Thiago Marques Coelho

**Análise do transporte de sedimentos na região central da
Baixada Santista (SP) através de modelagem numérica**

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

Orientador:
Prof. Dr. Joseph Harari

São Paulo
Novembro de 2011

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Análise do transporte de sedimentos na região central da Baixada
Santista (SP) através de modelagem numérica

Thiago Marques Coelho

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

Julgada em ____/____/____

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

DON'T PANIC¹

¹MEGAGODO TEAM, [s.d.] The Hitchhiker's Guide to the Galaxy, Ursa Menor Beta: Megadodo Publications.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Hipóteses Científicas	2
2	OBJETIVOS	5
3	ÁREA DE ESTUDO	6
3.1	Sistema de Canais do Estuário de Santos, São Vicente e Bertioga . .	8
3.2	Baía de Santos	12
3.3	Região Costeira Adjacente	14
3.4	Regime de Ventos	19
3.5	Regime de Ondas	22
4	MATERIAIS E MÉTODO	23
4.1	O Modelo Numérico ROMS	23
4.1.1	Sedimento de Fundo	24
4.1.2	Dispersão do Sedimento em Suspensão	26
4.1.3	Dispersão do Sedimento no Fundo	28
	Meyer-Peter Müeller	29
	Soulsby e Damgaard	29
4.1.4	Inclinação do fundo	31
4.1.5	Cálculo de massa	32
4.1.6	Morfologia	32
4.1.7	Efeitos da Densidade do Sedimento	32
4.1.8	Cálculo do Atrito de Fundo	33
	Formulação de arrasto simples	33
	Formulação com interação entre correntes e ondas	35
4.2	O Modelo Numérico SWAN	36
4.3	Ferramenta de Acoplamento de Modelos MCT	38
4.4	Domínios Simulados pelo Modelo	38
4.5	Região do Cabo de São Tomé ao Cabo de Santa Marta	39
4.6	Forçantes e Condições Iniciais	40

4.6.1	Campo de massa	40
4.6.2	Campo de ventos	44
4.6.3	Informações de maré	44
4.6.4	Informações de ondas	45
4.7	Região Central da Baixada Santista	48
4.8	Forçantes e Condições Iniciais	49
4.8.1	Campo de massa	49
4.8.2	Campo de ventos	50
4.8.3	Informações de ondas	51
4.8.4	Dados de correntes e elevação nos contornos abertos	52
4.9	Dados de Entrada de Sedimentos	52
4.9.1	Sedimento de fundo	52
4.9.2	Sedimento em suspensão	53
4.9.3	Aportes de rios	54
4.10	Parâmetros do modelo	56
4.11	Tempo de Simulação	57
4.12	Calibração e Validação Hidrodinâmica	58
5	RESULTADOS	60
5.1	Validação do Modelo Hidrodinâmico	60
5.2	Maré de Sizígia	60
5.3	Maré de Quadratura	76
5.4	Passagem de Frente Fria	89
5.5	Transporte por carga de fundo (<i>Bedload</i>)	105
5.6	Taxa de Sedimentação no Alto do Estuário	108
6	DISCUSSÕES	111
6.1	Validação do Modelo Hidrodinâmico	111
6.2	Transporte de Sedimentos em Suspensão	111
6.3	Transporte por Carga de Fundo	115
6.4	Taxa de Sedimentação	115
6.5	Limitações das Simulações Numéricas	116
7	CONCLUSÕES	119

REFERÊNCIAS	121
ANEXOS	131
A Vazão dos Rios.	131
B Sedimento de Fundo.	132

Lista de Figuras

3.1	<i>Mapa do relevo da região central da costa de São Paulo, com as subzonas Serra do Mar e Baixadas Litorâneas destacadas (Miranda, 2011).</i>	6
3.2	<i>Apresentação da área de estudo deste trabalho: região central da Baixada Santista.</i>	7
3.3	<i>Distribuição de materiais finos no fundo para a região estuarina e da Baía de Santos.</i>	10
3.4	<i>Volume de material dragado do Porto de Santos entre os anos de 1932 e 2007. A dragagem de aprofundamento de 12 metros para 15 metros na região, ocorreu após o ano de 2007, portanto, os volumes relativos a este aprofundamento não estão contemplados nesta série.</i>	12
3.5	<i>Mapa da área costeira adjacente à região central da Baixada Santista, SP, com as informações de batimetria obtidas das cartas náuticas 1701 e 1711.</i>	14
3.6	<i>Esquema dos principais processos físicos atuantes na plataforma continental de São Paulo, para os períodos de verão e inverno. As letras T e S, remetem aos parâmetros oceanográficos temperatura e salinidade, respectivamente. Extraído de Castro, Miranda e Myao (1987) .</i>	15
3.7	<i>Imagens geradas a partir de dados da câmera CCD (Couple Charged Device) acoplada ao satélite sino-brasileiro CBERS2, na faixa espectral 0,52 a 0,59 μm. A escala de cores é a partir de uma unidade arbitrária(u) de material em suspensão.</i>	17

3.8	<i>Mapa de classes de sedimentos na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em vermelho representa a região central da Baixada Santista. Modificado de Furtado, Tessler e Eichler (1984) apud Rodrigues et al. (2003).</i>	18
3.9	<i>Distribuição de areia na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em preto delimita a região central da Baixada Santista. Modificado de Rodrigues et al. (2003).</i>	18
3.10	<i>Distribuição de silte na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em preto delimita a região central da Baixada Santista. Modificado de Rodrigues et al. (2003).</i>	19
3.11	<i>Distribuição de argila na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em preto delimita a região central da Baixada Santista. Modificado de Rodrigues et al. (2003).</i>	19
3.12	<i>Esquema conceitual da passagem de uma frente fria na costa brasileira. Modificado de (Stech, 1990).</i>	20
3.13	<i>Evolução da passagem dos sistemas frontais na costa leste da América do Sul para o mês de Janeiro de 2010. A linha Vermelha representa o região fronteira Uruguai-Brasil e a linha verde representa a região de Santos. Modificado de (INPE/CPTEC, 2010).</i>	21
3.14	<i>Evolução da passagem dos sistemas frontais na costa leste da América do Sul para o mês de Agosto de 2009. A linha Vermelha representa o região fronteira Uruguai-Brasil e a linha verde representa a região de Santos. Modificado de (INPE/CPTEC, 2009).</i>	21
4.1	<i>Esquema do processo de criação e aglutinação das camadas de sedimento de fundo, a partir das condições de erosão e deposição na camada de sedimento mais superficial. Adaptado de Soupy, Warner e Sherwood (2010).</i>	26
4.2	<i>Elevação da região simulada no domínio de Cabo de São Tomé ao Cabo de Santa Marta. Os dados de elevação foram obtidos a partir do banco de dados etopo1.</i>	39
4.3	<i>Mapa de temperatura na superfície para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.</i>	41

4.4	<i>Mapa de temperatura na profundidade 200 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.</i>	41
4.5	<i>Mapa de temperatura na profundidade 1500 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.</i>	42
4.6	<i>Mapa de salinidade na superfície para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.</i>	42
4.7	<i>Mapa de salinidade na profundidade 200 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.</i>	43
4.8	<i>Mapa de salinidade na profundidade 1500 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.</i>	43
4.9	<i>Mapa da região do Oceano Atlântico com os dados obtidos dos satélites altimétricos Topex/Poseidon, Jason e ERS assimilados pelo modelo. Adaptado de Egbert e Erofeeva (2010).</i>	45
4.10	<i>Altura significativa das ondas(m) na região, para o dia 05 de janeiro de 2009 às 00:00 h. Dados obtidos do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III.</i>	46
4.11	<i>Período das ondas(s) na região, para o dia 05 de janeiro de 2009 às 00:00 h. Dados obtidos do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III.</i>	47
4.12	<i>Direção das ondas(°) em notação meteorológica, para o dia 05 de janeiro de 2009 às 00:00 h. Dados obtidos do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III.</i>	47
4.13	<i>Batimetria da região simulada no domínio da região central da Baixada Santista. Os dados de profundidade foram obtidas a partir das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) de números 1700, 1711 e 1701.</i>	48
4.14	<i>Mapas de temperatura da superfície (painel esquerdo) e fundo (painel direito) utilizados como condição inicial nas simulações para o domínio da região central da baixada santista.</i>	50
4.15	<i>Mapas de salinidade da superfície (painel esquerdo) e fundo (painel direito) utilizados como condição inicial nas simulações para o domínio da região central da baixada santista.</i>	50

4.16	<i>Evolução temporal da intensidade e direção dos ventos para o mês de agosto de 2009 na região.</i>	51
4.17	<i>Evolução temporal da intensidade e direção dos ventos para o mês de janeiro de 2010 na região.</i>	51
4.18	<i>Mapas de distribuição de argila (painel superior esquerdo), silte (painel superior direito) e areia muito fina (painel inferior) para a região do domínio simulado.</i>	53
4.19	<i>Concentrações de argila (kg m^{-3}) na superfície (painel esquerdo) e no fundo (painel direito).</i>	54
4.20	<i>Concentrações de silte (kg m^{-3}) na superfície (painel esquerdo) e no fundo (painel direito).</i>	54
4.21	<i>Concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painel esquerdo) e no fundo (painel direito).</i>	54
4.22	<i>Mapa com os locais de aporte de água e sedimentos (pontos em azul), utilizados como dados de entrada do modelo.</i>	55
4.23	<i>Concentrações de sedimentos (kg m^{-3}) em cada fonte de água e sedimentos inseridos no modelo.</i>	55
4.24	<i>Vazões médias de água doce ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em cada fonte de água e sedimentos inseridos no modelo.</i>	56
4.25	<i>Aportes de sedimentos (kg s^{-1}) em cada fonte de água e sedimentos inseridos no modelo.</i>	56
5.1	<i>Dados observados (linha azul) e resultados do modelo numérico (linha preta) para a componente v da velocidade na superfície, meio e fundo da coluna d'água e nível da superfície do mar, entre os dias 10 e 30 de janeiro de 2010.</i>	60
5.2	<i>Variação do nível da superfície do mar entre 18 de janeiro de 2010 às 00h e 19 de janeiro de 2010 às 00h.</i>	61
5.3	<i>Mapa de altura significativa e direção das ondas para o dia 18 de Janeiro de 2010 às 12 h.</i>	62
5.4	<i>Evolução das concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010.</i>	66

5.5	<i>Evolução das concentrações de materiais finos (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010.</i>	68
5.6	<i>Localização das áreas onde foram extraídas as evoluções temporais das estruturas verticais da concentração de sedimentos.</i>	69
5.7	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região do alto estuário.</i>	70
5.8	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região central do canal de Bertioga.</i>	71
5.9	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região sul do canal de São Vicente.</i>	72
5.10	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região sul do canal do Porto de Santos.</i>	73
5.11	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região central da Baía de Santos.</i>	74
5.12	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região costeira de Praia Grande.</i>	75
5.13	<i>Variação do nível da superfície do mar entre os dias 11 de Janeiro de 2010 às 00h e 12 de Janeiro de 2010 às 00h.</i>	76

5.14	<i>Mapa de altura significativa e direção das ondas para o dia 11 de Janeiro de 2010 às 12 h.</i>	77
5.15	<i>Evolução das concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010.</i>	80
5.16	<i>Evolução das concentrações de materiais finos (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010.</i>	82
5.17	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região do alto estuário.</i>	83
5.18	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região central do canal de Bertiooga.</i>	84
5.19	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região da saída do canal de São Vicente.</i>	85
5.20	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região da saída do canal do Porto de Santos.</i>	86
5.21	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região central da Baía de Santos.</i>	87
5.22	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região costeira de Praia Grande.</i>	88

5.23	<i>Concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e no fundo (painéis à direita) e altura significativa e direção das ondas (painel inferior) entre os dias 10 e 13 de agosto de 2010.</i>	95
5.24	<i>Concentrações de materiais finos (kg m^{-3}) na superfície (painéis esquerdos) e fundo (painéis direitos) entre os dias 10 e 13 de agosto de 2010.</i>	98
5.25	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região do alto estuário.</i>	99
5.26	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região central do canal de Bertioga.</i>	100
5.27	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região da saída do canal de São Vicente.</i>	101
5.28	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região da saída do canal do Porto de Santos.</i>	102
5.29	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região central da Baía de Santos.</i>	103
5.30	<i>Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região costeira de Praia Grande.</i>	104

5.31	<i>Evolução temporal do transporte de sedimentos do fundo, da altura significativa e da direção das ondas incidentes e das correntes de fundo na região costeira de Praia Grande, entre os dias 02 e 30 de agosto de 2009. Por motivos de visualização, a direção dos vetores de velocidade foram rotacionadas em 90° para oeste.</i>	106
5.32	<i>Evolução temporal do transporte de sedimentos do fundo, da altura significativa e da direção das ondas incidentes e das correntes de fundo na região costeira de Praia Grande, entre os dias 02 e 30 de janeiro de 2010. Por motivos de visualização, a direção dos vetores de velocidade foram rotacionadas em 90° para oeste.</i>	107
5.33	<i>Transportes por carga de fundo para nordeste e sudoeste em agosto de 2009 e janeiro de 2010, na região costeira de Praia Grande.</i>	108
5.34	<i>Localização e identificação dos pontos de onde foram extraídos os valores de taxa de sedimentação na região do alto estuário.</i>	109
5.35	<i>Séries temporais da elevação da camada de fundo nos pontos P1, P2, P3 e P4, para o mês de Janeiro de 2009.</i>	110

Lista de Tabelas

4.3.1	Relação dos parâmetros que são trocadas entre os modelos ROMS e SWAN.	38
4.6.1	Níveis verticais padrão dos dados de temperatura e salinidade do WOA09 para a climatologia mensal.	40
4.10.1	Parâmetros do modelo	57
5.6.1	Taxas de sedimentação nos pontos selecionados, na região do alto estuário da Baixada Santista.	110

Lista de Acrônimos

- AC - Água Costeira
- ACAS - Água Central do Atlântico Sul
- APM - Anticiclones Polares Migratórios
- ASAS - Alta Subtropical do Atlântico Sul
- ASCII - *American Standard Code for Information Interchange*
- AT - Água Tropical
- CCD - Coupled Charged Device
- CCF - Camada de Contorno de Fundo
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação
- ECOSAN - A Influência do Sistema Estuarino da Baixada Santista sobre o Ecossistema de Plataforma Continental Adjacente
- IOUSP - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
- MCT - *Model-Coupling Toolkit*
- NCAR - *National Center for Atmospheric Research*
- NCEP - *National Center for Environmental Prediction*
- NetCDF - *Network Common Data Form*
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
- PC - Plataforma Continental
- PCI - Plataforma Continental Interna
- PCSP - Plataforma Continental de São Paulo
- ROMS - *Regional Ocean Modeling System*
- SP - São Paulo
- SWAN - *Simulating Waves Nearshore*
- TCE - Tensão Crítica de Erosão
- TPXO7.1 - OSU TOPEX/Poseidon Cross-Over Global Inverse Solution
- TS - Temperatura e Salinidade
- WOA09 - World Ocean Atlas 2009

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu professor **Prof. Dr. Joseph Harari** pela orientação e a grande confiança que depositou em mim. Obrigado por mais esta etapa professor!

Obrigado ao **CNPq** pela bolsa disponibilizada durante o mestrado.

Obrigado a todos do **LABSIP** por todo o suporte.

Obrigado a todos da equipe da **SALT Ambiental** pelo apoio, companheirismo incondicional e por tornar o ambiente de trabalho um lugar extremamente agradável, faça “chuva” ou faça “sol”.

Agradeço a todos da minha **turma de pós graduação de 2009** por todos os momentos bons e os não tão bons assim.

Obrigado ao **Dr. Ravi Shroff** pela amizade e por corrigir meu *abstract*.
Thanks!

Obrigado ao “*Quasi Doutor*” **Francisco José da Silva Dias** pela convivência e aprendizado que tive ao seu lado.

Obrigado à **Leilane Gonçalves dos Passos** e ao **Paulo Candeia Neto** pelo importante V_0 na configuração dos modelos numéricos.

Meus profundos agradecimentos a todos da **República Estação 69** pela amizade e compreensão. Valeu mesmo galera! É muito bom dividir um teto com vocês. Um obrigado ainda mais especial ao republicano **Márcio Katsumi Yamashita** pela excelente ajuda no desenvolvimento da dissertação.

Por fim, agradeço à **Thaís Marques Vicente**, meus **irmãos**, meus **pais** e toda a minha **família**, a quem eu dedico este trabalho. Obrigado por tudo.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar o transporte de sedimentos na região central da Baixada Santista (SP) através do uso do modelo numérico ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) acoplado ao modelo numérico SWAN (*Simulating WAves Nearshore*) em simulações representativas dos meses de agosto de 2009 e janeiro de 2010. Os resultados indicaram haver picos no transporte de sedimentos, principalmente na plataforma continental e na Baía de Santos, durante a passagem de sistemas frontais, chegando a atingir $4,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na região costeira. As menores taxas de concentração de sedimentos em suspensão na coluna d'água ocorreram durante os períodos de quadratura, sem a presença de ventos fortes e incidência de ondas com grande energia. O transporte por carga de fundo encontrado na área costeira de Praia Grande foi predominantemente para sudoeste, em ambos os meses simulados, onde, as maiores taxas de transporte foram observadas no mês de agosto com valores em torno de $1 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2}$ para o mês. A taxa de sedimentação na região do alto estuário foi da ordem de 1 cm ano^{-1} , concordando com os dados disponíveis na literatura. O modelo numérico representou de forma satisfatória os padrões de transporte de sedimentos encontrados na região.

Palavras chave: Transporte de sedimentos, Bedload, Simulação Numérica, Baixada Santista, ROMS, SWAN.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the sediment transport in the central region of Baixada Santista (SP) using the numerical model ROMS (Regional Ocean Modeling System) coupled to the numerical model SWAN (Simulating Waves Nearshore) in simulations representing the months of August 2009 and January 2010. The results suggested peaks in sediment transport, especially on the continental shelf and the Bay of Santos, during the passage of frontal systems, achieving values of $4,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nearshore. The lowest rates of concentration of suspended sediment in the water column occurred during periods of neap tides, without the presence of strong winds and incidence of waves with high energy. In both simulated months, the bedload transport found in the coastal area of Praia Grande was predominantly to the southwest, with the highest rates of transport observed in the month of August, with values of $1 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2}$. The rate of sedimentation in the upper estuary has been on the order of 1 cm year^{-1} , in agreement with the data available in the literature. The numerical model represented the transport patterns of sediments found in the region in a satisfactory way.

Keywords: Sediment transport, Bedload, Numerical Simulation, Baixada Santista, ROMS, SWAN.

1 INTRODUÇÃO

Apesar de compor apenas cerca de 7,6% dos oceanos, a plataforma continental (PC), e, em especial, sua área costeira, é um dos compartimentos oceânicos mais estudados no mundo, por ser a região onde se realiza a maior parte das intervenções humanas no ambiente marinho, incluindo: a exploração de recursos biológicos (*i.e.* peixes e frutos-do-mar), areia, água, minérios etc.; o descarte de efluentes domésticos e industriais; atividades de recreação, entre muitas outras formas de uso (Brink e Robinson, 1998).

Segundo Sverdrup, Johnson e Fleming (1942), em muitos aspectos oceanográficos, o conhecimento da PC é fragmentado e inadequado. Sete décadas depois, a afirmação ainda é atual. Isto se deve ao fato da PC caracterizar-se como uma região onde processos oceânicos, continentais e atmosféricos interagem, formando um compartimento único e dinâmico.

Os processos hidrodinâmicos que ocorrem em oceano profundo e atingem a costa tendem a ser significativamente alterados, devido a fatores como presença da costa, pequena profundidade, variações sazonais de aporte de água doce, radiação solar e vento, que atuam em pequenos volumes e, muitas vezes, provocam respostas amplificadas (Brink e Robinson, 1998).

Assim como os processos hidrodinâmicos costeiros, a dinâmica de sedimentos nas regiões litorâneas é um assunto de grande complexidade. O aporte de sedimentos de diferentes origens, partículas com grandes variações de forma, tamanho e densidade, grande variabilidade de concentração de material em suspensão e alta atividade biológica são alguns exemplos de fatores, presentes na costa, que alteram a dinâmica transporte de sedimentos nas regiões litorâneas (Alveirinho, 1987).

Segundo Muehe (2006), o entendimento do transporte de sedimentos na costa é um relevante instrumento para os gestores públicos e para os tomadores de decisão, nas questões que envolvam o desenvolvimento urbano nas zonas costeiras, o ordenamento das atividades produtivas e a preservação e conservação dos biomas naturais.

Ainda segundo o trabalho *op. cit.*, em um cenário de acirradas disputas pelo espaço, onde a preservação de restingas, mangues, falésias e dos oceanos se confronta

com o crescimento desordenado das cidades e com o desenvolvimento do turismo e da aquicultura como atividades econômicas relevantes, a natureza se impõe.

Isso mostra que o conhecimento da dinâmica sedimentar no litoral, e dos processos que a governam, é fundamental para inferir sobre as potenciais mudanças da linha de costa a longo termo e a contabilização do balanço sedimentar.

No Brasil, mais especificamente no litoral do Estado de São Paulo, diversos esforços empregando variadas metodologias e ferramentas são utilizados para estudar a dinâmica sedimentar na linha de costa (Tessler *et al.*, 2006).

De acordo com Fredsøe e Deigaard (1995), durante as últimas décadas, o desenvolvimento da pesquisa de transporte de sedimento costeiro mudou de simples descrições fenomenológicas para modelos numéricos sofisticados onde, tanto a hidrodinâmica quanto os resultados do transporte de sedimentos são descritos em detalhes.

Este maior detalhamento do transporte de sedimentos comprova que, juntamente com a adoção de outras ferramentas e técnicas (*e.g.* sensoriamento remoto e geoprocessamento), a modelagem numérica tende a impulsionar significativamente o conhecimento da dinâmica sedimentar e da evolução Quaternária nas áreas submersas de regiões costeiras (Rodrigues *et al.*, 1999).

A modelagem numérica simula o transporte de sedimentos presentes numa região, a partir de informações sobre o tipo de sedimentos presentes no fundo e quantidades de material sólido que são drenados para a região, além das informações sobre as correntes e ondas presentes no local.

Este trabalho apresenta a dinâmica de sedimentos na região estuarina e costeira central da Baixada Santista, SP, utilizando como metodologia para o cálculo do transporte de sedimentos, a modelagem numérica computacional, simulando diversos cenários, como: condições de inverno e verão, passagens de frentes frias e marés de sizígia e quadratura.

1.1 Hipóteses Científicas

Este presente trabalho testará duas hipóteses científicas.

A primeira hipótese está relacionada à validade do modelo numérico de transporte de sedimentos:

A modelagem numérica do transporte de sedimentos na região central da Baixada Santista é capaz de reproduzir satisfatoriamente os padrões da dinâmica sedimentar existentes na região.

Como dito anteriormente, a modelagem matemática do transporte de sedimentos é uma metodologia que pode ser mais eficiente do que apenas descrições fenomenológicas relacionadas à dinâmica sedimentar (Fredse e Deigaard, 1995).

Contudo, mesmo com os importantes avanços na área, uma série de simplificações, aproximações e formulações baseadas em testes empíricos, muitas vezes realizados em ambientes controlados, faz com que o resultado numérico não reproduza corretamente a dinâmica do ambiente em determinada região.

Há uma série de exemplos sobre as limitações da modelagem numérica, sendo uma importante, o efeito não contabilizado por grande parte dos modelos numéricos de modificação do processo de floculação de materiais coesivos em suspensão, devido a variações de temperatura, salinidade e turbulência da água (Kranck, 1973). Este efeito pode ser um fator decisivo na dinâmica sedimentar, em diversas regiões costeiras do globo.

Este trabalho testará um modelo numérico que representa o estado-da-arte na modelagem numérica de sedimentos, analisando e comparando os resultados gerados pelo mesmo, com os disponíveis na literatura.

A segunda hipótese a ser testada está relacionada ao padrão de transporte de sedimentos na região costeira:

O transporte de sedimentos por carga de fundo na região costeira de Praia Grande, de coordenadas $24^{\circ} 2' 29,4'' S$ $46^{\circ} 29' 26,52'' W$, tem direção predominante para sudoeste.

Basicamente existem duas situações que determinam a direção do transporte de sedimentos por carga de fundo na região:

- 1) Situação de tempo bom, com ventos e correntes predominantemente para sudoeste e ondas oriundas do setor leste-sudeste e,
- 2) Situação de passagem de frente fria, com ventos e correntes mais intensos e direção predominantemente para nordeste, além do aumento da altura das ondas vindas do setor sudeste-sul.

A primeira situação apresenta o transporte do sedimento por carga de fundo, preferencialmente para a direção sudoeste, e na segunda situação, o transporte muda para a direção nordeste.

Os trabalhos de Araujo e Alfredini (2001) e Tessler *et al.* (2006) afirmam que a direção do transporte na região é predominantemente para sudoeste, porém, segundo IPT (1994), Giannini (1987), Ponçano *et al.* (1999) e Goya e Tessler (2000), o transporte tem sentido nordeste, gerando uma discussão ainda em aberto sobre o verdadeiro rumo do transporte de material sedimentar junto à costa na região.

Este trabalho testará a hipótese acima, a partir da avaliação quantitativa dos resultados do transporte do sedimento por carga de fundo para a região mencionada, utilizando os resultados das simulações numéricas para o período de agosto de 2009 e janeiro de 2010.

2 OBJETIVOS

Este documento tem o seguinte objetivo principal:

- Caracterizar a dinâmica do transporte de sedimentos na região dos canais do complexo estuarino Santos - São Vicente, Baía de Santos e Plataforma Continental adjacente.

Além disso, são objetivos específicos deste trabalho:

- Determinar os processos de transporte de sedimentos na região, em situações de maré de sizígia e quadratura e passagem de frentes frias;
- Comparar os resultados da taxa de sedimentação da região do alto do complexo estuarino com dados disponíveis na literatura;
- Analisar quantitativamente o transporte de sedimentos por carga de fundo na região costeira de Praia Grande, de coordenadas $24^{\circ} 2' 29,4''$ S $46^{\circ} 29' 26,52''$ W.
- Discutir a representabilidade dos resultados do modelo numérico e os padrões da dinâmica sedimentar em toda região.

3 ÁREA DE ESTUDO

O litoral paulista apresenta uma costa orientada preferencialmente para NNE-SSO (Rodrigues *et al.*, 1999), com cerca de 400 quilômetros de extensão entre as latitudes 23° 30' - 25° S e longitudes 40° 30' - 48° W (Tessler *et al.*, 2006).

Segundo Almeida (1964), geomorfologicamente, a região compõe parte da Planície Costeira, anteriormente definida por Ab'Saber e Bernardes (1958) como Província Fisiográfica Litoral, onde corresponde à área drenada diretamente para o mar, constituindo o rebordo do Planalto Atlântico.

De acordo com IPT (1981), esta província costeira encontra-se dividida em Subzona Serra do Mar e Zona das Baixadas Litorâneas (Figura 3.1). A subzona Serra do Mar apresenta relevo abrupto, formado predominantemente por escarpas festonadas, desenvolvidas ao longo de anfiteatros sucessivos, separados por espigões.

Esta subzona apresenta diversos vales, profundamente entalhados, que determinam a forma da drenagem que escoar na região, e constituem-se nos núcleos exportadores dos materiais terrígenos que adentram a planície costeira (Fukumoto, 2007).

A subzona das Baixadas Litorâneas apresenta terrenos baixos, próximos ao nível do mar e com baixa taxa de drenagem (Rodrigues *et al.*, 1999).

Figura 3.1: Mapa do relevo da região central da costa de São Paulo, com as subzonas Serra do Mar e Baixadas Litorâneas destacadas (Miranda, 2011).

Uma segunda abordagem de divisão a ser considerada neste trabalho é a da linha de costa do estado paulista em dois setores distintos, sul e norte (Tessler *et al.*, 2006).

A porção sul se estende da Ilha Comprida até a região de Praia Grande e é composta por praias extensas, contínuas e retilíneas. A porção norte, entre a Ilha de São Sebastião e Ubatuba, é formada por uma costa recortada pela Serra do Mar, com a presença de diversas baías e enseadas.

A região central da Baixada Santista, área de estudo deste trabalho (Figura 3.2), pode ser considerada como uma zona de transição, onde características de ambas porções podem ser identificadas.

Além disso, três compartimentos distintos, porém conectados entre si, estão presentes na área de estudo: o sistema de canais do Estuário de Santos, São Vicente e Bertioga, a Baía de Santos e a região costeira adjacente.

Figura 3.2: Apresentação da área de estudo deste trabalho: região central da Baixada Santista.

3.1 Sistema de Canais do Estuário de Santos, São Vicente e Bertioga

O sistema de canais do estuário de Santos é composto pelo Canal do Porto, Canal de São Vicente e Canal de Bertioga e caracteriza-se por conter uma rede hidrográfica rica e mal definida, incapaz de manter suas águas dentro dos limites de um leito (Goldenstein, 1972).

Esta rede está inserida em um dos mais importantes polos de desenvolvimento urbano e industrial brasileiro, o polo industrial de Cubatão, onde situa-se também o Porto de Santos (Yassuda, 1991).

Segundo Harari *et al.* (1990), a onda de maré que ocorre na região é semi-diurna e se propaga simultaneamente pelos canais de Santos e São Vicente, de modo que as amplitudes médias variam entre 27 cm nas marés de quadratura e 123 cm nas marés de sizígia, e o encontro da sua propagação pelos canais estuarinos dá-se, aproximadamente, no Largo do Candinho (Canal de Bertioga) e no Largo da Pompeba (Canal de São Vicente).

As correntes com maiores intensidades no estuário localizam-se na entrada do Canal do Porto de Santos, devido ao efeito de continuidade, com valores que chegam a ultrapassar 100 cm s^{-1} (Harari, Camargo e Cacciari, 2000).

Segundo os dados obtidos no projeto “A Influência do Sistema Estuarino da Baixada Santista sobre o Ecossistema de Plataforma Continental Adjacente” (ECO-SAN) do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) (Katsuragawa, 2007), o estuário apresentou valores de temperatura médios na coluna d’água de $27,39^\circ\text{C}$, no mês de fevereiro de 2005, condições representativas de verão, e $22,76^\circ\text{C}$, no mês de agosto de 2005, condições representativas de inverno.

Para a salinidade, os valores médios na coluna d’água obtidos foram de 26,34, no mês de fevereiro de 2005 e 29,29, no mês de agosto de 2005.

Segundo Gregorio (2009), a temperatura nos meses de verão (período onde a região apresenta maior estratificação na coluna d’água) para o estuário apresenta valores médios próximos a 25°C na superfície e 24°C no fundo. Para a salinidade, os valores médios encontrados para superfície e fundo foram de 23 e 34, respectivamente.

O sistema de canais recebe drenagem dos municípios de Santos, São Vicente,

Cubatão, Guarujá e Praia Grande. Além disso, toda a drenagem da parte ocidental do Canal de Bertioga segue para o Canal de Santos (CETESB, 2001).

Um levantamento feito por IME (2008) apresentou dados de vazão de água fluvial e de sólidos dos principais afluentes da região, onde é possível observar que o Rio Itapanhaú, que deságua no Canal de Bertioga, constitui-se como o principal afluente da região, transportando até $114 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de água doce, porém com uma vazão de materiais sólidos baixa em relação aos maiores afluentes da região (Anexo A).

Neste levantamento, para a determinação das vazões mínimas, médias e máximas estimadas para os cursos d'água que contribuem para o Estuário de Santos, utilizou-se a metodologia constante do Manual de Cálculo das Vazões Máximas, Médias e Mínimas nas Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo, publicado pelo DAEE (1994).

A granulometria dos sedimentos de fundo nos canais estuarinos, tem composição aproximada de 0% a 25% de areias e 75% a 100% de materiais finos, de acordo com os dados originalmente disponibilizados em IME (2008) e apresentados no Anexo B deste documento.

A Figura 3.3 apresenta a porcentagem das frações de materiais finos, nos pontos obtidos por (IME, 2008).

Figura 3.3: *Distribuição de materiais finos no fundo para a região estuarina e da Baía de Santos.*

A característica mais marcante no padrão de transporte de sedimentos no interior do complexo estuarino de Santos, São Vicente e Bertioga, é o domínio do transporte pela ação das marés, mostrando praticamente uma simetria no transporte das partículas nas direções preferenciais das correntes geradas pelas variações do nível da água na região (EPUSP-DAEE, 1966).

Contudo, apesar de existir uma forte influência do regime de marés dentro do estuário, este apresenta um padrão de correntes com baixa competência para transportar os sedimentos ao longo dos canais estuarinos, fazendo com que as maiores concentrações de sedimentos sejam observadas na região do alto estuário (Ponçano, 1985).

Uma grande quantidade de materiais finos são drenados do continente para o estuário, porém, o processo de deposição devido à baixa intensidade das correntes é mais importante do que a deposição por floculação dos materiais finos (Fúlfaro e Ponçano, 1976).

Mesmo com a predominância de deposição sedimentar devido aos processos hidrodinâmicos, de acordo com Fukumoto (2007), a dinâmica de deposição de sedimentos finos ao longo do estuário é alterada pela mudança das condições químicas das águas superficiais causada pelo lançamento de resíduos industriais.

Por causa do grande adensamento urbano e industrial na região, a quantidade de poluentes presentes na água e nos sedimentos do sistema estuarino é bastante expressiva e heterogênea, em decorrência dos diversos tipos de descargas de esgotos e rejeitos industriais e domésticos, além de atividades de dragagem do canal. Em consequência, os tipos e fontes de poluentes presentes na região são muito diversificados (Tommasi, 1985).

A presença do maior porto da América Latina agrava esta situação, sendo que estimativas da CETESB em 1985 apontavam que 92% dos resíduos produzidos pelas atividades portuárias não tinham destino adequado, sendo parte lançada nos canais do estuário e parte incinerada de forma precária.

Atualmente, o canal de acesso e de navegação do Porto de Santos estão sofrendo um novo processo de dragagem, onde serão aprofundados dos atuais 12 metros para 15 metros.

Em sua forma natural, do ponto de vista de taxa de erosão e sedimentação, o sistema estuarino Santos, São Vicente e Bertioga encontra-se em grande equilíbrio, apresentando apenas em alguns locais específicos, taxas de grande assoreamento (EPUSP-DAEE, 1966; Fúlfaro e Ponçano, 1976).

Com as atividades de extração de material sólido no fundo, o equilíbrio morfológico existente no sistema estuarino se desfaz, fazendo com que as taxas de assoreamento se intensifiquem até que a forma dos canais do estuário se aproxime novamente da original (Fúlfaro e Ponçano, 1976), o que faz com que exista uma relação diretamente proporcional entre o aumento artificial do canal aprofundado e o volume de material dragado nas atividades de manutenção.

Segundo George (1967) *apud* (Ponçano, 1985), todos os portos modernos

são, em escala variável, portos artificiais, desenvolvidos a partir de um sítio natural insuficiente para atender às necessidades de navegação atual. Portanto, apesar do paradoxo produzido pela relação entre o aprofundamento e o volume de material dragado do canal estuarino, esta profundidade deverá ser mantida artificialmente (*i.e.* através de sucessivas atividades de dragagem de manutenção) para que o Porto de Santos suporte o volume e tamanho dos navios que chegam à região.

Como resultado da dragagem do canal do Porto de Santos, centenas de milhares de metros cúbicos são retirados dos canais de navegação e descartados em área oceânica, porém, próximo ao continente e ilhas da região (*i.e.* regiões de cotas batimétricas entre 20 e 30 metros de profundidade, aproximadamente).

A Figura 3.4 apresenta a série histórica do volume de material dragado na região do Porto de Santos, desde 1932 até 2007.

Figura 3.4: *Volume de material dragado do Porto de Santos entre os anos de 1932 e 2007. A dragagem de aprofundamento de 12 metros para 15 metros na região, ocorreu após o ano de 2007, portanto, os volumes relativos a este aprofundamento não estão contemplados nesta série.*

3.2 Baía de Santos

A Baía de Santos tem seu limite exterior orientado para sul e delimitado pela Ponta de Itaipu em 24° 2' S e 46° 23,96' W, em São Vicente, e pela Ponta Grossa em 24° 1,46' S e 46° 19,42' W, no Guarujá.

Baseando-se na carta náutica nº 1701 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, a Baía de Santos tem sua abertura para o oceano com extensão de, aproximadamente, 9 km, e comprimento da região de sua abertura para o oceano até a linha de costa de 6,5 km. A área aproximada da Baía de Santos é de 40 km².

Segundo CETESB (2001), a Baía de Santos é relativamente abrigada e

constitui-se em uma zona de mistura da água salina, proveniente do oceano adjacente, com as águas salobras provenientes do estuário. Está presente, no interior da Baía, o emissário submarino de Santos, que também contribui significativamente para o aumento de poluentes na região, incluindo também os eventuais aportes de poluentes gerados pelas aberturas das comportas dos canais de Santos em situações de alto índice de precipitação, além de córregos irregulares que chegam à linha da costa.

De acordo com Harari e Camargo (1998), na Baía de Santos existe um importante contraste de intensidade das correntes entre a porção oeste e a leste, onde, nas enchentes (e vazantes) de sizígia, se tem convergência (e divergência) das correntes nos Canais de Bertioga e São Vicente e correntes num único sentido no Canal do Porto de Santos.

Ainda segundo os autores, na sizígia, em virtude da preponderância da M2, principal componente lunar semidiurna, e da S2, principal componente solar semidiurna, na circulação de maré da área, as correntes apresentam rotação anti-horária ao longo do ciclo de maré. Já na quadratura, as correntes de superfície não apresentam um sentido definido de rotação; e nas vazantes das áreas rasas, as correntes nos Canais de Bertioga, São Vicente e Santos são num único sentido.

A partir dos dados do projeto ECOSAN (Katsuragawa, 2007), a Baía de Santos apresentou valores de temperatura médios na coluna d'água de 25,62 °C, no mês de fevereiro de 2005, condições representativas de verão, e 21,90 °C, no mês de agosto de 2005, condições representativas de inverno.

Para a salinidade, os valores médios na coluna d'água obtidos foram de 33,48, no mês de fevereiro de 2005 e 35,09, no mês de agosto de 2005.

Gregorio (2009), citando os trabalhos de CETESB (2004), Bosquilha (2002) e David (2003), afirma que, durante o período de verão, a Baía de Santos apresenta alta estratificação, com valores de temperatura entre 21,58 °C e 28,40 °C e valores de salinidade entre 29,09 e 35,08. Durante o inverno, a coluna se torna mais homogênea, com valores de temperatura entre 17,56 °C e 22,85 °C e valores de salinidade entre 32,4 e 34,89.

Além dos impactos gerados pelo emissário submarino e pelos canais e córregos da região, a Baía de Santos no passado foi, indevidamente, área de descarte

de materiais dragados do Porto de Santos, o que ocasionou impactos ambientais significativos na região (CETESB, 2001).

A Baía de Santos exporta e importa sedimentos provenientes dos canais estuarinos na sua parte mais interior e exporta e importa sedimentos provenientes da região costeira na sua parte mais exterior.

A Figura 3.3, baseando-se nos dados do Anexo B, mostra que a região apresenta uma composição granulométrica aproximada entre 0% a 25% de materiais finos e entre 75% e 100% de areias, respectivamente.

3.3 Região Costeira Adjacente

A área costeira adjacente tem profundidades superiores a 15 metros, sendo já *off shore*, porém ainda influenciada por águas provenientes do estuário e dos emissários de Santos, Guarujá e Praia Grande (CETESB, 2001) (Figura 3.5).

A região costeira a ser estudada neste trabalho atinge profundidades de pouco mais de 25 metros e uma distância média da costa de, aproximadamente, 17 km .

Figura 3.5: Mapa da área costeira adjacente à região central da Baixada Santista, SP, com as informações de batimetria obtidas das cartas náuticas 1701 e 1711.

Na parte mais interna da PC de São Paulo, ocorre a predominância de Água Costeira (AC), porém, segundo Castro, Miranda e Myao (1987), durante os meses de verão, a região sofre a intrusão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), apresentando uma pronunciada picnoclina que pode atingir profundidade menores que 20 metros. Durante o inverno, a ACAS tende a recuar até a região da plataforma continental externa (Figura 3.6).

Segundo Tessler *et al.* (2006), o alinhamento do litoral paulista (NNE-SSW) junto com a predominância de ondas de NE-E, resultam no predomínio de correntes de deriva litorânea com sentido sudoeste. Em condições onde há o predomínio de frontogênese ligada aos APM (Anticiclones Polares Migratórios), com ondas provenientes de S-SE, a deriva passa a se propagar para nordeste.

Figura 3.6: Esquema dos principais processos físicos atuantes na plataforma continental de São Paulo, para os períodos de verão e inverno. As letras T e S, remetem aos parâmetros oceanográficos temperatura e salinidade, respectivamente. Extraído de Castro, Miranda e Myao (1987)

Outro importante fenômeno que ocorre na região é a chegada de água mais fria e de menor salinidade vinda do sul, devido à advecção da pluma de água doce do Rio da Prata, possivelmente associada a ventos persistentes de sudoeste (Pimenta *et al.*, 2005).

A região apresenta uma significativa influência das descargas de afluentes dos rios que desembocam no estuário, sendo de suma importância a contabilidade dos mesmos para hidrodinâmica local (Harari *et al.*, 2006).

Sobre o aspecto geomorfológico, segundo Tessler *et al.* (2006), a região como

um todo apresenta um forte equilíbrio morfodinâmico. Uma exceção a esta regra é a região da Praia Grande próxima à Ponta de Itaipu.

Um estudo de Farinaccio (2000) *apud* (Tessler *et al.*, 2006) nesta região constatou que, durante o período de passagem de sistemas frontais, existe o predomínio de erosão, mas que com o retorno das condições de tempo bom, a reconstrução do perfil praial é rápida.

Três imagens geradas a partir de dados da câmera CCD (Couple Charged Device) acoplada ao satélite sino-brasileiro CBERS2, na faixa espectral 0,52 a 0,59 μm , são apresentadas na Figura 3.7. Apesar de não existir uma calibração das imagens da câmera CCD para o local, as mesmas conseguem mostrar, de forma qualitativa, que o transporte de sedimentos em suspensão na região fica restrito, predominantemente, junto à costa, não ultrapassando áreas da plataforma continental interna (PCI) mais afastadas que 15 km da costa.

Para os períodos referentes às três imagens, os ventos foram sempre fracos, com intensidades menores que 3 m s^{-1} , sendo para W-SW no dia 27.04.2004, para NW no dia 30.06.2006 e para NE para o dia 25.07.2006. Os dados da condição do tempo para as datas foram produzidos pelas reanálises do modelo do NCEP/NCAR (*National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*), referentes ao ponto de grade de coordenadas $25^{\circ} 0' \text{ S } 47^{\circ} 30' \text{ W}$.

Figura 3.7: *Imagens geradas a partir de dados da câmera CCD (Couple Charged Device) acoplada ao satélite sino-brasileiro CBERS2, na faixa espectral 0,52 a 0,59 μm . A escala de cores é a partir de uma unidade arbitária(u) de material em suspensão.*

Em relação à granulometria da superfície do fundo, toda a região é, predominantemente, constituída de areia muito fina, de acordo com Furtado, Tessler e Eichler (1984) *apud* Rodrigues *et al.* (2003) (Figura 3.8).

As Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 apresentam os mapas de distribuição de areia, silte e argila, respectivamente, para a região da Plataforma Continental de São Paulo, com a área costeira da região central da Baixada Santista destacada.

Figura 3.8: Mapa de classes de sedimentos na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em vermelho representa a região central da Baixada Santista. Modificado de Furtado, Tessler e Eichler (1984) apud Rodrigues et al. (2003).

Figura 3.9: Distribuição de areia na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em preto delimita a região central da Baixada Santista. Modificado de Rodrigues et al. (2003).

Figura 3.10: Distribuição de silte na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em preto delimita a região central da Baixada Santista. Modificado de Rodrigues et al. (2003).

Figura 3.11: Distribuição de argila na região da Plataforma Continental de São Paulo. O quadrilátero em preto delimita a região central da Baixada Santista. Modificado de Rodrigues et al. (2003).

3.4 Regime de Ventos

Os fatores que condicionam o regime de ventos para a região da Plataforma Continental de São Paulo (PCSP) são a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e os sistemas meteorológicos frontais (Dottori, 2001).

Para o período de verão, os ventos na região são provocados pela ASAS e

sopram, predominantemente, de E-NE (Coelho, 2007). Estes ventos sofrem interferências durante a passagem na região de sistemas frontais, com a frequência de até duas frentes por mês (Lemos e Calbete, 1996).

No período de inverno, as frentes frias aumentam em frequência (*i.e.* 3 a 6 eventos por mês) e intensidade (Castro, 1985), produzindo uma mudança na direção dos ventos de NE para NW, à medida que o sistema frontal se aproxima, e, após sua passagem, os ventos mudam a direção de SW para NE (Stech, 1990), assumindo os padrões de ventos condicionados pela ASAS novamente (Figura 3.12).

Figura 3.12: Esquema conceitual da passagem de uma frente fria na costa brasileira. Modificado de (Stech, 1990).

De acordo com o Climanálise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), no mês de Janeiro de 2010 (Figura 3.13) não houve passagem de nenhuma frente fria na região de Santos, enquanto que, no mês de Agosto de 2009 (Figura 3.14), a região sofreu a passagem de 4 frentes frias.

As simulações numéricas realizadas neste trabalho serão para os períodos mencionados acima e apresentados detalhadamente na seção (4.11).

Figura 3.13: Evolução da passagem dos sistemas frontais na costa leste da América do Sul para o mês de Janeiro de 2010. A linha Vermelha representa o região fronteira Uruguai-Brasil e a linha verde representa a região de Santos. Modificado de (INPE/CPTEC, 2010).

Figura 3.14: Evolução da passagem dos sistemas frontais na costa leste da América do Sul para o mês de Agosto de 2009. A linha Vermelha representa o região fronteira Uruguai-Brasil e a linha verde representa a região de Santos. Modificado de (INPE/CPTEC, 2009).

3.5 Regime de Ondas

Tessler *et al.* (2006), citam duas séries de observações de ondas obtidas na costa sul do litoral paulista, são elas: CTH/USP (1973) na região de Cananéia entre os anos 1968 e 1969 e, Bomtempo (1991) na região da Juréia (município de Peruíbe) entre os anos 1982 e 1985.

De acordo com os dados levantados, Tessler *et al.* (2006) apontam que, de um modo geral, existem dois padrões típicos de onda: ondas de tempo bom, oriundas mais frequentemente do arco entre S60°E-E e as ondas de tempestade, provenientes do arco entre S75°E-S20°W.

Os períodos observados foram de 3 a 30 segundos, onde mais de 85% dos dados estavam entre os valores de 6 a 20 segundos, com predomínio no intervalo entre 9 e 11 segundos.

A altura significativa variou entre 0,5 e 2 metros em 90% da série, onde 50% dos dados estavam entre os valores de 1 a 1,5 metro.

A pesquisa de CTH/USP (1973) analisou a correlação entre ventos locais, coletados de uma estação meteorológica costeira, e os parâmetros das ondas incidentes, concluindo que estas ondas estavam vinculadas somente aos seus centros de geração oceânicos, não sofrendo influência significativa do vento local.

Poucos dados observados sobre o comportamento das ondas incidentes na área de estudo estão disponíveis na literatura. O único encontrado durante o levantamento bibliográfico deste trabalho foi Alfredini (2003) *apud* (Farinnaccio, 2009) na região da Baía de São Vicente, localizada na porção oeste e interior da Baía de Santos. Segundo o autor, foram observados valores de altura média de ondas entre 1 e 2 metros e período entre 9 e 11 segundos, entre os meses de novembro de 1972 e novembro de 1973.

4 MATERIAIS E MÉTODO

Para a caracterização sedimentológica da região estudada, foram realizadas simulações numéricas de transporte de sedimentos na região do Complexo Estuarino Santos, São Vicente e Bertioga, na Baía de Santos e região da Plataforma Continental adjacente.

Devido ao pequeno domínio simulado, para obter condições realísticas da hidrodinâmica local e do regime de ondas incidentes, foram realizadas simulações de um domínio compreendido entre o Cabo de São Tomé na porção mais ao norte e o Cabo de Santa Marta na porção mais ao sul, onde informações de ondas, correntes e elevação da superfície livre do mar foram inseridos como condições de bordas no modelo da região central da Baixada Santista. Detalhes dos dois domínios simulados serão apresentados mais adiante neste documento.

As simulações numéricas foram realizadas utilizando o modelo numérico ROMS, sigla em inglês para Sistema de Modelagem Oceânica Regional (*Regional Ocean Modeling System*) acoplado em sistema de duas vias com o modelo numérico de ondas SWAN, sigla em inglês para Simulação de Ondas Costeiras (*Simulating WAves Nearshore*).

4.1 O Modelo Numérico ROMS

O Regional Ocean Modeling System (ROMS) é um modelo tri-dimensional de superfície livre, que resolve as equações de Navier-Stokes através de aproximações por diferenças finitas, utilizando as aproximações hidrostática e de Boussinesq (IMCS, 2011).

O modelo utiliza uma grade ortogonal curvilínea do tipo C de Arakawa e um sistema de coordenadas vertical do tipo S (*terrain-following*) que assemelha-se com a coordenada do tipo σ , porém, com a versatilidade de os níveis verticais não serem porcentagens fixas da coluna d'água, o que permite maior resolução nas camadas mais superficiais e de fundo de acordo com a profundidade local.

O ROMS utiliza um esquema de passo de tempo “explícito-separado” (*split-explicit*) que resolve um número finito de passos de tempo barotrópico - onde as variações no campo de velocidade são de maior frequência - para cada passo de tempo

baroclínico, para desenvolver a superfície livre do mar e as equações de *momentum* verticalmente integradas (Shchepetkin e McWilliams, 2005).

O modelo apresenta uma estrutura flexível que permite diferentes escolhas de componentes para resolução de esquemas advectivos de turbulência e de condições de borda (Ezer, Arango e Shchepetkin, 2002), além de utilizar submodelos de camadas de superfície e fundo, fluxos ar-mar, derivadores de superfície e modelo biológico de interação nutriente-fitoplâncton-zooplâncton. O campo de densidade é determinado pela equação de estado que, além da temperatura e salinidade, contabiliza a concentração do sedimento em suspensão (Warner *et al.*, 2008).

Um submodelo de transporte de sedimentos também está implementado no ROMS. Utilizando metodologias já existentes em outros modelos numéricos, como ECOMSed, EFDC, COHERENS e Delft3D, o ROMS representa o sedimento utilizando categorias separadas de sedimentos coesivos e não-coesivos, cada um com um número ilimitado de classes de materiais, que caracterizam o diâmetro do grão, sua densidade, velocidade de deposição, tensão de cisalhamento crítica para erosão e parâmetro empírico de erosão (Warner *et al.*, 2008).

Essas propriedades são utilizadas pelo modelo para determinar a característica de cada camada ativa de sedimento e assim calcular sua capacidade de erosão/ressuspensão e deposição, em função das condições hidrodinâmicas do local.

As informações sobre o módulo de sedimentos do ROMS, apresentadas abaixo, foram baseadas em Warner *et al.* (2008).

4.1.1 Sedimento de Fundo

O sedimento de fundo é representado por variáveis tri-dimensionais com um número fixo de camadas predeterminadas. Cada célula de cada camada de fundo é inicializada com dados de altura da camada, distribuição de cada classe de sedimento, porosidade e idade do sedimento, sendo esta última informação utilizada para rastrear o tempo que ocorreu a deposição na célula de grade.

Para cada classe de sedimento em cada célula, a massa pode ser determinada utilizando os parâmetros acima citados, com exceção da idade do sedimento, mais a densidade dos grãos. A formulação de sedimento de fundo também inclui duas variáveis bi-dimensionais, que descrevem outras propriedades do fundo marinho,

como diâmetro médio dos grãos, densidade média, velocidade de decantação, tensão crítica para que ocorra erosão, altura e comprimento da ondulação do fundo.

A massa de cada classe de sedimento disponível para transporte é limitada na camada mais superficial do sedimento de fundo. O sedimento em suspensão que é depositado é adicionado apenas na camada mais superficial do sedimento de fundo.

O atrito de fundo é utilizado pelo submodelo de transporte de sedimentos para calcular as taxas de erosão ou deposição em cada ponto de grade durante os passos de tempo da simulação, alterando assim as camadas de sedimento de fundo, disponibilizando ou inserindo sedimentos da coluna d'água nas mesmas.

Para cada passo de tempo, a altura da camada ativa de sedimento é calculada, baseando-se na relação de Harris e Wiberg (1997):

$$z_a = \max[k_1(\tau_{sf} - \overline{\tau_{ce}}), 0] + k_2 D_{50} \quad (4.1)$$

onde:

τ_{sf} é o atrito máximo de fundo produzido pela interação de onda e corrente ($\text{m}^2 \text{s}^2$);

$\overline{\tau_{ce}}$ é a tensão crítica de erosão média entre todas as classes de sedimentos inseridas no modelo ($\text{m}^2 \text{s}^2$);

D_{50} é a densidade média do grão do sedimento na superfície do fundo (kg m^{-3}) e

k_1 e k_2 são constantes empíricas de valores 0,007 e 6,0, respectivamente.

Caso a camada de sedimentos mais superficial tenha uma altura menor que a altura de z_a , esta recebe sedimento proveniente da camada imediatamente abaixo e, caso esta camada imediatamente abaixo da camada mais superficial não for suficiente para que seja maior ou igual a z_a , a camada de sedimento mais profunda se divide para que o número total de camadas de sedimento se conserve.

O usuário pode configurar a altura máxima das camadas de sedimento de forma que, se uma deposição contínua de sedimentos produzir uma altura da camada de superfície de sedimento maior que a definida pelo usuário, uma nova camada sobre a camada mais superficial de sedimentos é criada e as duas camadas mais profundas de sedimentos se fundem, para também evitar alterações no número total de camadas de sedimentos.

A Figura 4.1 apresenta um esquema de erosão/deposição das camadas de sedimento.

Figura 4.1: Esquema do processo de criação e aglutinação das camadas de sedimento de fundo, a partir das condições de erosão e deposição na camada de sedimento mais superficial. Adaptado de Soupy, Warner e Sherwood (2010).

Após os fluxos de sedimentos entre a coluna d'água e o fundo serem calculados, devido aos processos de erosão e deposição, dá-se início à atualização das características do sedimento no fundo, como D_{50} , ondulação do fundo, densidade média etc, para que possa ser calculado o stress de fundo para o próximo passo de tempo.

4.1.2 Dispersão do Sedimento em Suspensão

O sedimento suspenso na coluna d'água é transportado como um traçador conservativo como temperatura e salinidade, sendo considerada sua deposição no fundo e a sua redistribuição para a coluna d'água através do processo de erosão/deposição.

A diferença do cálculo do transporte de temperatura e salinidade, para o transporte de sedimentos, é a adição de um termo de fonte e sorvedouro, devido ao

processo de decantação e troca de material entre o fundo e a coluna d'água. Este termo adicional é calculado da seguinte maneira:

$$C_{fonte,m} = -\frac{\partial w_{s,m} C_m}{\partial s} + E_{s,m} \quad (4.2)$$

onde:

$w_{s,m}$ é a velocidade de decantação do sedimento (m s^{-1});

$E_{s,m}$ é a fonte de erosão definida a seguir ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

s é a coordenada vertical;

C_m é a concentração de sedimento (kg m^{-3}) e

m corresponde ao índice referente à classe de sedimento.

O ROMS calcula o transporte escalar do sedimento em suspensão da seguinte forma:

$$\frac{\partial(H_z C)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z C)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z C)}{\partial y} + \frac{\partial(w H_z C)}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\overline{c' w'} - \frac{v_\theta}{H_z} \frac{\partial C}{\partial s} \right) + C_{fonte,m} \quad (4.3)$$

onde:

u , v e w são as componentes de velocidade horizontais e vertical (m s^{-1});

H_z é a altura da célula de grade (m);

v_θ é o coeficiente cinemático de difusão molecular ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

$\overline{c'}$ é o coeficiente de concentração turbulenta médio no tempo (kg m^{-3}) e

$\overline{w'}$ é a velocidade vertical turbulenta média no tempo (m s^{-1}).

Assume-se fluxo zero nas condições de borda de superfície e fundo na equação de difusão vertical. Para a equação de advecção, são calculados os fluxos de sedimento fundo $\Rightarrow$ coluna d'água (*i.e.* processo de erosão) e coluna d'água $\Rightarrow$ fundo (*i.e.* processo de deposição), apenas para a interação entre a camada de fundo e a camada mais profunda da coluna d'água.

O termo de fonte de erosão ($E_{s,m}$) é parametrizado seguindo Ariathurai e Arulanandan (1978), que segue:

$$E_{s,m} = E_{0,m} (1 - \phi) \frac{\tau_{sf} - \tau_{ce,m}}{\tau_{ce,m}}, \quad \text{se } \tau_{sf} > \tau_{ce,m} \quad (4.4)$$

onde:

E_s é o fluxo de massa na superfície erodida ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

E_0 é a constante de erosão de fundo definida pelo usuário ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e

ϕ é a porosidade do sedimento (*i.e.* volume da água intersticial/volume total da camada mais superficial de sedimento).

A fluxo máximo de erosão para cada classe de sedimento é limitado pela viabilidade da mesma na camada mais superficial do fundo.

4.1.3 Dispersão do Sedimento no Fundo

O transporte de sedimentos são dominantes em regiões próximas ao fundo, portanto, é essencial o conhecimento preciso das velocidade das correntes próximas ao fundo, assim como o atrito de fundo na presença de ondulações ou de um fundo liso (Rijn, 1990)

O modelo numérico ROMS implementa dois diferentes métodos de modelar o processo de erosão:

- 1) A formulação do fluxo unidirecional de Meyer-Peter e Mueller (1948) e
- 2) A fórmula de Soulsby e Damgaard (2005) que contabiliza os efeitos combinados de correntes e de ondas.

As formulações levam em conta características específicas de cada classe de sedimento inserida no modelo, como: tamanho do grão (D), densidade do grão (ρ_s), densidade específica do grão na água ($s = \rho_s/\rho$) e tensão crítica de erosão (TCE) (τ_{ce}).

Para as duas formulações, primeiramente é calculada a taxa de transporte por erosão para cada classe de sedimento, adimensionalmente (Φ), e, então, o valor calculado é convertido para uma taxa por erosão dimensional (q_{bl}), utilizando a seguinte fórmula:

$$q_{bl} = \Phi \sqrt{(s - 1)gD_{50}^3 \rho_s} \quad (4.5)$$

Esta por sua vez, é uma quantidade vetorial horizontal com direção que corresponde à resultante da erosão de fundo.

A seguir, serão apresentadas as duas metodologias e suas formulações para o cálculo da taxa de erosão do fundo.

Meyer-Peter Müller

Para este método, a formulação é:

$$\Phi = \max \left[8(\theta_{sf} - \theta_c)^{1,5}, \quad 0 \right] \quad (4.6)$$

onde:

Φ é a magnitude da taxa de transporte de fundo adimensional;

$\theta_c = 0,0047$ é o parâmetro crítico de Shields;

θ_{sf} é o parâmetro adimensional de Shields para o atrito máximo de fundo;

$$\theta_{sf} = \frac{\tau_{sf}}{(s - 1)gD_{50}} \quad (4.7)$$

Para a formulação de Meyer-Peter e Mueller (1948), τ_{sf} é o atrito máximo de fundo, calculado da seguinte maneira:

$$\tau_{sf} = (\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2)^{0,5} \quad (4.8)$$

onde:

τ_{bx} e τ_{by} são os componentes para o atrito máximo de fundo produzido pelas correntes.

O transporte por erosão é dividido em componentes x e y , baseadas na magnitude das componentes para o atrito máximo de fundo, em relação ao valor máximo de atrito de fundo (τ_{sf}):

$$q_{blx} = q_{bl} \frac{\tau_{bx}}{\tau_{sf}}, \quad q_{bly} = q_{bl} \frac{\tau_{by}}{\tau_{sf}} \quad (4.9)$$

Soulsby e Damgaard

Esta formulação contabiliza o efeito combinado das ondas e correntes no transporte de sedimentos por erosão. Ela é baseada na integração numérica de um ciclo de onda, utilizando a seguinte equação do transporte adimensional:

$$\vec{\Phi} = \max \left[A_2 \theta^{0,5} (\theta_{sf} - \theta_c) \frac{\vec{\theta}_{sf}}{\theta_{sf}}, \quad 0 \right] \quad (4.10)$$

onde:

$\vec{\Phi}$ e $\vec{\theta}_{sf}$ são vetores com suas componentes na direção da corrente e ortogonal à mesma;

θ_c é o parâmetro crítico de Shields, calculado da seguinte maneira:

$$\theta_c = \frac{\tau_{ce}}{(s-1)gD_{50}} \quad (4.11)$$

e

$A_2 = 12$, que apresenta um coeficiente semi-empírico.

Esta solução calcula a taxa de transporte nas direções paralela e perpendicular às correntes, que segue:

$$\boxed{\Phi_{\parallel} = \max[\Phi_{\parallel 1}, \Phi_{\parallel 2}] \quad (4.12)}$$

onde:

$$\Phi_{\parallel 1} = A_2 \theta_m^{0,5} (\theta_m - \theta_c) \quad (4.13)$$

$$\Phi_{\parallel 2} = A_2 (0,9534 + 0,1907 \cos 2\phi) \theta_w^{0,5} \theta_m + A_2 (0,229 \gamma_w \theta_w^{1,5} \cos \phi) \quad (4.14)$$

e

$$\boxed{\Phi_{\perp} = A_2 \frac{0,1907 \theta_w^2}{\theta_w^{3/2} + 1,5 \theta_m^{1,5}} (\theta_m \sin 2\phi + 1,2 \gamma_w \theta_w \sin \phi) \quad (4.15)}$$

onde:

θ_m é o parâmetro de Shields médio, calculado da seguinte maneira:

$$\theta_m = \frac{\tau_m}{(s-1)gD_{50}} \quad (4.16)$$

τ_m é calculado como:

$$\tau_m = \tau_c \left(1 + 1,2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_w + \tau_c} \right)^{1,5} \right) \quad (4.17)$$

sendo

τ_c é o atrito de fundo provocado apenas pelas correntes ($\text{m}^2 \text{s}^2$);

τ_w é o atrito de fundo provocado apenas pela ação das ondas e

γ_w é o fator de assimetria calculado a partir de harmônicos de oscilação das ondas, com valor máximo de 0,2.

Os fluxos obtidos nas equações 4.12 e 4.15 são rotacionados para direções das correntes médias e das ondas e, então, dimensionalizados utilizando a equação 4.5.

Para esta pesquisa, foi utilizada a formulação para o cálculo da taxa de erosão do fundo de Soulsby e Damgaard (2005).

Devido às duas formulações serem baseadas em diversos coeficientes empíricos, a escolha do cálculo da taxa de erosão de fundo de Soulsby e Damgaard (2005) foi feita a partir da análise qualitativa dos resultados de transporte de sedimentos, realizados para a região investigada neste trabalho.

4.1.4 Inclinação do fundo

Para calcular a erosão do fundo, após o cálculo de Φ , obtido a partir de uma das duas formulações acima, é feita uma correção devido à inclinação do fundo. Esta correção é obtida da seguinte maneira:

$$q_{bl,inc} = \frac{\tan \varphi_m}{(\tan \varphi_m - \tan \beta) \cos \beta} \quad (4.18)$$

onde:

$\beta = \tan^{-1}(dz/dx_\alpha)$ é a inclinação do fundo na direção do transporte do sedimento erodido e

φ_m é o ângulo de fricção do sedimento, o qual é configurado como 33° por padrão.

Por fim, o valor de Φ será multiplicado pelo valor de $q_{bl,inc}$.

4.1.5 Cálculo de massa

O fluxo de sedimento provocado pela erosão no centro de cada célula de grade é transferido para a fronteira da mesma e, então, é realizado o cálculo das diferenças de Φ e atualizado o valor da quantidade de massa, para cada célula de grade.

4.1.6 Morfologia

O ROMS calcula as mudanças na elevação do fundo a partir da variação da quantidade de massa de sedimento depositado, presente em cada célula de grade.

Variações na elevação do fundo podem ser suficientes para causar mudanças no padrão de correntes, o que faz com que a evolução morfológica, durante a simulação de domínios costeiros de razoável dinâmica sedimentar, sejam importantes para investigar com mais precisão o padrão de correntes numa região, além de apenas desenvolver estudos sedimentológicos.

4.1.7 Efeitos da Densidade do Sedimento

Outro aspecto importante na interação entre dinâmica sedimentar e a hidrodinâmica é o efeito da densidade do sedimento no campo de massa local.

O modelo numérico ROMS acrescenta à equação de estado da água do mar um termo que adiciona a densidade do sedimento em suspensão na coluna d'água:

$$\rho = \rho_{\text{água}} + \sum_{m=1}^{N_{\text{sed}}} \frac{C_{s,m}}{\rho_{s,m}} (\rho_{s,m} - \rho_{\text{água}}) \quad (4.19)$$

onde:

ρ é a densidade do fluido (kg m^{-3});

$\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água (kg m^{-3});

$\rho_{s,m}$ é a densidade da sedimento de classe m (kg m^{-3}) e

$C_{s,m}$ é a concentração do sedimento na coluna d'água m (kg m^{-3}).

Essa diferença na densidade do fluido pode iniciar ou influenciar movimentos por gradientes densidade, além de alterar a estratificação da coluna d'água e os valores de viscosidade do fluido.

4.1.8 Cálculo do Atrito de Fundo

Variações dos valores de velocidade na coluna d'água, concentração de sedimentos, produção e dissipação de energia cinética turbulenta e o número de Reynolds, especialmente junto ao fundo, tornam o cálculo do atrito de fundo de difícil resolução para grades com espaçamentos de níveis verticais, utilizados geralmente em domínios de escala regional (Warner *et al.*, 2008).

Para aumentar a qualidade das simulações de tais parâmetros, o modelo numérico ROMS os parametriza de forma diferenciada na camada de contorno de fundo (CCF), em relação ao restante das células verticais na coluna d'água.

A determinação da CCF é importante para as simulações numéricas pois, a partir dela, é calculado o atrito no fluxo gerado por sua interação com o fundo, que é então, inserido nas equações do movimento utilizadas pelo modelo, como condições de contorno.

A CCF é ainda mais importante para o cálculo do transporte de sedimentos pois, o atrito de fundo, calculado na CCF, é determinante para a resolução das taxas de erosão e deposição, como apresentado nos capítulos 4.1.2 e 4.1.3.

Dois métodos de cálculo da CCF são disponíveis no ROMS. São eles:

- (1) Formulação de arrasto simples e
- (2) Formulação que representam a interação entre correntes e ondas.

Formulação de arrasto simples

A formulação de arrasto simples resolve a CCF, implementando cálculos de atrito de fundo linear, quadrático ou logarítmico.

O método de arrasto simples e quadrático é dependente da velocidade no fundo e dos coeficientes γ_1 e γ_2 .

$$\tau_{bx} = \left(\gamma_1 + \gamma_2 \sqrt{u^2 + v^2} \right) u \quad (4.20)$$

$$\tau_{by} = \left(\gamma_1 + \gamma_2 \sqrt{u^2 + v^2} \right) v \quad (4.21)$$

Onde:

γ_1 e γ_2 são os coeficientes de arrasto linear e quadrático, respectivamente. Estes coeficientes são constantes em todo o domínio.

Para escolher entre a formulação de arrasto linear e quadrático, o usuário precisa apenas configurar os valores de γ_1 (caso queira utilizar o arrasto quadrático) ou γ_2 (caso queira utilizar o arrasto linear) como zero.

Os valores de u e v são as componentes em x e y da camada de fundo.

O ROMS disponibiliza formulação de arrasto logarítmico, assumindo o perfil logarítmico previsto na camada limite através da velocidade de atrito u_* e elevação da rugosidade do fundo z_0 , que segue:

$$|u| = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4.22)$$

Onde:

$$|u| = \sqrt{u^2 + v^2} \text{ (m s}^{-1}\text{)};$$

$$u_* = \sqrt{|\tau_{bx}| + |\tau_{by}|} \text{ (m s}^{-1}\text{)};$$

z é a elevação média da célula de fundo (m);

$k = 0,41$ é a constante de von Kármán's e

z_0 é a elevação da rugosidade do fundo.

O cálculo do atrito da camada de fundo é então:

$$\begin{aligned}
|u| &= \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \\
\sqrt{u^2 + v^2} &= \frac{\sqrt{|\tau_{bx}| + |\tau_{by}|}}{k} \ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) \\
|\tau_{bx}| + |\tau_{by}| &= \frac{k^2(u^2 + v^2)}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} \\
\sqrt{\tau_{bx} \cdot \tau_{bx}} + \sqrt{\tau_{by} \cdot \tau_{by}} &= \frac{k^2(u^2 + v^2)}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} \\
\tau_{bx} \hat{i} + \tau_{by} \hat{j} &= \frac{k^2}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} (u^2 + v^2) \cdot \frac{(u \hat{i} + v \hat{j})}{|u|} \\
\tau_{bx} \hat{i} + \tau_{by} \hat{j} &= \frac{k^2}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} (u^2 + v^2) \cdot \frac{(u \hat{i} + v \hat{j})}{\sqrt{u^2 + v^2}} \\
\tau_{bx} \hat{i} + \tau_{by} \hat{j} &= \frac{k^2}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} \sqrt{u^2 + v^2} \cdot (u \hat{i} + v \hat{j})
\end{aligned}$$

Portanto,

$$\tau_{bx} = \frac{k^2}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.23)$$

e

$$\tau_{by} = \frac{k^2}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.24)$$

A vantagem da formulação logarítmica é uma melhor qualidade dos dados de velocidade, pois o cálculo das mesmas é dependente do ponto médio da camada de fundo. Nos casos das formulações de atrito de fundo linear e quadrático, os valores de velocidade utilizados são diretamente da camada da célula de fundo.

Formulação com interação entre correntes e ondas

O segundo método utiliza formulações mais complexas, implementando diversos modelos de CCF, calculados a partir da interação entre corrente e ondas, como Jonsson e Carlsen (1976), Smith (1977), Grant e Madsen (1979) e Madsen (1994), acoplados com cálculos de rugosidade de fundo (Warner *et al.*, 2008).

Neste segundo método de cálculo da CCF, o ROMS implementa três diferentes formas de calcular a CCF a partir de interações entre ondas e correntes, e de cálculo da rugosidade do fundo. São elas:

(1) *sg_bbl* que baseia-se nos algoritmos de interação entre ondas e correntes e de rugosidade do fundo, de acordo com Styles e Glenn (2000) e Styles (2002);

(2) *mb_bbl* que usa algoritmos de interação entre ondas e correntes de Soulsby (1995) combinado com cálculo de quantidade de sedimento e rugosidade do fundo, de acordo com Grant e Madsen (1982), Nielsen (1986) e Li e Amos (2001) e

(3) *ssw_bbl* que utiliza algoritmos de interação entre ondas e correntes de Madsen (1994) ou de Styles e Glenn (2000), juntamente com formulações de morfodinâmica propostas por Wiberg e Harris (1994) e Harris e Wiberg (2001).

Estas formulações são mais complexas em relação à formulação de arrasto simples, pois a influência das ondas e mudanças no fundo devido à dinâmica sedimentar produzem movimentos turbulentos que geram altos valores de atrito de fundo instantâneos (Warner *et al.*, 2008).

Para estas parametrizações, o ROMS utiliza valores de velocidade do fluido, velocidade gerada pelo movimento orbital das ondas, período da onda e direção da onda.

Além dos parâmetros de ondas e correntes, informações sobre o sedimento também são utilizadas pelas formulações da CCF, como: diâmetro médio do sedimento D_{50} , densidade média do sedimento ρ_s e velocidade de decantação do sedimento w_s .

Durante a execução deste trabalho, os modelos *sg_bbl* e *mb_bbl* apresentaram alguns problemas relacionados à implementação do código (*i.e. bugs*), além de apresentarem valores relacionados aos resultados da dinâmica sedimentar menos satisfatórios do que o modelo de CCF, *ssw_bbl*. Consequentemente, este último modelo foi utilizado nas formulações da CCF, para as simulações realizadas neste trabalho.

4.2 O Modelo Numérico SWAN

O SWAN, sigla em inglês para Simulando Ondas Próximas à Costa (*Simulating WAVes Nearshore*) é a terceira geração de um modelo numérico o qual foi

utilizado para obter estimativas realísticas dos parâmetros de ondas (*e.g.* período, altura significativa, comprimento, energia, direção etc.) em áreas costeiras, lagos e estuários, a partir de informações de ventos, batimetria e condições de correntes (Booji *et al.*, 2011).

Este modelo é baseado na equação do balanço de ação das ondas, com elementos de fontes e sorvedouro, como vento, quebra das ondas, dissipação pelo fundo e interações não lineares entre ondas.

Segundo Warner *et al.* (2008), o SWAN resolve a equação de transporte da densidade de ação da onda N (*i.e.* densidade de energia da onda, dividida pela frequência relativa) da seguinte maneira:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_w}{\sigma} \quad (4.25)$$

onde:

c_x e c_y são as celeridades das ondas nas direções x e y (m s^{-1});

σ é a frequência das ondas relativas às correntes (s^{-1});

θ é a direção das ondas e

S é o termo que representa fatores de fonte e sorvedouro das ondas, como ventos, quebra das ondas, dissipação pelo fundo e interações não lineares entre ondas.

O SWAN pode ser utilizado de duas formas no modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos ROMS:

(1) Utilização de resultados de período, comprimento, altura e direção das ondas, obtidos nas simulações do SWAN, como dados de entrada do ROMS no esquema de uma via e

(2) Esquema de duas vias, onde, durante a simulação dos dois modelos numéricos, há trocas periódicas de informações sobre parâmetros de ondas e condições hidrodinâmicas, oferecendo então, simulações mais realísticas na interação entre os campos de ondas e de hidrodinâmica.

Para este trabalho, foi implementada a forma de duas vias de simulação ROMS/SWAN.

O esquema de duas vias é possível de ser feito a partir da ferramenta de acoplamento de modelos (MCT), que será descrita a seguir.

4.3 Ferramenta de Acoplamento de Modelos MCT

O MCT, sigla em inglês para Ferramenta para Acoplamento de Modelo (*Model-Coupling Toolkit*), é uma metodologia *open-source* e modular, para a construção um sistema de modelos a partir do acoplamento de modelos específicos, onde existe um mecanismo de transferência de dados entre os modelos, enquanto os mesmos são executados (IMCS, 2011).

O acoplamento exige que cada modelo use sua própria grade, arquivos de dados de entrada, passos de tempo, e cada modelo gere seus próprios arquivos de saída nos seus próprios formatos (*e.g.* ASCII e NetCDF) e no seu intervalo de tempo configurado (IMCS, 2011).

Na tabela 4.3.1, são apresentados os parâmetros que são trocados entre os modelos ROMS e SWAN, configurados para as simulações deste trabalho.

Tabela 4.3.1: Relação dos parâmetros que são trocadas entre os modelos ROMS e SWAN.

Parâmetros SWAN→ROMS	Parâmetros ROMS→SWAN
Direção da onda (°)	Profundidade (m)
Amplitude da onda (m)	Elevação da superfície livre do mar (m)
Comprimento da onda (m)	Velocidade barotrópica (componente u) (m s^{-1})
Período da onda no fundo (s)	Velocidade barotrópica (componente v) (m s^{-1})
Período da onda na sup. (s)	Rugosidade do fundo (m)
Velocidade orbital da onda no fundo (m s^{-1})	

4.4 Domínios Simulados pelo Modelo

Como apresentado anteriormente, para este trabalho foi utilizado um primeiro domínio de meso escala, em que foram utilizados os resultados dos campos de correntes e de ondas simulados, como informações de bordas para um segundo domínio interior ao primeiro onde, então, foram realizadas as simulações de transporte de sedimentos.

Nas próximas seções, são apresentadas as informações sobre cada um dos domínios simulados.

4.5 Região do Cabo de São Tomé ao Cabo de Santa Marta

Foi simulado o domínio entre as latitudes $30^{\circ} 13' 16''$ S e $20^{\circ} 7' 21''$ S e longitudes $50^{\circ} 20' 8''$ W e $39^{\circ} 9' 6''$ W, que compreende a região do Cabo de Santa Marta no Estado de Santa Catarina, ao Cabo de São Tomé no Estado do Rio de Janeiro (Figura 4.2).

Figura 4.2: Elevação da região simulada no domínio de Cabo de São Tomé ao Cabo de Santa Marta. Os dados de elevação foram obtidos a partir do banco de dados etopo1.

A grade horizontal do modelo é do tipo regular, com 188 pontos equidistantes em espaçamentos de 6052 metros, na direção média paralela as linhas isobatimétricas da PC simulada (*i.e.* 42° no sentido anti horário) e 84 pontos equidistantes em espaçamentos de 6063 metros, na direção normal as linhas isobatimétricas da PC. A batimetria obtida no banco de dados etopo1 (Amante e Eakins, 2009) foi truncada em 1500 metros.

A grade vertical é do tipo coordenada S com 10 pontos, totalizando 157.920 pontos simulados no campo tridimensional, com 121.598 (*i.e.* aproximadamente 77%

do total) pontos em água e 36.322 (*i.e.* aproximadamente 23% do total) pontos em terra.

4.6 Forçantes e Condições Iniciais

4.6.1 Campo de massa

Os dados de temperatura e salinidade foram obtidos a partir do banco de dados climatológicos WOA09, sigla em inglês para Atlas Oceânico Mundial 2009 (World Ocean Atlas 2009) (Locarnini *et al.*, 2010); (Antonov *et al.*, 2010) para os meses simulados, descritos na seção 4.11.

Os dados disponíveis foram gerados a partir de dados coletados por diversos equipamentos, em diferentes pontos do oceano, e interpolados por análise objetiva, gerando um banco de dados com resolução regular de 1° para todo o globo, com 24 níveis verticais (Tabela 4.6.1), para os dados de climatologia mensal para temperatura e salinidade.

Tabela 4.6.1: Níveis verticais padrão dos dados de temperatura e salinidade do WOA09 para a climatologia mensal.

Índice do nível	Profundidade (m)	Índice do nível	Profundidade (m)
1	0	13	400
2	10	14	500
3	20	15	600
4	30	16	700
5	50	17	800
6	75	18	900
7	100	19	1000
8	125	20	1100
9	150	21	1200
10	200	22	1300
11	250	23	1400
12	300	24	1500

Com o intuito de ilustrar os dados adquiridos do WOA09 para a região, as Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam mapas de temperatura dos dados climatológicos

de janeiro para região estudada, nos níveis verticais 0, 200 e 1500 metros, enquanto que as Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam mapas de salinidade, para mês de janeiro, nos mesmos níveis de profundidade.

Figura 4.3: Mapa de temperatura na superfície para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.

Figura 4.4: Mapa de temperatura na profundidade 200 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.

Figura 4.5: Mapa de temperatura na profundidade 1500 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.

Figura 4.6: Mapa de salinidade na superfície para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.

Figura 4.7: Mapa de salinidade na profundidade 200 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.

Figura 4.8: Mapa de salinidade na profundidade 1500 m para a climatologia de janeiro, obtida no banco de dados oceânicos global WOA09.

4.6.2 Campo de ventos

O campo de ventos foi obtido a partir do banco de dados global NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*), para a região de interesse.

Estes dados são gerados a partir de reanálises de resultados de um modelo climático, alimentado com diversas observações meteorológicas, obtidas a partir de navios, aviões, estações meteorológicas, satélites etc. (Kanamitsu *et al.*, 1996).

Os dados utilizados tem variação temporal de 6 horas e variação espacial de 2,5° para todo o globo, e são disponíveis em

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.

As informações de vento obtidas foram interpoladas linearmente para os pontos de grade horizontais do modelo numérico ROMS.

4.6.3 Informações de maré

Os dados de maré foram obtidos a partir do modelo regional de marés oceânicas *Atlantic Ocean 2011-atlas* de 1/12°, com as componentes: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1 e M4 (Egbert e Erofeeva, 2010).

Este modelo assimila dados dos satélites altimétricos TOPEX/Poseidon e Jason, juntamente com dados do satélite altimétrico ERS, e utiliza como condição de bordas abertas, dados do modelo global TPXO7.1.

Os resultados do modelo de marés oceânicas utilizados são disponíveis em: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/AO.html>.

A Figura 4.9 apresenta a região do Oceano Atlântico, com os locais de dados observados pelos satélites altimétricos citados acima, utilizados pelo modelo regional de marés.

Figura 4.9: Mapa da região do Oceano Atlântico com os dados obtidos dos satélites altimétricos Topex/Poseidon, Jason e ERS assimilados pelo modelo. Adaptado de Egbert e Erofeeva (2010).

4.6.4 Informações de ondas

A simulação de ondas deste domínio foi realizada pelo modelo numérico SWAN (seção 4.2) acoplado no modo duas vias com o ROMS através do MCT (seção 4.3).

Os contornos abertos do domínio receberam informações de altura significativa, direção e período médio das ondas no local a partir do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III (Chawla e Tolman, 2007), (Tolman, 2009) e (Tolman, 2010).

Os dados tem resolução temporal de 3 horas e resolução espacial de $0,5^\circ$ para longitude e $0,5^\circ$ para latitude, no intervalo entre $-77,5^\circ$ e $77,5^\circ$, e foram interpolados linearmente para os pontos de grade nas bordas abertas do modelo numérico SWAN.

Os dados são disponibilizados em <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>.

A mesma batimetria (truncada em 1500 metros) e as mesmas informações de ventos configurados no ROMS foram utilizados nas simulações do SWAN.

Para efeito de exemplificação dos dados utilizados no modelo, as Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, apresentam mapas de altura significativa, período e direção médias das ondas, respectivamente, para o dia 05 de janeiro de 2009 às 00:00 h, obtidos dos dados disponíveis do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III.

Figura 4.10: *Altura significativa das ondas(m) na região, para o dia 05 de janeiro de 2009 às 00:00 h. Dados obtidos do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III.*

Figura 4.11: Período das ondas(s) na região, para o dia 05 de janeiro de 2009 às 00:00 h. Dados obtidos do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III.

Figura 4.12: Direção das ondas($^{\circ}$) em notação meteorológica, para o dia 05 de janeiro de 2009 às 00:00 h. Dados obtidos do modelo de ondas operacional global NOAA WAVEWATCH III.

4.7 Região Central da Baixada Santista

Foi simulado o domínio entre as latitudes $24^{\circ} 15' 1''$ S e $23^{\circ} 46' W''$ S e longitudes $46^{\circ} 40' 54''$ S e $46^{\circ} 0' 1''$ W, que compreende a região costeira de Praia Grande, SP, no seu limite sul, até a região norte da Ilha de Santo Amaro, SP, no seu limite norte (Figura 4.13).

Figura 4.13: Batimetria da região simulada no domínio da região central da Baixada Santista. Os dados de profundidade foram obtidas a partir das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) de números 1700, 1711 e 1701.

A grade horizontal do modelo é do tipo regular com 600 pontos equidistantes em espaçamentos de 104 metros, rotacionada em 22° no sentido anti horário em relação ao eixo cartesiano e 300 pontos equidistantes em espaçamentos de 94 metros na direção normal ao eixo rotacionado.

O motivo da rotação da grade em relação aos eixos N-S, E-W é que, a mesma foi idealizada de tal forma que consiga obter o maior número de pontos de água no domínio.

A batimetria foi obtida a partir de dados extraídos das cartas náuticas do DHN, de números 1700, 1711 e 1701 onde, após obtidos os dados, estes foram interpolados linearmente para os pontos de grade do plano horizontal do modelo. Um alisamento da batimetria, seguindo a metodologia de Sikirić, Janeković e Kuzmić (2009), foi realizado para suavizar erros no gradiente de pressão horizontal, gerados por variações abruptas da profundidade entre células de grade vizinhas.

A grade vertical é do tipo coordenada S com 10 pontos, totalizando 1.800.000 pontos simulados no campo tridimensional, com 1.037.340 (*i.e.* aproximadamente 58% do total) pontos em água e 762.660 (*i.e.* aproximadamente 42% do total) pontos em terra.

4.8 Forçantes e Condições Iniciais

4.8.1 Campo de massa

Devido ao domínio pequeno, o campo de massa inicial foi obtido da seguinte maneira:

1. Realizada uma simulação de 1 mês com os dados de temperatura e salinidade obtidos a partir do WOA09 (seção 4.6.1), com condições de gradiente zero nos contornos abertos para temperatura e salinidade e com os aportes de água fluvial dos rios inseridos no modelo (apresentados a seguir).
2. O resultado final dos campos TS (*i.e.* campos de temperatura e salinidade) foi então recuperado e utilizado como condição inicial para as simulações.

Isto faz com que o efeito do aporte de água fluvial seja considerado no campo de massa inicial do modelo, sem que as condições de TS do oceano ao largo sejam atenuadas significativamente.

A Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os campos iniciais de temperatura e salinidade, utilizados nas simulações para o domínio.

Figura 4.14: Mapas de temperatura da superfície (painel esquerdo) e fundo (painel direito) utilizados como condição inicial nas simulações para o domínio da região central da baixada santista.

Figura 4.15: Mapas de salinidade da superfície (painel esquerdo) e fundo (painel direito) utilizados como condição inicial nas simulações para o domínio da região central da baixada santista.

4.8.2 Campo de ventos

Assim como no domínio da região entre o Cabo de São Tomé ao Cabo de Santa Marta, os campos de ventos foram obtidos a partir do banco de dados global NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*), disponíveis para a região.

Como o espaçamento dos dados disponíveis é de $2,5^\circ$, conforme descrito na seção 4.6.2, todo o domínio foi considerado como sendo forçado com vento uniforme no espaço, proveniente do ponto $22^\circ 30' S$, $45^\circ 30' W$. Esta deficiência nos dados de vento pode prejudicar os resultados das simulações numéricas, contudo, o uso de um

aninhamento em domínio maior e, consequentemente, uma maior coleção de dados para forçarem o modelo, serve para que os efeitos da baixa resolução do dados de ventos sejam amenizados.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam a evolução temporal da velocidade do vento para os meses de agosto de 2009 e janeiro de 2010, respectivamente.

Figura 4.16: *Evolução temporal da intensidade e direção dos ventos para o mês de agosto de 2009 na região.*

Figura 4.17: *Evolução temporal da intensidade e direção dos ventos para o mês de janeiro de 2010 na região.*

4.8.3 Informações de ondas

A simulação de ondas neste domínio foi realizada pelo modelo numérico SWAN (seção 4.2, acoplado no modo duas vias com o ROMS através do MCT, descrito na seção 4.3).

Os contornos abertos do domínio receberam informações de altura significativa, direção e período médio das ondas, a partir dos resultados das simulações do domínio entre o Cabo de São Tomé ao Cabo de Santa Marta.

Os dados tem resolução temporal de 1 hora e resolução espacial de aproximadamente 1400 metros para longitude e latitude, de modo que foram interpolados linearmente para os pontos de grade nas bordas abertas do modelo numérico SWAN.

4.8.4 Dados de correntes e elevação nos contornos abertos

Os dados de velocidade integrada na coluna d'água e elevação do nível do mar obtidos da simulação do domínio entre o Cabo de São Tomé ao Cabo de Santa Marta, foram inseridos no contorno aberto do domínio da região central da Baixada Santista.

Os dados tem resolução temporal de 1 hora e resolução espacial de, aproximadamente, 6000 metros de modo que foram interpolados linearmente para os pontos de grade nas bordas abertas da grade da região central da Baixada Santista.

4.9 Dados de Entrada de Sedimentos

4.9.1 Sedimento de fundo

A caracterização do sedimento quanto às frações de areia e materiais finos (*i.e.* silte (diâmetro de 0,016 mm) e argila (diâmetro de 0,004 mm)) presentes no fundo da região do estuarina e Baía de Santos, foi obtida a partir dos dados de granulometria dos sedimentos de superfície na região, originalmente disponibilizados em IME (2008) e apresentados no Anexo B.

Para os dados sedimentológicos iniciais da plataforma continental adjacente à região da Baixada Santista, foram utilizadas as informações de distribuição de areias, silte e argila, disponíveis em Rodrigues *et al.* (2003).

Devido à baixa quantidade de sedimentos coesivos na região da plataforma continental no domínio simulado, todo o fundo do domínio foi considerado como contendo apenas areia muito fina (diâmetro de 0,088 mm), de acordo com Furtado, Tessler e Eichler (1984) *apud* Rodrigues *et al.* (2003) e apresentado na Figura 3.8.

Utilizando os dados disponíveis em IME (2008) e Rodrigues *et al.* (2003), foi possível construir um mapa de porcentagem de materiais finos e areia muito fina para o domínio simulado.

A Figura 4.18 apresenta os mapas de distribuição de argila, silte e areia muito fina, utilizados nas simulações.

Figura 4.18: Mapas de distribuição de argila (painel superior esquerdo), silte (painel superior direito) e areia muito fina (painel inferior) para a região do domínio simulado.

4.9.2 Sedimento em suspensão

Análogo ao que foi realizado na seção 4.8.1, os valores iniciais de sedimentos em suspensão foram obtidos a partir dos resultados de concentrações de sedimentos na coluna d'água ao final de uma simulação de 1 mês, com aportes de água fluvial dos rios inseridos no modelo.

Isto faz com que o modelo inicie com uma estrutura de concentração de sedimentos na coluna d'água, próximas às encontradas na região.

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 apresentam os valores iniciais nas simulações de concentração de sedimento na superfície e fundo, para argila, silte e areia muito fina, respectivamente.

Figura 4.19: Concentrações de argila (kg m^{-3}) na superfície (painel esquerdo) e no fundo (painel direito).

Figura 4.20: Concentrações de silte (kg m^{-3}) na superfície (painel esquerdo) e no fundo (painel direito).

Figura 4.21: Concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painel esquerdo) e no fundo (painel direito).

4.9.3 Aportes de rios

Os dados de aportes de materiais sólidos na região, também foram computados nas simulações, a partir dos dados de vazão de rios, de acordo com os dados

presentes no Anexo A deste documento, apresentados originalmente em IME (2008).

Devido ao grande número de afluentes na região, foram inseridas 16 fontes de água e sedimentos representativos das vazões somadas desses afluentes. A Figura 4.22 apresenta a localização das fontes de água e sedimento inseridas no modelo.

Figura 4.22: Mapa com os locais de aporte de água e sedimentos (pontos em azul), utilizados como dados de entrada do modelo.

As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 apresentam os valores de concentração de sedimentos, vazão de água fluvial e aporte de sedimentos de cada fonte de água e sedimento inseridas no modelo.

Figura 4.23: Concentrações de sedimentos (kg m^{-3}) em cada fonte de água e sedimentos inseridos no modelo.

Figura 4.24: Vazões médias de água doce ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em cada fonte de água e sedimentos inseridos no modelo.

Figura 4.25: Aportes de sedimentos (kg s^{-1}) em cada fonte de água e sedimentos inseridos no modelo.

4.10 Parâmetros do modelo

Na Tabela 4.10.1, são apresentados os principais parâmetros e constantes utilizados nas simulações numéricas deste trabalho.

Tabela 4.10.1: Parâmetros do modelo

Parâmetro	Valor
Rugosidade do fundo (inicial)	0,02 m
Velocidade decantação da argila	0.0033 mm/s
Velocidade decantação do silte	0.2139 mm/s
Velocidade decantação da areia muito fina	6.8439 mm/s
Taxa de erosão da argila	$5,0 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Taxa de erosão do silte	$5,0 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Taxa de erosão do areia muito fina	$5,0 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
TCE da argila	0.0961 N m^{-2}
TCE do silte	0.1058 N m^{-2}
TCE da areia muito fina	0.1036 N m^{-2}

4.11 Tempo de Simulação

Para as duas regiões apresentadas anteriormente, foram realizadas simulações numéricas, com condições ambientais representativas dos períodos de agosto de 2009 e janeiro de 2010 (*i.e.* 62 dias no total), com o objetivo de se caracterizar o transporte de sedimentos para condições típicas de inverno e verão para a região da Baixada Santista.

4.12 Calibração e Validação Hidrodinâmica

Para o processo de comprovação da representabilidade quantitativa dos resultados do modelo numérico hidrodinâmico em relação às condições reais, foram utilizados dados de correntes na coluna d'água e nível da superfície do mar, obtidos através de um perfilador acústico de correntes Sontek Argonaut XR, instrumentado com sensor de pressão e três transdutores acústicos operando em 750 kHz, na posição 24° 0,757' S 46° 19,579' W, com profundidade de 11 m, aproximadamente, em intervalos de 30 minutos.

As medições de correntes na coluna d'água (segundo as componentes norte-sul, leste-oeste e vertical) foram obtidas em 10 células de 1,0 m, a partir de 0,5 m acima do fundo até 0,5 m abaixo do nível da superfície do mar.

O período disponível para a comparação compreende os dias 08 de janeiro de 2010 às 00 h e 31 de janeiro de 2010 às 23 h. Devido ao local do fundeio estar a cerca de 200 metros de distância do continente, a componente da velocidade u apresentou intensidades muito baixas (*i.e.* próximas à precisão do equipamento) e foi descartada, sendo então comparados os dados de intensidade das correntes para a componente v e os dados de nível da superfície do mar.

O método utilizado para as comparações quantitativas foi o proposto por Willmott (1981), que define:

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{modelo} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{modelo} - \overline{X_{obs}}| + |X_{obs} - \overline{X_{obs}}|)^2} \quad (4.26)$$

onde:

X_{modelo} é o resultado do modelo para a variável a ser comparada.

X_{obs} é o dado observado para a variável a ser comparada.

$\overline{X_{obs}}$ é a média no tempo do dado observado para a variável a ser comparada.

Os valores de *Skill* variam de 0 até 1. Uma concordância perfeita entre os resultados do modelo e os dados observados gera valores de *Skill* iguais a 1 e, quanto mais discordantes os resultados do modelo com os dados observados, menor será o valor do *Skill*.

O *Skill* é um parâmetro estatístico, sem dimensão, e que deve ser avaliado levando em conta o fenômeno a ser estudado, a precisão da coleta dos dados e o tipo

de modelo utilizado. A avaliação do *Skill* ainda é algo subjetivo para validação de modelos hidrodinâmicos costeiros e oceânicos, fazendo com que não exista um valor mínimo de *Skill* que determine se os resultados do modelo numérico representam, de forma satisfatória, as condições reais do domínio simulado.

Analisando diversos trabalhos que contém validação de modelos numéricos hidrodinâmicos, pode-se assumir que, resultados de simulações com *Skill* acima de 0,65 para parâmetros de velocidades de correntes, estão presentes em trabalhos que apresentam o estado da arte das simulações numéricas (Warner, Geyer e Lerczak, 2005; Haidvogel *et al.*, 2008; Gangfeng *et al.*, 2011; Huang, 2011).

5 RESULTADOS

5.1 Validação do Modelo Hidrodinâmico

A Figura 5.1 apresenta os dados observados e os resultados do modelo numérico com os valores de *Skill*, para a evolução temporal da componente v da velocidade em superfície, meio e fundo da coluna d'água e a variação do nível da superfície do mar.

Figura 5.1: Dados observados (linha azul) e resultados do modelo numérico (linha preta) para a componente v da velocidade na superfície, meio e fundo da coluna d'água e nível da superfície do mar, entre os dias 10 e 30 de janeiro de 2010.

O *Skill* obtido para a componente v da velocidade foi de 0,44, 0,70 e 0,65 para superfície, meio e fundo da coluna d'água, respectivamente. O *Skill* obtido para a variação da superfície livre do mar foi de 0,95.

5.2 Maré de Sizígia

Nesta seção, serão apresentados os resultados do modelo numérico para uma situação de maré de sizígia, com ondas e ventos médios presentes na região, ou seja, altura significativa das ondas de aproximadamente 1 metro, e intensidade dos ventos

entre 2 e 6 m/s.

A Figura 5.2 apresenta a evolução do nível da superfície do mar para a região da entrada da Baía de Santos para os dias 18 a 19 de janeiro, onde a maré encontrava-se em período de sizígia, com amplitude de onda de aproximadamente, 1,3 m.

Figura 5.2: *Variação do nível da superfície do mar entre 18 de janeiro de 2010 às 00h e 19 de janeiro de 2010 às 00h.*

A Figura 5.3 apresenta o mapa de altura significativa e direção das ondas incidentes no local para o dia 18 de Janeiro de 2010 às 12 h, representando o padrão de ondas durante o período de 18 e 19 de janeiro de 2010.

No mapa, são apresentados também o instante selecionado (em dia e hora), o nível do mar e a energia cinética específica do momento (E_c) normalizada pelo maior valor de E_c das correntes, durante as simulações de agosto de 2009 e janeiro 2010. O parâmetro (E_c) é qualitativo e está apresentado em todos os mapas de concentrações de sedimentos e informações de ondas apenas para que o leitor possa, mais facilmente, observar o nível de intensidade das correntes no instante apresentado no mapa.

Este mapa indica que a região apresentou um comportamento homogêneo para a área costeira com, aproximadamente, 1,2 m de altura significativa e direção, predominantemente de sul para todo o domínio. É possível observar uma refração mais acentuada nas regiões próximas à linha de costa, onde a direção das ondas e o alinhamento da linha de costa ficam sempre perpendiculares.

Exceção ao padrão de altura significativa de ondas na área costeira é a área entre a Ilha de Santo Amaro (Guarujá) e a Ilha da Moela, e as regiões próximas aos pontões, conforme descrição no Figura 3.2, onde é possível notar uma região de sombra para as ondas, com altura significativa menor que 0,5 m.

A região da Baía de Santos mostrou resultados de altura significativa de

ondas mais heterogêneas sendo possível observar valores iguais aos encontrados na área costeira adjacente, como a região da entrada da Baía, até valores próximos de zero, como a porção oriental mais interior da mesma. Para resultados de direção, nota-se uma forte refração das ondas incidentes, obtendo-se direções desde sul até leste.

Na região das bocas do estuário, é possível notar a presença de ondas, porém com alturas significativas sempre menores que as observadas na área costeira adjacente e na Baía de Santos. A área próxima à boca do canal de São Vicente apresentou a maior altura significativa das ondas incidentes entre todas as saídas do estuário.

Para a região interior do estuário, não existem valores significativos para altura de ondas.

Figura 5.3: Mapa de altura significativa e direção das ondas para o dia 18 de Janeiro de 2010 às 12 h.

As Figuras 5.4 e 5.5, apresentam as concentrações de areia muito fina e materiais finos (*i.e.* silte e argila), respectivamente, na superfície e fundo da coluna d'água, para o período de 18 a 19 de janeiro.

Para os mapas de areia muito fina, a concentração de sedimento de superfície é inexistente na maior parte do tempo e na maior parte do domínio. Apenas em pontões expostos e em regiões de, no máximo, algumas dezenas de metros afastadas da linha de costa, é possível encontrar valores de concentração acima de $0,01 \text{ kg m}^{-3}$.

Valores maiores que $0,5 \text{ kg m}^{-3}$ foram observados na região próxima à desembocadura do canal de Bertioga, porém de forma muito restrita ao local, não sendo observados tais valores em outras regiões do domínio.

Em alguns momentos do período amostrado (*e.g.* dia 16 às 04 h), é possível observar a presença de areia muito fina na superfície, na região da desembocadura do canal de São Vicente.

Para os mapas de concentração de areia muito fina na coluna d'água próxima ao fundo, os valores encontrados foram maiores e, com exceção da região do estuário, presentes em quase todo o período e em quase todo o domínio.

Na região costeira, a concentração de sedimentos aumenta significativamente em direção à linha de costa, onde, em todo o período, apresentou valores de concentração de areia muito fina acima de $0,01 \text{ kg m}^{-3}$, chegando a valores acima de 3 kg m^{-3} .

Na região da Baía de Santos, a sua porção oeste, resultaram maiores concentrações de sedimentos em relação à porção oriental, onde, em alguns momentos de baixa intensidade das correntes, as concentrações de sedimentos são nulas.

Não existem valores significativos de concentração de areia muito fina na coluna d'água, para a região do estuário.

Para os mapas de concentração na coluna d'água de materiais finos, observam-se valores significativos tanto na superfície quanto no fundo, em todo o período de simulação.

Na Baía de Santos - principalmente na borda oeste - nos canais estuarinos e na região a nordeste do domínio, foram registradas as maiores concentrações das frações coesivas dos sedimentos simulados.

Entre os canais estuarinos, o canal de Bertioga e de São Vicente apresentaram as maiores concentrações de sedimentos, chegando a valores de 1 kg m^{-3} , na coluna d'água. Os mapas de concentração do material junto ao fundo indicam haver

uma maior homogeneidade nesta parte da coluna d'água para todo o estuário.

Nos mapas de superfície é possível notar o avanço de uma pluma de sedimentos em direção ao exterior da Baía de Santos, atingindo locais com profundidade de até 20 metros, principalmente no período de vazante, com concentração de $0,05 \text{ kg m}^{-3}$.

Plumas de sedimentos com concentrações mais elevadas do que as observadas na pluma citada acima (*i.e.* concentrações atingindo 1 kg m^{-3}) foram encontradas nas saídas dos canais do Porto de Santos e de São Vicente.

Um importante resultado encontrado é o padrão de dispersão da pluma do canal de São Vicente, que permanece na maior parte do tempo junto à costa, na borda oeste da Baía de Santos, enquanto que a pluma da desembocadura do canal de Santos avança para o centro da Baía, concordante com o esquema de circulação anti-horário das correntes observado no local.

Durante a maior parte do período, as correntes na plataforma simulada apresentaram direções de nordeste para sudoeste (*i.e.* situação típica de tempo bom para a região), resultando na dispersão de parte dos sedimentos finos que foram transportados de fora da Baía de Santos para a região costeira de Praia Grande, chegando a concentrações da ordem de $0,2 \text{ kg m}^{-3}$ nas proximidades da Ponta de Itaipu.

Apesar da maior frequência do transporte em toda a região costeira de nordeste para sudoeste, em alguns instantes, como o do dia 18 às 12 h e do dia 19 às 00 h, nota-se que a pluma de sedimentos que sai da Baía de Santos flui para nordeste, enquanto que a pluma da desembocadura do canal de Bertiooga tem direção para sudoeste.

Este padrão de transporte de sedimentos para sudoeste na desembocadura do canal de Bertiooga foi observado para o sedimento em suspensão na superfície e no fundo.

Figura 5.4: *Evolução das concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010.*

Figura 5.5: *Evolução das concentrações de materiais finos (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010.*

Para apresentar a evolução temporal da estrutura vertical da concentração de sedimentos, seis regiões foram selecionadas, contemplando os diferentes compartimentos presentes no domínio. As regiões são:

- Alto estuário da Baixada Santista
- Área central do canal de Bertioga
- Proximidades da região sul do canal de São Vicente

- Proximidades da região sul do canal de Santos
- Área central da Baía de Santos
- Área costeira de Praia Grande

A Figura 5.6 apresenta a localização das áreas citadas acima.

Figura 5.6: Localização das áreas onde foram extraídas as evoluções temporais das estruturas verticais da concentração de sedimentos.

As Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, apresentam as evoluções temporais das estruturas verticais das concentrações dos sedimentos em suspensão na coluna d'água, assim como as velocidades médias na coluna d'água, para o período de 18 a 19 de janeiro de 2010.

O domínio simulado apresenta correntes predominantemente alinhadas com a linha da costa, devido à sua proximidade com a mesma. Aliado ao grande domínio das marés sobre a hidrodinâmica, fazendo com que as correntes tenham uma direção preferencial com sentidos e opostos, alguns gráficos de velocidades das correntes tiveram as direções das mesmas rotacionadas em 90° na direção oeste, com o objetivo de permitir uma melhor visualização dos resultados.

Os gráficos de correntes em que as direções foram rotacionadas contém a informação **N 90°** próxima ao canto esquerdo.

A região do alto estuário não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água durante todo o período observado.

Os materiais finos apresentaram uma coluna d'água compartimentada com uma camada da superfície até a profundidade de, aproximadamente, 5 m, com concentração de sedimentos entre 0,3 e 0,4 kg m⁻³ e a camada de 5 m de profundidade até o fundo, com uma concentração de sedimentos entre 0,7 e 0,9 kg m⁻³, para todo o período.

A média das correntes na coluna d'água mostrou um comportamento concordante com o nível do mar, com intensidades máximas próximas a 10 cm s⁻¹ e estruturas verticais de concentração de sedimentos, indicando relação com as correntes observadas.

Figura 5.7: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região do alto estuário.*

A região do canal de Bertioga não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água durante todo o período observado.

Os materiais finos apresentaram um padrão de concentração de sedimentos homogêneo na coluna d'água e variando no tempo. As concentrações permaneceram entre 1,2 e 1,6 kg m⁻³, com os maiores valores relacionados com as maiores intensidades das correntes no período.

Figura 5.8: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região central do canal de Bertioga.*

A região da saída do canal de São Vicente não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água, durante todo o período observado.

A estrutura vertical dos materiais finos apresentou concentrações próximas de zero a $3,5 \text{ kg m}^{-3}$, com os maiores valores coincidentes com os períodos de baixamar.

Os materiais finos apresentaram um padrão de concentração de sedimentos homogêneo na coluna d'água, na maior parte do tempo.

Figura 5.9: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região sul do canal de São Vicente.*

A região da saída do canal do Porto de Santos não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água durante todo o período observado.

Para os materiais finos, observa-se um núcleo de concentrações mais baixas na região intermediária da coluna d'água, chegando a concentrações próximas de zero.

Picos de concentração máxima (*i.e.* próximos a $1,2 \text{ kg m}^{-3}$), junto ao fundo, foram observados para os mesmos instantes de máxima intensidade das correntes médias na coluna d'água.

Figura 5.10: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região sul do canal do Porto de Santos.*

Para a região central da Baía de Santos, a areia muito fina apresentou concentrações significativas junto ao fundo, não ultrapassando mais que 2,5 metros de coluna d'água, sempre nesta camada, durante todo o período. As concentrações máximas de areia muito fina para o período simulado foram de, aproximadamente, $0,7 \text{ kg m}^{-3}$.

Os materiais finos apresentaram uma heterogeneidade em suas concentrações, tanto ao longo da coluna d'água quanto ao longo do tempo.

Dois núcleos de concentração máxima foram observados. Um junto ao fundo, com concentração de, aproximadamente, $0,55 \text{ kg m}^{-3}$, durante a baixamar, e o outro núcleo da superfície até a profundidade de 5 metros, com concentração de, aproximadamente, $0,6 \text{ kg m}^{-3}$, também no período de baixamar.

Figura 5.11: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região central da Baía de Santos.*

Para a região costeira de Praia Grande, a areia muito fina foi observada próxima ao fundo, não ultrapassando 1 metro acima do fundo. O valor máximo de concentração do sedimento foi de, aproximadamente, 3 kg m^{-3} .

Apesar da areia muito fina permanecer confinada junto ao fundo, observa-se sua presença, durante todo o período simulado.

Os sedimentos finos apresentaram um padrão bem diferenciado entre a preamar e a baixamar, onde as maiores concentrações (*i.e.* aproximadamente $0,25 \text{ kg m}^{-3}$) foram observadas na preamar e as menores concentrações (*i.e.* aproximadamente $0,1 \text{ kg m}^{-3}$) foram observadas na baixamar.

Figura 5.12: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 18 e 19 de janeiro de 2010, na região costeira de Praia Grande.*

5.3 Maré de Quadratura

Análogo ao que foi apresentado na seção anterior, nesta seção serão exibidos os resultados do modelo numérico para uma situação de maré de quadratura, com ondas e ventos médios presentes na região (*i.e.* altura significativa das ondas de, aproximadamente, 1 m e intensidade dos ventos entre 2 e 6 m/s), com o objetivo de caracterizar o padrão de concentração e transporte de sedimentos na coluna d'água nesta fase da maré.

A Figura 5.13 apresenta a evolução do nível da superfície do mar na região da entrada da Baía de Santos para os dias 11 e 12 de janeiro, onde a maré encontrava-se em período de quadratura, com amplitude de onda de, aproximadamente, 0,40 m.

Figura 5.13: *Variação do nível da superfície do mar entre os dias 11 de Janeiro de 2010 às 00h e 12 de Janeiro de 2010 às 00h.*

A Figura 5.14 apresenta o mapa de altura significativa e direção das ondas incidentes no local para o dia 11 de janeiro de 2010 às 12 h, representando o padrão de ondas durante o período de 11 e 12 de janeiro de 2010.

O padrão de ondas apresentado para a situação de maré de sizígia (seção 5.2) foi o mesmo da condição de quadratura.

Figura 5.14: Mapa de altura significativa e direção das ondas para o dia 11 de Janeiro de 2010 às 12 h.

As Figuras 5.15 e 5.16, apresentam as concentrações de areia muito fina e materiais finos (*i.e.* silte e argila), respectivamente, na superfície e fundo, para o período de 09 e 10 de Janeiro.

Não foi observada a presença de areia muito fina na superfície durante o período.

Para os mapas de concentração de areia muito fina na coluna d'água próximo ao fundo, é possível observar concentrações maiores que $0,05 \text{ kg m}^{-3}$ apenas em locais muito próximos à costa (*i.e.* profundidades menores que 15 metros).

Na maior parte do período, concentrações significativas (*i.e.* acima de $0,01 \text{ kg m}^{-3}$) de areia muito fina, no interior da Baía de Santos, são observadas apenas na região das praias de Santos e São Vicente e na porção oeste da Baía.

Não foi detectada presença de areia muito fina em suspensão na região dos canais do estuário.

Para os materiais finos, as concentrações dos sedimentos foram menores que as observadas para a situação de maré de sizígia (seção 5.2), assim como o alcance

da pluma originária da Baía de Santos e das plumas geradas nas desembocaduras dos canais do estuário.

O sedimento junto à região costeira de Praia Grande e da porção externa do norte da Ilha de Santo Amaro também foi observado, porém em concentrações menores (*i.e.* inferiores a $0,1 \text{ kg m}^{-3}$).

Assim como na situação de maré de sizígia, em alguns mapas de concentração de sedimentos em superfície na quadratura, como o do dia 11 às 08 h, nota-se que a pluma de sedimentos que sai da Baía de Santos flui para nordeste, enquanto que a pluma da desembocadura do canal de Bertioga tem direção sudoeste.

Figura 5.15: Evolução das concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010.

Figura 5.16: *Evolução das concentrações de materiais finos (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e fundo (painéis à direita) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010.*

As Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam as evoluções temporais das estruturas verticais das concentrações dos sedimentos em suspensão na coluna d'água, assim como as velocidades médias na coluna d'água para o período de 11 e 12 de janeiro de 2010.

A região do alto estuário não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água, durante todo o período observado.

Os materiais finos apresentaram uma coluna d'água compartimentada com uma camada da superfície até a profundidade de, aproximadamente, 5 m com concentração de sedimentos entre 0,5 e 0,6 kg m^{-3} e uma camada de 5 m de profundidade até o fundo, com uma concentração de sedimentos entre 0,7 e 0,9 kg m^{-3} para todo o período simulado.

As médias das correntes na coluna d'água tiveram um comportamento concordante com o nível do mar, com intensidades máximas próximas a 4 cm s^{-1} , e as estruturas verticais de concentração de sedimentos, não indicaram relação com as correntes observadas.

Figura 5.17: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região do alto estuário.*

A região do canal de Bertioga não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água durante todo o período observado.

Os materiais finos apresentaram um padrão de concentração de sedimentos homogêneo na coluna d'água e variando no tempo. As concentrações permaneceram entre 0,8 e 0,9 kg m⁻³, com os maiores valores relacionados com as maiores intensidades das correntes.

As intensidades das correntes médias na coluna d'água não ultrapassaram 4 cm s⁻¹.

Figura 5.18: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região central do canal de Bertioga.*

A região da saída do canal de São Vicente não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água durante todo o período observado.

As estruturas verticais dos materiais finos apresentaram concentrações próximas de zero a até $3,5 \text{ kg m}^{-3}$, com os maiores valores coincidentes com os períodos de baixamar.

As maiores concentrações de sedimentos foram observadas na parcela mais superficial da coluna d'água, com exceção do dia 11 às 12 h, onde um núcleo de maior concentração de sedimentos foi observado próximo ao fundo.

Figura 5.19: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região da saída do canal de São Vicente.*

A região da saída do canal do Porto de Santos não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água, durante todo o período observado.

Para os materiais finos, é possível observar uma estratificação na coluna d'água quanto à concentração de sedimentos, onde valores mais altos (*i.e.* entre 0,5 e 0,6 kg m⁻³) são observados apenas na metade superior da coluna d'água e, na metade inferior da coluna d'água, as concentrações não ultrapassaram o valor de 0,2 kg m⁻³.

Figura 5.20: Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região da saída do canal do Porto de Santos.

Para a região central da Baía de Santos, a areia muito fina apresentou concentrações significativas junto ao fundo, não ultrapassando mais que 1,5 metro de coluna d'água, com uma diminuição significativa nas quatro horas finais do período considerado.

As concentrações máximas de areia muito fina para o período foram de, aproximadamente, $0,35 \text{ kg m}^{-3}$.

Os materiais finos apresentaram maiores concentrações na região próxima ao fundo, com valores máximos de, aproximadamente, $0,6 \text{ kg m}^{-3}$. Durante todo o período, este padrão de distribuição de sedimentos finos na coluna d'água foi mantido.

Figura 5.21: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região central da Baía de Santos.*

Igualmente ao obtido no período de sizígia para a região costeira de Praia Grande, a areia muito fina foi observada próximo ao fundo, não ultrapassando 1 metro acima do fundo. O valor máximo de concentração do sedimento foi de, aproximadamente, 2 kg m^{-3} .

Apesar da areia muito fina permanecer confinada junto ao fundo, observa-se sua presença nesta parcela da coluna d'água durante todo o período apresentado.

Os sedimentos finos apresentaram um gradiente de concentrações em direção ao fundo, com uma tendência de diminuição das concentrações entre o início e o fim do período.

Figura 5.22: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2010, na região costeira de Praia Grande.*

5.4 Passagem de Frente Fria

Nesta seção, serão exibidos os resultados do modelo numérico para o período do dia 10 às 16 h ao dia 13 às 16 h, em agosto de 2009, onde ocorreu a passagem de uma frente fria na região, conforme mostra a Figura 3.14.

A Figura 5.23 apresenta a concentração de areia muito fina na superfície e no fundo, a altura significativa e a direção das ondas incidentes na região, para o período de 10 às 16 h a 13 às 16 h de agosto de 2009, enquanto que a Figura 5.24 apresenta a concentração de materiais finos (*i.e.* silte e argila), na superfície e fundo, para o mesmo período.

Observando a intensidade e direção das correntes, bem como os índices de energia cinética durante o período, pode-se notar que no dia 11 de agosto de 2009, à 0 h, foram registradas as maiores intensidades das correntes entre os resultados das simulações deste trabalho.

A região do alto estuário não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água, durante todo o período observado.

Para os mapas de areia muito fina em suspensão na superfície, foi observado um pico nos valores de concentração para o dia 11 à 0 h e para o dia 13 de agosto da 0 h até às 16 h.

Para os mapas de areia muito fina em suspensão próximo ao fundo, igualmente ao observado nos mapas de superfície, ocorreu um aumento significativo nos valores de concentração em todo o domínio (exceção ao interior do estuário), em relação aos resultados para condições de sizígia e quadratura, principalmente para o dia 11 à 0 h e o dia 13 de agosto da 0 h até às 16 h, instantes onde observaram-se as maiores intensidades de correntes e alturas de ondas incidentes.

Na região da Baía de Santos, a porção leste apresentou as menores quantidades de areia muito fina em suspensão e os menores valores de altura significativa de ondas.

Os mapas de ondas apresentaram valores de altura significativa, na porção da plataforma continental simulada, no intervalo entre 1 e 3 m, com os maiores picos no dia 11 à 0 h e o dia 13 de agosto de 0 h até às 16 h.

É possível observar regiões de sombras gerada pela Ilha da Moela e pelos pontões presentes no domínio onde, mesmo em situações de ondas incidentes com

altura significativa entre 2,5 e 3 m, as áreas de sombra apresentam ondas sempre menores que 0,5 m.

Os materiais finos também apresentaram um aumento significativo em suas concentrações durante o período de simulação de frente fria.

As plumas de materiais em suspensão próximas à Baía de Santos sofreram um intenso transporte na direção nordeste durante a passagem da frente fria, atingindo valores de até $0,05 \text{ kg m}^{-3}$ na porção leste da Ilha de Santo Amaro.

A partir do dia 13 de agosto à 0 h (*i.e.* após a passagem da frente fria), fortes correntes de nordeste para sudoeste foram observadas na região, transportando os sedimentos finos da saída da Baía de Santos e da desembocadura do canal de Bertiooga para sudoeste.

A região interior da Baía de Santos apresentou concentrações entre 0,1 e 3 kg m^{-3} na superfície e nas proximidades do fundo, com os maiores valores frequentemente observados na porção mais interior da Baía.

Figura 5.23: Concentrações de areia muito fina (kg m^{-3}) na superfície (painéis à esquerda) e no fundo (painéis à direita) e altura significativa e direção das ondas (painel inferior) entre os dias 10 e 13 de agosto de 2010.

Figura 5.24: Concentrações de materiais finos (kg m^{-3}) na superfície (painéis esquerdos) e fundo (painéis direitos) entre os dias 10 e 13 de agosto de 2010.

As Figuras 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam as evoluções temporais das estruturas verticais da concentração dos sedimentos em suspensão na coluna d'água, assim como as velocidades médias na coluna d'água, para o período do dia 10 às 16 h ao dia 13 às 16 h, em agosto de 2009.

A região do alto estuário não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água durante todo o período observado.

Os materiais finos apresentaram um pico de concentração de sedimentos entre o final do dia 10 e o início do dia 11 de agosto, chegando a, aproximadamente, $1,5 \text{ kg m}^{-3}$ próximo ao fundo.

No restante do período, ocorreu uma diminuição na concentração de sedimentos finos em função do tempo e a presença de uma coluna d'água com concentração de sedimentos estratificada, apresentando valores em torno de 1 kg m^{-3} próximo ao fundo e $0,5 \text{ kg m}^{-3}$ nas camadas mais superficiais.

As médias das correntes na coluna d'água mostraram um comportamento concordante do nível do mar, com intensidades máximas próximas a 10 cm s^{-1} .

Figura 5.25: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região do alto estuário.*

A região do canal de Bertioga não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água durante todo o período observado.

Assim como observado na região do alto estuário, os materiais finos apresentaram um pico de concentração de sedimentos entre o final do dia 10 e o início do dia 11 de agosto, onde foram encontrados valores próximos a 4 kg m^{-3} . A concentração dos sedimentos decaiu gradativamente em função do tempo.

As intensidades das correntes médias na coluna d'água chegaram a quase 10 cm s^{-1} no período, com o pico de intensidade coincidindo com o pico de concentração de sedimentos finos na coluna d'água.

Figura 5.26: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região central do canal de Bertioga.*

A região da saída do canal de São Vicente não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água, durante todo o período observado.

As estruturas verticais dos materiais finos apresentaram concentrações próximas de zero a $3,5 \text{ kg m}^{-3}$, com os maiores valores coincidentes com os períodos de baixamar.

Para os sedimentos finos, alguns picos isolados de concentração são observados junto ao fundo, atingindo valores de, aproximadamente, 3 kg m^{-3} , porém, de uma forma geral, a região apresentou um padrão de maiores concentrações de sedimentos na coluna d'água durante as marés vazantes, com concentrações médias próximas de 0 na maré enchente e, aproximadamente, 1 kg m^{-3} na maré vazante.

Figura 5.27: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região da saída do canal de São Vicente.*

A região da saída do canal do Porto de Santos não apresentou concentrações significativas de sedimento do tipo areia muito fina na coluna d'água, durante todo o período observado.

Para os materiais finos, são observados alguns picos de concentração junto ao fundo, chegando a valores próximos a $1,4 \text{ kg m}^{-3}$. Núcleos de alta concentração de sedimentos finos também são observados na superfície, principalmente durante os períodos de maré vazante.

Figura 5.28: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região da saída do canal do Porto de Santos.*

Para a região central da Baía de Santos, a areia muito fina apresentou concentrações significativas junto ao fundo, entre o final do dia 10 e o início do dia 11 e do final do dia 12 até o dia 13 às 16 h, chegando a valores de concentração próximos a 2 kg m^{-3} . A faixa de presença de areia muito fina na coluna d'água atingiu altura de até 2,5 metros acima do fundo.

Os materiais finos apresentaram maiores concentrações (*i.e.* aproximadamente $0,5 \text{ kg m}^{-3}$) nos períodos de maré vazante, decaindo ao longo do tempo.

Figura 5.29: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região central da Baía de Santos.*

Para a região costeira de Praia Grande, a areia muito fina foi observada próximo ao fundo, atingindo quase dois metros acima do fundo. O valor máximo de concentração do sedimento foi de, aproximadamente, 7 kg m^{-3} .

Dois picos de concentração do sedimento foram observados, sendo um no período do final do dia 10 ao início do dia 11 e outro do início do dia 13 até às 16 h. Estes picos coincidem com a passagem da frente fria na região (primeiro pico) e a incidência de ondas com altura significativa maiores que 2 metros (segundo pico).

Assim como observou-se nas concentrações de areia muito fina, os sedimentos finos apresentaram dois picos bem destacados de máxima concentração do material na coluna d'água, durante os mesmos períodos citados acima. O gradiente de concentração foi da superfície para o fundo.

Figura 5.30: *Evolução temporal da estrutura vertical da concentração de areia muito fina (painel superior), materiais finos (painel médio) e intensidade e direção das correntes (painel inferior) entre o dia 10 às 16 h e o dia 13 de agosto de 2009 às 16 h, na região costeira de Praia Grande.*

5.5 Transporte por carga de fundo (*Bedload*)

Nesta seção, serão apresentados os resultados do transporte de sedimentos do fundo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) na região costeira de Praia Grande, apresentada na Figura 5.6, para os meses de agosto de 2009 e janeiro de 2010.

A Figura 5.31 apresenta o transporte de sedimentos do fundo, a altura significativa e direção das ondas incidentes e as correntes de fundo na região costeira de Praia Grande, entre os dias 02 e 30 de agosto de 2009, representando as condições típicas de inverno para a região.

No início do dia 11, período onde ocorreu a passagem de uma frente fria, observou-se o maior pico de transporte de sedimentos do fundo (*i.e.* cerca de $4 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de todo o período de simulação, com direção nordeste.

O maior pico observado para a direção sudoeste ocorreu entre o final do dia 12 e início do dia 13, período onde ocorreram as maiores alturas significativas de ondas para o local, nas simulações realizadas neste trabalho (*i.e.* cerca de 2,2 metros).

A Figura 5.32 apresenta o transporte de sedimentos do fundo, a altura significativa e direção das ondas incidentes e as correntes de fundo, na região costeira de Praia Grande, entre os dias 02 e 30 de janeiro de 2010, representando as condições típicas de verão para a região.

Os resultados do transporte de sedimentos do fundo, para janeiro, apresentaram valores menores em relação aos observados para o mês de agosto.

Os dois maiores picos observados coincidem com as maiores combinações de altura significativa de ondas e velocidade das correntes.

Com exceção de um pequeno pico de intensidade de transporte do sedimento do fundo para nordeste no dia 06, em todos os instantes onde ocorreu transporte de sedimentos para esta direção, os valores encontrados foram próximos de zero.

Assim como ocorreu no mês de agosto de 2009, na maior parte do tempo, o transporte no local teve direção sudoeste.

Figura 5.31: *Evolução temporal do transporte de sedimentos do fundo, da altura significativa e da direção das ondas incidentes e das correntes de fundo na região costeira de Praia Grande, entre os dias 02 e 30 de agosto de 2009. Por motivos de visualização, a direção dos vetores de velocidade foram rotacionadas em 90° para oeste.*

Figura 5.32: *Evolução temporal do transporte de sedimentos do fundo, da altura significativa e da direção das ondas incidentes e das correntes de fundo na região costeira de Praia Grande, entre os dias 02 e 30 de janeiro de 2010. Por motivos de visualização, a direção dos vetores de velocidade foram rotacionadas em 90° para oeste.*

A Figura 5.33 apresenta os valores acumulados do transporte do sedimento por carga de fundo para as direções nordeste e sudoeste, durante os meses de agosto de 2009 e janeiro de 2010, na região costeira de Praia Grande.

Os resultados mostram que, durante o mês de agosto de 2009, o transporte por carga de fundo acumulado apresentou um valor duas vezes acima do observado para o mês de janeiro.

O transporte para sudoeste foi maior que para a direção nordeste em ambos os meses, apresentando intensidades cerca de cinco vezes maior para o mês de agosto de 2009 e onze vezes maior para o mês de janeiro de 2010.

Figura 5.33: *Transportes por carga de fundo para nordeste e sudoeste em agosto de 2009 e janeiro de 2010, na região costeira de Praia Grande.*

5.6 Taxa de Sedimentação no Alto do Estuário

Nesta seção, serão apresentados resultados da taxa de sedimentação em quatro diferentes locais na região do alto estuário da Baixada Santista (Figura 5.34) para o período referente à simulação de janeiro de 2010. Os resultados de taxa de sedimentação nestes mesmos locais para o mês de agosto, foram muito próximos dos resultados encontrados para o mês de janeiro e, portanto, não serão apresentados.

Figura 5.34: Localização e identificação dos pontos de onde foram extraídos os valores de taxa de sedimentação na região do alto estuário.

Os locais escolhidos foram os mesmos onde valores de taxa de sedimentação foram obtidos nos trabalhos de Fukumoto (2007) e Martins *et al.* (2010), permitindo então uma comparação entre os dados disponíveis na literatura e os resultados das simulações no presente trabalho.

A Figura 5.35 apresenta a evolução da elevação da camada de fundo nos pontos P1, P2, P3 e P4 e a tabela 5.6.1 apresenta os resultados das taxas de sedimentação anuais, calculadas pelo modelo numérico, bem como os valores obtidos na literatura para os locais apresentados.

Figura 5.35: Séries temporais da elevação da camada de fundo nos pontos $P1$, $P2$, $P3$ e $P4$, para o mês de Janeiro de 2009.

Tabela 5.6.1: Taxas de sedimentação nos pontos selecionados, na região do alto estuário da Baixada Santista.

Local	Taxa de sedimentação (cm ano ⁻¹)		
	Modelo Numérico	Fukumoto 2007	Martins <i>et al</i> 2010
P1	1,98	1,34 ± 0,13	-
P2	1,34	-	1,47 ± 0,13
P3	1,61	1,58 ± 0,15	1,24 ± 0,13
P4	3,19	-	0,47 ± 0,04

6 DISCUSSÕES

6.1 Validação do Modelo Hidrodinâmico

Os valores de *Skill* calculados foram satisfatórios e mostram que o modelo numérico reproduz de forma razoável os padrões hidrodinâmicos observados, mesmo em uma região muito próxima a contornos terrestres.

Para períodos de maré de sizígia, os resultados do modelo foram os mais concordantes com os dados de correntes e nível do mar. O resultado oposto foi encontrado em períodos de maré de quadratura, onde estes apresentaram maiores discordâncias com os dados obtidos para a região. Esta diferença de eficiência do modelo entre os períodos de marés de sizígia e quadratura, se deve à amplitude das correntes e da variação do nível do mar entre as duas fases de maré.

Em marés de quadratura, a amplitude do nível do mar é duas a três vezes menor que a encontrada em maré de sizígia para a região. Isso faz com que processos de menor amplitude no local e de mais difícil previsão, tenham, proporcionalmente, mais influência nas correntes e na variação do nível do mar em marés de quadratura, do que em marés de sizígia.

Apesar da menor eficiência do modelo numérico para maré de quadratura, os valores de *Skill* foram razoáveis para o período.

Uma exceção pode ser feita para o *Skill* de 0,44, obtido para a componente v em superfície. O provável motivo do valor mais baixo, se deve aos ventos locais influenciados pelo efeito das encostas próximas à região de fundeio do ADCP, alterando localmente as correntes mais superficiais. O modelo numérico não pode calcular o efeito gerado por esses ventos, pois os mesmos são muito localizados e não são resolvidos pelo modelo atmosférico global.

6.2 Transporte de Sedimentos em Suspensão

O padrão de distribuição de areia muito fina em suspensão na coluna d'água apresentou os maiores valores de concentração, nas regiões próximas ao fundo da área central da Baía de Santos e da plataforma continental adjacente.

Isto se deve a dois principais fatores:

- 1) Nas regiões citadas acima, a presença simultânea de correntes e ondas permitiu que a tensão de cisalhamento no fundo fosse superior à tensão crítica de cisalhamento para erosão da areia muito fina, disponibilizando-a na coluna d'água e
- 2) A falta de competência do fluxo em manter o sedimento em suspensão nas regiões mais superficiais da coluna d'água, fazendo com que a presença de areia muito fina ocorresse apenas nas camadas da coluna d'água mais próximas ao fundo.

De uma forma geral, a areia muito fina apresentou valores de concentração na seguinte ordem crescente: situação de maré de quadratura, situação de maré de sizígia e situação de passagem de frente fria, concordando com o nível de energia no sistema para tais situações.

Tanto a plataforma continental quanto a Baía de Santos apresentaram um amplo intervalo de concentração de areia muito fina em suspensão, de 0 a 7 kg m⁻³, que está intimamente relacionado com as condições hidrodinâmicas e de ondas incidentes na região que, por sua vez, principalmente na plataforma simulada, são influenciadas, predominantemente, por eventos atmosféricos atuantes localmente (no caso das correntes) e no oceano adjacente (no caso das ondas).

Este resultado é corroborado pelo trabalho de Tessler (1988) que constatou que a dinâmica de transporte de sedimentos na região está ligada aos processos de circulação atmosférica, como a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que, segundo os resultados do modelo, geram correntes de NE para SW e os sistemas meteorológicos frontais, que geram correntes de SW para NE.

O ângulo de incidência das ondas na plataforma que adentram o interior da Baía de Santos fez com que, durante todo o período simulado, a porção ocidental da Baía, apresentasse exposição a ondas de maior altura significativa e, portanto, maior energia.

Isso justifica o padrão de maior presença de areia muito fina na coluna d'água na porção oeste da Baía de Santos em relação à sua porção leste.

Trabalhos de Ponçano e Fúlfaro (1976), Fúlfaro e Ponçano (1976) e Sondotécnica (1977) também evidenciaram uma diferenciação da Baía de Santos entre porção oriental e ocidental, onde a primeira porção foi definida como influenciada pelo mar aberto e a segunda porção, pelo canal do porto.

Quanto à região do interior do estuário, em nenhuma simulação das reali-

zadas neste trabalho foi observada a presença de areia muito fina na coluna d'água.

Este padrão mostra que o estuário não tem competência para transportar areias em suspensão para fora do mesmo, devido à sua característica de baixa energia hidrodinâmica e abrigo integral das ondas.

Apesar desta característica para o interior do estuário, analisando as figuras de areia muito fina em superfície e próximo ao fundo, é possível observar a presença significativa de areia muito fina nas desembocaduras dos canais de Santos, São Vicente e Bertioga, indicando haver um transporte efetivo de areia muito fina nas direções de entrada e saída destes canais, porém estas concentrações atingem apenas algumas dezenas de metros em direção ao interior do estuário.

Uma configuração muito mais complexa no padrão de transporte de materiais finos em suspensão ocorre no domínio.

Isto se deve ao fato destes sedimentos serem mantidos mais facilmente em suspensão na coluna d'água, ficando então sujeitos por um maior período às diferentes intensidades e direções das correntes na coluna d'água, e à estratificação da densidade da mesma.

O padrão mais evidente do transporte de sedimentos finos em suspensão no domínio é a exportação destes materiais da desembocadura da Baía de Santos para a plataforma adjacente.

Este expressivo transporte de sedimentos da Baía de Santos foi mencionado por Tessler (2001), que elencou o compartimento como um dos principais elementos de exportação de sedimentos terrígenos em suspensão (lamas e matéria orgânica), na região centro/sul do litoral de São Paulo. Além da Baía de Santos, também foram mencionados Baía de Paranaguá, Sistema Cananéia-Iguape (Ararapira, Cananéia e Icapara), foz dos rios Ribeira de Iguape e Itanhaém, além das pequenas drenagens originárias dos contrafortes da Serra do Mar.

A pluma de sedimentos finos na superfície atinge cerca de 10 km de distância da saída da Baía, com concentração de $0,05 \text{ kg m}^{-3}$.

Como os materiais finos em suspensão tem o comportamento aproximado de um traçador inerte na coluna d'água, a pluma de sedimentos segue o padrão da hidrodinâmica da plataforma adjacente, portanto, a mesma é advectada para sudoeste a maior parte do tempo e, em situações de incidência de ventos vindos de

sul-sudoeste (*i.e.* comportamento típico de passagem de frente fria na região), a pluma é advectada para nordeste.

A região costeira da Praia Grande recebe uma importante parte dos sedimentos finos exportados da Baía de Santos, que permanecem suspensos na região devido à presença das ondas e correntes, competentes para mantê-los na coluna d'água.

Apesar do fluxo de sedimentos finos para a região costeira de Praia Grande ocorrer na maior parte do tempo, valores de concentração acima de $0,05 \text{ kg m}^{-3}$ são observados apenas nas regiões muito próximas à costa, indicando que o sedimento se dispersa por toda linha de costa, sendo gradativamente transportado em menores quantidades para o oceano aberto.

Este padrão de dispersão dos sedimentos em suspensão confinado à costa, obtido nos resultados das simulações, pode ser observado também nas imagens de satélite que realçam o material em suspensão na coluna d'água (Figura 3.7), corroborando os resultados obtidos pelas simulações.

A pluma de sedimentos finos gerada pela desembocadura do canal de Bertoga também foi observada nos resultados das simulações, porém, o alcance da mesma é mais limitado em relação à pluma da Baía de Santos. O provável motivo do maior confinamento, é a orientação da desembocadura deste canal, que segue a linha de costa local e, com isso, acarreta um padrão de transporte de sedimentos já no sentido do transporte litorâneo, na maior parte do tempo.

Os resultados da evolução temporal da estrutura vertical da concentração de materiais finos nas região sul do canal de São Vicente e do Porto de Santos mostraram que existe um aumento da concentração de sedimentos durante o período de maré vazante, indicando que a exportação dos sedimentos do estuário para a Baía de Santos ocorre em forma de pulsos, determinado pela variação do nível do mar.

Os primeiros trabalhos que fizeram um levantamento sobre comportamento dos sedimentos no estuário, como a pesquisa realizada por EPUSP-DAEE (1966), já tinham observado o transporte dos sedimentos concordante com a ação das marés.

Este padrão também foi observado nos mapas de sedimentos finos em superfície onde, em instantes de maré vazante, é possível notar o avanço das plumas dos canais. Durante as vazantes de sizígia, este fenômeno é intensificado devido ao

aumento do fluxo no local.

Vale ressaltar que, devido ao padrão de circulação anti-horário na Baía de Santos, a pluma do canal do Porto de Santos avança para o centro da Baía, enquanto que a pluma do canal de São Vicente permanece a maior parte do tempo junto à borda oeste da Baía, concordando novamente com os trabalhos de Ponçano e Fúlfaro (1976), Fúlfaro e Ponçano (1976) e Sondotécnica (1977) sobre a influência da porção leste da Baía pelo canal do porto.

6.3 Transporte por Carga de Fundo

O transporte por carga de fundo na região costeira de Praia Grande mostrou que o fluxo de sedimentos costeiros do fundo tem direção predominante para sudoeste, porém, o pico do fluxo foi observado durante o período de passagem de uma frente fria, que ocasionou o transporte para nordeste.

Apesar da passagem de um sistema frontal na região ser um evento que promova a transferência de uma grande quantidade de energia da atmosfera para o oceano, seu efeito é curto, fazendo com que o transporte de sedimentos para nordeste seja menor, tanto para o mês de agosto quanto para o mês de janeiro.

Além disso, a passagem da frente fria mais intensa que ocorreu durante o mês de agosto, e provocou um pico de transporte, acarretou ondas com altura significativa acima de dois metros cerca de 1,5 dia após sua passagem.

Este fenômeno, comumente chamado de “ressaca”, ocorreu quando os ventos já sopravam de nordeste, fazendo com que, imediatamente após a passagem do sistema frontal, houvesse um pico de transporte de sedimentos por carga de fundo para sudoeste, compensando o efeito da passagem da frente fria no fluxo para nordeste dos sedimentos litorâneos.

6.4 Taxa de Sedimentação

A taxa de sedimentação no alto do estuário da Baixada Santista apresentou valores muito baixos (*i.e.* da ordem de 1 cm ano^{-1}), indicando que a região está em forte equilíbrio morfodinâmico, onde as profundidades dos canais não apresentam alterações significativas.

Este equilíbrio já havia sido indicado no trabalho de Fúlfaro e Ponçano (1976), que descreveram a região como equilibrada no que se refere à sedimentação, onde taxas elevadas ocorrem apenas localmente.

Alguns trabalhos, como os realizados por Fúlfaro e Ponçano (1976) e EPUSP-DAEE (1966), sugerem que os mangues presentes na região do alto estuário santista atuam como um filtro de material sólido, aumentando ainda mais o processo de retenção de sedimentos nesta região, mais no interior do estuário.

O modelo numérico não leva em conta a deposição de sedimentos nos manguezais, e não contabiliza o papel filtrante do mangue, conforme sugerem os autores citados. No entanto, esta limitação tem um efeito localizado, não trazendo alterações significativas nas demais áreas simuladas.

As comparações dos resultados da taxa de sedimentação no alto estuário com os dados obtidos na literatura para os mesmos locais, mostram que o modelo consegue representar de forma realística o padrão de sedimentação da região. Os resultados do modelo tiveram a mesma ordem de grandeza dos dados da literatura, como mostra a Tabela 5.6.1.

Uma exceção ocorre no ponto P4, apresentado na Figura 5.34, onde o modelo não conseguiu representar de forma correta a taxa de sedimentação do local. Possivelmente, o erro deve-se ao fato da resolução espacial da grade do modelo em torno de 100 metros (*i.e.* aproximadamente a largura do canal de São Vicente naquela região), atenuar as correntes do local, produzindo uma zona de acúmulo de sedimentos mais intensa que a realidade.

Para que a taxa de sedimentação no local seja melhor representada pelas simulações, é necessário um refinamento da grade para, pelo menos, 50 metros de espaçamento.

6.5 Limitações das Simulações Numéricas

As principais limitações nas simulações realizadas neste trabalho se devem à qualidade dos dados de entrada, principalmente no campo de ventos, campo de massa e características do sedimento de fundo (quanto ao tamanho dos grãos e porcentagem das frações).

Como apresentado anteriormente, os dados de velocidade dos ventos em

superfície disponíveis para a região são insuficientes para que seja representado o efeito da orografia no vento local. Estações de coleta de dados meteorológicos, e até mesmo o uso de um modelo atmosférico acoplado ao modelo numérico ROMS, podem amenizar tal limitação.

Os dados de temperatura e salinidade fornecidos pelo WOA09 não oferecem resolução suficiente para que o campo de massa do domínio seja corretamente inicializado, acarretando erros nos movimentos gerados pelo gradiente de densidade e na estratificação da coluna d'água.

A estratégia utilizada neste trabalho de simular o domínio por alguns dias com o aporte de água doce dos tributários da região e inicializar os campos de temperatura e salinidade a partir dos resultados finais desta rodada, é eficiente para suprimir a deficiência da falta de dados para inicializar o modelo, porém, ainda assim, é fundamental o uso de uma coleção de dados de temperatura e salinidade, com alta resolução espacial e temporal especificamente da região.

Um exemplo crítico desta limitação é o transporte de materiais finos da área costeira para o oceano, devido ao padrão de avanço e retrocesso da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), proposto por Mahiques, Tessler e Furtado (1998). Segundo esses autores, na região próxima à Ilha de São Sebastião, durante o verão, os ventos dominantes, de direção NW, favorecem o deslocamento da Água Costeira (AC) para áreas mais externas da plataforma continental e, conseqüentemente, a penetração, em subsuperfície da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), para áreas mais rasas, causando o transporte de material terrígeno, em suspensão, para áreas mais profundas da plataforma continental.

O trabalho de Tessler (2001) informa que este padrão ainda não foi comprovado para a plataforma centro sul paulista, porém, já existem fortes indícios da sua efetividade, também para esta área.

As simulações numéricas realizadas neste trabalho não conseguem reproduzir tal fenômeno, devido à limitação do campo inicial de massa.

A escassez de dados no mapa granulométrico de fundo, especialmente na plataforma, é outra importante limitação das simulações realizadas.

A região da plataforma costeira foi considerada como contendo apenas areia muito fina depositada no fundo, porém sub-regiões do domínio sujeitas a maior ou

menor energia das ondas e correntes, apresentam deposição de frações mais grossas (no caso de ambiente com maior energia) ou frações mais finas (no caso de ambiente menos energético). Isso provoca uma forte limitação no padrão de transporte nessas regiões, já que os sedimentos presentes nelas não são corretamente representados pelo modelo.

Outras limitações encontradas são as seguintes:

- Relativamente baixa resolução horizontal da grade do modelo numérico;
- Incapacidade do modelo numérico representar a dinâmica dos sedimentos coesivos como floculação e consolidação e
- Incapacidade do modelo numérico representar a interação entre sedimentos coesivos e areias.

7 CONCLUSÕES

O trabalho realizado conduziu às seguintes conclusões:

- O modelo numérico hidrodinâmico utilizado simulou de forma satisfatória a hidrodinâmica da área de estudo.
- A hidrodinâmica do estuário da Baixada Santista não tem competência para transportar areias em suspensão para fora do mesmo.
- A pluma do canal do Porto de Santos avança para o centro da Baía, enquanto que a pluma do canal de São Vicente permanece a maior parte do tempo junto à borda oeste da Baía, concordando com o padrão de circulação anti horário da baía.
- A região costeira da Praia Grande recebe uma importante parte dos sedimentos finos exportados da Baía de Santos, que permanecem suspensos na região devido à presença das ondas e correntes, competentes para mantê-los na coluna d'água.
- O transporte de sedimentos por carga de fundo é predominantemente para sudoeste na região costeira de Praia Grande, de coordenadas $24^{\circ} 2' 29,4''$ S e $46^{\circ} 29' 26,52''$ W.
- A taxa de sedimentação no alto do estuário da Baixada Santista, segundo o resultado do modelo numérico, é da ordem de 1 cm ano^{-1} , concordando com os dados disponíveis na literatura para o local.
- Limitações do modelo em reproduzir a dinâmica de sedimentos coesivos, como consolidação e floculação, aparentemente não limitaram a simulação do transporte de sedimentos na região.
- Apesar do sucesso na reprodução dos padrões de transporte de sedimentos da área de estudo, refinamentos, principalmente nos campos iniciais de distribuição dos sedimentos, massa e forçante dos ventos, são necessários para que a dinâmica sedimentar do local seja representada de forma mais detalhada pelas simulações numéricas.

- Além disso, para que seja realizada uma validação mais aprofundada da capacidade do modelo em reproduzir os padrões observados do transporte de sedimentos, é fundamental a realização de campanhas de coletas de dados em campo, para que os resultados dos modelo numéricos numéricos utilizados neste trabalho sejam melhor comparados.

Referências

- AB'SABER, A. N.; BERNARDES, N. **O vale do paraíba, serra da mantiqueira e arredores de são paulo**. In: . [S.l.]: Conselho Nacional de Geografia., 1958.
- ALFREDINI, P. ***O clima de agitação ondulatória na Baía de São Vicente (SP)***. São Paulo, Brasil, 2003.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. ***In: Instituto Geográfico e Geológico. Geologia do Estado de São Paulo. Boletim IGG***, v. 41, p. 167–263, 1964.
- ALVEIRINHO, D. J. M. ***Dinâmica sedimentar e evolução recente da plataforma continental portuguesa setentrional***. Tese (Doutorado) — Univ. Lisboa, 1987.
- AMANTE, C.; EAKINS, B. W. ***ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis***. 2009. 19 p.
- ANTONOV, J. I.; LOCARNINI, R. A.; MISHONOV, A. V.; BOYER, T. P.; GARCIA, H. E.; BARANOVA, O. K.; ZWENG, M. M.; JOHNSON, D. R. ***World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Salinity. S. Levitus***. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010. 184 p.
- ARAUJO, R. N.; ALFREDINI, P. O cálculo do transporte de sedimentos litorâneo: Estudo de caso das praias de suarão e cibratel (município de itanhaém, são paulo). ***Rev. Bras. Rec. Hidr.***, v. 6, n. 2, 2001.
- ARIATHURAI, C. R.; ARULANANDAN, K. Erosion rates of cohesive soils. ***Journal of Hydraulics Division***, v. 104, n. 2, p. 279–282, 1978.
- BOMTEMPO, V. L. ***Características hidráulicas e sedimentológicas de trecho do litoral sul do Estado de São Paulo***. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.
- BOOJI, N.; HAAGSMA, I. J. G.; HOLTHUIJSEN, L. H.; KIEFTENBURG, A. T. M. M.; RIS, R. C.; WESTHUYSEN, A. J. van der; ZIJLEMA, M. ***SWAN USER MANUAL Cycle III version 40.85***. P.O. Box 5048 2600 GA Delft The Netherlands, 2011.

BOSQUILHA, G. *Estudo da distribuição de surfactantes aniônicos e de polifosfatos no sistema estuarino de Santos/são vicente e baía de Santos (são paulo, brasil) e avaliação das metodologias aplicadas*. Dissertação de Mestrado — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil., 2002.

BRINK, K.; ROBINSON, A. R. *The Sea, Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

CASTRO, B. M. *Subtidal response to wind forcing in the south Brazil bight during winter*. Tese (Doutorado) — University of Miami., Coral Gables, Florida., 1985.

CASTRO, B. M.; MIRANDA, L. B.; MYAO, S. Y. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais em média escala. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, São Paulo, SP, p. 35(2):135–151, 1987.

CETESB. *Sistema Estuarino de Santos e São Vicente*. [S.l.], 2001.

CETESB. *Relatório de qualidade das águas litorâneas do estado de são paulo - balneabilidade das praias*. [S.l.], 2004.

CHAWLA, A.; TOLMAN, H. L. *Automated grid generation for WA-VEWATCH III*. [S.l.], 2007.

COELHO, A. L. *Resposta da Plataforma Continental Sudeste a ventos sazonais e sinóticos de verão: estudos numéricos*. Tese (Doutorado) — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2007.

CTH/USP. *Observação das características das ondas do mar de Cananéia*. São Paulo, Brasil. (inédito)., 1973.

DAEE. *Manual de cálculos das vazões máximas, médias e mínimas nas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo*. São Paulo, Brasil, 1994. 94 p.

DAVID, C. *Distribuição da biomassa microbentônica na Baía de Santos (SP, Brasil) com ênfase para a região do emissário submarino*. Tese (Doutorado) — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil., 2003.

DOTTORI, M. *Resposta da Plataforma Continental de São Paulo à Forçante de Vento Transiente*. Dissertação de Mestrado — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2001.

EGBERT, G.; EROFEEVA, L. *OSU Tidal Data Inversion*. 2010. [Http://volkov.oce.orst.edu/tides/AO.html](http://volkov.oce.orst.edu/tides/AO.html). Acessado em julho de 2010. Disponível em: <<http://volkov.oce.orst.edu/tides/AO.html>>.

EPUSP-DAEE. *O estuário santista: pesquisa sobre o assoreamento verificado na faixa portuária, para a Companhia Docas de Santos*. São Paulo, SP, 1966.

EZER, T.; ARANGO, H.; SHCHEPETKIN, A. F. Developments in terrain-following ocean models: intercomparisons of numerical aspects. *Ocean Model.*, v. 4, p. 249–267, 2002.

FARINACCIO, A. *Alterações relacionadas à ação antrópica na dinâmica dos processos costeiros nas planícies da Praia grande/Mongaguá e Enseada de Caraguatatuba (SP)*. Dissertação de Mestrado — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2000.

FARINNACCIO, A. Variations of the shoreline on santos and são vicente bays. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 1, n. 1, p. 42–48, 2009.

FREDSØE, J.; DEIGAARD, R. *Mechanics of coastal sediment transport*. World Scientific, 1995. (Advanced series on ocean engineering). Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=TuaaPwAACAAJ>>.

FUKUMOTO, M. M. *Determinação da história deposicional recente do Alto Estuário Santista, com base nos teores de metais e na suscetibilidade magnética dos sedimentos*. 134 p. Tese (Doutorado) — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, São Paulo, Brasil, 2007.

FÚLFARO, V. J.; PONÇANO, W. L. Sedimentação atual do estuário e baía de santos: um modelo geológico aplicado a projetos de expansão da zona portuária. Rio de Janeiro - RJ, p. 2:67–90, 1976.

FURTADO, V. V.; TESSLER, M. G.; EICHLER, B. B. **Distribuição de sedimentos de superfície de fundo na plataforma continental do estado de são paulo**. In: . Rio de Janeiro, CIRM/UERJ.: [s.n.], 1984. p. 15 p.

GANGFENG, M.; FENGYAN, S.; SHUGUANG, L.; DINGMAN, Q. Hydrodynamic modeling of changjiang estuary: Model skill assessment and large-scale structure impacts. *Appl. Oc. Res.*, v. 33, p. 69–78, 2011.

GEORGE, P. *Geografia econômica*. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, Biblioteca do Fundo Universal, Estante de Economia., 1967.

GIANNINI, P. C. F. *Sedimentação quaternária na planície costeira de Peruíbe-Itanhaém (SP)*. Dissertação de Mestrado — Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, SP, 1987. 2 Volumes.

GOLDENSTEIN, L. *A industrialização da baixada santista : estudo de um centro industrial satélite*. 342 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil, 1972.

GOYA, S. C.; TESSLER, M. G. Variações morfológicas espaço-temporais entre as praias de cibratel e itanhaém-suarão, estado de são paulo. *Rev. bras. oceanogr.*, v. 48, n. 2, p. 151–166, 2000.

GRANT, W. D.; MADSEN, O. S. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research*, v. 84, n. C4, p. 1797–1808, 1979.

GRANT, W. D.; MADSEN, O. S. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *J. Geophys. Res.*, v. 87, n. C1, p. 469–481, 1982.

GREGORIO, H. P. *Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma do Emissário Submarino de Santos*. Dissertação de Mestrado — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2009.

HAIDVOGEL, D. B. *et al.* Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system. *J. Comput. Phys.*, Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, v. 227, p. 3595–3624, March 2008. ISSN 0021-9991. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1347465.1347771>>.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Modelagem numérica da região costeira de santos (sp): Circulação de maré. **Rev. bras. oceanogr.**, v. 46, p. 135–156, 1998.

HARARI, J.; CAMARGO, R.; CACCIARI, P. L. Resultados da modelagem numérica hidrodinâmica em simulações tridimensionais das correntes de maré na baixada santista. **Rev. Bras. Rec. Hidr.**, v. 5, n. 2, p. 71–87, 2000.

HARARI, J.; CAMARGO, R.; FRANÇA, C. A. S.; MESQUITA, A. R.; PICARELLI, S. S. Numerical modeling of the hydrodynamics in the coastal area of sao paulo state - brazil. **JCR**, v. 39, p. 1560–1563, 2006. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium - ICS 2004, 14 - 19 March 2004, Itajaí, SC, Brazil.

HARARI, J.; MESQUITA, A. R.; MARONE, E.; FRANÇA, C. A. S.; R.CAMARGO; PEREIRA, J. E. R.; ADÃO, C. J. G. P.; JÚNIOR., I. L. S. **Technical report of the project Flow measurements in the Bay of Santos**. [S.l.], 1990.

HARRIS, C.; WIBERG, P. Approaches to quantifying long-term continental shelf sediment transport with an example from the northern california stress mid-shelf site - ii. modelling suspended sediment concentration and transport during storms. **Continental Shelf Research**, v. 17, n. 11, p. 1389–1418, 1997.

HARRIS, C.; WIBERG, P. A two-dimensional, time-dependent model of suspended sediment transport and bed reworking for continental shelves. **Computers & Geosciences**, v. 27, n. 6, p. 675–690, 2001. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300400001229>>.

HUANG, H. **Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) 3D Hydrodynamic Model Comparison**. Baton Rouge, LA, USA., 2011.

IMCS, O. M. G. **ROMS > start**. 2011. [Http://www.myroms.org/](http://www.myroms.org/). Acessado em janeiro de 2011. Disponível em: <<http://myroms.org/>>.

IME, F. R. F. **EIA-RIMA da Dragagem de Aprofundamento do Canal de Navegação e Bacias de Evolução do Porto Organizado de Santos / SP**. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

INPE/CPTEC. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática - INPE/CPTEC**. [S.l.], 2009. v. 8, n. 24.

INPE/CPTEC. *Boletim de Monitoramento e Análise Climática - INPE/CPTEC*. [S.l.], 2010. v. 1, n. 25.

IPT. Mapa geológico do estado de são paulo. volume i. *Governo do Estado de São Paulo. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia.*, p. 126p, 1981.

IPT. *Carta geotécnica do Estado de São Paulo, escala 1:500.000*. São Paulo, SP, 1994.

JONSSON, I. C.; CARLSEN, N. A. Experimental and theoretical investigations in an oscillatory boundary layer. *Journal of Hydraulic Research*, v. 14, n. 1, p. 45–60, 1976.

KANAMITSU, E. M. *et al.* The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Amer. Meteor. Soc.*, v. 77, n. 3, p. 437–470, 1996.

KATSURAGAWA, M. *Dinâmica do ictioplâncton e do zooplâncton. In: Pires- Vanin, A. M. S. Projeto ECOSAN: A influência do complexo estuarino da baixada Santista sobre o ecossistema da plataforma adjacente*. [S.l.], 2007.

KRANCK, K. Flocculation of suspended sediment in the sea. *Nature*, v. 246, p. 348–350, 1973.

LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. *Climanálise Especial – Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC. Cap. 14*, 1996.

LI, M. Z.; AMOS, C. L. Sedtrans96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves. *Computers & Geosciences*, Elsevier, v. 27, n. 6, p. 619–645, 2001. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00120-5)>.

LOCARNINI, R. A.; MISHONOV, A. V.; ANTONOV, J. I.; BOYER, T. P.; GARCIA, H. E.; BARANOVA, O. K.; ZWENG, M. M.; JOHNSON, D. R. *World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature. S. Levitus*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010. 184 p.

MADSEN, O. S. Spectral wave–current bottom boundary layer

flows. In: COASTAL ENGINEERING RESEARCH COUNCIL. Kobe, Japan, 1994. p. 384–398.

MAHIQUES, M. M.; TESSLER, M.; FURTADO, V. Characterization of energy gradient in enclosed bays of ubatuba region, south-eastern brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Elsevier, v. 47, n. 4, p. 431–446, 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771498903687>>.

MARTINS, C. C.; BÍCEGO, M. C.; MAHIQUES, M. M.; FIGUEIRA, R. C. L.; TESSLER, M. G.; MONTONE, R. C. Depositional history of sedimentary linear alkylbenzenes (labs) in a large south american industrial coastal area (santos estuary, southeastern brazil). *Environmental Pollution*, v. 158, n. 11, p. 3355–3364, 2010.

MEYER-PETER, E.; MUELLER, R. *Formulas for bed-load transport*. Stockholm, Sweden, 1948.

MIRANDA, E. E. *Brasil em Relevô*. 2011. [Http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/](http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/). Acesso em abril de 2011. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>.

MUEHE, D. *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*. 1 ed.. ed. [S.l.]: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006. ISBN 85-7738-028-9.

NIELSEN, P. Suspended sediment concentrations under waves. *Coastal Engineering*, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 23–31, 1986. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0378383986900372>>.

PIMENTA, F. M.; CAMPOS, E. J. D.; MILLER, J. L.; PIOLA, A. R. A numerical study of the plata river plume along the southeastern south american continental shelf. *Brazilian Journal of Oceanography*, scielo, v. 53, p. 129–146, 12 2005. ISSN 1679-8759.

PONÇANO, W. L. *Sedimentação atual aplicada a portos do Brasil*. 278 p. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências, São Paulo, SP, 1985.

PONÇANO, W. L.; FÚLFARO, V. J. **Sedimentação atual nas adjacências da ponta de itaipu e baía de santos: implicações na escolha de locais de lançamento de material dragado.** In: . [S.l.]: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1976.

PONÇANO, W. L.; TESSLER, M. G.; FREITAS, C. G. L.; MAHIQUES, M. M. Tendências regionais de transporte de sedimentos arenosos ao longo das praias paulistas. *Revista UNG. Geociências*, (6), p. 102–120, 1999.

RIJN, L. *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*. Aqua Publications, 1990. ISBN 9789080035614. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=z7ARAQAAIAAJ>>.

RODRIGUES, M.; FURTADO, V. V.; TESSLER, M. G.; MAHIQUES, M. M. *Atlas sedimentológico da plataforma continental do Estado de São Paulo: texto explicativo e mapas*. São Paulo, SP: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2003. 34 p.

RODRIGUES, M.; MAHIQUES, M. M. de; TESSLER, M. G.; FURTADO, V. V. Uma revisão histórica acerca do conhecimento sobre a sedimentação atual, em ambientes marinhos submersos, do estado de sao paulo, brasil. *Brazilian Journal of Oceanography*, scielo, v. 47, p. 91–106, 1999. ISSN 1679-8759.

Shchepetkin, A. F.; McWilliams, J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, v. 9, p. 347–404, 2005.

SIKIRIĆ, M. D.; JANEKOVIĆ, I.; KUZMIĆ, M. A new approach to bathymetry smoothing in sigma-coordinate ocean models. *Ocean Modelling*, v. 29, n. 2, p. 128–136, 2009. ISSN 1463-5003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1463500309000742>>.

SMITH, J. D. *Modeling of sediment transport on continental shelves*. In: *Goldberg, E.D., McCave, I.N., O'Brien, J.J., Steele, J.H. (Eds.), The Sea, Vol. 6. Wiley-Interscience*. [S.l.]: New York, pp. 539–577., 1977.

SONDOTÉCNICA. *Comportamento hidráulico e sedimentológico do estuário santista: relatório final*. São Paulo, SP, 1977.

SOULSBY, R. L. *Bed shear-stress due to combined waves and currents*. In: . [S.l.]: Advances in Coastal Morphodynamics: An Overview of the G8-Coastal Morphodynamics Project, Co-Sponsored by the Commission of The European Communities Directorate General XII, 1995. p. pp. 4.20–4.23.

SOULSBY, R. L.; DAMGAARD, J. S. Bedload sediment transport in coastal waters. ***Coastal Engineering***, v. 52, n. 8, p. 673–689, 2005. ISSN 0378-3839. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383905000475>>.

SOUPY, A.; WARNER, J. C.; SHERWOOD, C. R. *Community Coastal Sediment-Transport Model Project Page*. 2010. [Http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/sediment-transport/](http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/sediment-transport/). Acessado em agosto de 2010. Disponível em: <<http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/sediment-transport/>>.

STECH, J. L. *Um estudo comparativo da dinâmica da circulação de inverno entre as plataformas continentais das costas sudeste do Brasil e do Estados Unidos utilizando um modelo numérico*. Tese (Doutorado) — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1990.

STYLES, R. Modeling bottom roughness in the presence of wave-generated ripples. ***Journal of Geophysical Research***, v. 107, n. C8, p. 1–15, 2002. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2002/2001JC000864.shtml>>.

STYLES, R.; GLENN, S. M. Modeling stratified wave and current bottom boundary layers on the continental shelf. ***Journal of Geophysical Research***, American Geophysical Union, v. 105, n. C10, p. 24119–24139, 2000. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2000/2000JC900115.shtml>>.

SVERDRUP, H.; JOHNSON, M. W.; FLEMING, R. H. ***The Oceans: their physics, chemistry and general biology***. 1. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc, 1942.

TESSLER, M. G. *Dinâmica sedimentar quaternária no litoral sul-paulista*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências., São Paulo, SP, 1988.

TESSLER, M. G. *Taxas de Sedimentação Holocênica na Plataforma Continental Sul do Estado de São Paulo*. 2001. Concurso de Livre Docência – IO-USP.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. C.; YOSHIKAWA, P. S.; HURTADO, S. N. ***Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro - Capítulo: São Paulo***. 1 ed..

ed. [S.l.]: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006. ISBN 85-7738-028-9.

TOLMAN, H. L. *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. [S.l.], 2009.

TOLMAN, H. L. *WAVEWATCH III (R) development best practices Ver. 0.1*. [S.l.], 2010.

TOMMASI, L. R. Resíduos de praguicidas em águas e sedimentos de fundo do sistema estuarino de Santos (sp). *Cienc. Cult. (Sao Paulo)*, v. 37, n. 6, p. 1001–1015, 1985.

WARNER, J. C.; GEYER, W. R.; LERCZAK, J. A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research*, Richmond, Va.: William Byrd Press for John Hopkins Press, 1949-, v. 110, n. C5, p. 1–13, 2005. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2004JC002691.shtml>>.

WARNER, J. C.; SHERWOOD, C. R.; SIGNELL, R. P.; HARRIS, C. K.; ARANGO, H. G. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, v. 34, n. 10, p. 1284–1306, 2008. ISSN 0098-3004. Predictive Modeling in Sediment Transport and Stratigraphy. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V7D-4S21TN6-4/2/52d3a2265dd04e80f20475b8a09cad82>>.

WIBERG, P. L.; HARRIS, C. K. Ripple geometry in wave-dominated environments. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n. C1, p. 775–789, 1994. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1994/93JC02726.shtml>>.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Phys. Geogr.*, n. 2, p. 184–194, 1981.

YASSUDA, E. A. *Modelo numérico do transporte de sedimentos no canal principal do Estuário de Santos*. 121 p. Dissertação de Mestrado — Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1991.

ANEXOS

A Vazão dos Rios.

Relação das vazões mínimas, médias e máximas e de vazões sólidas para os rios/córregos próximos da região que desaguam no sistema estuarino. Adaptado de IME (2008).

Rio/Córrego	E	N	Mínima (m ³ /s)	Média (m ³ /s)	Máxima (m ³ /s)	Vazão Sólida (m ³ /ano)
Córrego das Neves	363.957	7.357.061	0,021	0,084	12,47	2715,93
Rio Agari	368.613	7.352.603	0,097	0,396	37,02	66920,38
Rio Cacheta	357.108	7.351.822	0,042	0,172	47,61	32255,65
Rio Cubatão	356.090	7.359.034	1,256	5,142	214,23	737694,35
Rio dos Bagres	358.931	7.352.240	0,093	0,382	45,73	63478,36
Rio Jurubatuba	366.098	7.358.075	0,98	4,012	90,32	56208,01
Rio Perequê	356.125	7.359.100	0,535	2,191	98,82	35932,92
Rio Itapanhaú	386.479	7.367.665	2,459	10,070	114,36	247444,33
Rio 9	351.602	7.353.506	0,016	0,065	11,99	14129,78
Rio 10	354.061	7.356.380	0,009	0,038	7,00	4967,3
Rio 15	362.953	7.358.473	0,013	0,054	7,45	1769,91
Rio 16	363.108	7.355.889	0,009	0,037	5,14	795,89
Rio 17	362.202	7.356.815	0,008	0,034	4,85	670,36
Rio 18	362.245	7.358.263	0,021	0,084	10,59	13631,26
Rio 19	365.318	7.358.240	0,016	0,067	8,47	14819,33
Rio 20	365.469	7.357.375	0,007	0,029	3,67	4263,64
Rio 21	366.112	7.357.999	0,011	0,045	5,29	506,45
Rio 22	365.940	7.355.938	0,004	0,016	2,11	2071,92
Rio 23	368.704	7.357.461	0,104	0,426	31,51	4873,36
Rio 24	368.889	7.356.854	0,022	0,088	10,04	849,27
Rio 28	351.264	7.355.296	0,004	0,016	3,56	666,68
Rio 29	357.555	7.359.963	0,01	0,042	7,03	8030,33
Rio 31	357.192	7.358.926	0,002	0,009	1,73	197,54
Rio 34	362.072	7.356.816	0,002	0,007	1,49	136,38
Rio 36	367.001	7.345.035	0,025	0,102	14,4	3083,56

B Sedimento de Fundo.

Porcentagem de materiais finos e areia total nos sedimentos coletados ao longo do canal de Santos e Baía de Santos. Adaptado de IME (2008)

Longitude	Latitude	Finos	Areia	Longitude	Latitude	Finos	Areia
-46,33489	-24,02312	56,7 %	43,3 %	-46,33141	-24,01334	6,0 %	94,1 %
-46,32211	-23,99573	20,6 %	79,4 %	-46,32660	-23,99170	92,5 %	7,5 %
-46,28893	-23,98663	46,4 %	51,7 %	-46,29191	-23,98518	86,9 %	13,2 %
-46,28930	-23,97047	45,3 %	54,7 %	-46,29324	-23,97214	93,7 %	6,2 %
-46,30035	-23,95681	25,4 %	74,6 %	-46,30413	-23,95888	82,9 %	17,1 %
-46,30696	-23,93349	80,3 %	19,8 %	-46,31278	-23,93324	88,6 %	11,5 %
-46,31266	-23,92747	82,3 %	17,8 %	-46,32329	-23,92573	80,3 %	19,9 %
-46,33892	-23,92435	91,5 %	8,4 %	-46,35695	-24,05734	4,4 %	95,6 %
-46,35475	-24,05001	20,9 %	79,1 %	-46,35284	-24,04370	8,4 %	91,5 %
-46,34890	-24,03348	15,3 %	84,7 %	-46,34650	-24,02773	26,4 %	73,6 %
-46,34433	-24,02221	20,7 %	79,3 %	-46,34006	-24,01287	42,3 %	57,7 %
-46,33769	-24,00674	15,1 %	84,8 %	-46,33377	-24,00086	48,1 %	51,9 %
-46,32438	-23,99266	70,1 %	29,9 %	-46,31744	-23,99195	69,0 %	31,0 %
-46,29790	-23,99168	20,8 %	79,2 %	-46,29040	-23,98214	61,9 %	38,1 %
-46,29005	-23,97058	43,9 %	56,1 %	-46,29475	-23,96512	86,5 %	13,5 %
-46,29927	-23,96138	52,8 %	47,2 %	-46,30273	-23,95704	42,2 %	57,8 %
-46,30661	-23,95253	42,1 %	57,9 %	-46,30989	-23,94707	47,7 %	52,3 %
-46,31087	-23,94061	75,6 %	24,4 %	-46,31261	-23,93815	69,1 %	30,9 %
-46,31302	-23,93138	85,2 %	14,8 %	-46,32003	-23,92959	80,3 %	19,7 %
-46,32357	-23,92793	66,8 %	33,3 %	-46,32719	-23,92723	87,3 %	12,7 %
-46,33174	-23,92598	83,2 %	16,8 %	-46,33507	-23,92437	72,8 %	27,2 %
-46,33887	-23,92005	83,4 %	16,6 %	-46,34354	-23,91779	70,3 %	29,7 %
-46,35284	-23,91711	81,3 %	16,7 %	-46,35645	-23,91798	69,5 %	30,5 %
-46,35834	-23,91795	55,5 %	44,5 %	-46,36154	-23,91749	67,0 %	13,0 %
-46,36601	-23,91608	91,0 %	9,0 %	-46,36941	-23,91361	67,7 %	12,3 %
-46,35399	-24,04862	2,5 %	96,4 %	-46,35216	-24,04107	48,0 %	52,1 %
-46,34780	-24,03390	15,2 %	85,3 %	-46,33850	-24,01218	40,2 %	59,0 %
-46,33837	-24,00823	24,1 %	76,1 %	-46,33393	-24,00212	41,1 %	58,0 %
-46,33087	-23,99550	69,5 %	25,5 %	-46,32605	-23,99460	20,6 %	78,4 %
-46,30076	-23,99192	48,7 %	50,7 %	-46,28960	-23,97607	59,7 %	33,9 %
-46,29246	-23,96814	60,8 %	38,5 %	-46,29799	-23,96437	61,9 %	23,9 %
-46,30129	-23,95878	55,4 %	44,8 %	-46,30990	-23,94538	59,1 %	40,7 %
-46,31131	-23,93788	62,9 %	36,5 %	-46,31633	-23,93053	65,8 %	27,6 %
-46,34866	-23,91767	64,6 %	34,4 %				