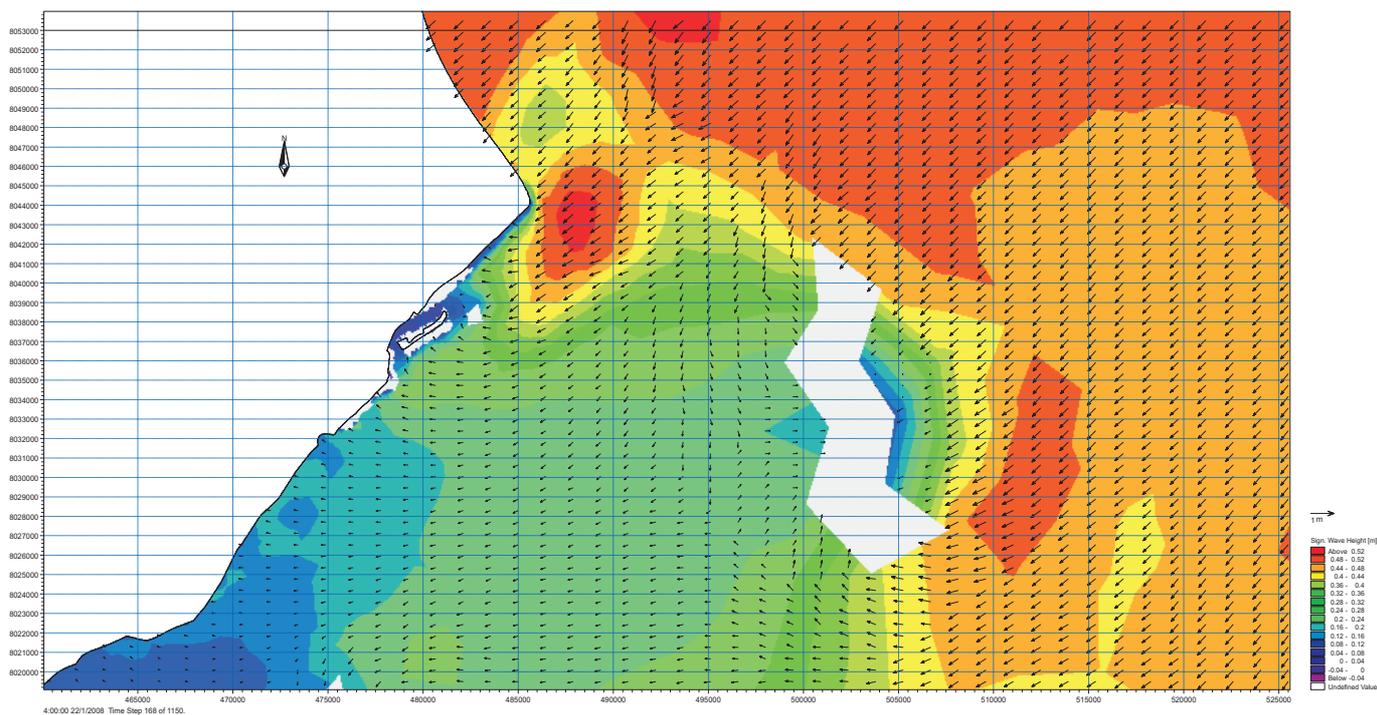


Figura 4.21: Simulação para CALM-1S, mostrando a direção e altura significativa de onda.

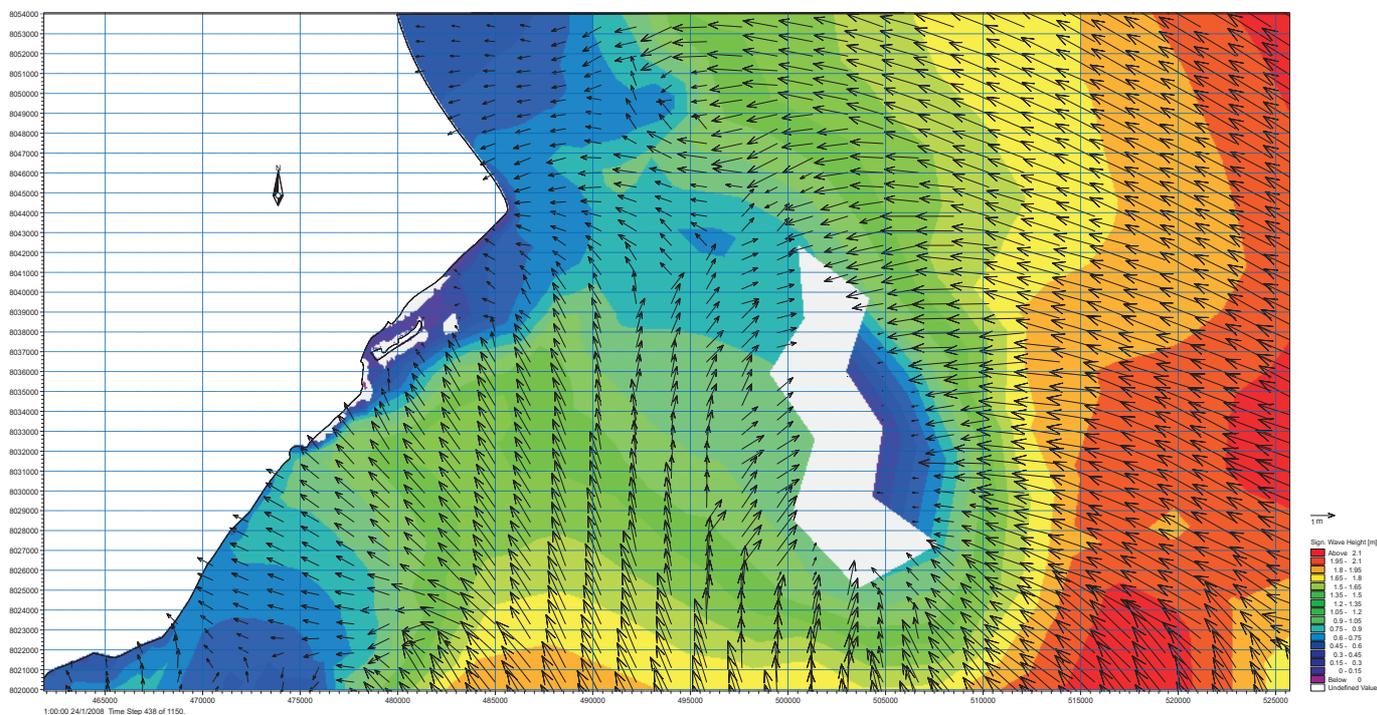


Figura 4.22: Simulação para STORM-1S, mostrando a direção e altura significativa de onda.

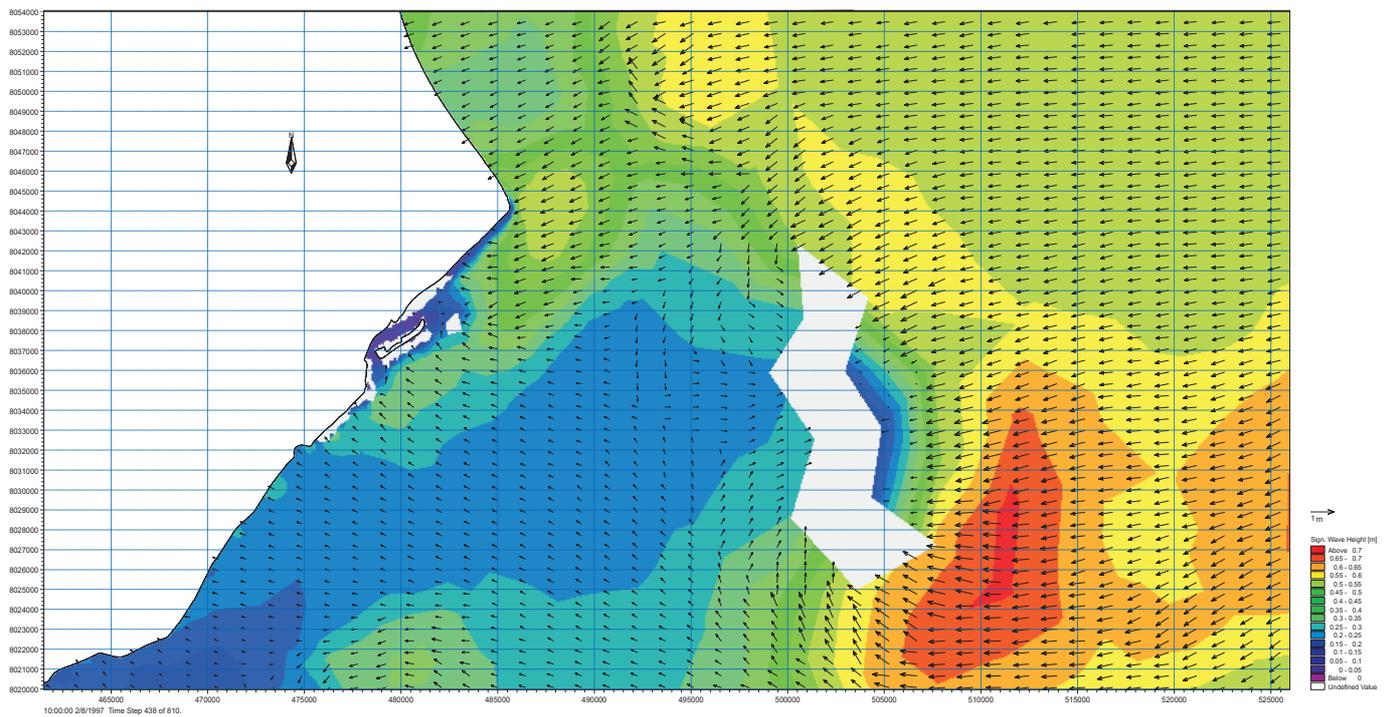


Figura 4.23: Simulação para CALM-2S, mostrando a direção e altura significativa de onda.

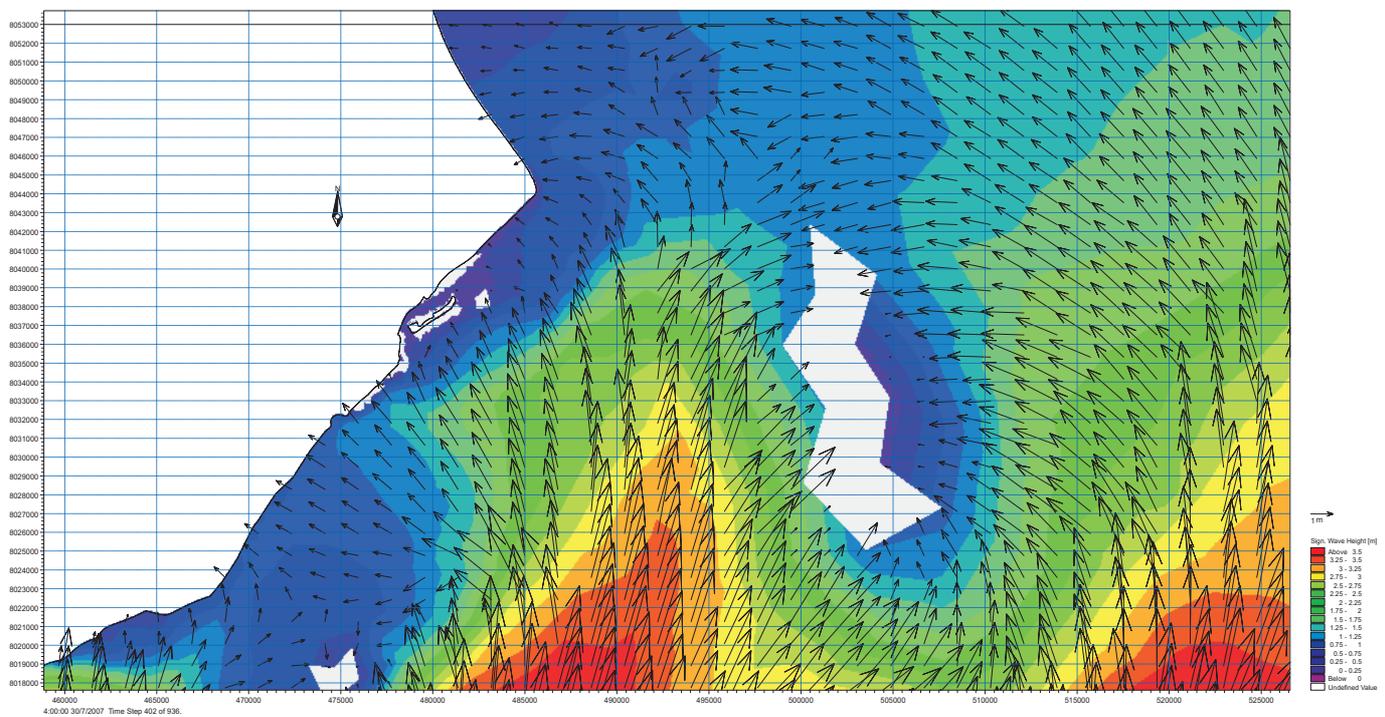


Figura 4.24: Simulação para STORM-2S, mostrando a direção e altura significativa de onda.

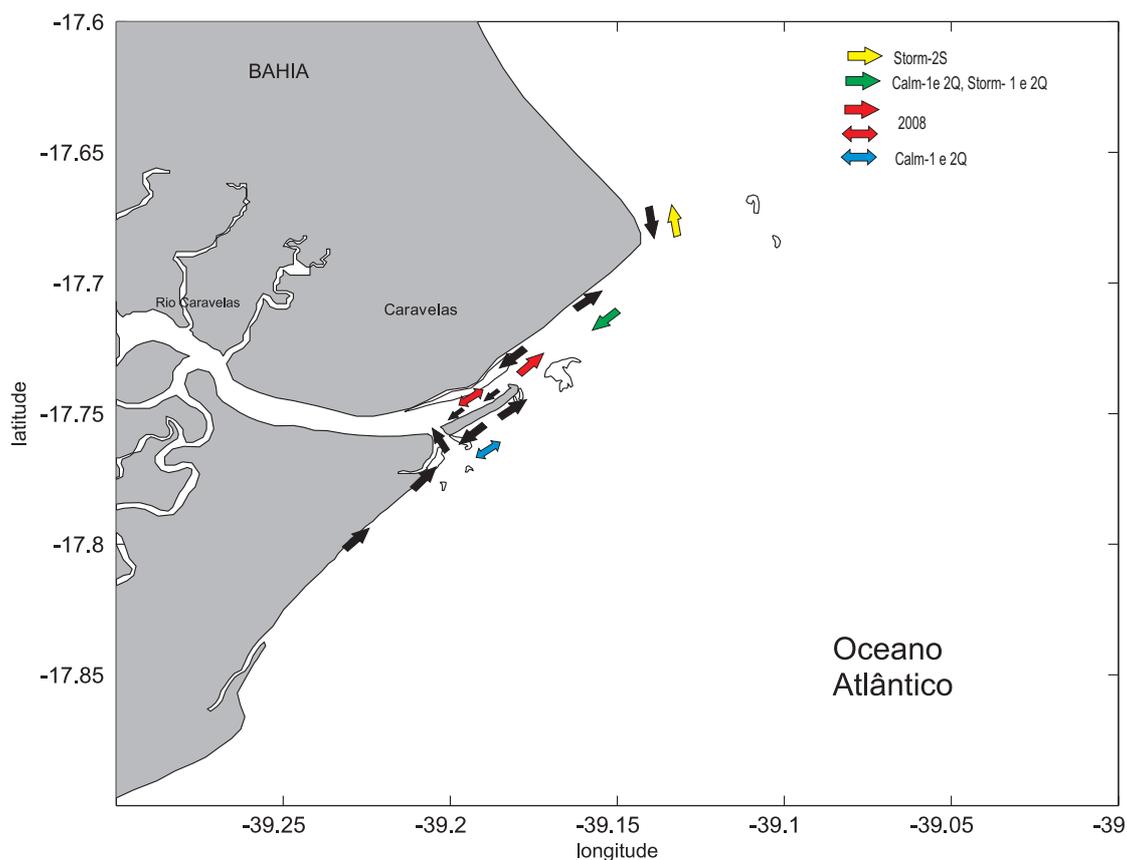


Figura 4.25: Sentido da deriva litorânea ao longo da costa. As setas pretas representam a maioria dos casos, e as setas coloridas representam algumas exceções conforme a condição em determinados pontos.

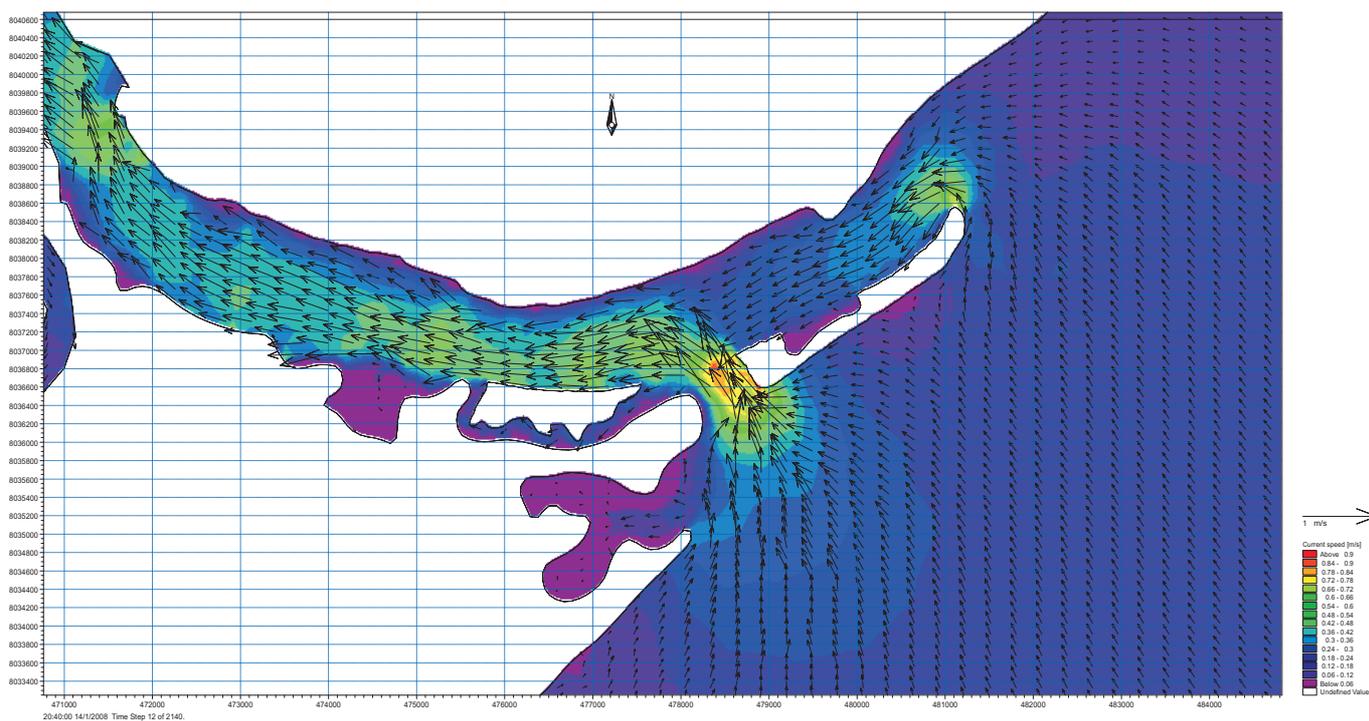
4.5.2 Hidrodinâmica

Para o módulo hidrodinâmico, os resultados obtidos são a elevação da superfície e as correntes. A figura 4.26 apresenta algumas das simulações para o período de 2008 representando as correntes de enchente, vazante, durante a maré de quadratura. A figura 4.27 apresenta algumas das simulações para o período de 2008 representando as correntes de enchente e vazante, durante a maré de sizígia. Observou-se neste estuário, que a corrente foi principalmente influenciada pelas condições de maré. Segundo Miranda *et al.* (2002), para estuários de planície costeira, em geral a parcela barotrópica (forçada pela maré) responsável pela variabilidade de alta frequência é uma ordem de grandeza maior do que a baroclínica (forçada pelo campo de densidade, como por exemplo, a descarga fluvial).

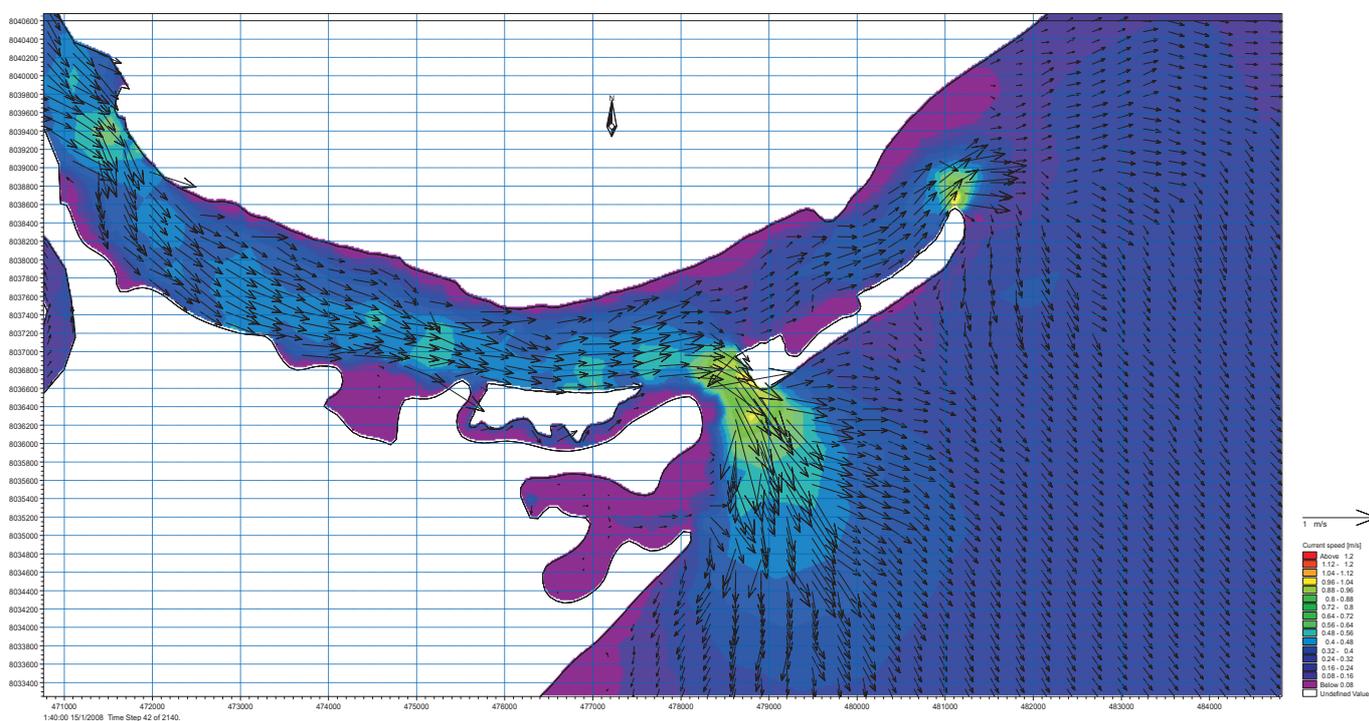
Observou-se através da figura 4.26, que as correntes de enchentes durante a quadratura, no canal estuarino, variaram de aproximadamente $0.38m/s$ a $0.66m/s$, entretanto no Canal do Tomba notou-se velocidades de intensidades entre $0.84m/s$ a $0.90m/s$. As correntes de vazantes, no canal estuarino, variaram de aproximadamente $0.40m/s$ a $0.88m/s$, e no Canal do Tomba e na Barra Velha observou-se correntes mais intensas entre $0.96m/s$ a $1.04m/s$.

Na figura 4.27, notou-se que as correntes de enchentes durante a sizígia, no canal estuarino, variaram de aproximadamente $0.50m/s$ a $1.0m/s$, entretanto no Canal do Tomba notou-se velocidades de intensidades de até $1.2 m/s$. Para as correntes de vazante, no canal principal, variaram de aproximadamente $0.45m/s$ a $1.05m/s$, e no Canal do Tomba observou-se correntes mais intensas entre $1.05m/s$ a $1.5m/s$. Dessa forma, como esperado, as correntes foram mais intensas durante a sizígia do que na quadratura.

É interessante ressaltar que, apesar de as correntes serem influenciadas principalmente pelo regime de maré, quando a descarga fluvial foi $22.72 m^3/s$ (nas condições STORM) ela produziu um efeito significativo durante a sizígia, reduzindo a intensidade das correntes de enchente, apresentando estas valores similares a das condições CALM. Isto foi comparado também, através dos períodos de 2007 e 2008, onde nestes períodos as descargas fluviais foram muitas baixas e as velocidades para a sizígia foram mais intensas alcançando quase $1m/s$, o que não ocorreu nas condições de sizígia STORM.

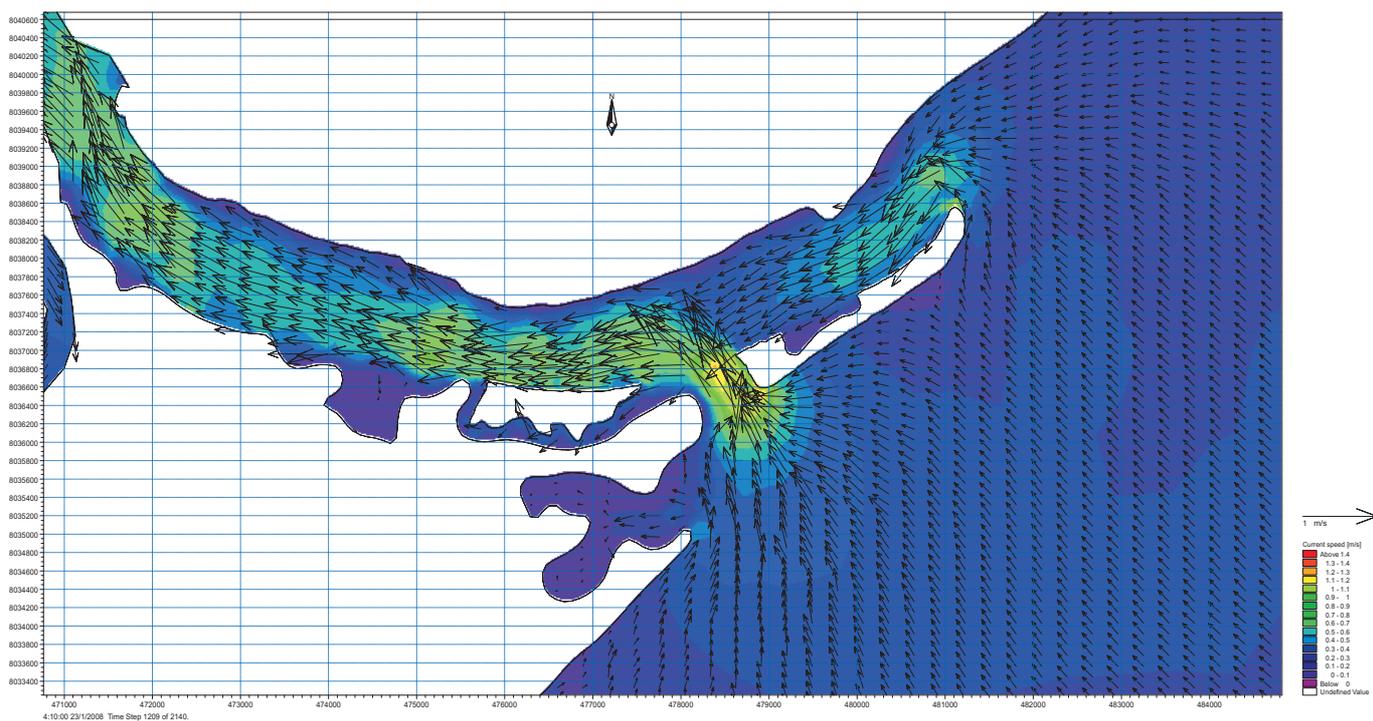


(a) Corrente enchente

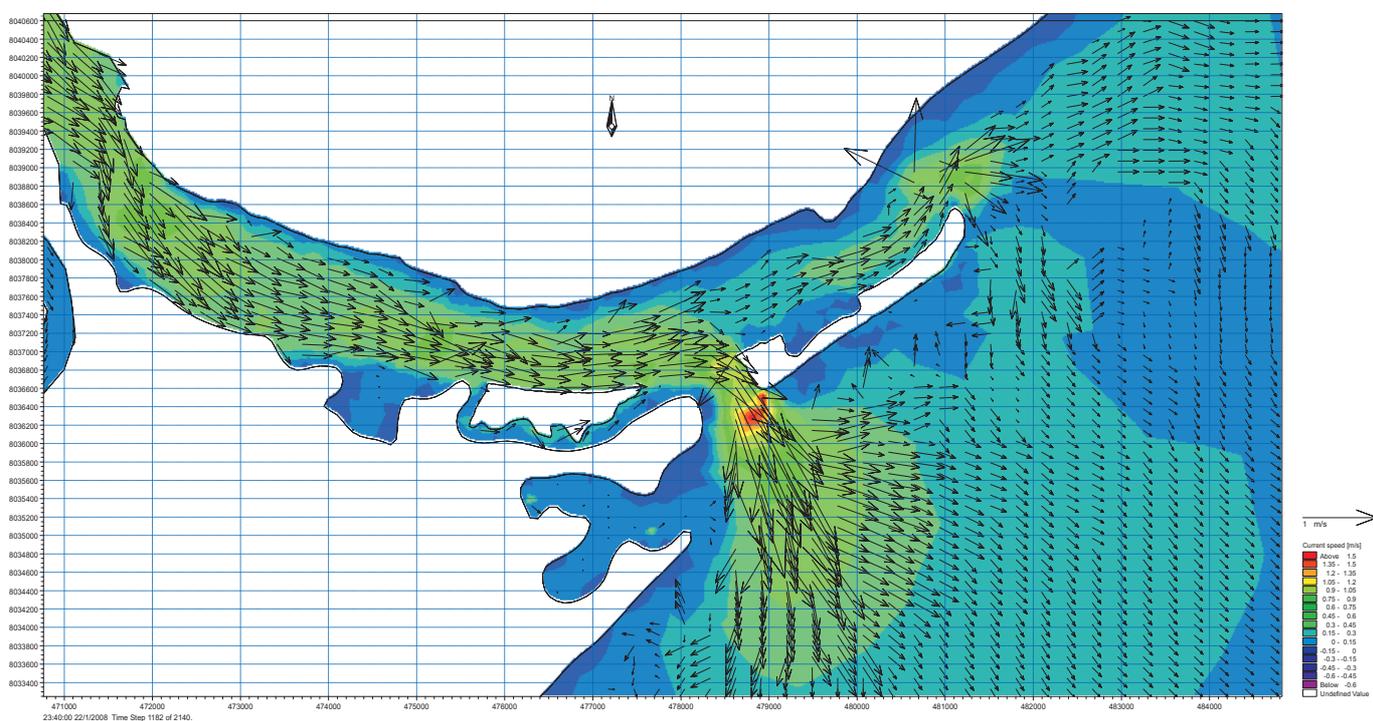


(b) Corrente vazante

Figura 4.26: Simulação para o período de 2008 durante corrente de enchente, vazante e estufa, respectivamente, na maré de quadratura.



(a) Corrente enchente



(b) Corrente vazante

Figura 4.27: Simulação para o período de 2008 durante corrente de enchente, vazante, respectivamente, na maré de sizígia.

4.5.3 Transporte de sedimentos

Para a análise do transporte de sedimentos, 12 perfis horizontais foram extraídos dos resultados do modelo, ao longo do estuário e das áreas adjacentes, representados na figura 4.28. Entretanto, só serão apresentados os mais relevantes para a área de interesse. O começo e o final de cada perfil está indicado com as letras p e p' no mapa com a localização de cada um, sendo p o começo do perfil (distância 0 metros) e p' o final (distância final).

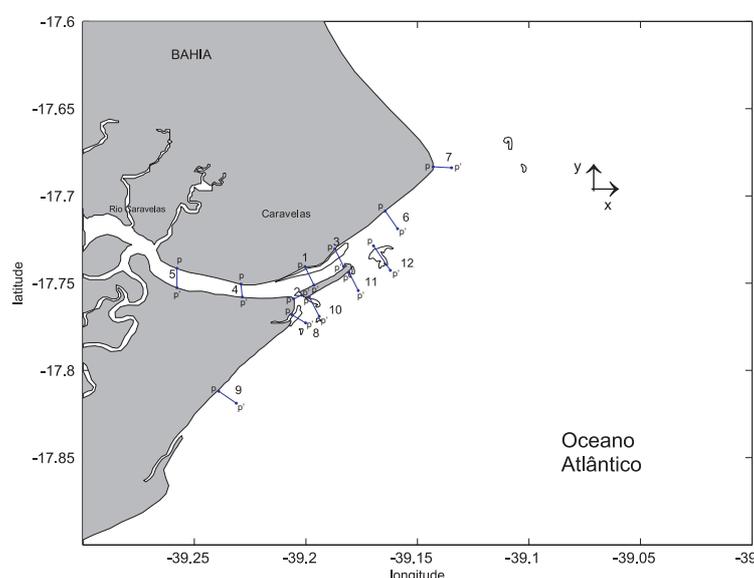


Figura 4.28: Localização dos perfis horizontais extraídos para o módulo de sedimentos. Os bancos arenosos estão representados na figura pelas feições com contornos de cor branca.

As condições escolhidas para a visualização do transporte de sedimentos foram STORM2S/Q, CALM1S/Q e CALM2S/Q, nos perfis 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11 e 12. Estas figuras estão apresentadas no apêndice A. Para facilitar a interpretação dos resultados, na figura 4.29, são apresentados diagramas esquemáticos do transporte médio para cada condição selecionada.

O transporte de sedimentos para o perfil 1 foi controlado pela maré (principalmente enchente) e pela descarga fluvial. Nas condições de maré de quadratura o transporte foi menor do que nas condições de maré de sizígia. Nas condições de STORM (alta descarga fluvial) o transporte de sedimentos (sentido estuário acima) foi menor do que nas condições CALM (baixa descarga fluvial) em que o transporte de sedimentos foi maior (sentido estuário acima). Para todas as condições, na direção longitudinal, o transporte

foi para dentro do canal e na direção transversal, o transporte teve direção para o pontal arenoso. Para o período de 2007 e 2008, em que ambos foram feitos com baixa descarga, observou-se que durante a maré de quadratura o transporte de sedimentos foi menor ou quase inexistente, e durante a maré de sizígia foi quando ocorreu a maior parte do transporte para dentro e fora do canal. Na direção transversal, a maior parte do transporte predominante foi em direção ao pontal arenoso, entretanto, em 2008, em alguns momentos o transporte também apresentou sentido oposto, ou seja, para a costa.

O transporte de sedimentos para o perfil 2 foi controlado pela maré. Nas condições de maré de sizígia, o transporte foi um pouco maior do que durante a maré de quadratura. Neste perfil, não foi observada diferença em relação as condições STORM e CALM. Para todas as condições, na direção longitudinal, o transporte de sedimentos oscilou de acordo com a maré, para dentro e fora do canal. Na direção transversal, o transporte durante a maré vazante apresentou sentido da Ilha da Caçumba para o pontal arenoso, e durante a maré enchente apresentou sentido do pontal para a Ilha.

O transporte de sedimentos para o perfil 3 foi dominado pela maré e pelas ondas. Devido a existência do pontal arenoso na frente deste perfil, ele é protegido das ondas do quadrante sul e dessa forma, para essas condições houve maior influência da maré (principalmente vazante) no transporte de sedimentos. Já para as condições calmas com ondas de leste e nordeste, que induzem uma deriva na costa com sentido para o sul, o transporte foi mais intenso para dentro do canal. O transporte transversal, excetuando-se para as condições STORM-2Q que oscilou entre a costa e o pontal, foi mais intenso com direção ao pontal arenoso.

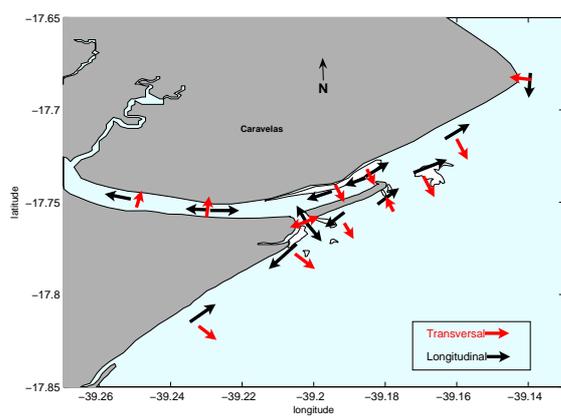
O transporte médio de sedimentos por dia para o perfil 8 foi influenciado pela fluxo de maré vazante sendo mais intenso na maré de sizígia do que na maré de quadratura. O transporte longitudinal teve sentido predominante para o sul e o transporte transversal teve sentido predominante em direção ao delta de maré vazante, exceto para as condições STORM-2S, em que o transporte transversal apresentou sentido para à costa.

O transporte médio de sedimentos por dia para o perfil 10 teve influência das ondas (deriva para o sul) e da maré, sendo que na maré de sizígia o transporte é mais intenso do que na maré de quadratura. O sentido predominante para o transporte longitudinal foi para o sul, exceto nas condições STORM-2S e CALM-2Q onde o transporte

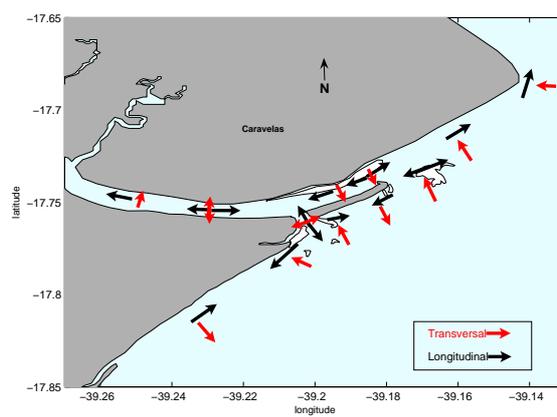
foi para o norte em STORM-2S (provavelmente devido a propagação das ondas de S/SE) e oscilou entre o norte e o sul em CALM-2Q. O transporte transversal, apesar de muito pequeno, teve sentido para as regiões oceânicas, exceto nas mesmas condições citadas anteriormente, pois em STORM-2S o transporte transversal teve sentido para o pontal arenoso e em CALM-2Q o transporte oscilou entre o pontal e o delta de maré vazante.

O transporte médio de sedimentos por dia para o perfil 11 teve a influência das ondas (corrente de deriva) e da maré. Na maré de sizígia o transporte foi um pouco mais intenso do que na maré de quadratura. Em relação as ondas, notou-se que quando em maré de sizígia e condições de tempestades com alturas e direções de onda variando (STORM-2S), o transporte de sedimentos foi maior e com sentido para o sul, e quando em maré de quadratura e condições CALM-2Q o transporte também teve sentido para o sul. Em STORM-2S, o principal motivo para ocorrer este transporte para o sul foi devido as correntes de vazante durante a maré de sizígia e para CALM-2Q foi devido à corrente litorânea gerada pelas ondas propagadas do quadrante leste. Para todas as outras condições o transporte longitudinal predominante foi para o norte. O transporte transversal, apesar de pequeno, foi predominante em direção ao pontal, exceto nas condições STORM-2S e CALM-1S em que o transporte foi, respectivamente, com sentido para as regiões oceânicas e oscilou entre o pontal e o banco externo.

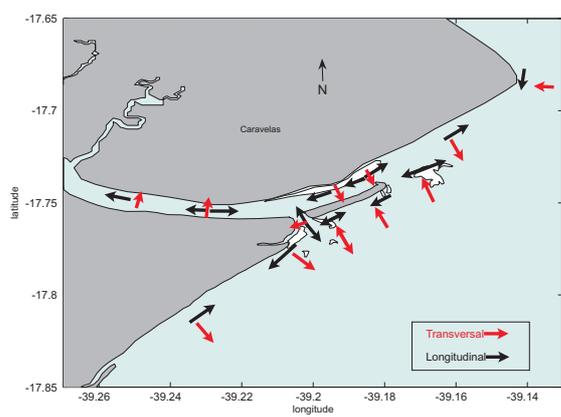
O transporte médio de sedimentos por dia para o perfil 12 foi influenciado pelas correntes de maré e pelas ondas. Nas condições de quadratura o transporte foi quase inexistente, havendo transporte de sedimentos durante a maré vazante. Na condição STORM-2S ocorreu um pequeno transporte durante as correntes de enchente para dentro do canal, contudo o transporte foi mais intenso e com direção para o delta de maré vazante durante as correntes de vazante. Para as outras condições, o transporte ocorreu também, durante a maré vazante, com direção para o delta de maré vazante. O transporte transversal ocorreu devido ao clima de ondas, e teve sentido predominante para o sul do banco arenoso, sendo um pouco mais intenso com ondas de E e NE. Para a condição STORM-2S (ondas do quadrante sul) o transporte predominante foi para o norte do banco arenoso, devido principalmente as correntes geradas por ondas sobre o delta de maré vazante.



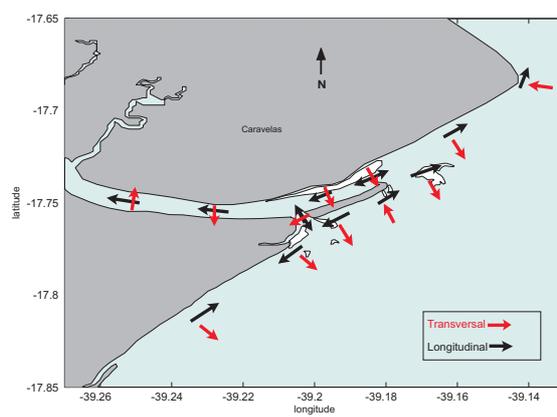
(a) STORM-2Q



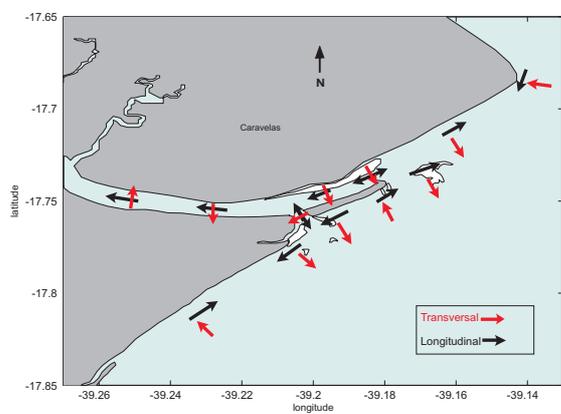
(b) STORM-2S



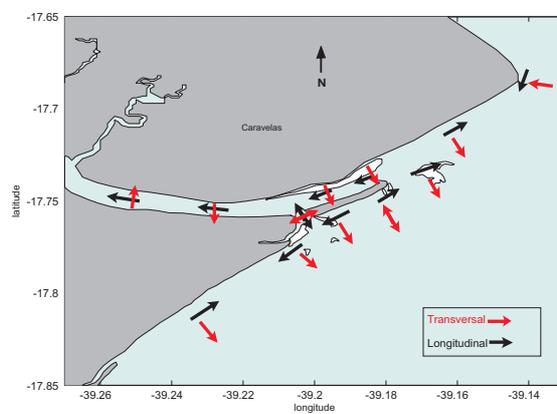
(c) CALM-2Q



(d) CALM-2S



(e) CALM-1Q



(f) CALM-1S

Figura 4.29: Diagrama esquemático para o transporte médio de sedimentos para as condições: STORM-2Q, STORM-2S, CALM-2Q, CALM-2S, CALM-1Q e CALM-1S.

4.5.4 Comportamento dos bancos e do pontal arenoso

Para o estudo do comportamento do pontal arenoso e dos bancos ao redor da desembocadura do rio Caravelas, foram extraídos, do módulo de sedimentos, 12 pontos indicados na figura 4.30. Para cada ponto, foi extraído a evolução morfológica do fundo por dia, ou seja, taxas de erosão ou deposição de sedimentos. Para visualização foram representadas apenas as mesmas condições usadas para o transporte de sedimentos e estão apresentadas no apêndice B. Assim como na seção anterior, para facilitar a interpretação dos resultados, na figura 4.31, são apresentados diagramas esquemáticos das áreas de erosão e deposição na região de estudo, para cada condição selecionada.

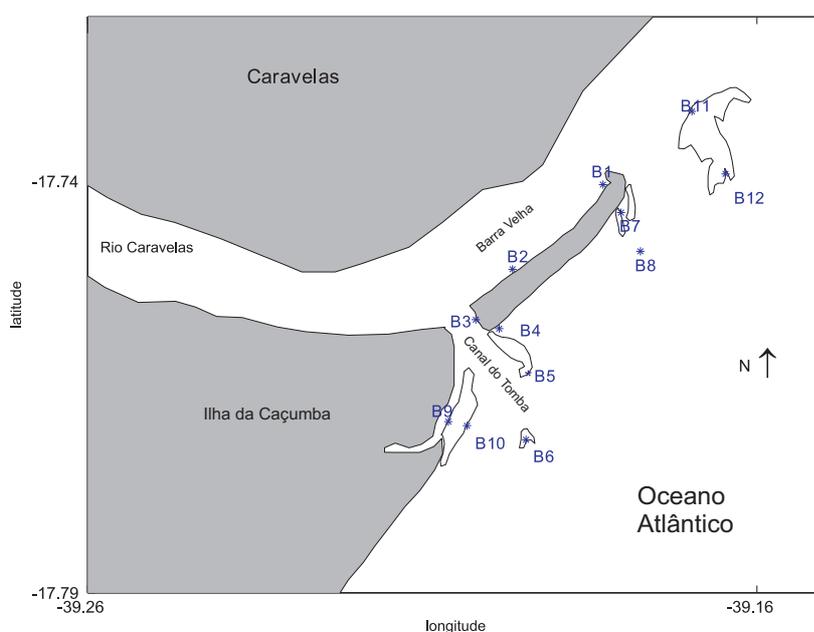


Figura 4.30: Localização dos pontos extraídos no pontal arenosos e nos bancos ao redor da desembocadura.

No ponto B1, localizado na extremidade do pontal arenoso, observou-se a tendência a deposição dos sedimentos para a maioria dos casos, durante a maré de sizígia. Durante a maré de quadratura, não houve evolução do fundo para nenhum dos casos. Nas condições de ondas vindas com alturas variando e do quadrante E (CALM-2S) a deposição foi maior do que para ondas com altura constante e vindas do NE (CALM-1S). Já para as condições de ondas de tempestades, sobre regime de ondas do quadrante sul com alturas

variando(STORM-2S), ocorreu retirada de sedimentos neste ponto. Para os anos de 2007 e 2008, ocorreu deposição na extremidade do pontal, também somente durante a maré de sizígia. Relembrando que o transporte lateral de sedimentos para este ponto teve sentido predominante para o pontal arenoso.

No ponto B2, localizado nas proximidades da metade do pontal, na parte voltada para a Barra Velha, ocorreu deposição dos sedimentos em todos os casos, tanto na maré de quadratura quanto na maré de sizígia, sendo que nesta a deposição ocorreu em maior intensidade. Apenas nos casos CALM-2Q, CALM-2S e STORM-2Q, nos primeiros dias, houve erosão do fundo, mas após isso ocorreu deposição. O transporte lateral para esta região teve sentido predominante para o pontal arenoso.

No ponto B3, localizado na base do pontal voltado para o Canal do Tomba, tanto para a maré de quadratura quanto para a maré de sizígia, a maior tendência foi de erosão do fundo neste ponto. Entretanto, durante a maré de quadratura, para as condições de ondas com alturas variando vindas de E e do quadrante sul (CALM-2Q e STORM-2Q), houve uma deposição de sedimentos nesta região, contudo nos últimos dias da simulação ocorreu erosão do fundo. O transporte lateral neste ponto teve predominância em direção a Ilha da Caçumba.

No ponto B4, localizado na base do pontal voltado para o oceano, durante a maré de sizígia para todas as condições simuladas e para CALM-1Q e STORM-1Q, houve uma erosão do fundo. Durante a maré de quadratura, para as condições de ondas com alturas variando com direções de E (CALM-2Q) e do quadrante sul (STORM-2Q) ocorreu a deposição de sedimentos neste ponto (o transporte lateral para estas duas condições foi em direção ao pontal). O transporte lateral neste ponto teve sentido em direção a regiões oceânicas, ou seja, em direção ao delta de maré vazante localizado no ponto B5, que será discutido a seguir.

No ponto B5, que está localizado em uma das feições arenosas associadas ao delta de maré vazante do Canal do Tomba, para todas as condições houve deposição de sedimentos, provavelmente este aporte de sedimentos foi proveniente, além do canal de maré, do pontal arenoso (ponto B4). Durante a maré de sizígia para as ondas com alturas variando e de direções do quadrante E (CALM-2S), nos primeiros dias ocorreu uma erosão do fundo neste banco. Para os períodos de 2007 e 2008, houveram diferenças

na dinâmica do banco, devido às variações das condições de ondas: em 2008 o clima de ondas apresentou-se relativamente constante, com alturas nas regiões oceânicas inferiores ou iguais a 1.5 m e portanto, para esta condição a maré pareceu ser o principal mecanismo por promover mudanças no banco, onde durante a maré de sizígia ocorreu erosão do banco e durante a maré de quadratura ocorreu deposição de sedimentos no banco; em 2007, o clima de ondas apresentou-se mais energético em alguns dias, com alturas nas regiões oceânicas maiores que 2.0 m, e exatamente nestes dias o banco sofreu erosão, e quando as alturas foram menores sofreu deposição.

No ponto B6, que está localizado também em uma das feições arenosas associadas ao delta de maré vazante do Canal do Tomba, para a maioria dos casos, ocorreu a deposição de sedimentos, entretanto durante condições de maré de sizígia a tendência de deposição foi diminuindo com o tempo. Para as condições de 2007, quando ocorreu ondas maiores durante a maré de quadratura, a deposição foi menor, porém quando as alturas de ondas foram menores, houve maior depósito de sedimentos.

No ponto B7, localizado perto da extremidade do pontal voltada para o oceano, a tendência foi de erosão do fundo, para todas as condições tanto na maré de quadratura quanto na maré de sizígia. No período de 2007, quando ocorreu ondas maiores, a erosão foi maior e em 2008, durante a maré de sizígia, ocorreu erosão com maior intensidade. O transporte lateral, na maioria dos casos, teve sentido para o pontal, entretanto a deriva neste ponto teve sentido para a extremidade do pontal e como foi observado no ponto B1, ocorreu deposição na maior parte do tempo e portanto o sedimento que será depositado em B7 estará indo para a extremidade do pontal (ponto B1).

No ponto B8, localizado à frente do ponto B7 em cima de um banco arenoso, na maioria das condições a tendência foi de erosão do fundo. Para as condições CALM-2Q e STORM-2Q a tendência foi de deposição de sedimentos. Nos períodos de 2007 e 2008, durante a maré de sizígia houve maior erosão do que na maré de quadratura, sendo que para 2007, na maré de quadratura ocorreu deposição.

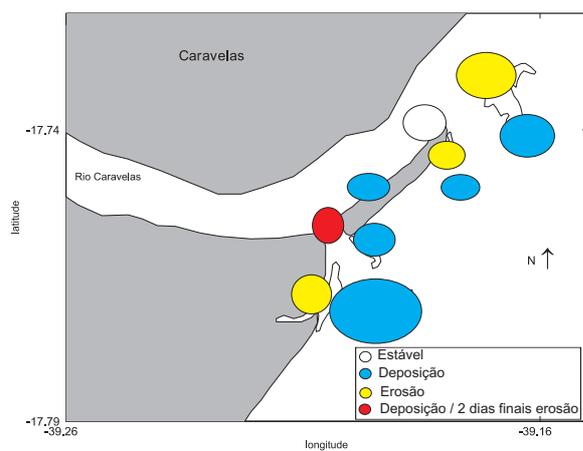
No ponto B9, localizado em cima de um dos bancos marginais do delta de maré vazante perto da Ilha da Caçumba, para maioria das condições ocorreu erosão do fundo. Na condição STORM-2S, ao contrário, ocorreu deposição de sedimentos. O transporte lateral neste ponto foi em direção ao oceano, provavelmente para os bancos B10 e B6,

entretanto para a condição STORM-2S o transporte foi em direção à costa. Para os períodos de 2007 e 2008, durante a maré de quadratura a taxa de mudança de fundo foi quase nula, porém durante a maré de sizígia ocorreu erosão.

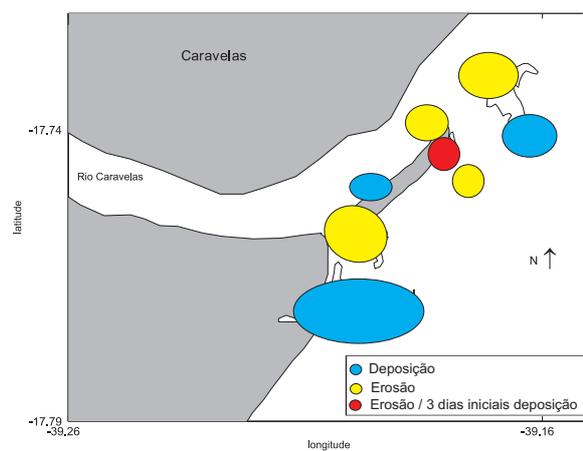
No ponto B10, localizado em cima do mesmo banco marginal de B9, na parte leste do banco, houve tendência a deposição para todos os casos, tanto na maré de sizígia quanto na maré de quadratura, provavelmente o material depositado neste ponto esteja vindo do ponto B9 e de dentro do canal.

No ponto B11, localizado em cima do delta de maré vazante da desembocadura da Barra velha, na parte norte do banco, para todas as condições, neste ponto do banco, observou-se a tendência de erosão do fundo, sendo que o transporte lateral teve sentido predominante para o sul, provavelmente para o sul do banco, no ponto B12. Para os anos de 2007 e 2008, durante a maré de quadratura, a erosão foi um pouco menor que na maré de sizígia.

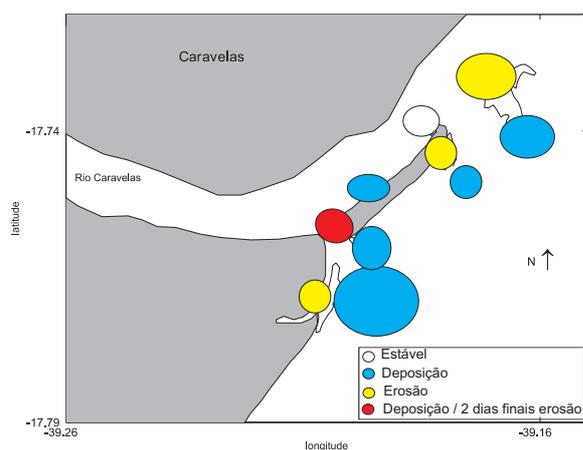
No ponto B12, localizado em cima do delta de maré vazante da desembocadura da Barra velha, na parte sul do banco, para a maioria das condições, durante a maré de quadratura e em STORM-2S, houve deposição de sedimentos neste ponto do delta. Para as condições CALM-2S e CALM-1S, ocorreu erosão do fundo. Para os períodos de 2007 e 2008, na sizígia ocorreu erosão do banco e na quadratura deposição de sedimentos.



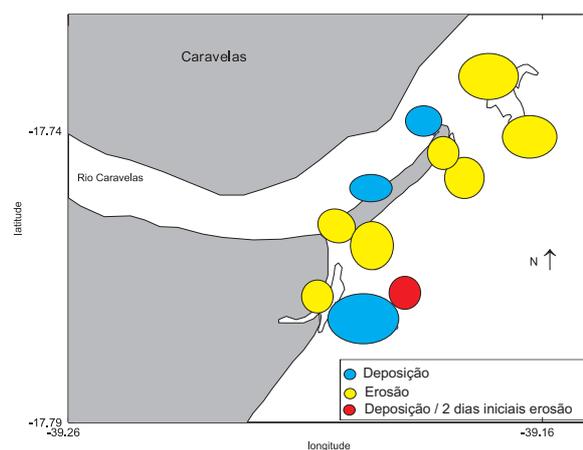
(a) STORM-2Q



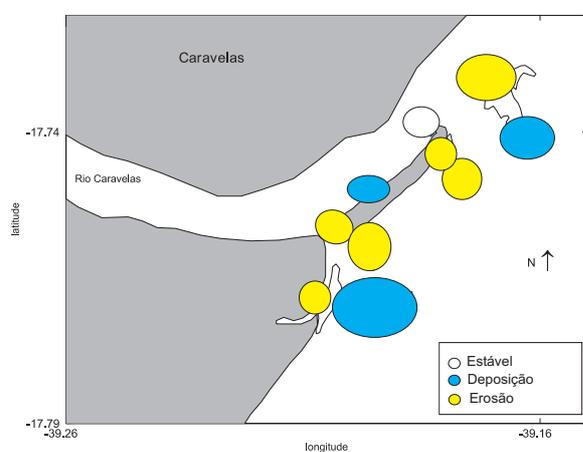
(b) STORM-2S



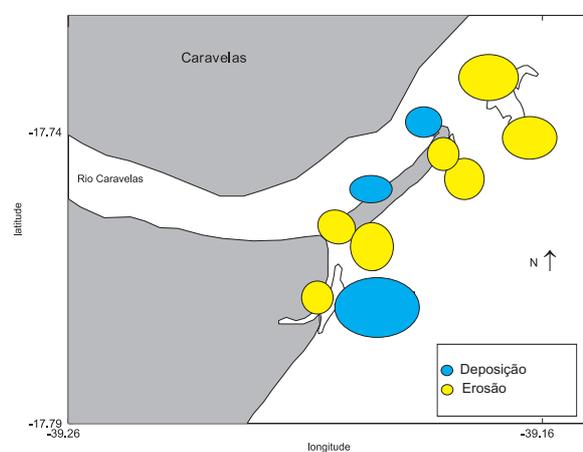
(c) CALM-2Q



(d) CALM-2S



(e) CALM-1Q



(f) CALM-1S

Figura 4.31: Diagrama esquemático para a mudança do fundo para as condições: STORM2-Q, STORM-2S, CALM-2Q, CALM-2S, CALM-1Q e CALM-1S.

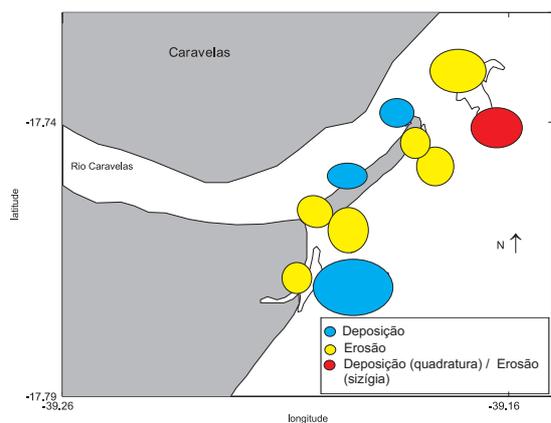
4.5.5 Sumário dos Resultados

Para auxiliar na visualização dos dados e na discussão, a tabela 4.11 apresenta, para cada ponto (B) e seu respectivo perfil, o sumário dos principais processos físicos que atuam no transporte de sedimentos na área de interesse. Observou-se que o principal agente por promover transporte de sedimentos, na região foi a maré, mesmo tendo papel secundário em alguns casos. As ondas possuem um papel importante nas regiões adjacentes ao canal através das correntes geradas por elas. Perto da desembocadura, as ondas atuam sobre os bancos arenosos e o delta de maré vazante promovendo as trocas sedimentares, através da geração das correntes em direção à costa, entre o sistema estuarino, as praias adjacentes e os próprios bancos arenosos e o delta de maré vazante.

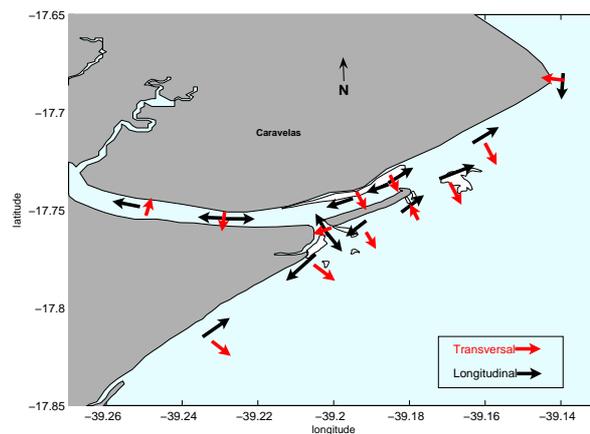
Tabela 4.11: Sumário dos principais processos físicos que atuam em cada perfil e banco.

| Perfil/Banco | Maré | Onda |
|----------------------|------|------|
| Perfil 1/ B1 | X | |
| Perfil 2/ B2 | X | |
| Perfil 3/ B3 | X | X |
| Perfil 4 | X | |
| Perfil 5 | X | |
| Perfil 6 | | X |
| Perfil 7 | | X |
| Perfil 8/ B9 e B10 | X | |
| Perfil 9 | | X |
| Perfil 10/ B4 e B5 | X | X |
| Perfil 11/ B7 e B8 | X | X |
| Perfil 12/ B11 e B12 | X | X |

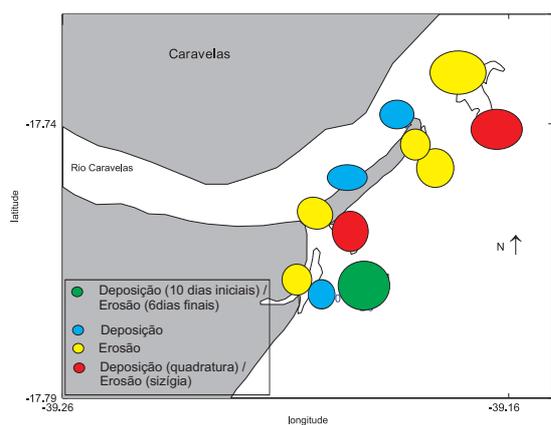
A figura 4.32 apresenta um diagrama esquemático da evolução do fundo e do transporte médio de sedimentos para os 16 dias simulados utilizando os dados medidos em campo (2007 e 2008). Através dessas figuras, observou-se que o padrão do transporte de sedimentos no canal de maré apresentou pouca variação, já nas regiões com maior influência marinha, observaram-se algumas diferenças na dinâmica sedimentar devido às variações sazonais mensais que ocorrem entre os anos, influenciando o clima de ondas e a hidrodinâmica costeira.



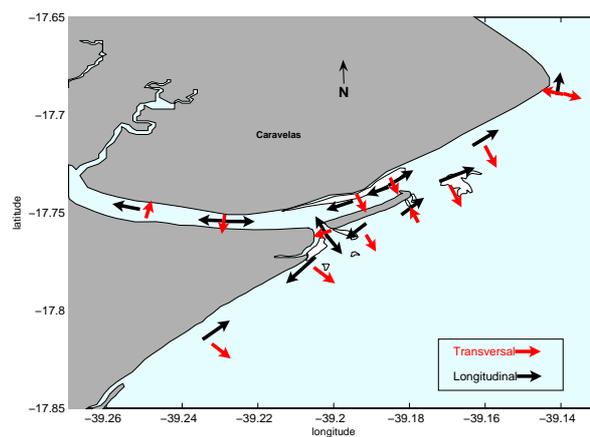
(a) Evolução do Fundo 2007



(b) Transporte de sedimentos 2007



(c) Evolução do Fundo 2008



(d) Transporte de sedimentos 2008

Figura 4.32: Diagrama esquemático da mudança de fundo por dia e do transporte de sedimentos para os períodos de 2007 (acima) e 2008 (abaixo).

Capítulo 5

Discussão

O estuário de Caravelas pode ser classificado como dominado por maré, sendo a descarga fluvial insignificante para a dinâmica local. Durante eventos de maré de sizígia, observou-se fortes fluxos de enchente e de vazante, sendo que nas regiões próximas as desembocaduras, as correntes de vazante tenderam a ser um pouco maiores do que as correntes de enchente; e na região estuarina as correntes de enchente foram cerca de 10% maiores do que as correntes de vazante. Segundo Woodroffe *et al.* (1989), em estuários dominados por maré, as marés enchentes tem curta duração e fluxos de velocidades maiores do que a maré de vazante. Este tipo de estuário, dominado por maré, segundo Davis & Fitzgerald (2004), desenvolvem-se ao longo de costas que possuem uma combinação entre um alto intervalo de maré, prisma de maré grande e ausência de um clima de ondas energético.

A região de estudo, apesar de ser caracterizada como de baixos níveis de energia de onda devido à existência de grande concentração de parcéis e recifes de corais, apresenta células da deriva litorânea ao longo das regiões adjacentes à desembocadura e que acabam promovendo transporte de sedimentos, sendo importantes para a dinâmica do local, principalmente dos bancos e do pontal arenoso. Sendo uma região relativamente protegida da ação das ondas, a propagação de ondas de pequenas alturas (e.g. 1 m) ocasionam mudanças na morfodinâmica das regiões adjacentes, as quais irão ocasionar mudanças na dinâmica de transporte de sedimentos para o canal estuarino.

Nas desembocaduras do rio Caravelas (Tomba e Barra Velha), observou-se que os deltas de maré vazante, e as feições associados a eles, são bem desenvolvidas e constituídas

de areia grossa à média. O processo predominante que controla a dinâmica destes deltas foi a maré. As fortes correntes durante a maré de sizígia, levam o sedimento para dentro do canal e estes sedimentos acabam voltando com as correntes de maré vazante para os deltas. Os pontos extraídos nos experimentos numéricos sobre os bancos, mostraram que durante quase todas as condições os sedimentos são depositados nessas feições.

Entretanto, as ondas podem influenciar estas feições, pois quando foram impostas as condições de contornos de ondas mais energéticas, principalmente do quadrante sul, ocorreu retirada de sedimentos dos deltas e dos bancos associados a desembocadura do Canal do Tomba. Os sedimentos passaram a ser transportados para dentro do canal e para a costa, e quando as alturas de ondas tornaram-se menores, voltou a ocorrer deposição de sedimentos nesses bancos. Esse aspecto também foi observado, para as simulações com os dados medidos (2007 e 2008), para a campanha de 2007, realizada em agosto, épocas em que sistemas frontais atingem a região e portanto de clima de ondas mais energéticos, observaram-se mudanças nos bancos: com alturas de ondas maiores ocorreu erosão, e com alturas menores ocorreu deposição. Já para o período de 2008, realizada em janeiro durante o verão, com intervalo de alturas de ondas menores e mais constantes, as mudanças morfológicas nos bancos foram devido as condições de marés diferentes, sendo mais intensas durante as marés de sizíguas, onde as correntes são mais fortes e portanto mais sedimentos são transportados para dentro do canal, causando erosão nos bancos. Os sedimentos retornam, de volta para os bancos, com o fluxo de maré vazante. Durante a maré de quadratura, as correntes foram menos intensas e os sedimentos são depositados no delta.

Para o delta associado a desembocadura da Barra Velha, foi notado também que quando ondas do quadrante NE e E, atingem a região, ocorre retirada de sedimentos da parte norte do banco e deposição na parte sul deste, indicando um transporte dos sedimentos de uma região do delta para outra. Quando não há esse regime de ondas, o delta é totalmente influenciado pelas marés, ocorrendo maior retirada de sedimentos durante as fortes correntes de sizígia, e deposição durante a quadratura.

Oertel (1972) descreveu a complexidade dos movimentos de sedimentos sobre canais em resposta a interações entre ondas e marés. A refração de ondas sobre os bancos cria um complexo padrão de cristas de ondas cruzando-se, e a quebra de ondas concen-

tradas nessas áreas de cruzamento ocasiona um levantamento da água intensificando a suspensão de sedimentos com essas ondas grandes tendendo a carregar a areia em direção a costa. A célula de movimento dos sedimentos, entretanto depende da magnitude relativa da superimposição das correntes de maré, da direção de movimento dos sedimentos, e se a corrente está associada com fluxo de enchente ou de vazante. Quando a maré está subindo, as ondas grandes e as correntes de maré transportam sedimentos em direção a costa e sobre as partes altas dos bancos, e somente as correntes de maré transportam sedimentos em direção aos bancos marginais e ao canal de maré. Durante a maré de vazante, o fluxo em direção ao mar, atravessa a superfície dos bancos, através do canal de maré e ao redor dos bancos, depositando os sedimentos.

Este padrão entre a dinâmica dos bancos arenosos e dos deltas foi observado na região de estudo, pois durante as marés de sizígia ou marés altas, para todos os casos, ocorreu um maior transporte de sedimentos para a costa e para dentro do canal de maré; e durante as marés de quadratura ou marés baixas, há pouco transporte de sedimentos e os bancos e os deltas de vazantes tenderam a acumular os sedimentos.

O pontal arenoso (Pontal do Sul), associado as desembocaduras do rio Caravelas, apresentou uma dinâmica influenciada pelo clima de ondas e pelo regime de marés. Este pontal, assim como os bancos arenosos, apresentou uma granulometria de areia grossa a média. Suas características também foram avaliadas nos últimos anos, através da digitalização da linha de costa com imagens de satélites. Para este pontal, notou-se que a região da extremidade do pontal, apresentou acreção para todas as condições simuladas. Segundo Komar (1998), a maioria dos pontais crescem na direção predominante do transporte longitudinal de sedimentos, ou mesmo, se alinham aos ângulos da direção predominante das ondas (Figura 5.1).

Para o pontal do Sul, tanto a direção predominante do transporte quanto a direção de ondas atuaram em seu crescimento: a direção predominante da deriva litorânea na proximidade da extremidade do pontal teve sentido para o norte, e o pontal tem um crescimento na direção da deriva; em relação a direção de ondas, a extremidade do pontal, nos últimos anos, vem crescendo e recurvando-se para noroeste, provavelmente devido a influência do trem de ondas propagados de diferentes direções, principalmente do quadrante NE e E. De acordo com Petersen *et al.* (2008), os pontais formados pelo transporte

litorâneo podem ter uma forma complexa, serem recurvados ou em forma de gancho se as ondas chegarem de um amplo intervalo de direções.

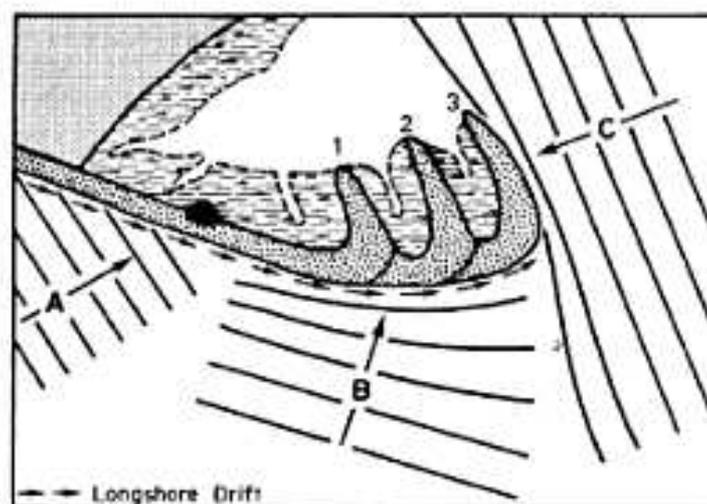


Figura 5.1: Diagrama esquemático da morfologia de um pontal recurvado sobre influência da deriva litorânea e de direções de ondas diferentes. (Fonte: Bird (2007)).

De maneira geral, analisando os pontos extraídos ao longo do pontal, pode-se interpretar a dinâmica e dizer qual são os mecanismos que a controlam. Para o ponto B1 (ver figura 4.30 - página 75), localizado na extremidade do pontal, houve deposição de sedimentos com influência da maré e principalmente devido à ação das correntes geradas pelas ondas sobre o delta de maré vazante. De acordo com os resultados, esta deposição foi mais intensa durante a sizígia, provavelmente porque sobre este regime as correntes de maré são mais intensas, trazendo os sedimentos do delta de vazante. Durante a quadratura, não houve mudanças significativas na forma da extremidade do pontal.

Para as ondas propagadas de E e com alturas variando (CALM2) a deposição de sedimentos foi maior na extremidade, do que para ondas de NE (CALM1), possivelmente em função das ondas de NE atingirem o pontal de forma mais paralela e conseqüentemente criando um transporte menor do que as ondas vindas de E. Já para ondas de SE com alturas constantes (STORM1) a deposição foi maior do que para as ondas do quadrante sul com alturas variando (STORM2). Esta diferença pode ser explicada devido ao fato que as ondas vindas de um intervalo de direções (quadrante sul) e de alturas diferentes, pode implicar em transporte litorâneo com diferentes intensidades. No caso das ondas sempre

propagadas de uma mesma direção e com um mesma altura, resulta em um transporte com intensidades relativamente constantes e portanto podem causar maior deposição.

Em termos gerais, a extremidade do pontal vem sofrendo acresção ao longo do tempo e é influenciada pela energia de ondas que atinge a região. Esta tendência também foi observada pelas imagens de satélites: pois comparando o ano de 1984, o ano base, ao ano de 2008, observou-se que o pontal vem afinando em largura e crescendo em comprimento com a formação de um gancho em sua ponta. Segundo Petersen *et al.* (2008), em estudos em um pontal teórico, observou que se o suprimento de areia é ilimitado, o crescimento do pontal e a resultante escala de comprimento (largura do pontal) dependem primariamente do clima de ondas e que o crescimento de um pontal arenoso é inversamente proporcional à sua largura.

Para o ponto B7, localizado no lado oposto do B1 na parte voltada para o oceano, ocorreu na maioria dos casos erosão neste ponto, durante eventos de quadratura e sizígia e com ondas de maior energia (como em 2007). Essa erosão provavelmente está relacionada ao fato de que a deriva neste ponto tem sentido para o norte e portanto depositando os sedimentos deste local para a extremidade do pontal (em B1), pois os resultados para o transporte lateral neste ponto, mostraram que há transporte de sedimentos do banco externo para o ponto B7, no entanto mesmo assim ocorreu retirada de sedimentos. Através das imagens de satélites, esse padrão de diminuição do pontal neste ponto também foi observado.

Para os pontos localizados do lado oposto, ou seja, no que seria a base do pontal na desembocadura do Canal do Tomba, observou-se no ponto B3, existe a tendência de retirada de sedimentos tanto na sizígia quanto na quadratura, e o transporte lateral predominante dos sedimentos foi com sentido para a Ilha da Caçumba. Provavelmente, os sedimentos nesta parte do pontal, são retirados e transportados para o delta de maré vazante e para dentro do canal durante as forte correntes na maré de sizígia, e na quadratura, estes sedimentos ficam retidos nos bancos marginais e no delta de maré vazante. Os sedimentos provenientes dos pontos B2 e B4 provavelmente não conseguem ser depositados em B3, pois em B4 a deriva neste ponto acaba sendo barrada pelas correntes de maré na desembocadura, transportando os sedimentos para dentro e fora do canal. No ponto B2, as correntes de maré enchente e de vazante oriundas da desembocadura da Barra Velha se

encontram com as do Canal do Tomba, transportando os sedimentos para dentro e fora do estuário.

Durante as condições CALM-2Q e STORM-2Q (na quadratura), em alguns dias ocorreu deposição em B3, exatamente nas mesmas condições em que no ponto B2 em alguns dias de simulação ocorreu retirada de sedimentos. Estes sedimentos de B2 foram provavelmente transportados e depositados em B3 e B4, mas logo os sedimentos são retirados pelas correntes de vazante. Pelas imagens de satélites, observaram-se ao longo dos anos, uma erosão nesta parte do pontal e conseqüentemente um aumento da distância entre a Ilha da Caçumba e o Pontal do Sul.

Na parte do pontal voltada para o oceano, no ponto B4, para todas as condições simuladas, durante quadratura e sizígia, houve erosão nesta parte do pontal. Apenas em alguns dias durante a maré de quadratura ocorreu deposição. Neste ponto, existe um deriva de sedimentos para o sul e o transporte lateral teve sentido para as regiões oceânicas, provavelmente os sedimentos são retirados e depositados nos bancos e deltas de vazante.

Através das imagens de satélites, também foi observado a erosão do pontal neste ponto (B4). Nas imediações deste ponto, existe uma divergência da deriva que ocasiona retirada de sedimentos, isto também foi evidenciado pelas imagens de satélites, pois pôde-se observar um afinamento da largura do pontal nesta região. Este padrão da deriva também foi obtido por Pianca (2007). Segundo Azevedo *et al.* (2005), que realizou estudos na mesma região, analisando imagens de satélites ao longo de 15 anos, observou uma tendência de intensa erosão nesta região do pontal voltada para o oceano enquanto sua face voltada para o continente manteve uma relativa estabilidade. Esta estabilidade na parte interna do pontal também foi observada no presente estudo, com uma pequena acreção nesta parte do pontal.

Através da figura obtida para a força de onda em Caravelas (Figura 4.9, página 46), observou-se uma associação aos anos de maiores energia de onda, ao anos de maior crescimento do pontal. Assim no ano de 1997, onde a energia foi alta, a extremidade do pontal cresceu e no ano seguinte em 1998, onde a energia foi baixa, o pontal não cresceu. No ano de 1999, com alta energia, ocorreu a primeira curvatura da extremidade do pontal e no ano de 2000, com baixa energia, o pontal não teve um crescimento significativo. No

ano de 2005, com alta energia, o pontal cresceu e sua extremidade encurvou-se mais e em 2003, com baixa energia, a ponta encurvou-se um pouco e houve erosão na parte voltada para o oceano. Para os anos de 2006 e 2007, com alta energia de onda, a extremidade do pontal cresceu encurvando-se mais e para o ano de 2008 onde a energia de onda foi relativamente média, o pontal apresentou-se com o mesmo cenário dos anos de 2006 e 2007.

O principal componente de canais dominados por maré (Figura 5.2) são os canais principais de vazante, os quais possuem: em sua parte final um lobo terminal, bancos lineares na margem do canal que bordeiam o canal principal de vazante, plataformas de espraiamento que são camadas rasas de areia localizadas em ambos os lados do canal principal, barras de espraiamentos que formam corpos individuais nas plataformas de espraiamentos e um canal marginal de enchente (Hayes, 1975). Segundo Komar (1996), vários estudos, em canais de maré, indicaram que os processos de correntes e ondas movem os sedimentos para dentro do canal sobre os bancos marginais e associados ao canal dominado pela maré enchente, enquanto ao mesmo tempo fortes correntes de vazante confinadas dentro do canal principal produzem um retorno em direção ao mar do transporte de sedimentos.

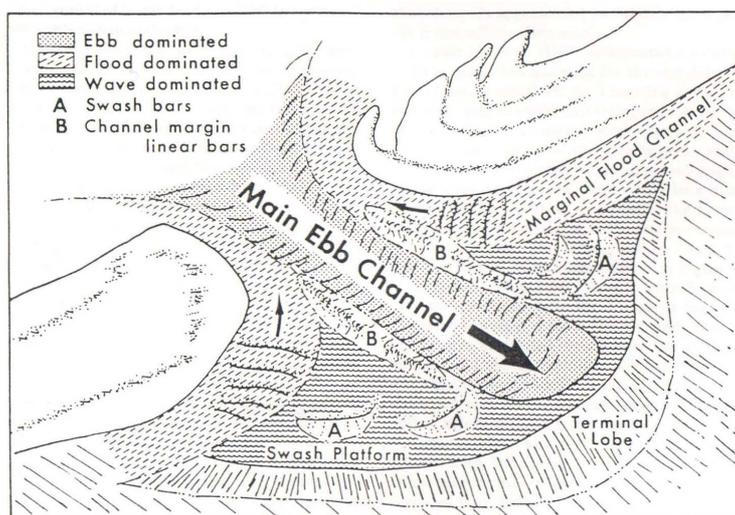


Figura 5.2: Diagrama esquemático da morfologia de um canal dominado por maré (Fonte: Komar (1996)).

A característica costeira, sempre presente, em canais de marés é a separação dos fluxos de vazante e enchente em diferentes canais. Tal segregação e seus efeitos

no transporte de sedimentos foi primeiro documentado por Brunn & Gerritsen (1959), sendo depois encontrando também por diversos outros autores. Cada canal geralmente possui um canal principal que é orientado perpendicular a costa e é dominado pelo fluxo de vazante. Os fluxos de enchente tendem a ser contido entre vários canais pequenos bordeando o canal principal e perto das praias adjacentes. Esta segregação é geralmente atribuída a assimetria das velocidade das correntes de maré e da força de Coriolis (Hayes *et al.*, 1970). Fluxos máximos de maré de enchente ocorrem entre média e alta maré quando a água é elevada e o fluxo está em mais de uma camada, movendo-se através dos bancos marginais de vazante e de seus sistemas de canais. Ao contrário, o fluxo máximo de vazante ocorre em média e baixa maré onde a pequena profundidade da água resulta em um fluxo mais canalizado e dessa maneira mais concentrado dentro do canal de maré vazante. Esta segregação, foi observada em Caravelas (Figura 2.3b - página 16), através da análise dos perfis 1, 2 e 3. Nas partes marginais destes perfis, não foi observado fluxo de maré vazante, mas sim apenas de maré enchente, já nas partes centrais, observou-se o fluxo de vazante.

As dragagens no Canal do Tomba, ocorridas nos últimos 6 anos (2002 à 2008), podem estar interrompendo a transferência de sedimentos entre as regiões adjacentes ao canal (Pontal arenoso e Ilha da Caçumba) e conseqüentemente estarem associadas as erosões ocorridas na Ilha Pontal do Sul e na linha de costa da Ilha da Caçumba. Nas simulações numéricas, do presente trabalho, não foram incluídas as dragagens, entretanto foi observado através das análises das imagens de satélites de 2003 a 2008 que estas regiões estão sofrendo um processo de erosão ao longo dos anos. Segundo FitzGerald *et al.* (2000), as variáveis que governam a transferência de sedimentos entre as regiões adjacentes aos canais de maré incluem o prisma de maré, a geometria do canal, a energia das ondas e das marés, o suprimento de sedimentos e modificações de engenharia, como dragagens e construção de molhes.

A figura 5.3, apresenta um resumo, da importância relativa de cada processo físico no transporte de sedimentos ao longo da região. A região do canal foi dominada pelas marés, transportando os sedimentos como consequência dos fluxos de marés assimétricos (enchente e vazante) no canal. Parte destes sedimentos transportados por estes fluxos são depositados na parte externa do canal formando os bancos submersos que por sua vez,

são controlados pela interação entre os fluxos de maré e as correntes geradas pelas ondas. A descarga fluvial do Rio Caravelas teve um papel insignificante nestes processos, por ser relativamente baixa.

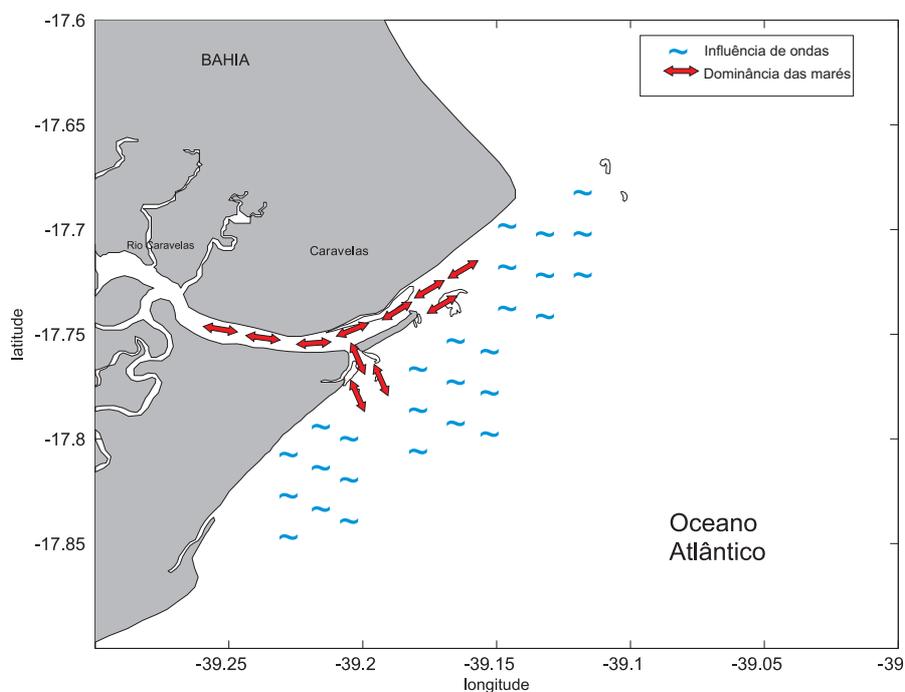


Figura 5.3: Resumo das áreas de relativa influência das marés e das ondas sobre o transporte de sedimentos, na região de Caravelas.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Conclusões

Como conclusões gerais, pode-se afirmar que através do uso de modelagem numérica foi possível entender os processos que controlam a distribuição e o transporte dos sedimentos ao longo da região estudada, resultando em informações sobre a dinâmica costeira na região de Caravelas, BA.

As conclusões específicas foram:

- O modelo MIKE21 mostrou-se como uma boa ferramenta no estudo do processo das ondas, da hidrodinâmica e de transportes de sedimentos na área de interesse;
- Foi possível a calibração e a validação do modelo MIKE21-FW (hidrodinâmico), através da utilização de dados in-situ coletados durante duas campanhas de coletas e comparações para o modelo MIKE21-SW (ondas) com outros estudos de ondas na região;
- O estuário de Caravelas foi classificado como dominado por marés;
- Os padrões de propagação das ondas da região são bastante influenciados pela topografia complexa e pela presença de inúmeros parcéis presentes no local de estudo, como o Banco de Abrolhos e o Parcel das Paredes;
- Os bancos arenosos são formados principalmente devido as correntes de marés que transportam os sedimentos para serem acumulados ao longo desses bancos e feições

arenosas associados à desembocadura;

- O clima de ondas, apesar de apresentarem pequena energia, também influenciam na dinâmica destes bancos através das correntes induzidas por elas (deriva litorânea), pois promovem o transporte ao longo das praias adjacentes e dos próprios bancos;
- O pontal arenoso é influenciado pelas ondas, através das correntes de deriva, como também é influenciado pelos processos que ocorrem no canal de maré, ou seja, pelos fluxos de maré;
- Os bancos e o pontal arenoso, possuem uma papel importante na dinâmica da região, uma vez que são formas de acumulação de sedimentos, representam importantes fontes destes para as praias adjacentes e para o próprio estuário e portanto o impacto sobre essas áreas poderão resultar em sérias consequências no volume de sedimentos ao longo da zona costeira em questão;
- As dragagens realizadas no Canal do Tomba podem estar influenciando na transferência de sedimentos entre as regiões adjacentes ao canal de maré, e ocasionando a erosão evidenciada no pontal arenoso e na linha de costa da Ilha da Caçumba. Esses efeitos da dragagem não foram considerados na modelagem numérica;
- As principais limitações do uso do modelo MIKE21 foram: os fluxos calculados, pelo modelo, são uma média da coluna de água, o que nem sempre pode representar a atual circulação na região (apesar da região de estudo ser classificada como homogênea); a resolução da malha do modelo, que não conseguiu representar algumas feições devido à batimetria complexa da região e resultando em diferenças nas intensidades das correntes, principalmente na região estuarina, e finalmente a resolução espacial limitada da disponibilidade de amostras de sedimentos impossibilitou a validação do módulo de sedimentos para região.
- Apesar dessas limitações do modelo, a validação parcial do MIKE21-FW mostrou que este conseguiu reproduzir de uma forma geral os fenômenos observados neste ambiente complexo.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados apresentados no presente trabalho, evidenciaram as variações morfológicas ocorridas, ao longo do tempo, na Ilha do Pontal Sul e na Ilha da Caçumba. Estas variações podem estar associadas com a dragagem do Canal do Tomba. Estudos referentes a dinâmica desses ambientes são inexistentes. Em face dessa carência de informações a cerca dos processos pontuais que ocorrem nesses ambientes, apresentamos como sugestões para trabalhos futuros:

- Levantamentos morfológicos da Ilha do Pontal do Sul;
- Inclusão dos efeitos da dragagem no transporte de sedimentos e na evolução morfológica;
- Coleta de informações hidrodinâmicas nas regiões oceânicas adjacentes à desembocadura;
- Aplicação de um modelo 3D para avaliar possíveis efeitos da estratificação sobre a dinâmica do ambiente;
- Levantamentos geofísicos para determinação das formas de fundo;
- Avaliar a influência do transporte de sedimentos em suspensão para a dinâmica da região.

Referências Bibliográficas

- Abbott, M.B., & Larsen, J. 1985. Modelling circulations in depth-integrated flows. *Journal of Hydraulic Research*, **23**, 309–326.
- Abbott, M.B., McCowan, A.D., & Warren, I.R. 1988. *Numerical modelling of free-surface flows that are two-dimensional in plan*. In: H.B. Fisher (Ed.). *Transport Models for Inland and Coastal Waters*. Academic Press, 222-283pp.
- ANA. *Agência Nacional de Águas - Sistema de Informações Hidrológicas*. <http://hidroweb.ana.gov.br/>.
- Andrade, A.C.S., Dominguez, J.M.L., Martin, L., & Bittencourt, A.C.S.P. 2003. Quaternary evolution of the Caravelas strandplain - Southern Bahia State - Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*.
- Azevedo, I. F., Guerra, J. V., & Cabral, A. P. 2005. Evolução geomorfológica de pontais arenosos associados à foz de rios na orla da planície de Caravelas - BA. *Page 6 of: Anais X Congresso da ABEQUA*.
- Bird, E.C.F. 1996. *Beach Management*. J. Wiley. 260p.
- Bird, E.C.F. 2007. *Coastal Geomorphology*. J. Wiley, 411pp.
- Bittencourt, A.C.S.P., Martin, L., Dominguez, J.M.L., & Silva, I.R. 2000. Patterns of sediment dispersion coastwise the state of Bahia - Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **72**, 271–286.
- Bittencourt, A.C.S.P., Martin, L., Dominguez, J.M.L., Silva, I.R., & Souza, D.L. 2002. A significant longshore transport divergence zone at the northeastern brazilian coast: im-

- plications on coastal quaternary evolution. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **74**, 505–518.
- Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Martin, L., & Silva, I.R. 2003. Uma aproximação de primeira ordem entre o clima de ondas e a localização, de longa duração, de regiões de acumulação flúvio-marinha e de erosão na costa norte do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(2), 159–166.
- Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Martin, L., & Silva, I.R. 2005. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: an overview. *Marine Geology*, **219**, 219–234.
- Boothroyd, J.C. 1985. *Tidal inlets and tidal deltas*. In: R.A. Davis (Ed.). *Coastal Sedimentary Environments*. Springer Verlag, New York. 445-532p.
- Brunn, P., & Gerritsen, F. 1959. Natural bypassing of sand at coastal inlets. *Journal of Waterways and Harbors Division*, **85**(WW4), 75–107.
- Bruun, P., & Gerritsen, F. 1960. *Stability of Coastal Inlets*. Amsterdam: North Holland. 123p.
- Camargo, M.G. 2005. *Sysgran 3.0*. Centro de Estudos do Mar - UFPR. <http://200.17.232.168/sysgran/>.
- Carter, R.W.G., & Woodroffe, C.D. 1994. *Coastal Evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press, 539pp.
- Charfas, C. 1990. The fringe of the ocean: under siege from land. *Science*, **248**(4952), 163–164.
- Cheng, R.T, Casulli, V., & Gartner, J. 1993. Tidal, residual, intertidal mudflat (TRIM) model and its applications to San Francisco Bay, California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **36**, 235–280.
- Cowell, P.J., & Thom, B.G. 1994. *Morphodynamics of coastal evolution*. In: Carter, R.W.G. and Woodroffe, C.D. (Eds.). *Coastal Evolution*. Cambridge University Press, 33-86pp.

- Davis, R.A. 1994. *Barrier island systems: a geologic overview*. In: R.A. Davis (Ed.). *Geology of Holocene Barrier Island Systems*. 1-46p.
- Davis, R.A., & Fitzgerald, D.M. 2004. *Beaches and Coasts*. Blackwell Publishing, 419pp.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. 2004. *Coastal processes with engineering application*. Cambridge University Press.
- Dominguez, J. M. L., & Bittencourt, A. C. S. P. 1996. Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in northeastern Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **68**(3), 355–371.
- Dominguez, J.M.L., Andrade, A.C.S., Almeida, A.B., & Bittencourt, A.C.S.P. 2009. *The Holocene Barrier Strandplains of the State of Bahia*. In: Dillenburg, S. and Hesp, P. (Eds.). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, Berlin, 390p.
- Dutra, L.X. 2003. *Os efeitos do aporte de sedimento na vitalidade dos recifes de corais de Abrolhos, Bahia*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 91p.
- Dyer, K., & Huntley, D.A. 1999. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges. *Continental Shelf Research*, **19**, 1285–1330.
- Escoffier, F.F. 1940. The stability of tidal inlets. *Shore and Beach*, 114–115.
- FitzGerald, D.M. 1988. *Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets*. In: A.J. Mehta (Ed.) *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. Lecture Notes on Coastal Estuarine Studies. 186-225p.
- FitzGerald, D.M., Kraus, N.C., & Hands, E.B. 2000. Natural mechanisms of sediment bypassing at tidal inlets. *ERDC/CHL CHETN*, **IV**(30), 1–10.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. 1957. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. *The Journal of Sedimentary Petrology*, **27**, 3–26.
- Goodwin, P. 1996. Predicting the stability of tidal inlets for wetland and estuary management. *Journal of Coastal Research*, **SI**(23), 83–101.

- Hansen, D.V., & Rattray, M.Jr. 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnology and Oceanography*, **11**(3), 319–325.
- Haslett, S.K. 2000. *Coastal Systems*. Routledge, 218pp.
- Hayes, M.O. 1975. Morphology of sand accumulations in estuaries. *Estuarine Research*, **2**, 3–22.
- Hayes, M.O., Goldsmith, V., & Hobb, C.H. 1970. Offset coastal inlets. *Proceedings 12th Coastal Engineering Conference*, 1187–1200.
- Hume, T.M., & Herdendorf, C. E. 1988. A geomorphic classification of estuaries and its application to coastal resources management: a New Zealand example. *Ocean and Shoreline Management*, **2**, 249–274.
- Huntley, D.A., Leeks, G.J.L., & Walling, D.E. 2001. *From rivers to coastal seas: the background and context of the land-ocean interaction study*. In: Huntley, D.A. and Leeks, G.J.L. and Walling, D.E. (Eds.). *Land-Ocean Interaction: measuring and modelling fluxes from river basins to coastal seas*. IWA Publishing, London, 1-7p.
- Jarret, J.T. 1976. *Tidal prism-inlet area relationships*. GITI Report No. 3, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. 54p.
- Komar, P.D. 1996. Tidal-inlet processes and morphology related to transport of sediments. *Journal of Coastal Research*, **SI**(23), 23–45.
- Komar, P.D. 1998. *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall. 429p.
- LeConte, L.J. 1905. Discussion of Notes on the improvement of river and harbor outlets in the United States (D.A. Watt). *Transcripts of the ASCE*, **LV**, 306–308.
- Leão, Z.M.A.N. 1999. *Abrolhos, BA. O complexo recifal mais extenso do Atlântico Sul*. <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio090/sitio090.htm>.
- Lessa, G., Teixeira, C.E.P., & Castro, C.B. 2005. Variabilidade da turbidez e taxas de sedimentação na zona costeira de Caravelas (BA): Existem evidências de impacto das atividades de dragagem do canal do Tomba nos recifes de Coral? *Page 6 of: Anais X Congresso da ABEQUA*.

- Mehta, A.J. 1996. A perspective on process related research needs for sandy inlets. *Journal of Coastal Research*, **SI(26)**, 3–21.
- Miranda, L. B. 2009. *Projeto Institutos do Milênio: Produtividade, Sustentabilidade e Utilização do Ecossistema do Banco de Abrolhos (PROABROLHOS)*. Subprojeto: Trabalhos Estuarinos.
- Miranda, L.B., Castro, B.M., & Kjerfve, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. EDUSP, São Paulo. 424p.
- Nielsen, P. 1979. Some basic concepts of wave sediment transport. *Series Paper 20. Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark*.
- O'Brien, M.P. 1931. Estuary tidal prisms related to entrance areas. *Civil Engineering*, **1**, 738–739.
- O'Brien, M.P. 1969. Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, **WWI**, 43–52.
- Oertel, G.F. 1972. Sediment transport on estuary entrance shoals and the formation of swash platforms. *Journal Sedimentary Petrology*, **42**, 858–868.
- Oertel, G.F. 1988. *Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands*. In: D.G. Aubrey and L. Weishar (Eds.). *Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets. Lectures Notes on Coastal Estuarine Studies*. 279–318pp.
- Pereira, A.F., Bélem, A.L., Castro, Belmiro M., & Geremias, R. 2005. Tide-topography interaction along the eastern Brazilian shelf. *Continental Shelf Research*, **25**, 1521–1539.
- Pereira, M.D., Siegle, E., Miranda, L.B., & Schettini, C.A.F. submetido. Caracterização sazonal da hidrodinâmica e do transporte de material particulado em suspensão em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas (BA). submetido. *Revista Brasileira de Geofísica*.
- Petersen, D., Deigaard, R., & Fredsøe, J. 2008. Modelling the morphology of sandy spits. *Coastal Engineering*, **55(7–8)**, 671–684.

- Pianca, C. 2007. *Refração de ondas e deriva litorânea na região de Caravelas - BA*. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Oceanográfico - Universidade de São Paulo.
- Pritchard, D.W. 1955. Estuarine Circulation Patterns. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **81**(717), 1–11.
- Raudkivi, A.J. 1988. The roughness height under waves. *Journal of Hydraulic Research*, **26**(5), 165–178.
- Santos, A. N. 2006. *Diagnóstico das condições geoambientais da orla marítima da Costa das Baleias, Extremo Sul do Estado da Bahia*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 152p.
- Shepard, F.P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, **24**(3), 151–158.
- Siegle, E. 2003. *Sediment Transport and Morphodynamics at an Estuary Mouth: a Study using Coupled Remote Sensing and Numerical Modelling*. Ph.D. thesis, University of Plymouth. 267p.
- Siegle, E., Huntley, D.A., & Davidson, M.A. 2004. Physical controls on the dynamics of inlet sandbar systems. *Ocean Dynamics*, **54**, 360–373.
- Siegle, E., Huntley, D.A., & Davidson, M.A. 2007. Coupling video imaging and numerical modelling for the study of inlet morphodynamics. *Marine Geology*, **236**, 143–163.
- Silva, I.R. 1999. *Avaliação da erosão costeira no Sul do Estado da Bahia: Belmonte (limite Bahia-Espírito Santo)*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 97p.
- Sutherland, J., Hall, L.J., & Chesher, T.J. 2001. *Evaluation of the coastal area model PISCES at Teignmouth (UK)*. HR Wallingford Report TR 125.
- Teixeira, C.E.P. 2006. *Caracterização e variabilidade da hidrodinâmica da zona costeira adjacente ao Banco de Abrolhos*. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 93p.

- Tolman, Hendrik L. 2002. *User Manual and System documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*. National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA.
- Tolman, H.L. 1999. *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18*. NOAA/NWS/NCEP/OMB. Tech. note 166. 110p. edn. Disponível em: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch>.
- USNavy. 1978. *Marine Climatic Atlas of the World, volume IV, South Atlantic Ocean*. Washington D.C., 325p.
- Van-Kreeke, J. 1992. Stability of tidal inlets: Escoffier's Analysis. *Shore and Beach*, 9–12.
- Van-Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J.P. 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, **47**, 295–327.
- Vriend, H.J. De, Zyserman, J., Roelvink, J.A., Péchon, P., & Southgate, H.N. 1993. Medium term 2DH coastal area modeling. *Coastal Engineering*, **21**, 193–224.
- Walton, T.L., & Adams, W.D. 1976. Capacity of inlet outers bars to store sand. *Pages 1919–1937 of: Proceedings of the 15th Conference on Coastal and Ocean Engineering, ASCE*.
- Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, **30**, 377–392.
- Woodroffe, C.D., Chappell, J., Thom, B.G., & Wallensky, E. 1989. Depositional model of a macrotidal estuary and floodplain, South Alligator River, Northern Australia. *Sedimentology*, **36**, 737–756.
- Wright, L.D., & Thom, B.G. 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, **1**, 412–459.
- Zenkovitch, V.P. 1967. *Processes of coastal development*. Oliver and Boyd, London, 738pp.

Apêndice A

Transporte de sedimentos

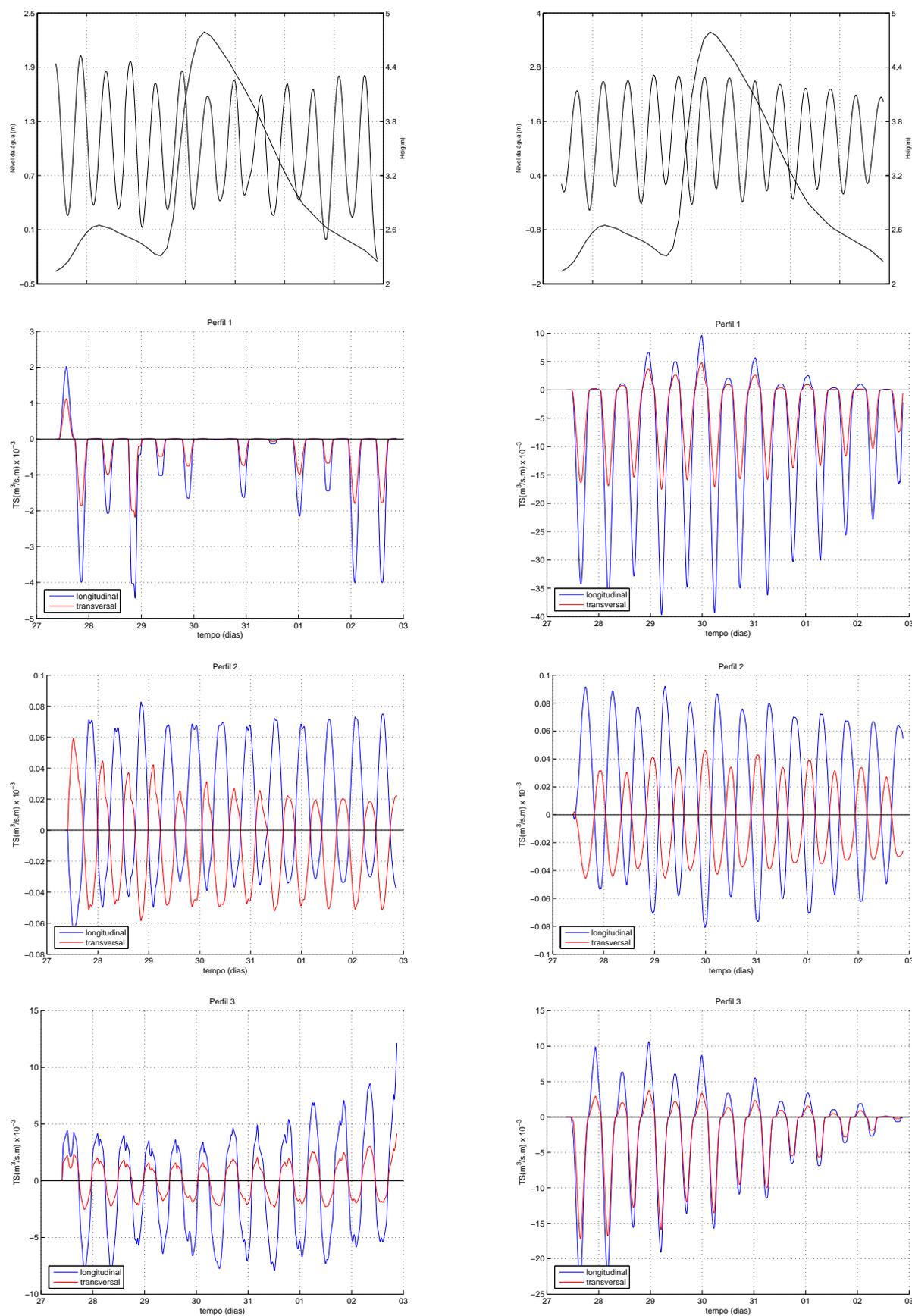


Figura A.1: Condições de contorno e transporte médio de sedimentos por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita).

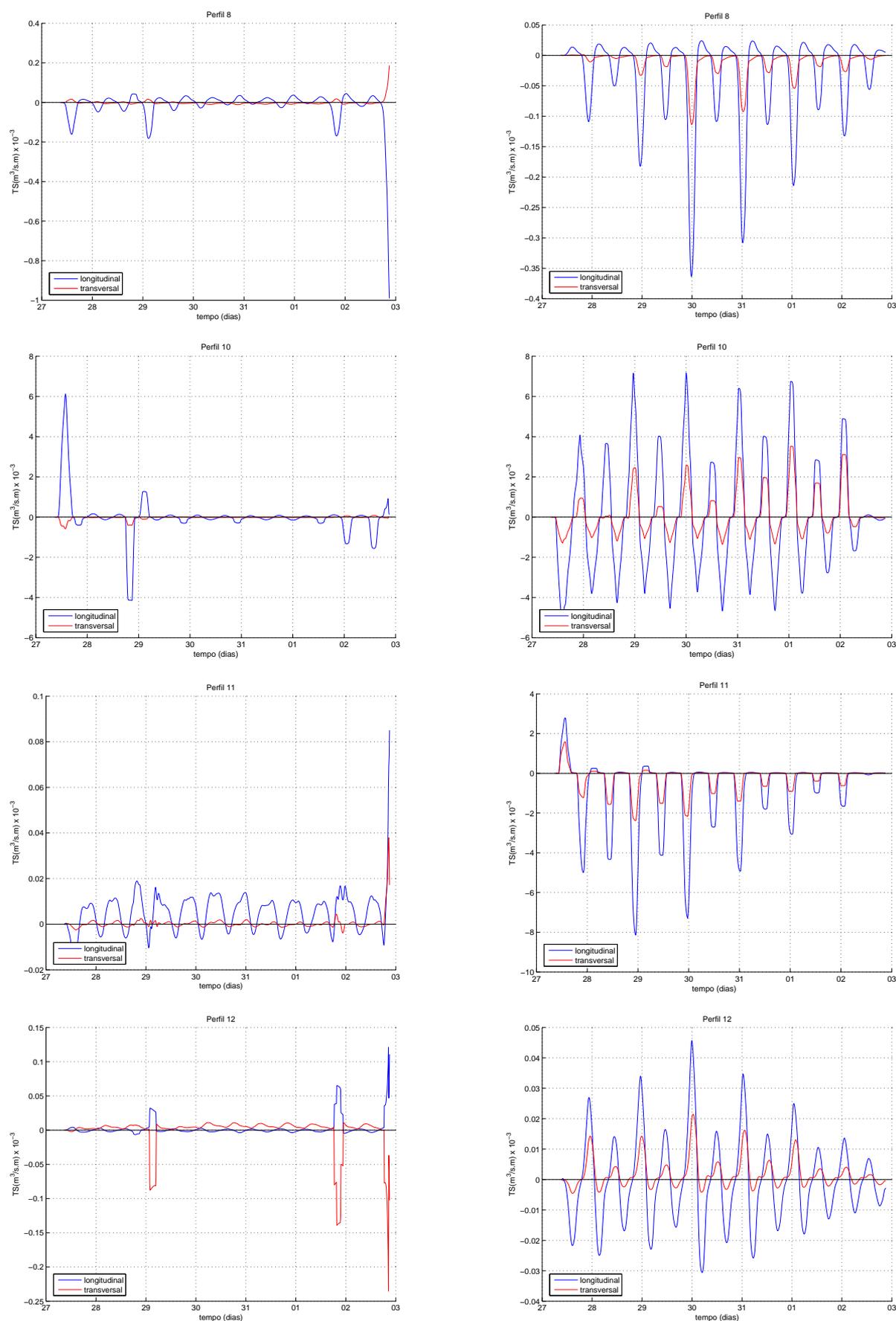


Figura A.2: Transporte médio de sedimentos por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita).

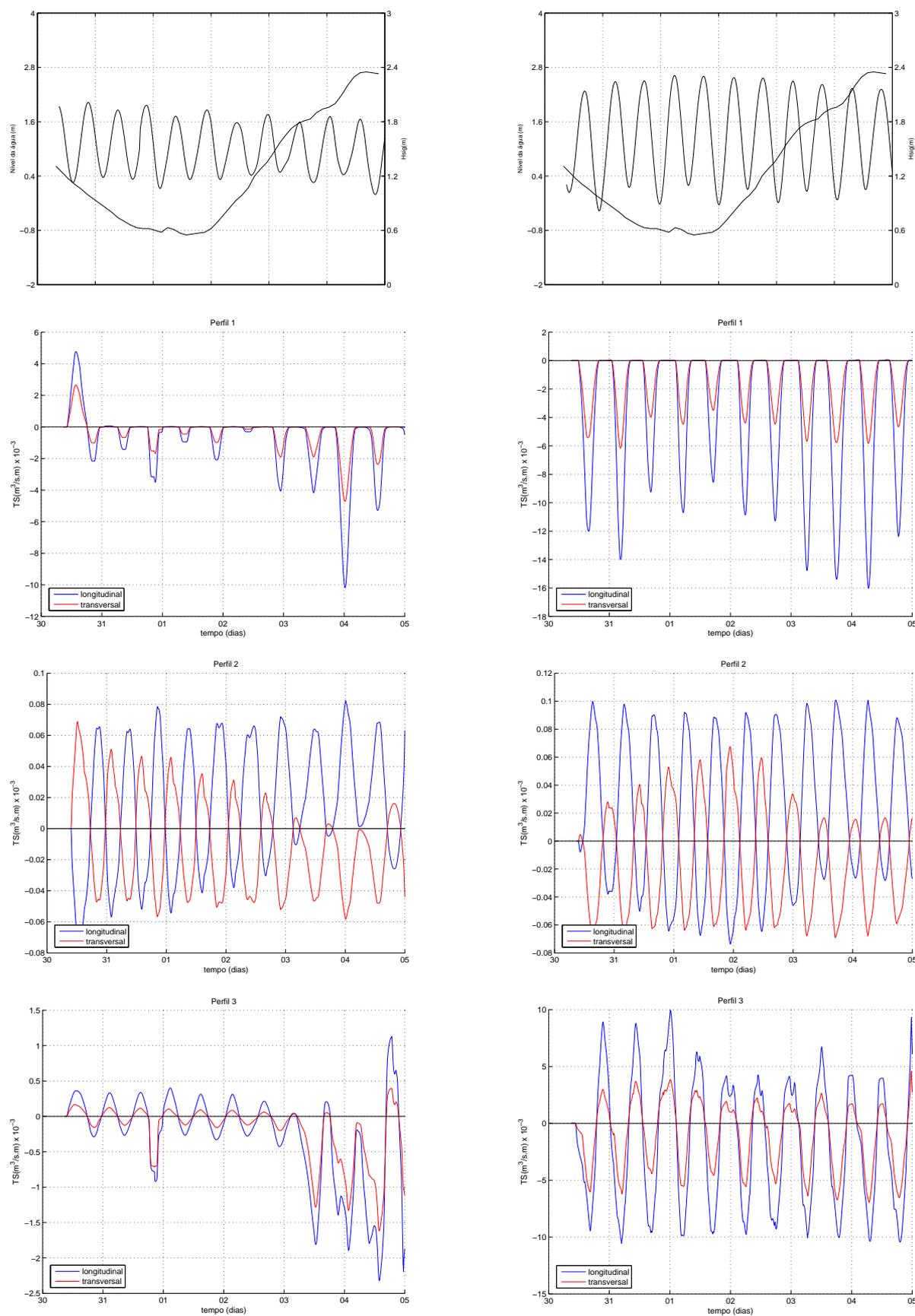


Figura A.3: Condições de contorno e transporte médio de sedimentos por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita).

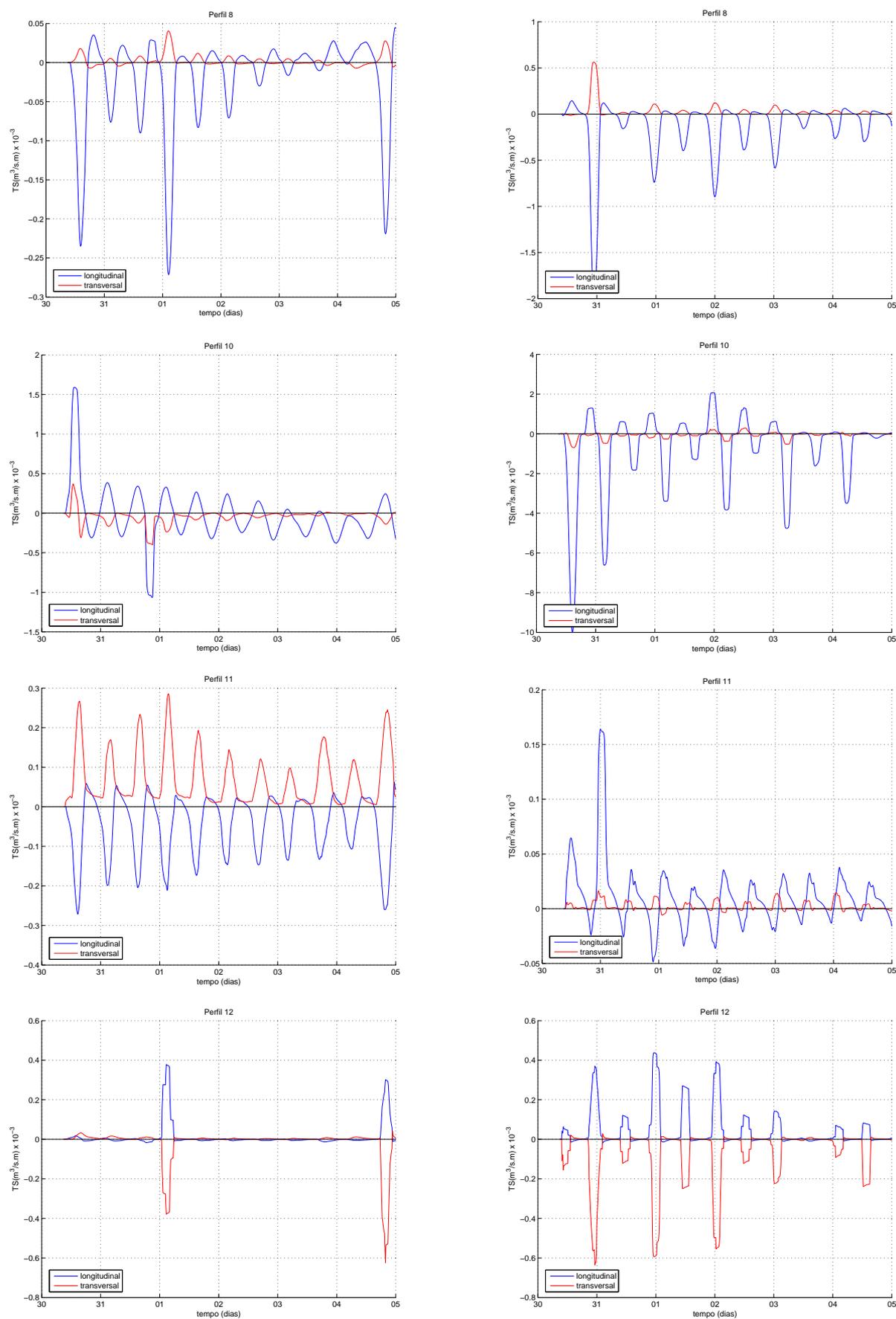


Figura A.4: Transporte médio de sedimentos por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita).

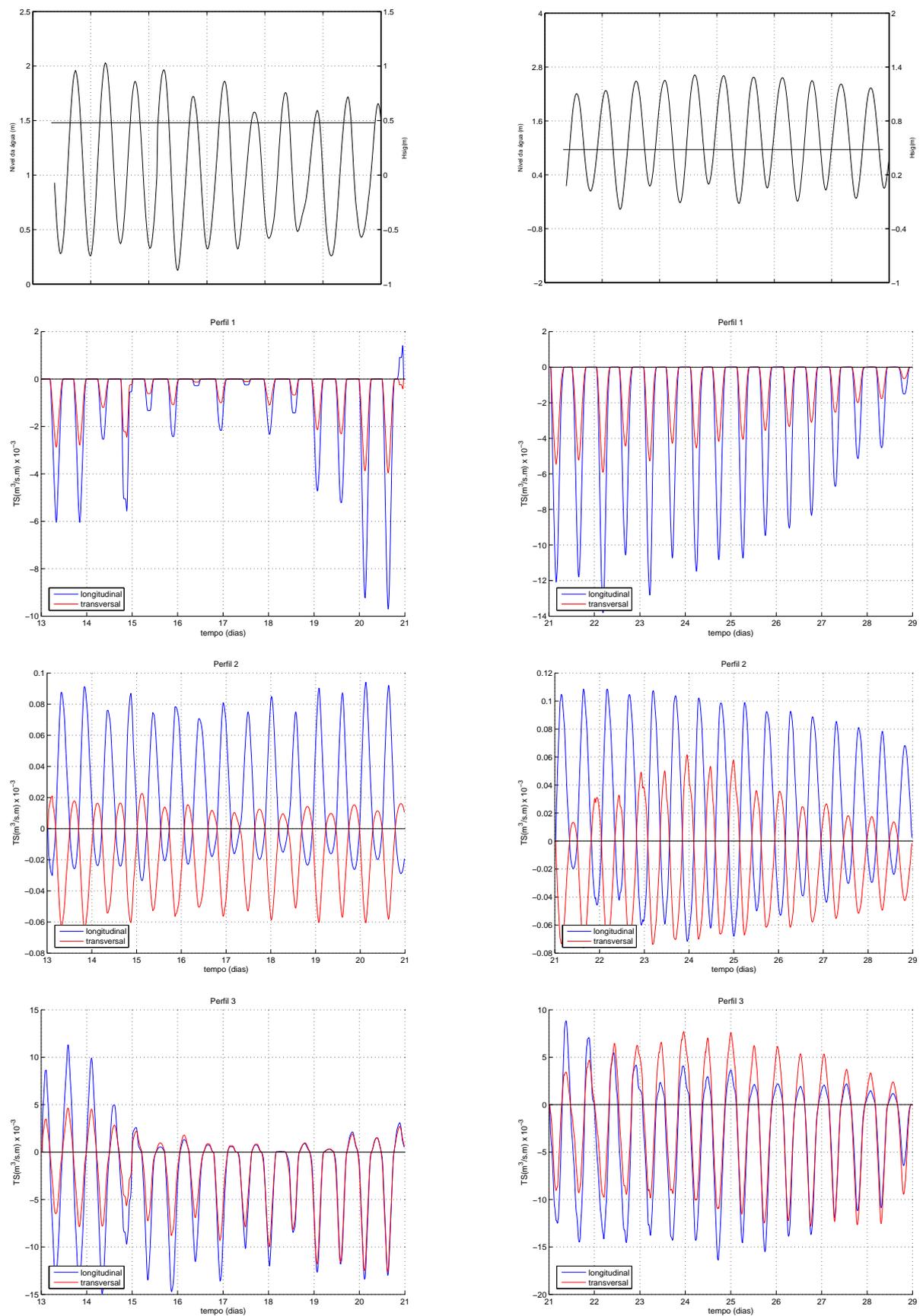


Figura A.5: Condições de contorno e transporte médio de sedimentos por dia para para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita).

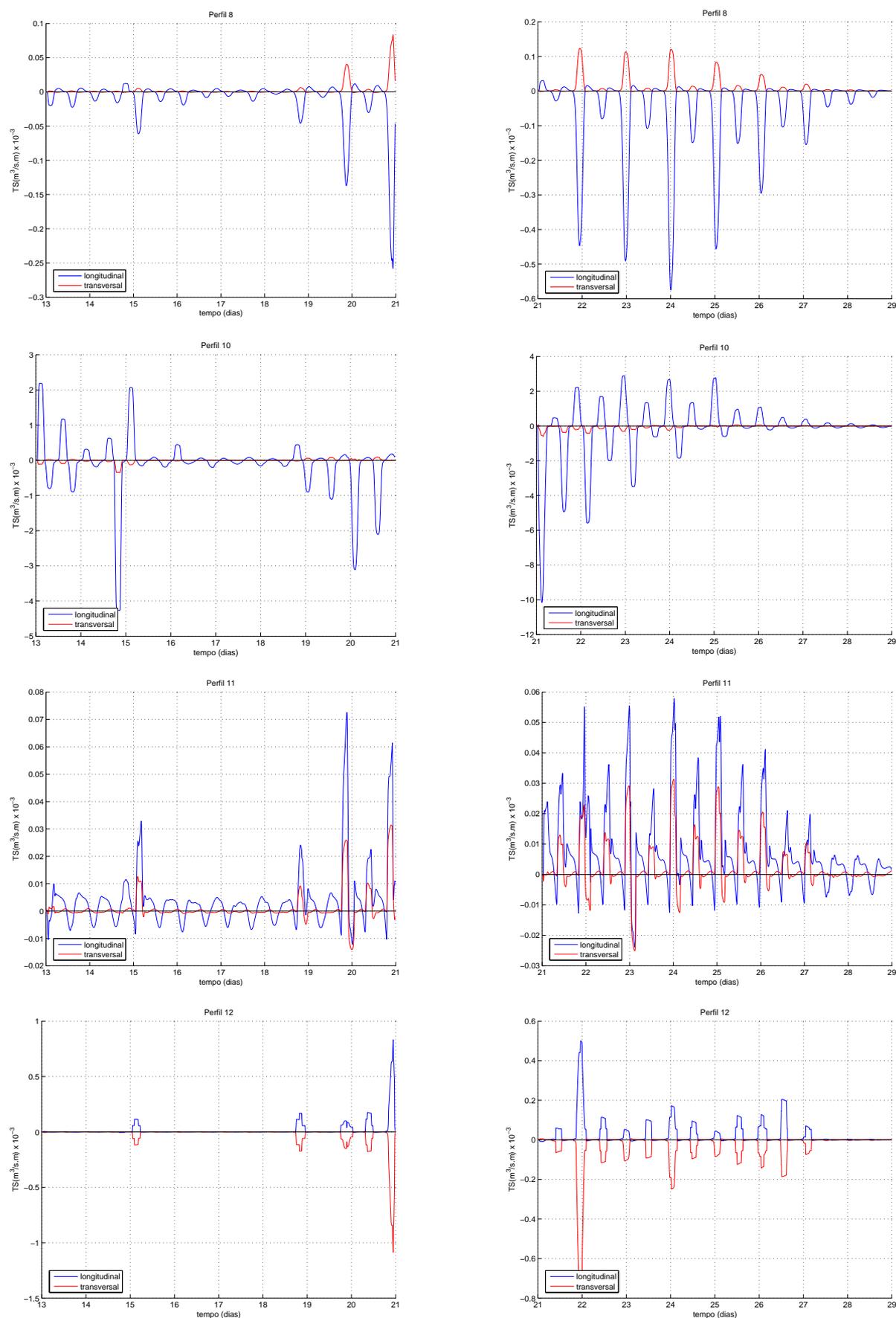


Figura A.6: Transporte médio de sedimentos por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita).

Apêndice B

Mudança do fundo

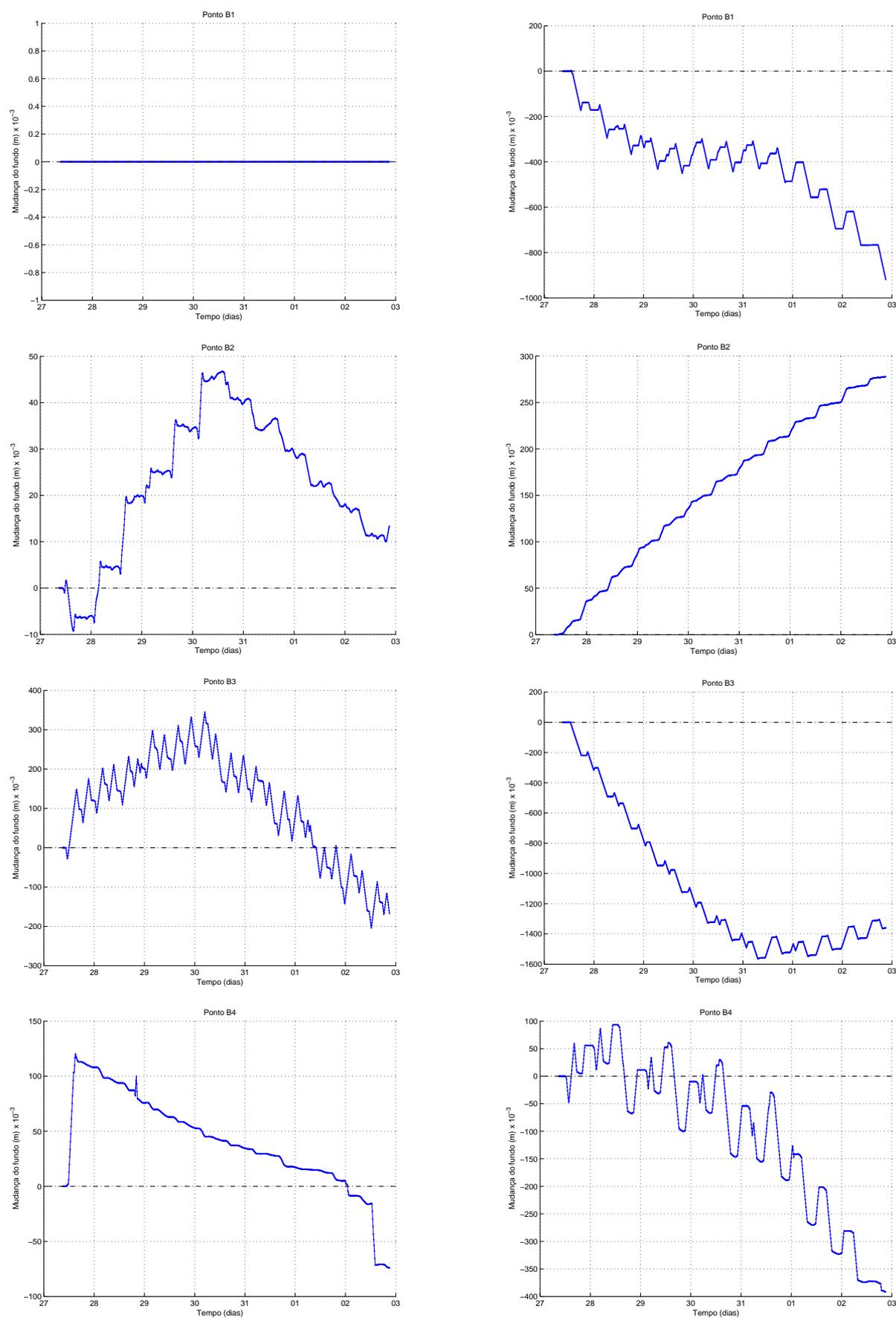


Figura B.1: Mudança do fundo por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita).

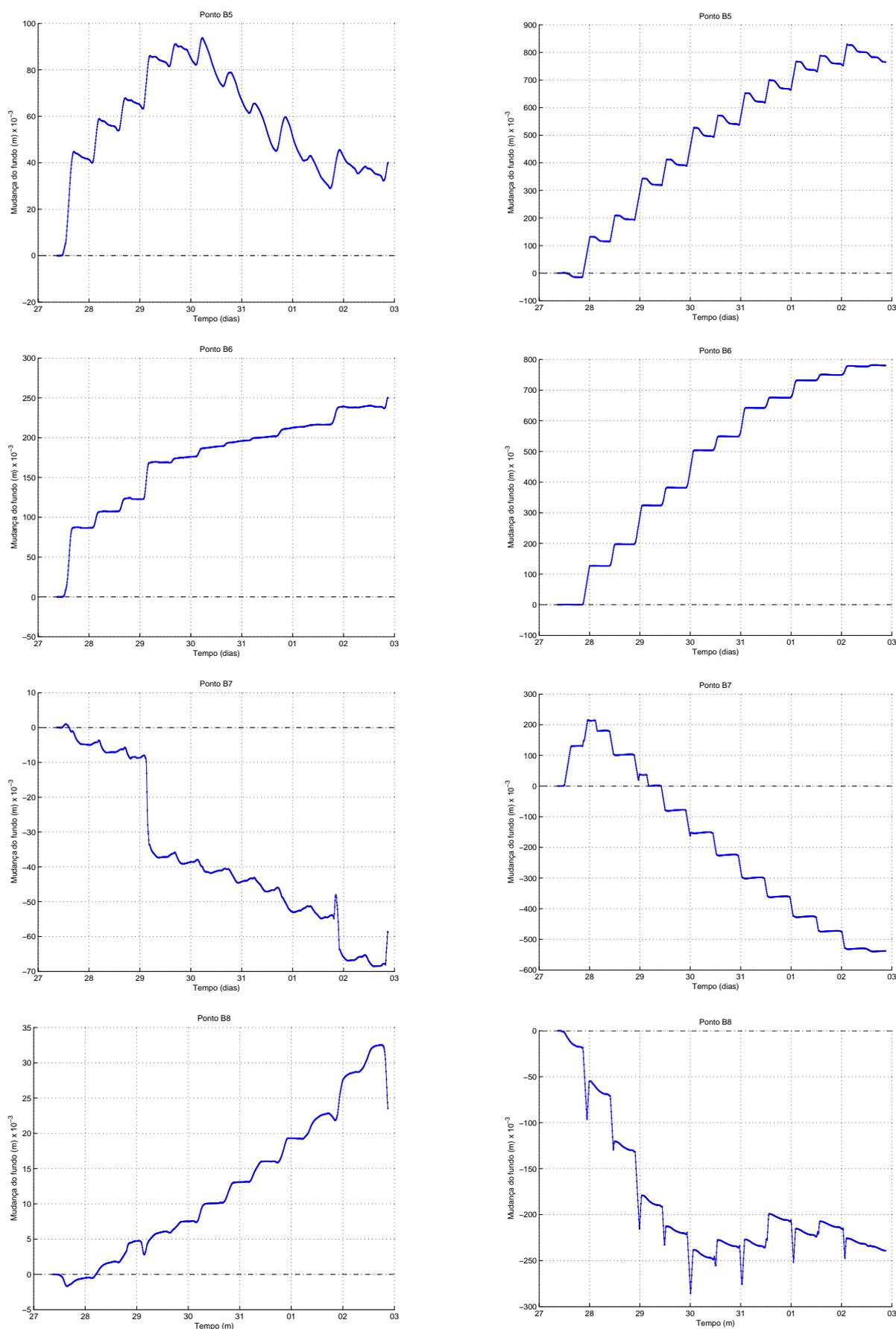


Figura B.2: Mudança do fundo por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita).

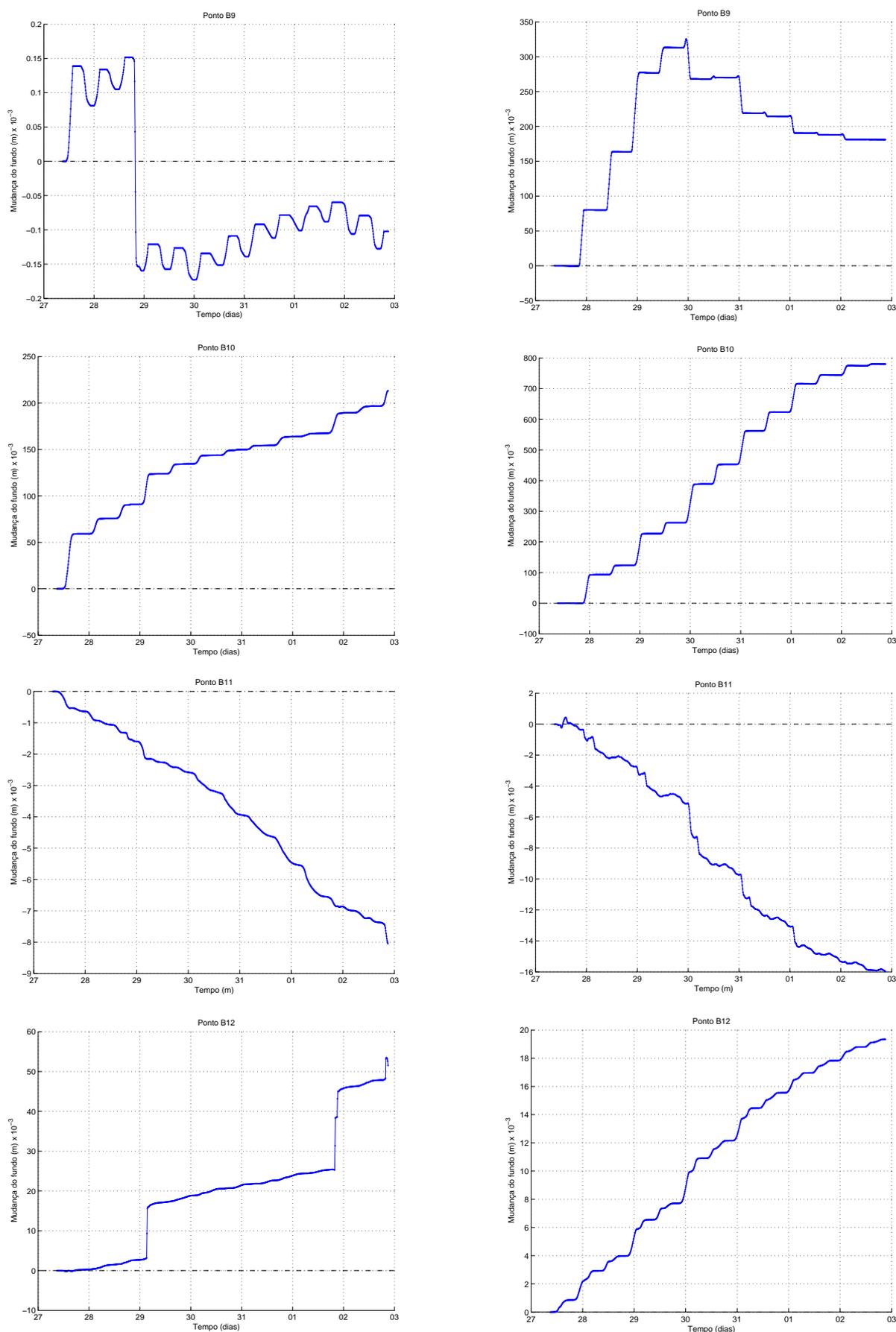


Figura B.3: Mudança do fundo por dia para as condições: STORM2-Q (esquerda) e STORM2-S (direita).

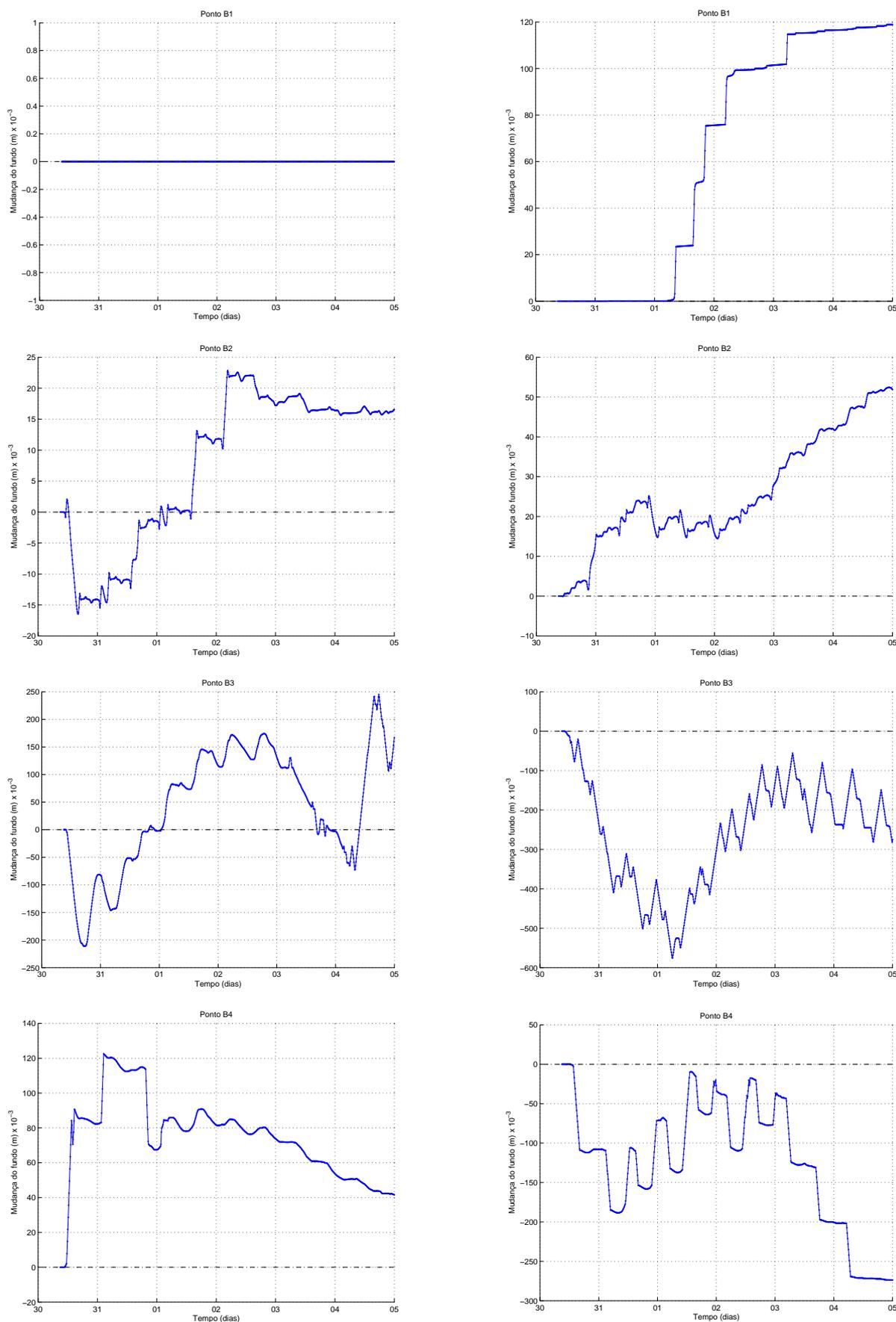


Figura B.4: Mudança do fundo por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita).

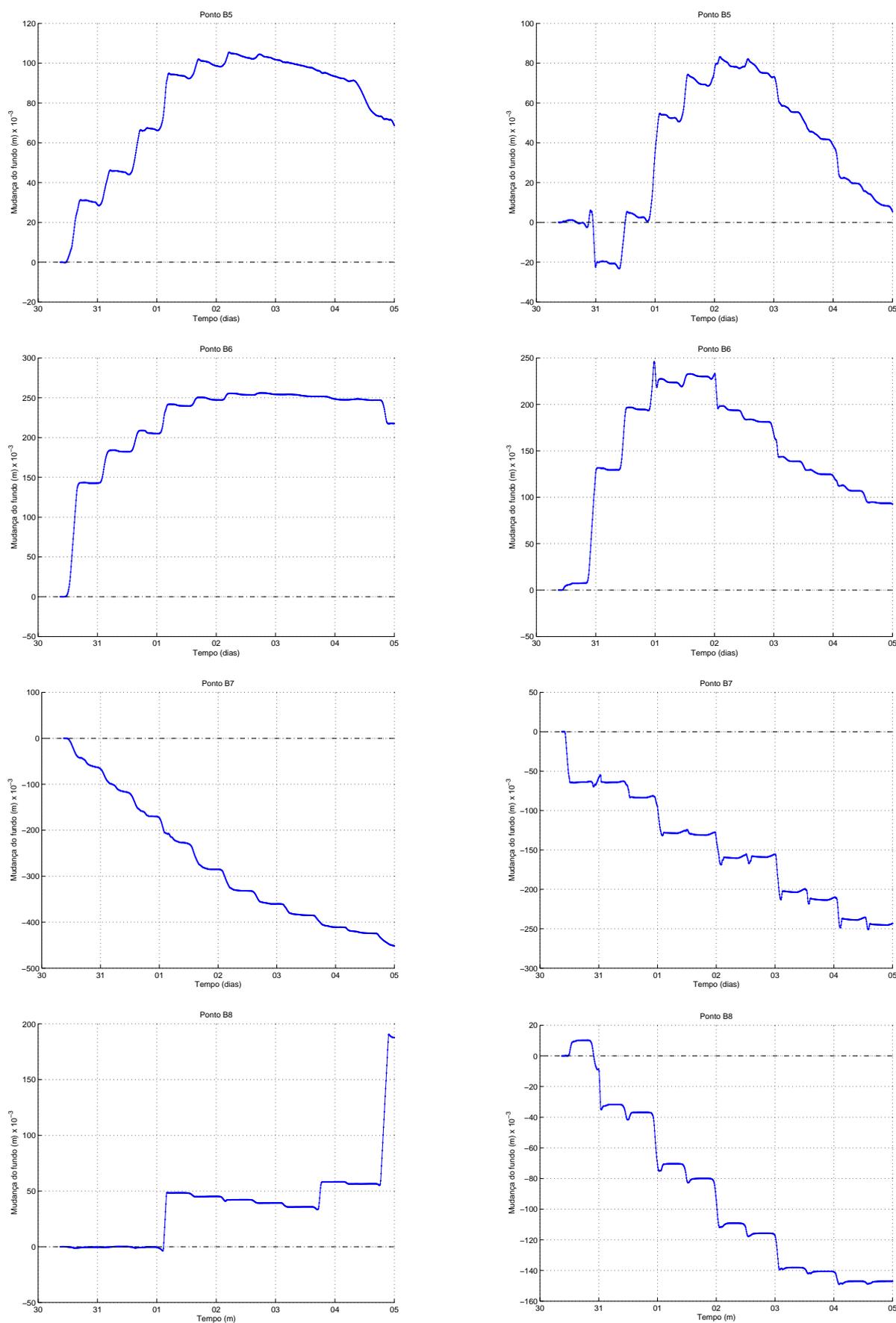


Figura B.5: Mudança do fundo por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita).

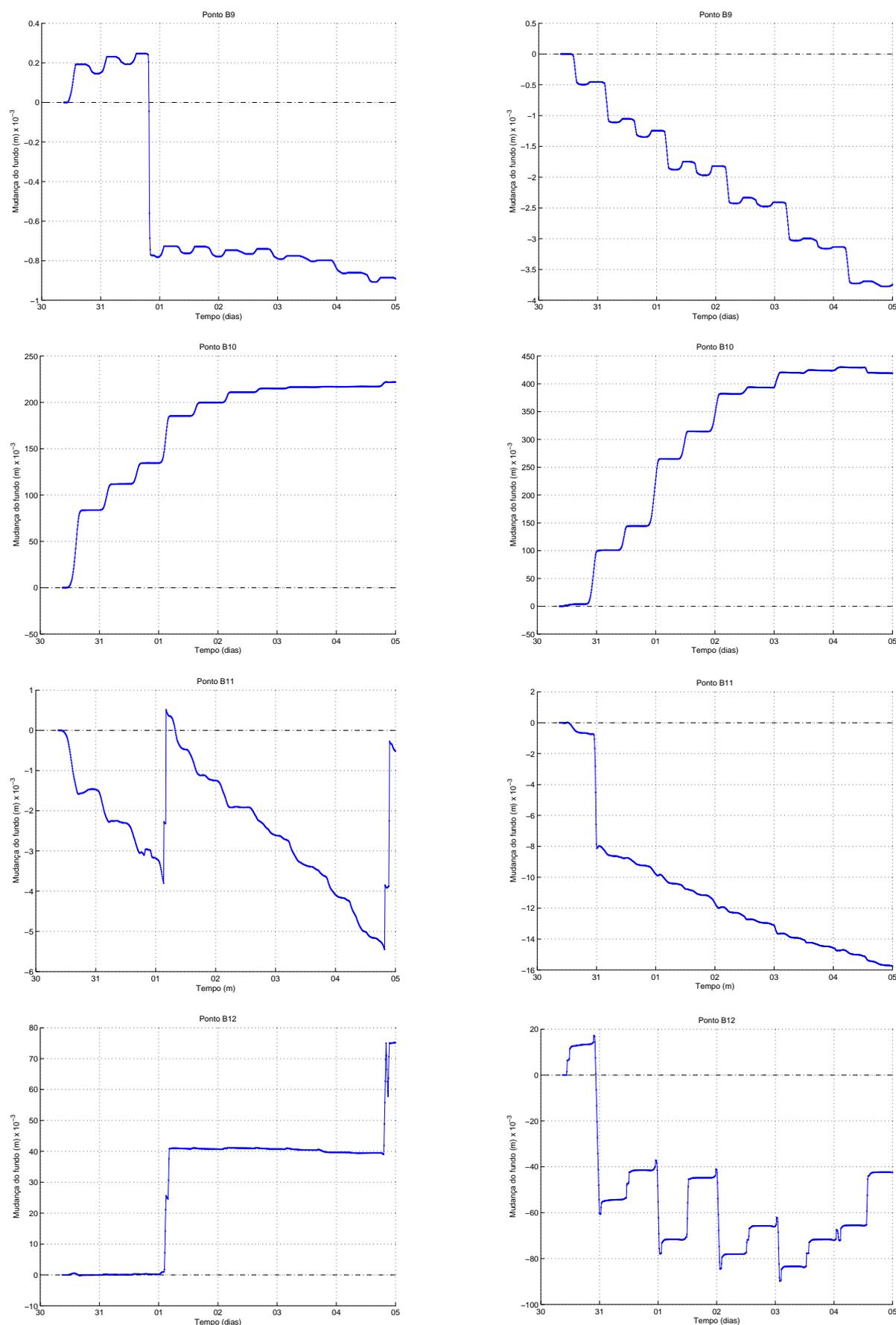


Figura B.6: Mudança do fundo por dia para as condições: CALM2-Q (esquerda) e CALM2-S (direita).

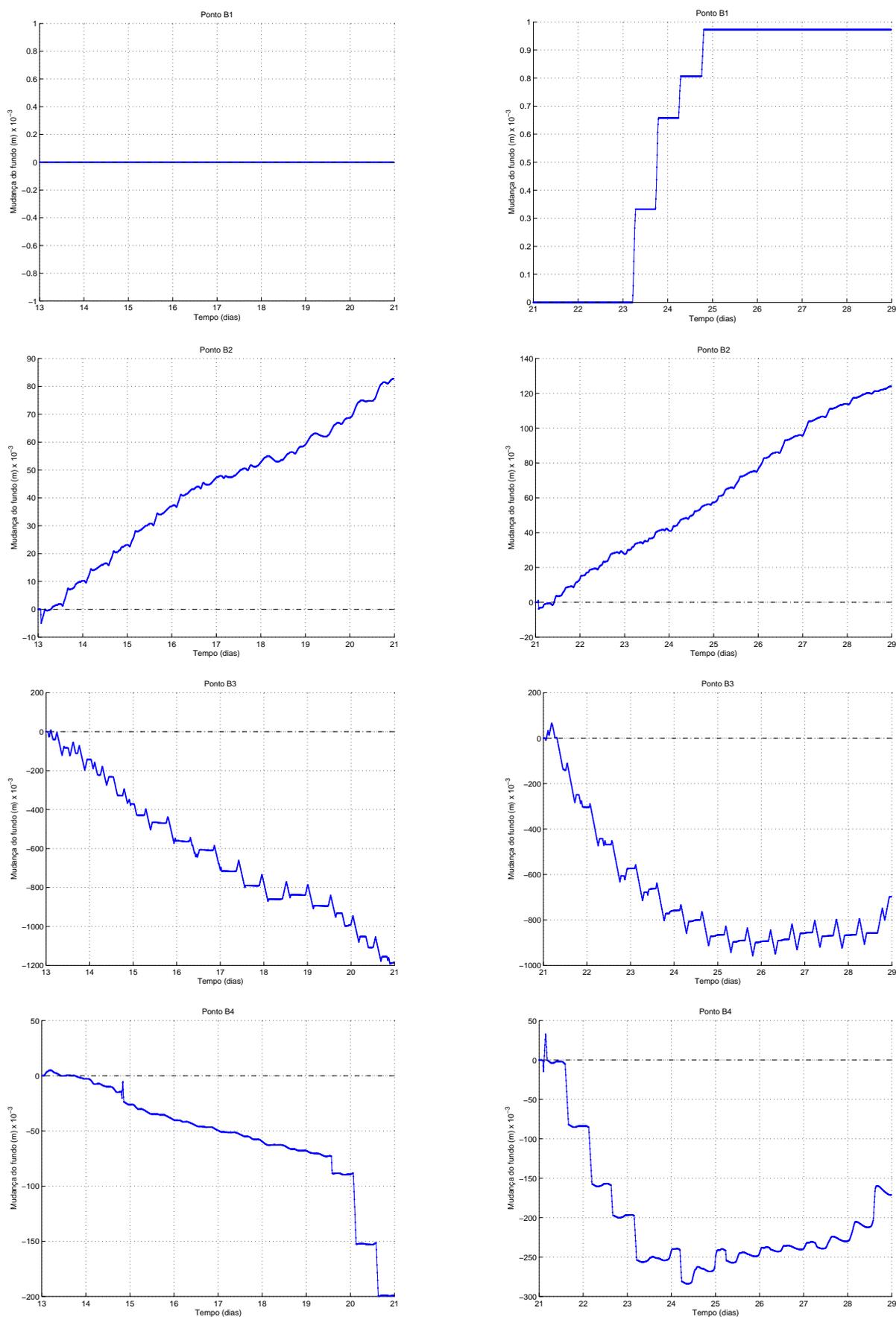


Figura B.7: Mudança do fundo por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita).

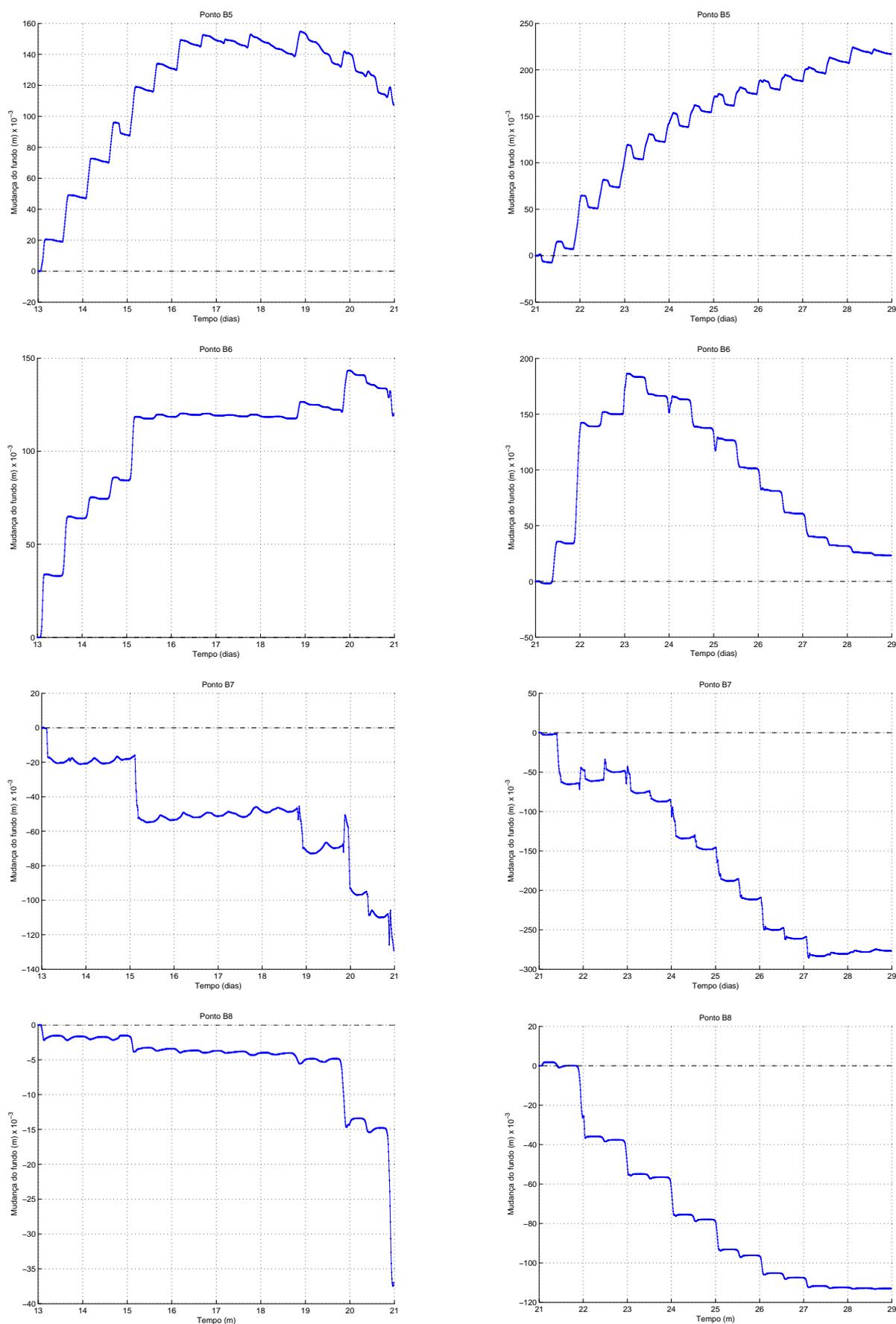


Figura B.8: Mudança do fundo por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita).

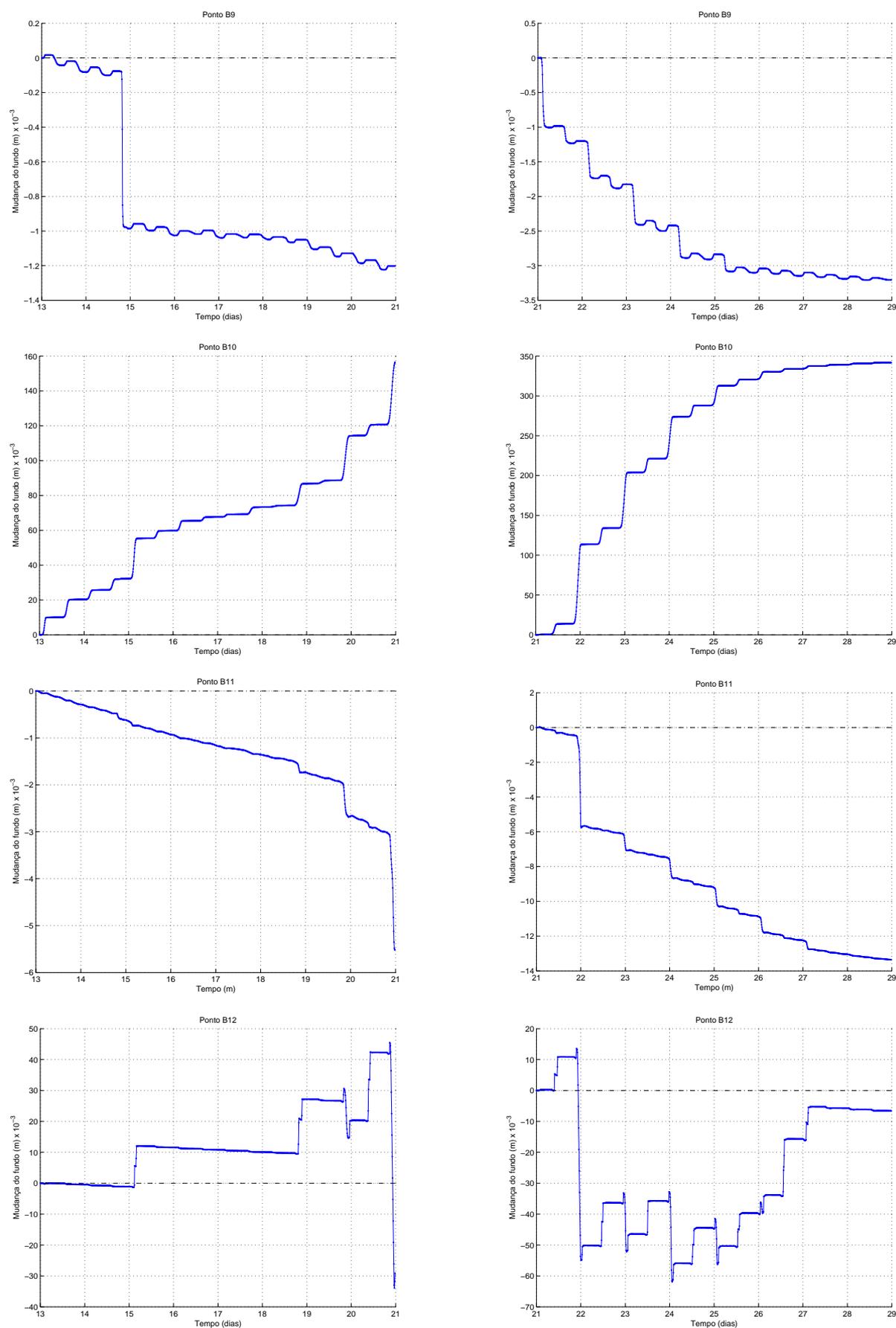


Figura B.9: Mudança do fundo por dia para as condições: CALM1-Q (esquerda) e CALM1-S (direita).

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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