Carolina Alcantara Olpe

Hidrodinâmica e transporte de sedimentos no Saco do Mamanguá (RJ), observações e
modelagem numérica

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Siegle

SÃO PAULO

2016

Universidade de São Paulo

Instituto Oceanográfico

Hidrodinâmica e transporte de sedimentos no Saco do Mamanguá (RJ), observações e
modelagem numérica

Carolina Alcantara Olpe

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

Julgada em ____/____/____

Prof. Dr. Eduardo Siegle

Conceito

Prof (a). Dr (a).

Conceito

Prof (a). Dr (a).

Conceito

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 GERAL	18
2.2 ESPECIFICOS.....	18
3. ÁREA DE ESTUDO	19
4. METODOLOGIA	24
4.1 CLIMA DE ONDAS	24
4.2 DADOS METEOROLÓGICOS	24
4.3 EXPERIMENTOS DE CAMPO	24
4.3.1 Coleta e Processamento dos Dados de Campo.....	25
4.3.1.1 Corrente e Nível de água.....	25
4.3.1.2 Batimetria	27
4.3.1.3 Sedimentologia.....	30
4.4 MODELO NUMÉRICO UTILIZADO – DELFT 3D	32
4.4.1 Módulo Hidrodinâmico	33
4.4.2 Módulo de Transporte de Sedimentos	36
4.4.3 Módulo de Ondas	37
4.4.4 Aplicação do Modelo.....	39
4.4.4.1 Domínio do Modelo e Confeção da Grade Numérica	39
4.4.4.2 Interpolação da Batimetria	41
4.4.4.3 Condições de Contorno	42
4.4.4.4 Configuração do Modelo Hidrodinâmico e de Transporte de Sedimentos	43
4.4.4.5 Configuração do Modelo de Ondas.....	45
4.4.5 Experimentos numéricos	47
5. RESULTADOS	48
5.1 DADOS ADQUIRIDOS.....	48
5.1.1 Clima de Ondas	48

5.1.2	Indicativos da Importância do Vento para as Correntes e Caracterização Física do Saco do Mamanguá	51
5.2	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	62
5.2.1	Hidrodinâmica	64
5.2.1.1	Calibração.....	64
5.2.1.2	Validação.....	66
5.2.2	Módulo de Transporte de Sedimentos	68
5.3	EXPERIMENTOS NUMÉRICOS	70
5.3.1	Módulo Hidrodinâmico	70
5.3.1.1	Padrão geral da circulação no interior do Saco do Mamanguá.....	70
5.3.1.2	Tempo de residência da água	73
5.3.1.3	Troca de Fluxos.....	80
5.3.2	Ondas.....	83
5.3.2.1	Propagação da onda no interior do Saco do Mamanguá	83
5.3.3	Transporte de Sedimentos	91
6.	DISCUSSÃO.....	102
7.	CONCLUSÕES.....	110
8.	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
	REFERÊNCIAS	113

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todo amor, força e direcionamento.

Agradeço ao meu orientador Eduardo Siegle pela oportunidade, orientação, apoio, confiança e amizade.

Ao Prof. Dr. Luigi Jovane por todo suporte e atenção.

Ao Prof. Dr. Arnaldo Valle-Levinson por todo o esclarecimento e ajuda.

Ao Gaspare Ciaccio por toda ajuda e grande paciência.

Ao Prof. Dr. Luiz B. de Miranda e ao Prof. Dr. Michel M. de Mahiques por toda atenção.

A Prof. Elisabete Braga e a Gláucia Berbel por permitirem a utilização dos dados obtidos.

A toda tripulação do Alpha Delphini e Véliger e a todos que me ajudaram em campo, especialmente ao Eric e Gabriel.

Aos companheiros e amigos de laboratório (LDC-USP), Bruna, Lilian, Mari, Mirella e Mirela, Júlia, Ph, Caio, Tito, Hélio, Filipe, Luiza e Maria Fernanda. E aos do laboratório do lado (LabGeo), Mari, Celine, Daniel, Cristian, Max, Flaminia, Martino e a nossa mascote Isa. A todos os amigos do Instituto Oceanográfico, em especial a Diana, Chiara, Bia, Dalton e Samuel. A vocês muito obrigada pelos momentos de descontração, apoio, cafés e risadas.

Aos meus pais pelo amor incondicional, por todo suporte, por sempre estarem ao meu lado. E aos meus irmãos por toda amizade, carinho e companheirismo.

Ao Bob, por toda compreensão, amor, por sempre estar ao meu lado, por toda a paciência, conselhos, carinho e apoio em todos os momentos.

A todos os meus familiares e aos Moraes e Filipims, por todo carinho e momentos de alegria.

Aos grandes amigos, por sempre estarem presentes, pelos conselhos, ajudas e momentos de descontração.

A todos que de alguma forma contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

E ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a primeira avaliação da hidrodinâmica do Saco do Mamanguá (RJ), com o objetivo de analisar o comportamento hidrodinâmico e o transporte de sedimentos da região, através do modelo hidrodinâmico Delft3D - FLOW e do modelo de ondas Delft3D - WAVE. Os resultados indicam que a hidrodinâmica do Saco do Mamanguá é grandemente influenciada pela ação do vento, principalmente pelos oriundos de sudoeste, seguido pela força da maré e dos gradientes de densidade, que juntos atuam no direcionamento e magnitude das correntes e trocas de volume entre a região e o oceano adjacente, sendo responsáveis também pelo transporte de sedimentos em suspensão da região. Os resultados do modelo numérico de ondas mostraram que estas não influenciam a hidrodinâmica da região. Através da comparação dos resultados do modelo numérico com os dados coletados na região, ele se mostrou satisfatório, principalmente em relação à hidrodinâmica, validando a correta representação dos padrões de circulação da área. Por fim, o trabalho demonstra que o Saco do Mamanguá é um ambiente de baixa energia, com correntes fracas, variando de bem misturado a estratificado em que, sua baixa dinâmica favorece a retenção de partículas em seu interior, porém a atuação do vento contribui para a exportação de material.

Palavras chave: hidrodinâmica, transporte de sedimentos, modelagem numérica, modelagem hidrodinâmica, modelagem de ondas, Saco do Mamanguá.

ABSTRACT

This study presents the first evaluation of hydrodynamics Saco do Mamanguá (RJ), with the aiming of analyze the hydrodynamics patters and sediment transport in the region using the hydrodynamic model Delft3D - FLOW and wave model Delft3D - WAVE. The results indicate that the hydrodynamics of Saco do Mamanguá is largely influenced by the wind, especially southwestern winds, followed by tide forces and density gradients which together will dictate direction and magnitude of current, the volume and mass exchanges between the study area and the adjacent ocean, and the suspended sediment transport. The results of the wave model showed that these did not influence the hydrodynamics of the region. The numerical model was proved be satisfactory, especially regarding the hydrodynamics patterns when compared to measured data, well representing the flow circulation of the area. Finally, the study demonstrates that Saco do Mamanguá is a low energy environment with low velocity currents, ranging from well mixed to stratified estuary. The low dynamic in the system favors particle retention in its interior although the performance of the wind contributes to the export of material.

Key-words: hydrodynamic, sediment transport, numerical modeling, hydrodynamic modeling, wave modeling, Saco do Mamanguá.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.....	19
Figura 2: Enfoque para o Saco do Mamanguá, com a Ilha Pequena ao fundo e a Ilha Grande a frente. À direita se observa o manguezal bem desenvolvido localizado ao fundo da região.	20
Figura 3: Detalhes, feições e ambientes que compõem o Saco do Mamanguá. (Nogara et al., 2009).	21
Figura 4: Embarcações utilizadas ao longo das campanhas amostrais. À esquerda navio Alpha Delphini e a direita o Véliger II.	24
Figura 5: ADCP utilizado para coleta da direção e intensidade das correntes da região do Saco do Mamanguá.	26
Figura 6: Malha amostral dos dados batimétricos coletados em janeiro de 2014 através da Ecossonda Multibeam e malha amostral dos dados batimétricos coletados em fevereiro de 2015, respectivamente.....	27
Figura 7: Bote e equipamento utilizado para coleta dos dados batimétricos em fevereiro de 2015.	28
Figura 8: Batimetria interpolada com os dados coletados nas campanhas de janeiro de 2014 e fevereiro de 2015.	29
Figura 9: Localização das coletas de sedimento da campanha de fevereiro de 2015 e coletas realizadas por Benites (2014).	32
Figura 10: Grades numéricas utilizadas no modelo numérico, sendo a menor e mais costeira a grade do modelo hidrodinâmico e a maior, com abrangência mais oceânica a do modelo de ondas. O detalhe do refinamento da grade na região do Saco do Mamanguá observa-se ao lado, assim como os principais rios localizados na região.....	40
Figura 11: Batimetria utilizada para o domínio hidrodinâmico.	41
Figura 12: Batimetria utilizada para o domínio de ondas.....	42
Figura 13: Histogramas direcionais das alturas significativas (a) e dos períodos de pico (b) de ondas próximas ao Saco do Mamanguá referentes aos anos de 1979 a 2009.....	48
Figura 14: Histogramas direcionais de vento para abril (a) e janeiro (b) de 2014, próximo ao Saco do Mamanguá.....	51
Figura 15: Padrão das forçantes atmosféricas, presente no registro da Componente V de correntes, obtido pela análise EOF.	52

Figura 16: Padrão das variações da maré, presente no registro da Componente V de correntes, obtido pela análise EOF.....	53
Figura 17: Comparação da interação das componentes semi-diurnas de maré com as variações de elevação da água, confirmando que estas são variações de maré.	53
Figura 18: Estruturas verticais mais complexas que ocorrem no registro da Componente V..	54
Figura 19: Histograma de ocorrência das direções da velocidade da corrente.....	58
Figura 20: Diagramas ilustrando o comportamento da corrente ao longo da coluna d'água referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá, em que o diagrama superior (a) mostra a velocidade das correntes e o inferior (b) suas direções, sendo a parte superior de cada diagrama a corrente superficial e, a parte inferior a corrente no fundo. Em ambos os diagramas verifica-se o comportamento da elevação da água, através do tracejado da parte superior. No diagrama superior as correntes de enchente são representadas pelos valores negativos e as de vazante pelos positivos.	59
Figura 21: Diagramas ilustrando o comportamento da componente longitudinal da corrente ao longo da coluna d'água referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá e do vento ao longo do período de análise, em que o diagrama superior (a) ilustra a velocidade e direção do vento, e o inferior a velocidade da componente longitudinal da corrente, juntamente com o comportamento da elevação da água (b), sendo a parte superior do diagrama de correntes é a corrente superficial e, a parte inferior a corrente no fundo. As correntes de enchente são representadas pelos valores negativos e as de vazante pelos positivos.	61
Figura 22: Comparação entre os dados de elevação do nível d'água simulados e medidos em abril de 2014.	65
Figura 23: Comparação entre os dados de velocidade da corrente simulados e medidos em abril de 2014.	65
Figura 24: Comparação entre os dados de elevação do nível d'água simulados e medidos em janeiro de 2014.	66
Figura 25: Comparação entre os dados de velocidade da corrente simulados e medidos em janeiro de 2014.	67
Figura 26: Localização dos pontos de onde foram extraídas as séries temporais dos resultados dos modelos numéricos. Sendo que, dos pontos A, B, C, D, F e H foram extraídos os resultados do modelo de transporte de sedimentos. Dos pontos A, C, E, F e G foram extraídos as séries temporais dos resultados dos modelos hidrodinâmicos e no ponto A	

foram extraídos as séries temporais dos resultados das trocas de fluxos e do modelo de ondas.....	69
Figura 27: Magnitude e direção da corrente para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e maré vazante (painel direito), para o caso de onda de Leste 2 (E2), com $H_s = 1,21$, $T_p = 7,81$	71
Figura 28: Magnitude e direção da corrente para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e maré vazante (painel direito), para o caso de onda de Sul 2 (S2), com $H_s = 1,26$, $T_p = 10,83$	72
Figura 29: Magnitude e direção da corrente para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e maré vazante (painel direito), para o caso de onda de Sudeste2 (SE2) , com $H_s = 1,26$, $T_p = 10,83$	72
Figura 30: Séries temporais de velocidade da corrente extraídas dos pontos A, C, E, F e G...	73
Figura 31: Localização em que as partículas foram lançadas ao longo do Saco do Mamanguá, com os setores de entrada, meio e fundo delimitados pelo tracejado vermelho.	74
Figura 32: Trajeto da partícula 16, a única lançada no setor de fundo que saiu do Saco do Mamanguá, depois de mais de 18 dias.	77
Figura 33: Trajeto da partícula 44 lançada no setor do meio do SM e na margem leste, saindo depois de aproximadamente 14 dias.	78
Figura 34: Trajeto da partícula 53, lançada na margem leste do setor de entrada, que saiu do Saco do Mamanguá em aproximadamente 8 dias.....	78
Figura 35: Trajeto da partícula 57, lançada na margem oeste do setor de entrada, saindo do Saco do Mamanguá depois de mais de 10 dias.....	79
Figura 36: Trajeto da partícula 60, lançada no setor de entrada no meio das margens leste e oeste, saindo do SM depois de 18 dias.	79
Figura 37: Seção transversal do ponto A localizado na entrada do Saco do Mamanguá, de onde foram extraídos os resultados do transporte de volume e de massa.	80
Figura 38: Descarga instantânea de água (m^3/s) na entrada do Saco do Mamanguá.	81
Figura 39: Descarga cumulativa de água (m^3) na entrada do Saco do Mamanguá.	81
Figura 40: Descarga instantânea de sedimento (m^3/s) na entrada do Saco do Mamanguá.....	82
Figura 41: Descarga cumulativa de sedimento (m^3) na entrada do Saco do Mamanguá.	83
Figura 42: Direção e altura significativa de onda, para o caso de onda Leste 2 – E2 (painel esquerdo), com $H_s = 1,2$, $T_p = 7,8$ e para o caso de onda Leste 3 – E3 (painel direito), com $H_s = 2,7$ e $T_p = 8,3$	87

Figura 43: Direção e altura significativa de onda, para o caso de onda Sul 3 – S3 (painel esquerdo), com $H_s = 1,7$, $T_p = 10,9$ e para o caso de onda Sul 4 – S4 (painel direito), com $H_s = 2,2$ e $T_p = 11,2$	88
Figura 44: Direção e altura significativa de onda, para o caso de onda Sudeste 2 – SE2 (painel esquerdo), com $H_s = 1,2$, $T_p = 9,2$ e para o caso de onda Sudeste 1– SE1 (painel direito), com $H_s = 2,7$ e $T_p = 9,6$	89
Figura 45: Séries temporais de altura significativa de onda extraídas do A para todos os casos de onda.	90
Figura 46: Ilustra o comportamento da altura significativa de onda, histogramas direcionais das alturas significativas (b) e dos períodos de pico (c) de ondas no Saco do Mamanguá referente ao período analisado em janeiro de 2014.	91
Figura 47: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto A.	93
Figura 48: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto B.	93
Figura 49: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto C.	94
Figura 50: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto D.	94
Figura 51: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto E.	100
Figura 52: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto F.....	95
Figura 53: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($m^3/s/m$) para o ponto A.	104
Figura 54: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($m^3/s/m$) para o ponto B.	104
Figura 55: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($m^3/s/m$) para o ponto C.	104
Figura 56: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($m^3/s/m$) para o ponto D.	105
Figura 57: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($m^3/s/m$) para o ponto E.....	105
Figura 58 Série temporal de transporte de silte em suspensão ($m^3/s/m$) para o ponto F.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação granulométrica descrita por Wentworth (1922).	31
Tabela 2: Características das frações de sedimento utilizadas no modelo	44
Tabela 3: Características dos casos de onda utilizados no presente trabalho.	46
Tabela 4: Frequência de ocorrência de ondas em diferentes direções e alturas significativas, referentes aos anos de 1979 a 2009, com destaque nas maiores ocorrências.	49
Tabela 5: Frequência de ocorrência de ondas em diferentes direções e períodos, referentes aos anos de 1979 a 2009, com destaque nas maiores ocorrências.	50
Tabela 6: Ocorrência de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá.	55
Tabela 7: Ocorrência de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá.	56
Tabela 8: Ocorrência de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente ao fundo, referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá.	57
Tabela 9: Classificação do RMAE de acordo com Van Rijn et al. (2003).	63
Tabela 10: Classificação de Skill de acordo com Henriksen et al. (2003).	64
Tabela 11: Resultados estatísticos referentes às variações de maré e magnitude das correntes durante a calibração.	66
Tabela 12: Resultados estatísticos referentes às elevações do nível d'água e magnitude das correntes durante a validação.	67
Tabela 13: Concentração de material em suspensão coletado em campo e disponibilizado pelo LabNut.	70
Tabela 14: Classificação da intensidade da onda com base em suas potências, de acordo com Costa (2015).	84
Tabela 15: Força e intensidade da onda de todos os casos de onda que serviram de entrada para o modelo.	85
Tabela 16: Força e intensidade da onda dos dados extraídos das simulações.	86
Tabela 17: Comparação da concentração de material articulado em suspensão (MPS) coletado em campo e gerada pelo modelo de transporte de sedimentos.	101

1. INTRODUÇÃO

A zona costeira é a região do oceano influenciada por processos continentais junto à região continental que é influenciada por processos oceânicos. É uma região de transição entre o domínio oceânico e o continental, caracterizada por ser um local muito dinâmico condicionado por diversos processos oceânicos e fatores físicos como ondas, marés e aporte de sedimentos, que integra e estabelece os diferentes ambientes e subambientes destas regiões. Apresentando grande diversidade e riqueza natural, é composta por diversos ambientes como deltas, praias, manguezais, recifes de coral, dunas, estuários e etc.

O enfoque deste trabalho é em ambientes estuarinos, que são ambientes que apresentam elevada biodiversidade, sendo tipicamente sensíveis e frágeis.

Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, apresentando uma livre ligação com o oceano aberto, onde a água do mar é diluída pela água doce oriunda da drenagem continental (Cameron & Pritchard, 1963). Tipos geomorfológicos desses ambientes foram classificados por Pritchard (1952) em que, nesta classificação se encontram estuários do tipo planície costeira, fiorde, construído por barra e estuários formados por outros processos como erupções vulcânicas, tremores de terra e falhas tectônicas.

Rias são um tipo de estuário, que apresentam geralmente forma de funil, com maiores profundidades em direção ao mar que diminuem progressivamente em sua extensão. São antigos vales fluviais alagados, desenvolvidos em costas não glaciais de alto relevo, localizadas geralmente em regiões subtropicais e temperadas. Apesar de serem consideradas um tipo de estuário, apenas uma pequena parcela deste ambiente apresenta maior influência da drenagem continental, sendo apenas esta caracterizada como um estuário (Evans & Prego, 2003).

Normalmente apresentam grande quantidade de sedimento fino e desenvolvimento de mangues ou marismas em suas margens. Foram formadas pela elevação da parte continental onde se encontrava um vale interior do rio que foi aliviado do peso de gelo durante o descongelamento, ocorrendo uma inundação pela elevação do nível relativo do mar durante o Holoceno (Miranda et al., 2012).

Funcionando como eficientes aprisionadores de sedimentos, suas sequências sedimentares geradas ao longo do seu preenchimento contêm evidências das mudanças climáticas que ocorreram durante esta época geológica (Garcia-Garcia et al., 2005).

Estes ambientes desempenham importante papel ecológico, permitindo o crescimento de diversas espécies devido à alta disponibilidade de sistemas produtores como manguezais e fitoplâncton, além da grande disponibilidade de nutrientes oriundos de aportes fluviais e antrópicos, apresentam também alta disponibilidade de luz solar, renovação da água pelos ciclos de maré, troca de nutrientes entre o substrato e a coluna d'água, sendo também de certo modo mais abrigados, se comparados a outros ambientes costeiros. Desta forma apresentam diversos habitats, se comportando frequentemente como berçários marinhos.

A hidrodinâmica desses ambientes é fundamental para equilibrar seu ecossistema. Ela determina a distribuição e o transporte de materiais como nutrientes, clorofila e larvas para o sistema. Sendo assim, seu conhecimento é de suma importância para a compreensão de diversos fatores ecológicos, químicos, físicos e geológicos, sendo um ambiente muito complexo que apresenta um sistema de renovação das águas, sedimentação e assimilação de substâncias bem característico, que podem encurtar sua vida geológica e biológica, causando alterações na qualidade de suas águas.

De acordo com Dyer (1973), a circulação da água e os processos de mistura destes ambientes são controlados na maioria das vezes pela diferença de densidade e interação entre a água fluvial e marinha, fazendo com que um gradiente de pressão horizontal afete a dinâmica estuarina. Porém, a força que estimula as correntes de enchente (correntes de maré direcionadas estuário acima) e de vazante (correntes direcionadas estuário abaixo), representadas pelo gradiente de pressão gerado pela inclinação do nível do mar devido as oscilações de maré, são geradas pelo efeito barotrópico. Quando este cessa, a circulação gravitacional gera um movimento bidirecional estimulado pelo gradiente de salinidade e pela descarga de água doce. Nestas condições, as correntes de vazante carregam os elementos da água do mar para as camadas superficiais, em que este volume removido será equilibrado pela advecção horizontal na camada de água situada abaixo do gradiente de salinidade (Miranda et al., 2002).

O transporte de sedimentos através de um estuário é controlado pelo aporte fluvial e pelo padrão de circulação estuarina. Sendo que, essa circulação é gerada pela descarga de água doce, variações do nível do mar, ação do vento na superfície da água, gradiente de densidade e circulação da plataforma (Miranda et al., 2002). Deste modo, esta circulação desempenha um importante papel na dinâmica sedimentar de ambientes estuarinos. Por isso, o conhecimento do transporte das partículas, proporcionará principalmente a compreensão do transporte de poluentes e contaminantes, já que estes podem estar adsorvidos na camada superficial dos sedimentos finos; assoreamento de uma região, devido a alta deposição sedimentar e alta concentração de material sedimentar em suspensão, que dificultará a penetração de luz na coluna de água, afetando o crescimento de algas, ou diminuindo a disponibilidade de alimento para outras espécies (Couceiro, 2015).

Neste âmbito, uma das melhores formas de entender a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar de uma área costeira é através do uso da modelagem numérica, representando uma eficiente ferramenta, principalmente para a gestão de ambientes, pois pode exibir situações do mundo real, sendo um ótimo custo-benefício, além de possibilitar a simulação de vários dias em apenas algumas horas.

Modelos bidimensionais integrados verticalmente têm sido amplamente utilizados ao longo das duas últimas décadas, sendo úteis para descrever fenômenos ondulatórios como marés e correntes de maré, ou transporte de materiais. Desta forma, um modelo 2D pode ser utilizado para descrever diversos tipos de ambientes, inclusive rias, principalmente quando a área de estudo apresenta baixa vazão, ou se encontra longe da foz do rio, apresentando fraca estratificação, como é o caso do Saco do Mamanguá. Além de apresentar como principal vantagem seu baixo custo computacional (Gomes - Gesteira et al., 1998).

A Baía de Ilha Grande, localizada no Estado do Rio de Janeiro, é uma área de grande interesse ambiental, onde estão presentes unidades de conservação, parques e reservas ecológicas, além de um terminal marítimo petroleiro, duas usinas nucleares, um porto, um estaleiro naval de grande porte e diversas marinas, apresentando também intensa atividade turística, pesqueira e de aquicultura (Bittencourt et al., 2010).

Na porção oeste dessa Baía, se encontra o Saco do Mamanguá, objeto deste estudo, no qual apresenta a morfologia de uma ria, sendo um ambiente que depende da interação de diversos processos e muitas vezes frágeis, nem sempre são bem estudados.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho é estudar a hidrodinâmica e transporte de sedimentos deste ambiente, com o intuito de compreender a influência das principais forçantes atuantes na região, como as marés, rios, ondas e ventos e a sua dinâmica sedimentar, a fim de compreender melhor seu funcionamento, através de uma avaliação geral do transporte de sedimentos em suspensão.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Compreender a dinâmica e o funcionamento do Saco do Mamanguá, em relação a sua hidrodinâmica e transporte de sedimentos.

2.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar a hidrodinâmica do Saco do Mamanguá;
- Aplicar e validar um modelo numérico na região;
- Avaliar as trocas de fluxos entre o Saco do Mamanguá e região costeira adjacente;
- Com base na hidrodinâmica, definir o padrão de transporte de sedimentos em suspensão na região;

3. ÁREA DE ESTUDO

O Saco do Mamanguá (Figura 1) localiza-se na região sudeste do Brasil, no Estado do Rio de Janeiro, próximo ao município de Paraty e a oeste da Baía de Ilha Grande, faz parte da Área de Proteção Ambiental do Cairuçu e da Reserva Florestal da Juatinga.

Possuindo 8 km de comprimento e 2 km de largura, apresenta profundidade média de 5 e máxima de 10 metros, sendo que esta vai diminuindo em direção ao fundo. Compreende a interface entre o continente e o oceano, e recebe matéria orgânica do manguezal e dos afluentes que deságuam aos fundos da região, sofrendo também influência das oscilações de maré.

Figura 1: Localização da área de estudo.

Segundo Nogara et al. (2009), o Saco do Mamanguá apresenta uma costa recortada, formando 33 pequenas praias de areia separadas por costões rochosos, cinco pequenos parcéis de pedras e duas ilhas (Figura 2). Os rios de pequeno porte que ali se formam e deságuam diretamente sobre as praias, ou nas planícies de fundo, determinam a formação de áreas alagadas onde se desenvolvem diversos caixetais (ecossistema que predomina a árvore caixeta, característica de áreas alagadas fluviais) e um sistema bem conservado de manguezais (Figura 2). Estes manguezais se encontram associados a áreas de intenso acúmulo de lama e areia, formando baixios de lodo.

Figura 2: Enfoque para o Saco do Mamanguá, com a Ilha Pequena ao fundo e a Ilha Grande a frente. À direita se observa o manguezal bem desenvolvido localizado ao fundo da região.

Na porção mais interna do Saco do Mamanguá deságuam 12 pequenos rios e riachos, porém os que apresentam maior área de contribuição são os rios, Grande, Turvo e do Regato criando uma zona de alta turbidez, sendo também uma das principais fontes de areia e silte para o sistema. Estes também causam uma redução na salinidade, o que faz a região apresentar características de um estuário. Além disto, essa porção recebe contribuição alóctone de sedimentos, nutrientes e matéria orgânica (Nogara et al., 2009).

Na Figura 3 podemos observar as feições e ambientes que compõem o Saco do Mamanguá. Sendo que a região que vai da Ponta Escalvada e Ponta do Buraco até a Praia Grande e Praia do Cruzeiro, sofre maior influência das águas oceânicas, apresentando águas de coloração mais clara, sendo mais profunda e circundada por praias e baixios de areia. A região mais mediana, que vai da Praia do Cruzeiro e Praia

Grande até o final da Ilha Pequena, sofre influência das águas oceânicas e dos afluentes que deságuam no manguezal, sendo influenciada também pelas correntes de maré e ação dos ventos. É constituída de estreitas praias de areia e lama, em que as Ilhas Grande e Pequena e o parcel do Cruzeiro criam um ambiente mais protegido, com maior acúmulo de lama e formação de baixios de lodo. Já o fundo do Saco do Mamanguá é delimitado a partir da Ilha Pequena, sendo caracterizado pelo início do aparecimento do manguezal nas margens e formação de baixios de lodo. Apresenta águas mais salobras, turvas e quentes, sofrendo maior influência dos rios que ali deságuam com muitos nutrientes, contribuindo com o aumento da produtividade das águas (Nogara et al., 2009).

Figura 3: Detalhes, feições e ambientes que compõem o Saco do Mamanguá. (Nogara et al., 2009).

Por ser uma área de transição entre o continente e o oceano, recebendo matéria orgânica dos manguezais, rios e riachos e das águas oceânicas, frias e ricas em

nutrientes, a região principalmente no verão, apresenta um grande enriquecimento e diversidade biológica.

Elevados picos montanhosos presentes no entorno do Saco do Mamanguá, de até 1000 m de altura, causam grandes influências na dinâmica dos ventos locais, que são afunilados e assim intensificados ao longo da região. A dinâmica dos ventos desta região segue dois padrões: um de direção predominante de nordeste durante o verão, com presença de temperatura e umidade relativamente altas, e outro de sudoeste durante o inverno, quando o sistema meteorológico de verão é deslocado para maiores latitudes, permitindo a entrada de sistemas frontais de origem sul, trazendo frentes frias (Castro, 1996).

Uma forte sazonalidade do regime de precipitações também ocorre, devido ao impacto das frentes frias serem mais intensos durante os meses quentes de verão, quando uma estação chuvosa se concentra provocada pelo contrastes térmico (Coelho Neto & Dantas, 1996).

Poucos estudos sobre as características físicas, químicas e geológicas foram realizados até hoje na região. Ambrósio Jr et al. (1991), realizaram estudos sobre estas características no Saco do Mamanguá entre 09/89 e 05/90. Segundo eles, a salinidade da região nesta época apresentou uma variação entre 34,4 e 35,5, devido à baixa descarga de água doce e circulação pouco intensa das águas da região. As condições térmicas apresentaram uma estrutura térmica entre 22° C e 24° C, exceto no mês de março que apresentou uma acentuada estratificação térmica devido à influência de uma massa de água controlada pela Água Central do Atlântico Sul (ACAS). Concluíram também, que as correntes da região são pouco intensas, geradas principalmente pela maré e por componentes gravitacionais, sendo a coluna de água fisicamente homogênea.

Desta forma, o Saco do Mamanguá é considerado um ambiente estuarino pois sofre influência do aporte dos rios que deságuam em seu interior, por ser uma região muito abrigada, apresentando circulação de água restrita e variações um pouco mais acentuadas dos parâmetros físico-químicos em suas águas. Além do predomínio de sedimentos finos, argilas e siltes que estão associados à baixa energia do ambiente.

4. METODOLOGIA

4.1 CLIMA DE ONDAS

O clima de ondas do período de 1979 a 2009, referente à área de estudo foi obtido através do modelo global WaveWatch III, desenvolvido pelo NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Este modelo é fundamentado pela equação do balanço da densidade de ação espectral para o espectro direcional da onda. Ele leva em consideração, o crescimento, refração e decaimento para cada frequência e períodos específicos das ondas, além da deformação do campo de ondas devido às variações espaciais e temporais da profundidade e correntes médias, crescimento e decaimento da onda pelo efeito do vento, interações não lineares, e fricção com o fundo, fornecendo assim características completas do campo de ondas (Tolman, 1999).

Os dados de altura significativa, períodos e direção de onda dos 30 anos levados em consideração obtidos no ponto 23,5°S e 44°W pelo WaveWatch III foram utilizados como dados de entrada para o módulo de propagação de ondas do modelo numérico.

4.2. DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos utilizados foram os registros obtidos pela Estação Meteorológica da Base Aérea de Santa Cruz, também conhecida como Aeroporto Bartolomeu de Gusmão (dados disponíveis em www.wunderground.com), situada na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro (latitude 22,56°S e longitude 43,43°W). Foram obtidos dados horários de intensidade e direção dos ventos para os períodos de interesse. Esses dados foram utilizados na calibração e validação do modelo numérico.

4.3. EXPERIMENTOS DE CAMPO

Foram realizadas três campanhas amostrais ao longo deste estudo a bordo das embarcações “Véliger II” e navio “Alpha Delphini” (Figura 4). A primeira e mais

longa foi realizada em janeiro de 2014, com duração de 11 dias. Em abril de 2014 foi realizada outra de campanha de apenas um dia, e em fevereiro de 2015, a última campanha, teve duração de quatro dias.

Figura 4: Embarcações utilizadas ao longo das campanhas amostrais. À esquerda navio Alpha Delphini e a direita o Véliger II.

4.3.1 Coleta e Processamento dos Dados de Campo

4.3.1.1 Corrente e Nível de água

Nas campanhas de janeiro e abril de 2014, foram coletados dados de nível de água e correntes através de um perfilador acústico, ADCP – *Aquadop Current Profiler Sidelooking* da Nortek (Figura 5), sendo que em todos os campos, o ADCP ficou fundeado no mesmo ponto de coleta (latitude $23,2403^{\circ}\text{S}$ e longitude $44,6069^{\circ}\text{W}$), localizado próximo à entrada do Saco do Mamanguá (Figura 5).

Este equipamento mede a velocidade da água por efeito Doppler no qual os transdutores liberam pulsos acústicos em uma frequência constante que é refletida de volta para o instrumento através das partículas que ficam em suspensão na coluna d'água. Com a diferença de frequência entre os pulsos emitidos e os ecos recebidos calcula-se a velocidade relativa entre o instrumento e as partículas em suspensão, adquirindo-se um perfil de velocidades ao longo da coluna d'água (Fiedler, 2015). O

ADCP foi configurado para coletar a direção e intensidade das correntes, com intervalo de amostragem de 30 minutos, e células de um metro de profundidade.

Os dados das componentes de velocidade de correntes observados em todas as campanhas foram convertidos de sistema cartesiano (norte-sul, leste-oeste) para sistema polar, em que a velocidade absoluta foi obtida por:

$$V_a = \sqrt{\text{componenteU}^2 + \text{componenteV}^2}$$

A direção da corrente foi calculada pelo quadrante do vetor de velocidade e pelo arco tangente da orientação trigonométrica. Através destes dados de direção da velocidade, um histograma foi construído para definir as correntes de vazante e de enchente, que será apresentado na Seção 5.3.2.

Figura 5: Acima se encontra a localização do fundeio do ADCP e abaixo ilustrado o ADCP utilizado para coleta da direção e intensidade das correntes da região do Saco do Mamanguá.

Os dados de nível de água foram adquiridos através do registro de profundidades de água coletados pelo ADCP. Em que, do registro de profundidades, foi subtraído seu valor médio, obtendo-se um registro preliminar de nível d'água. Desse novo registro foi subtraído o valor mínimo deste, obtendo-se assim o registro final de nível d'água. Isto foi realizado, pois, estes dados foram utilizados para correção da batimetria coletada em campo. Já que está foi adicionada a pontos digitalizados de cartas náuticas, que são referenciadas ao Nível de Redução (NR) da DHN, ou seja, o nível zero equivale à média das baixas mares de sizígia para o ponto

onde se localiza o NR da Carta Náutica, optou-se por este método de correção para erros não serem gerados nos resultados finais.

Estes dados serviram então, como forçantes para o modelo hidrodinâmico e correção dos dados batimétricos.

4.3.1.2 Batimetria

Nas campanhas de janeiro de 2014 e fevereiro de 2015 também foram coletados dados batimétricos da região do Saco do Mamanguá.

Dos dias 16 a 20 de janeiro de 2014, dados batimétricos de alta resolução foram obtidos através de um Ecobatímetro, Multibeam – RESON SeaBat 7101, acoplado ao navio “Alpha Delphini”. Este equipamento mede a profundidade da água pela transmissão de pulsos acústicos emitidos por ele próprio, que são refletidos de volta para o equipamento quando atingem o fundo oceânico. Estes dados foram então processados através do software PDS2000 – Teledyne RESON (Figura 6). Os dados batimétricos coletados não representam os dados reais, pois estão sob efeito das marés, então para a correção desta utilizou-se os dados de nível de água obtido pelas análises do ADCP. Desta forma no próprio software de processamento dos dados (PDS2000) removeu-se o efeito da maré obtendo apenas o valor real da batimetria.

Figura 6: Malha amostral dos dados batimétricos coletados em janeiro de 2014 através da Ecossonda Multibeam e malha amostral dos dados batimétricos coletados em fevereiro de 2015, respectivamente.

Em fevereiro de 2015, dos dias 8 a 12, foi realizada outra campanha complementar. Nela o levantamento batimétrico foi efetuado com uma Ecossonda Garmin – GPSMap 526 Sounder, com frequência programada de 200 kHz e armazenagem de registros a cada um segundo (Figura 6). Este sistema foi instalado em um bote, que foi utilizado na coleta dos dados como pode ser observado na Figura 7. Destes dados também foram removidos os efeitos da maré com os dados de nível de água obtido pelas análises do ADCP, e a diferença que a ecossonda se encontrava da linha d'água.

A batimetria interpolada com os dados coletados nas duas campanhas pode ser observada na Figura 8.

Figura 7: Bote e equipamento utilizado para coleta dos dados batimétricos em fevereiro de 2015.

Figura 8: Batimetria interpolada com os dados coletados nas campanhas de janeiro de 2014 e fevereiro de 2015.

Dados de cartas náuticas também foram utilizados para composição da área abrangente pela grade hidrodinâmica do modelo numérico. Foram obtidas cartas já georreferenciadas da Marinha do Brasil de números 1607, 1620, 1633 e 1634, disponíveis no site http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html. Os dados batimétricos dessas cartas foram digitalizados e adicionados aos pontos batimétricos coletados em campo.

Para a área restante que abrange a grade de ondas do modelo numérico, foram utilizados pontos batimétricos obtidos através do Delft Dashboard. O Delft Dashboard é uma interface gráfica independente, acoplada ao conjunto de modelagem do DELFT3D, nele há caixas de ferramentas que permitem a importação e exportação de diversos tipos de dados. Desta forma, dele foram importados dados batimétricos oriundos da *General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)*, que apresenta um conjunto global de dados batimétricos.

Além disso, também foi digitalizada a linha de costa da região de estudo através de imagens de satélites, e esta foi transformada em pontos batimétricos, sendo adicionada a batimetria final.

4.3.1.3 Sedimentologia

Os dados sedimentológicos utilizados no presente trabalho foram disponibilizados pelo Laboratório de Geoprocessamento – LabGEO, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Na campanha de fevereiro de 2015, 35 amostras de sedimento (Figura 9) foram coletadas através de um pegador do tipo Van-Veen. Estas foram etiquetadas e acondicionadas em sacos plásticos. Em laboratório foram secadas através de um liofilizador, e removidos o carbonato de cálcio, através da adição de ácido clorídrico diluído a 10% às amostras para descarbonatação, e a matéria orgânica através do tratamento com peróxido de hidrogênio. Posteriormente as frações granulométricas destas amostras foram quantificadas mediante difração a laser com o analisador Malvern 2000.

A classificação granulométrica das amostras condiz à descrita por Wentworth (1922), demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação granulométrica descrita por Wentworth (1922).

Classificação	Diâmetro (mm)
Areia muito grossa	2 - 1
Areia grossa	1 – 0,5
Areia média	0,5 – 0,25
Areia fina	0,25 – 0,125
Areia muito fina	0,125 – 0,0625
Silte	0,0625 – 0,0039
Argila	0,0039

De acordo com essa análise foi classificado que das 35 amostras, 28 eram areia fina, 2 areia muito fina e 5 areia média.

Benites (2014) e Teixeira (2009) também coletaram amostras sedimentares na região.

Benites (2014) coletou três testemunhos em janeiro de 2014 no Saco do Mamanguá, através do equipamento *gravity core*. Os pontos de coleta (Figura 9) estavam localizados, um próximo a Ilha do Algodão, outro quase na entrada do Saco do Mamanguá e o último próximo a Ilha Pequena. O processamento de suas amostras foi o mesmo descrito anteriormente e como resultados obteve-se que a fração silte foi a mais dominante nas amostras, seguida por areia muito fina e areia fina. Já Teixeira (2009) coletou e processou 23 amostras em maio de 2007 no Saco do Mamanguá. Como resultados obteve-se que a fração silte foi a mais dominante nas amostras, seguida por argila e areia.

Desta forma optou-se como entrada no modelo numérico, sedimento com frações características de areia fina e silte, já que estes se mostraram como predominantes na região.

Figura 9: Localização das coletas de sedimento da campanha de fevereiro de 2015 e coletas realizadas por Benites (2014) e Teixeira (2009).

4.4 MODELO NUMÉRICO UTILIZADO – DELFT 3D

O sistema de modelagem DELFT3D foi desenvolvido pela Deltares, tendo como objetivo analisar multidisciplinarmente zonas costeiras, lagos, rios e estuários. Este sistema abrange diversos módulos que integrados permitem a execução de simulações hidrodinâmicas, através de fatores como maré, gradientes de vento, densidade e correntes de ondas induzidas; propagação de ondas sobre batimetrias irregulares; advecção e dispersão de efluentes; evolução morfológica; transporte de sedimentos coesivos e não coesivos; modelagem de qualidade de água e processos ecológicos.

Este sistema compõe os módulos hidrodinâmico (FLOW), de onda (WAVE), qualidade da água (WAQ), transporte de sedimentos (SED), morfologia (MOR), monitoramento da partícula (PART) e ecologia (Eco). Além de possuir também ferramentas de pré-processamento como o gerador de grade RGFGRID e o gerador de batimetria QUICKIN; e ferramentas de pós-processamento como o GPP e o QUICKPLOT.

A seguir serão descritos resumidamente os módulos utilizados no presente trabalho, sendo estas informações retiradas dos manuais do usuário do Delft3D – FLOW e do DELFT3D – WAVE (Deltares, 2013), assim como as formulações utilizadas pelos seus diferentes módulos, que também podem ser consultadas seus manuais.

4.4.1 Módulo Hidrodinâmico

O DELFT3D – FLOW é o módulo principal do sistema, sendo capaz de interagir com os outros módulos, podendo estes serem aplicados simultaneamente.

Ele pode ser aplicado em modo bidimensional e tridimensional, resolvendo equações de águas rasas e calculando fenômenos hidrodinâmicos não estacionários, como fluxo de transporte e fenômenos resultantes da maré ou forçantes meteorológicas através de grades curvilíneas ou retilíneas.

O modelo é forçado pela maré e descarga fluvial nas fronteiras abertas e na superfície livre pela ação do vento através de gradientes de pressão – campo barotrópico e gradientes de densidade – campo baroclínico.

O sistema de equações do módulo hidrodinâmico consiste nas equações horizontais de movimento – *momentum*, equação da continuidade, e equações de transporte para constituintes conservativos, além de resolver as equações de Navier Stokes para um fluido incompressível levando em consideração aproximações para águas rasas de Boussinesq.

Em sua formulação numérica são incluídos os fenômenos da força da maré; efeito da força de Coriolis (rotação da Terra); fluxos turbulentos de massa e momento; efeitos barotrópicos e baroclínicos; transporte de propriedades conservativas; tensão

de cisalhamento do vento, fluxo de calor e variação da pressão atmosférica na superfície livre; dissipação de energia pelo atrito com o fundo; tensão de cisalhamento nas bordas; evaporação e precipitação descarga fluvial; difusão de momento na vertical devido ondas intensas e fluxos através de estruturas hidráulicas.

Pelo fato de normalmente os contornos de rios, zonas costeiras ou estuários serem curvos, não são bem representados por grades retangulares. Os contornos então se tornam irregulares podendo levar a erros de discretização. Com o intuito de reduzir estes erros ocorrentes em contornos ortogonais, são usadas coordenadas curvilíneas. Desta forma, as equações são formuladas em coordenadas ortogonais curvilíneas.

O movimento dos fluídos é governado pelas leis da continuidade e da conservação do movimento e a escala da velocidade se encontra no espaço físico tendo componentes perpendiculares as faces das células da grade curvilínea, assim a transformação da grade introduz termos de curvatura na equação de movimento.

De acordo com Phillips (1957), o sistema de coordenadas sigma (σ) foi introduzido em modelos atmosféricos, em que o eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos σ , não exatamente horizontais, que acompanham as variações a batimetria e do nível de água, obtendo-se deste modo uma feição suavizada para a batimetria.

O número de camadas é constante em todo o domínio, e a espessura relativa de cada camada σ é usualmente não uniforme, permitindo maior resolução nas áreas de interesse, como por exemplo em regiões superficiais (devido ao vento e trocas de calor com a atmosfera) e zonas próximas ao fundo (para cálculos de transporte de sedimentos).

A equação da continuidade é dada por:

$$\underbrace{\frac{\partial \zeta}{\partial t}}_{*1} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}}}_{*2} \underbrace{\frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G\eta\eta}]}{\partial \xi}}_{*3} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G\xi\xi}]}{\partial \eta} = Q$$

Onde:

t = tempo (s);

$\sqrt{G\xi\xi}$ e $\sqrt{G\eta\eta}$ = coeficientes utilizados para transformar coordenadas curvilíneas em coordenadas retangulares (m);

U, V = velocidade média da coluna d'água na direção x- e y- respectivamente (m/s);

ξ, η = coordenadas no sistema cartesiano;

Q = contribuições por unidade de área devido à fonte ou sumidouro de água, precipitação e evaporação.

Os termos numerados na Equação da continuidade representam:

*1 – Gradiente de nível d'água em função do tempo;

*2 – Gradiente de descarga específica na direção x;

*3 – Gradiente de descarga específica na direção y.

As equações do momentum na direção horizontal são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} \\ - fv = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\xi\xi}} P\xi + F\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M\xi \end{aligned}$$

e:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} \\ + fu = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\eta\eta}} P\eta + F\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M\eta \end{aligned}$$

Onde:

u, v = velocidade do fluxo nas direções ξ e η respectivamente (m/s);

σ = coordenada vertical;

f = parâmetro de Coriolis (1/s);

ρ_0 = densidade inicial da água (kg/m³);

v_v = coeficiente de viscosidade cinemática (m²/s);

$F\xi$ e $F\eta$ = desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds;

$P\xi$ e $P\eta$ = gradientes de pressão baroclínica;

$M\xi$ e $M\eta$ = contribuições devido a fontes externas;

ω = velocidade do fluxo na direção z (m/s);

Na superfície o efeito da precipitação e evaporação é levado em consideração. A velocidade vertical ω é definida nas superfícies σ . As velocidades verticais w (em sua “concepção física”), no sistema de coordenadas cartesianas, não são consideradas nas equações do modelo. Sendo que, essas velocidades podem ser expressas em função das velocidades horizontais (u e v), profundidade da coluna d’água (H), elevação do nível d’água (ζ) e velocidade vertical (ω).

O transporte de sedimentos em suspensão na coluna d’água é calculado usando a equação de advecção-difusão na sua forma tridimensional, da mesma forma que constituintes conservativos, como salinidade e calor, com algumas diferenças como: fluxo de sedimento entre o fundo e a coluna d’água e velocidade de queda do sedimento sobre a ação da gravidade, ou até efeitos da influência do sedimento na densidade da água e a redução turbulenta.

4.4.2 Módulo de Transporte de Sedimentos

Além do módulo hidrodinâmico, também compreende o modelo hidrodinâmico o módulo de transporte de sedimentos e o de morfologia. O módulo FLOW se comunica com os módulos de transporte de sedimentos e morfologia alternadamente, a cada passo de tempo. Eles calculam assim, o transporte que ocorre em suspensão e o transporte junto ao fundo para sedimentos coesivos e não coesivos.

A equação da advecção-difusão integrada na vertical é usada para o cálculo do transporte de sedimento em suspensão. Mudanças na batimetria de fundo, provocadas pela constante erosão/deposição de sedimentos, podem modificar o campo de velocidades. Estes processos dependem do tipo de sedimento envolvido, especialmente argila e areia, pois diferentes fórmulas serão utilizadas para os cálculos das velocidades de queda, erosão e deposição.

A equação da advecção-difusão é dada por:

$$\frac{\partial c^{(l)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(l)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(l)}}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s^{(l)})c^{(l)}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial z} \right) = 0$$

Onde:

$c^{(l)}$ = fração da concentração de sedimento (l) (kg/m³);

u , v e w = componentes de velocidade do fluxo nas 3 direções, x , y e z (m/s);

$\varepsilon_{s,x}^{(l)}$, $\varepsilon_{s,y}^{(l)}$ e $\varepsilon_{s,z}^{(l)}$ = coeficientes de viscosidade da fração de sedimento (l) em suspensão (m²/s);

$w_s^{(l)}$ = velocidade de decantação da fração de sedimento (l) (m/s).

4.4.3 Módulo de Ondas

O WAVE é o módulo de ondas do DELFT3D que simula basicamente a propagação de ondas; geração de onda a partir o vento; interações não lineares entre onda-onda e dissipação de energia para uma determinada topografia de fundo, campo de vento, nível de água e campos de correntes, em águas rasas intermediárias e profundas. Neste módulo é implementado o modelo de terceira geração SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) que leva em consideração a evolução de ondas aleatórias de curto comprimento de onda em regiões costeiras de águas rasas, intermediárias e profundas com influência de correntes, considerando a refração devido a estas correntes e variações de batimetria, reproduzindo também processos de difração, geração de ondas pelo vento, quebra induzida pelo fundo e pela corrente. Suas formulações se aplicam aos processos de ondas em águas rasas, como fricção com o fundo, difração e quebra de onda.

Sua principal característica é a interação dinâmica com o módulo hidrodinâmico Delft3D – FLOW, interagindo onda-corrente. Por isso o efeito das ondas em correntes e o efeito do fluxo em ondas são contabilizados.

O modelo SWAN se baseia na equação discreta do balanço de ação espectral, sendo totalmente espectral em todas as direções e frequências. Nele as ondas são descritas pela densidade espectral bidimensional da ação de ondas $N(\sigma, \theta)$ (conservada em presença de correntes), inclusive quando fenômenos não lineares predominam. As

variáveis independentes são a frequência relativa σ (observada em um amplo plano de referência se movendo com a velocidade da corrente) e a direção da onda θ (direção normal às cristas de ondas de cada componente espectral), sendo que a densidade de ação é igual à densidade de energia dividida pela frequência relativa.

A difração implementada no SWAN é a aproximação da refração-difração com fase desacoplada para modelos de ondas espectrais. A equação do balanço da ação espectral é dada por:

$$\begin{array}{cccccc} \frac{\partial N(\sigma, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma} \\ *1 & *2 & *3 & *4 & *5 & *6 \end{array}$$

Onde:

$N(\sigma, \theta)$ = densidade de ação da onda;

$S(\sigma, \theta)$ = fonte/sumidouro em termos de densidade de energia;

x, y = distância em x e y (m);

$C_{x,y,\sigma,\theta}$ = velocidade de propagação para x, y, σ, θ (m/s);

σ = frequência relativa (Hz);

θ = direção de onda ($^{\circ}$).

Os termos numerados na Equação (6) representam:

*1 – Taxa local de variação de ação no tempo;

*2 e *3 – Propagação de ação no espaço, com velocidades de propagação $c_{g,x}$ e $c_{g,y}$ nos eixos x e y , respectivamente;

*4 – Refração induzida pela profundidade e por correntes, com velocidade de propagação c_{θ} no eixo θ ;

*5 – Mudança da frequência relativa devido a variações na profundidade e nas correntes;

*6 – Termo fonte em relação à densidade de energia representando os efeitos de geração, dissipação e interação não linear onda-onda.

Em resumo, os processos hidrodinâmicos e de ondas, alimentam o módulo de transporte de sedimentos, que suporta transporte por suspensão e por carga de tração para sedimentos não coesivos e suspensão para sedimentos coesivos. À medida que o cálculo do transporte por tração é solucionado pela transferência de momento do fluido para o sedimento, aquele referente à carga em suspensão é formulado por equações de advecção e difusão.

4.4.4 Aplicação do Modelo

4.4.4.1 Domínio do Modelo e Confeção da Grade Numérica

Antes da grade numérica ser gerada, deve ser realizada a definição do domínio que ela vai abranger. Para que o modelo numérico reproduza os fenômenos que ocorrem na região de estudo de forma mais realística, optou-se utilizar como limites do domínio praticamente toda a Baía de Ilha Grande.

O modelo numérico possibilita o uso de uma ou mais grades numéricas para acompanhar o contorno físico da região que será simulada. Mas, alguns pontos devem ser levados em consideração durante a geração das grades. Ela deve ser refinada o suficiente para conseguir descrever as mudanças que ocorrem no ambiente, porém seu refinamento não deve ser tão denso, pois isto pode aumentar significativamente o tempo de simulação.

Através do módulo de geração e edição de grades, o RGFGRID do DELFT3D, foram criadas duas malhas numéricas distintas (Figura 10), uma para o módulo hidrodinâmico e outra para o módulo de ondas, sendo que as duas foram geradas e editadas em coordenadas cartesianas.

De forma a evitar geração e propagação de ruídos numéricos, as grades curvilíneas, como já mencionado, devem cumprir certos requisitos. Desta forma sua qualidade pode ser verificada através de algumas de suas propriedades como ortogonalidade (proporcional ao cosseno dos ângulos entre as linhas da grade na direção M e N), suavidade (variação do tamanho dos elementos da grade nas direções M e N) e resolução (razão do tamanho da área da célula), sendo que o manual do usuário sugere valores máximos para estes parâmetros. Desta forma, as duas grades

numéricas utilizadas nas simulações atendem os limites destes parâmetros descritos no Manual do usuário, DELFT3D – RGFGGRID (Deltares, 2014).

A grade hidrodinâmica abrange uma área menor e é a de maior resolução, apresenta resolução máxima de 355 metros e mínima de 81 metros e possui dimensão de 268 x 535. Já a grade para o módulo de ondas inclui uma área maior, porém menor resolução, possuindo resolução máxima de 2819 metros e mínima de 782 metros, com dimensão de 55 x 67.

Figura 10: Malhas numéricas utilizadas no modelo numérico, sendo a menor e mais costeira a grade do modelo hidrodinâmico e a maior, com abrangência mais oceânica a do modelo de ondas. O traçado vermelho demonstra os contornos abertos do domínio hidrodinâmico, e o detalhe do refinamento da grade na região do Saco do Mamanguá observa-se ao lado, assim como os principais rios localizados na região.

4.4.4.2 Interpolação da Batimetria

A batimetria da região de estudo, foi interpolada através do módulo QUICKIN – módulo gerador de batimetria do DELFT3D, pelo método da triangulação linear.

Este método de interpolação é considerado o mais adequado para um conjunto de dados que possui uma resolução parecida com a resolução da grade numérica.

Desta forma, foi interpolada uma batimetria para grade hidrodinâmica (Figura 11) e uma para a grade de ondas (Figura 12). Para tanto, foram utilizados os pontos batimétricos coletados em campo, os digitalizados de cartas náuticas, e os obtidos do GEBCO, como descrito anteriormente.

Figura 11: Batimetria utilizada para o domínio hidrodinâmico.

Figura 12: Batimetria utilizada para o domínio de ondas.

4.4.4.3 Condições de Contorno

As condições de fronteira podem ser de dois tipos. Contorno aberto, sendo os limites do domínio da modelagem que estão ligados ao oceano, portanto é nele em que se impõem as forçantes de elevação da superfície livre, e contorno fechado, sendo os contornos de terra, geralmente representando margens do corpo de água e possíveis pontos de afluxo e efluxo, como rios e estuários.

Desta forma, o domínio hidrodinâmico possui dois contornos abertos, um ao norte de Ilha Grande e outro ao Sul, que foram forçados pela série temporal de nível de água, registrada pelo ADCP, e pela série temporal de ventos descrita anteriormente. Para a simulação de transporte de sedimentos, no contorno terrestre foram consideradas descargas fluviais de baixa intensidade através de vazões hipotéticas ($2\text{m}^3/\text{s}$) e com descarga de sedimento nos tributários do rio Grande, rio Turvo e rio do Regato, rios muito pequenos e que possuem vazões de pequena intensidade, para simular o comportamento do sedimento oriundo do manguezal localizado ao fundo do

Saco do Mamanguá. As fronteiras configuradas no modelo e os tributários considerados na simulação de transporte de sedimentos estão ilustrados na Figura 10.

Diferentemente do modelo hidrodinâmico, em que os contornos são delimitados em referência as células da grade numérica, o modelo de ondas possui delimitação de fronteiras baseada na orientação da grade numérica, onde serão propagados os casos de onda. Sendo assim, a fronteira do domínio de ondas, foi determinada com orientação de sudeste.

4.4.4.4 Configuração do Modelo Hidrodinâmico e de Transporte de Sedimentos

Diversos testes de sensibilidade foram realizados até o modelo se estabilizar e possíveis fontes de ruídos serem eliminadas. Os parâmetros básicos utilizados como dados de entrada no modelo hidrodinâmico após os testes de sensibilidade foram, fração de sedimento, intervalo de tempo de simulação, densidade da água e do ar, rugosidade e viscosidade.

Em relação às frações de sedimento, foram utilizadas como entrada no modelo, sedimento com frações características de areia fina e silte. Pela falta de dados do tamanho médio e características físicas dos sedimentos encontrados no Saco do Mamanguá, foram selecionados tamanhos pré-especificados destes.

De acordo com Van Rijn (1993), a taxa de erosão dos sedimentos é um valor constante dependente da composição do mineral. Para lamas naturais pouco consolidadas, os valores característicos desta taxa estão entre $0,00001$ a $0,0005 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-2}$. Este autor apresentou resultados de tensões tangenciais críticas de erosão para sedimentos naturais com valores de $0,2 \text{ N/m}^2$. Sendo que as partículas de sedimentos e trechos da superfície do leito serão erodidas quando a tensão tangencial aplicada no leito exceder o valor da tensão tangencial crítica de erosão, que depende das características do material em questão e da estrutura do leito. Em relação à tensão tangencial crítica de deposição, o mesmo autor definiu valores de $0,06$, a $0,1 \text{ N/m}^2$. Em que, a deposição dos sedimentos irá ocorrer quando a tensão tangencial no leito não se encontra em um estado suficiente para ressuspender as partículas que entram em contato com o leito.

A simulação foi realizada com silte e areia depositados no fundo e distribuídos em uma camada uniforme de sedimentos de 0,05 metros para o silte e 5 metros para areia. A condição inicial de concentração de sedimento na coluna d'água foi 2650 g/l tanto para o silte em suspensão quanto para a areia. Foram consideradas também alterações na batimetria durante a simulação.

As características dos materiais sedimentares utilizados no presente trabalho podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características das frações de sedimento utilizadas no modelo

Fração	Densidade do leito (kg/m ³)	Densidade específica (kg/m ³)	Diâmetro (μm)	Tensão tangencial crítica de erosão (N/m ²)	Tensão tangencial crítica de deposição (N/m ²)	Taxa de erosão (kg/m ² /s)
Silte	500*	2650*	-	0,08	0,2	0,0001
Areia Fina	1600*	2650*	64	-	-	-

*Valores correspondentes ao padrão para sedimentos arenosos e silte.

O intervalo de tempo do modelo, ou seja, o passo de tempo para que cada equação seja realizada, foi determinado através do número de *Courant* (*Cr*). Esta variável adimensional indica as instabilidades do modelo, e quanto menor seu valor, menor é o erro do cálculo, porém maior tempo computacional. O número de *Cr* é calculado através da relação:

$$Cr = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}}$$

Onde:

Δt = intervalo de tempo;

H = profundidade local;

$\{\Delta x, \Delta y\}$ = termo que expressa o tamanho da célula em cada componente direcional da grade numérica;

g = gravidade.

De acordo com o Manual do modelo hidrodinâmico (Deltares, 2013), o valor de Cr não deve exceder 10. Este valor permite que o modelo represente bem os resultados com um esforço computacional considerável. Garantindo a eficiência do modelo o valor máximo de Cr foi utilizado para determinar o intervalo de tempo a ser usado em cada elemento da grade. O valor determinado para o intervalo de tempo foi 0,5 minutos (30 segundos).

Os parâmetros físicos constantes para todo o domínio foram:

- Gravidade: 9,81 m/s²;
- Densidade da água: 1024 kg/m³;
- Densidade do ar: 1,185 kg/m³.

Nas condições de contorno do fundo, o valor do coeficiente de rugosidade foi definido nas direções x e y , para a formulação de Chèzy. Sendo que o valor de rugosidade e viscosidade horizontal foram definidos na calibração do modelo, que será descrita na sequência, na seção 5.2.

4.4.4.5 Configuração do Modelo de Ondas

Como descrito anteriormente, o módulo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos comunicam-se com o modelo espectral de ondas SWAN através do módulo WAVE, com processos de interação entre onda e corrente. Assim, dados de batimetria, nível de água, corrente e vento são atualizados em relação ao domínio hidrodinâmico, baseado em intervalos de comunicação.

Os parâmetros de entrada para o modelo de ondas resumem-se em altura significativa (H_s), período de pico (T_p), direção média e espalhamento do espectro

direcional. Em que os dados obtidos a partir da realização do clima de ondas com os dados do WaveWatch III e selecionados como entrada no módulo de ondas podem ser observados na Tabela 3. Nela pode ser observado que foram selecionados três casos de ondas de Sul, dois de Leste e de Sudeste, e um caso extremo para cada uma destas direções, totalizando dez casos de ondas. O SWAN identifica os parâmetros de entrada e os transforma em um espectro padrão de JONSWAP (Booij et al., 1999). Sendo que os parâmetros de comunicação entre os módulos hidrodinâmico e de ondas são batimetria, nível de água e corrente.

Tabela 3: Características dos casos de onda utilizados no presente trabalho.

Direção (°)	Hs (metros)	Tp (segundos)
Sul (S1) – 180	0,85	11,02
Sul (S2) – 180,68	1,26	10,83
Sul (S3) – 181,91	1,73	10,96
Sul (S4) – 183,22	2,22	11,18
Leste (E1) – 95,21	0,84	7,58
Leste (E2) – 98,07	1,21	7,81
Leste (E3) – 86,81	2,71	8,31
Sudeste (SE1) – 135,72	2,70	9,57
Sudeste (SE2) – 135,47	1,25	9,19
Sudeste (SE3) – 135,79	1,71	9,42

Para representar os processos que influenciam na propagação de ondas, o modelo deve conter algumas variáveis para que ocorra a redistribuição de energia de onda. Os principais processos de transformação de ondas em águas rasas, representados no SWAN são: a quebra de onda induzida pela profundidade, que foi

considerada através da especificação dos parâmetros α com valor igual a 1 e parâmetro γ igual a 0,73; a fricção com o fundo que foi introduzida através do coeficiente de JONSWAP com valor de 0,067 e a força de distribuição de energia que foi definida como tensor de radiação.

4.4.5 Experimentos numéricos

Com o modelo calibrado e validado, as simulações foram então realizadas. Para um melhor entendimento da área de interesse, bem como sua hidrodinâmica e transporte de sedimentos, foram realizadas simulações que pudessem avaliar o comportamento da região em relação às forçantes atuantes.

Desta forma para uma melhor observação do comportamento hidrodinâmico e da propagação de ondas na região, o módulo de ondas e o módulo hidrodinâmico foram realizados simultaneamente para cada caso de onda selecionado, sendo que para as dez simulações foram utilizadas a mesma série temporal de dados, condições climáticas e oceanográficas.

A análise do transporte de sedimentos da região foi realizada através de uma simulação com os módulos hidrodinâmicos, de transporte de sedimentos e de ondas combinados, incluindo todos os cenários de ondas, para um melhor entendimento do seu comportamento.

5 RESULTADOS

5.1 DADOS ADQUIRIDOS

5.1.1 Clima de Ondas

Através da série temporal extraída do modelo global de geração de ondas WaveWatch III (NOAA/NCEP), o clima de ondas para a região de interesse foi definido com base em uma análise estatística básica. A Figura 13 apresenta os histogramas direcionais das alturas e períodos de ondas de uma estação próxima à costa, localizada em 23,5°S e 44°W, para os anos de 1979 a 2009.

Figura 13: Histogramas direcionais das alturas significativas (a) e dos períodos de pico (b) de ondas próximas ao Saco do Mamangá referentes aos anos de 1979 a 2009.

Para a definição do clima de ondas, foram classificadas como ondas mais frequentes, as que apresentaram mais que 5% de ocorrência tanto em período quanto em altura de onda para o período de dados analisado, servindo estes de entrada para o modelo numérico. Além destes, foram selecionados três casos de onda que se apresentaram como casos extremos, ou seja, que corresponderam aos casos de maior altura de onda observados no período de análise, sendo selecionado um caso extremo para cada direção de onda mais ocorrente.

Nota-se com base nas observações da Figura 13, Tabela 4 e Tabela 5, referentes aos histogramas direcionais e frequências de ocorrência das ondas para o

período de 30 anos de dados analisados que, o clima de ondas da região próxima ao Saco do Mamanguá é caracterizado por ondas oriundas principalmente de sul (53,19%), sudeste (24,38%) e leste (21,16%), em que as ondas do quadrante sul são as que alcançam maiores períodos e amplitudes. Verifica-se também, que as alturas mais frequentes estão entre 1 e 2 metros (62,96%) e os períodos entre 8 e 12 segundos (61,23%).

Tabela 4: Frequência de ocorrência de ondas em diferentes direções e alturas significativas, referentes aos anos de 1979 a 2009, com destaque nas maiores ocorrências.

Hs/Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL(%)
0-0,5m	-	-	0,06	0,03	0,02	-	-	-	0,11
0,5-1,0m	-	-	5,81	3,92	5,18	0,07	-	-	14,98
1,0-1,5m	-	-	10,84	10,30	16,44	0,35	0,01	-	37,95
1,5m-2,0m	-	-	3,54	6,06	15,25	0,36	-	-	25,21
2,0-2,5m	-	-	0,69	2,72	9,18	0,25	-	-	12,83
2,5-3,0m	-	-	0,17	0,99	4,63	0,13	-	-	5,92
3,0-3,5m	-	-	0,03	0,23	1,79	0,07	-	-	2,13
3,5-4,0m	-	-	0,01	0,09	0,52	0,02	-	-	0,64
4,0-4,5m	-	-	-	0,04	0,16	-	-	-	0,20
4,5-5,0m	-	-	-	-	0,02	-	-	-	0,02
TOTAL (%)	-	0,01	21,16	24,38	53,19	1,24	0,01	0,01	100,00

Tabela 5: Frequência de ocorrência de ondas em diferentes direções e períodos, referentes aos anos de 1979 a 2009, com destaque nas maiores ocorrências.

Tp/Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL(%)
0-2s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-4s	-	-	0,01	-	-	0,04	0,01	0,01	0,07
4-6s	-	-	1,06	0,19	0,37	0,48	-	-	2,11
6-8s	-	-	11,02	4,60	2,77	0,36	-	-	18,75
8-10s	-	-	8,71	12,43	12,10	0,30	-	-	33,54
10-12s	-	-	0,38	5,16	22,09	0,06	-	-	27,69
12-14s	-	-	-	1,64	11,81	-	-	-	13,45
14-16s	-	-	-	0,34	3,29	-	-	-	3,63
16-18s	-	-	-	0,04	0,71	-	-	-	0,76
TOTAL (%)	-	0,01	21,18	24,40	53,15	1,24	0,01	0,01	100,00

5.1.2 Indicativos da Importância do Vento para as Correntes e Caracterização Física do Saco do Mamanguá

Conforme demonstrado pela Figura 14, o campo de ventos de abril apresenta maior ocorrência de ventos oriundos de sudoeste e nordeste e de janeiro oriundos principalmente de norte, nordeste e sul. Sendo que em ambos os meses a velocidade média foi de 3 m/s.

Figura 14: Histogramas direcionais de vento para abril (a) e janeiro (b) de 2014, próximo ao Saco do Mamanguá.

Dados de correntes foram coletados através de um ADCP, na região do Saco do Mamanguá. Os dados foram medidos de metro em metro a cada 30 minutos, em um total de 10 metros, profundidade local no ponto do fundeio.

Para uma melhor compreensão da importância da atuação do vento para a dinâmica das correntes, foi realizada para o registro da Componente V da corrente, uma análise das Funções Ortogonais Empíricas (EOF), também conhecida como Análise de Componentes Principais, uma análise estatística que busca a maior correlação entre um conjunto de variáveis de um dado, sendo utilizada para encontrar padrões de variabilidade, as respectivas variações ao longo do tempo e a importância de cada padrão (Kampel et al., 1996).

De acordo com Lisboa (2015), a análise de EOF é utilizada com frequência em estudos relacionados aos recursos naturais. Em que, para um conjunto de dados distribuídos espacialmente e que constituam uma série temporal, esta análise permitirá extrair os padrões de variabilidade espacial da grandeza exibida na série.

Para uma melhor análise dos dados hidrodinâmicos coletados, as camadas superficiais foram excluídas, uma vez que sofrem uma maior influência da atuação do vento. No diagrama da Figura 15 observamos os fluxos opostos na superfície e no fundo, com uma periodicidade de mais ou menos 1 dia, o que está relacionado provavelmente com o forçamento atmosférico e atuação do vento na coluna de água, que demonstrou uma variabilidade de 38% dos dados.

Figura 15: Padrão das forçantes atmosféricas, presente no registro da Componente V de correntes, obtido pela análise EOF.

Na Figura 16 observam-se os fluxos no mesmo sentido ao longo da coluna de água. Demonstrando uma periodicidade semi-diurna, representando a interação de todas as componentes de maré semi-diurnas, sendo fortemente relacionada às variações da superfície da água, como pode ser observado na Figura 17, que ilustra a comparação destas variações com a elevação da água, confirmando que estas são variações de maré. Além do que, podemos observar também, menores intensidades na quadratura até o dia 13, e maiores intensidades na sizígia a partir do dia 14. Sendo que a análise EOF, resultou que estas explicam 23% da variabilidade dos dados.

Figura 16: Padrão das variações da maré, presente no registro da Componente V de correntes, obtido pela análise EOF.

Figura 17: Comparação da interação das componentes semi-diurnas de maré (tracejado escuro) com as variações de elevação da água (tracejado claro), confirmando que estas são variações de maré. Os dois dados foram colocados na mesma escala para uma melhor comparação.

Na Figura 18, verifica-se as estruturas verticais mais complexas que ocorrem no registro da Componente V, como por exemplo, a variação dos gradiente de densidade, que explicam 16% da variabilidade dos dados.

Figura 18: Estruturas verticais mais complexas que ocorrem no registro da Componente V

De acordo com esta análise conclui-se que durante o período de dados analisados, o vento foi significativamente mais importante que a maré e outras possíveis forçantes para a dinâmica das correntes na região do Saco do Mamanguá.

As Tabela 6, 7 e 8 apresentam a ocorrência da intensidade e direção da corrente superficial, meia água e ao fundo, respectivamente. Na camada superficial, correntes para o quadrante ENE predominam no registro, totalizando 48,37% destes, com maior ocorrência de velocidades entre 0,05 a 0,1 m/s. A maior velocidade observada nesta camada é de 0,43 m/s de NE.

Em meia água correntes para o quadrante SSW totalizam 61,28% dos registros, com maior ocorrência de velocidade entre 0 e 0,1 m/s. A maior velocidade observada no registro é de 0,2 m/s (SW).

No fundo, uma corrente que oscila no eixo NE-SW é observada, porém com maior ocorrência da direção de SW, totalizando 29,45% dos registros. A maior velocidade observada nesta camada é de 0,23 m/s de SW.

Tabela 6: Ocorrência de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá.

Vel/Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
0-0.05 m/s	0,55	2,18	2,73	4,55	1,82	2,18	0,73	-	14,73
0.05-0.1 m/s	0,36	5,09	5,27	3,27	4,91	2,18	0,91	-	22,00
0.1-0.15 m/s	0,18	3,09	4,18	2,00	3,64	2,55	0,36	-	16,00
0.15-0.2 m/s	0,36	1,82	3,09	3,45	4,55	2,55	1,09	-	16,91
0.2-0.25 m/s	0,18	2,55	3,09	2,00	1,64	2,73	0,18	-	12,36
0.25-0.3 m/s	-	4,18	2,55	0,36	0,36	0,36	0,73	-	8,55
0.3-0.35 m/s	-	4,36	0,55	0,18	0,18	0,55	-	-	5,82
0.35-0.4 m/s	-	2,91	0,18	-	-	-	-	-	3,09
0.4-0.45 m/s	-	0,55	-	-	-	-	-	-	0,55
TOTAL (%)	1,64	26,73	21,64	15,82	17,09	13,09	4,00	-	100,00

Tabela 7: Ocorrência de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá.

Vel/Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
0-0.05 m/s	-	2,55	4,91	7,27	7,82	4,36	0,91	0,18	28,00
0.05-0.1 m/s	0,36	3,27	4,91	9,45	15,27	13,64	2,00	0,18	49,09
0.1-0.15 m/s	0,18	-	0,18	2,00	8,00	8,55	-	-	18,91
0.15-0.2 m/s	-	-	-	0,36	2,36	0,91	-	-	3,64
0.2-0.25 m/s	-	-	-	-	0,18	0,18	-	-	0,36
0.25-0.3 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.3-0.35 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.35-0.4 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4-0.45 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL (%)	0,55	5,82	10,00	19,09	33,64	27,64	2,91	0,36	100,00

Tabela 8: Ocorrência de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente ao fundo, referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamangá.

Vel/Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
0-0.05 m/s	0,18	3,09	6,55	8,55	7,09	7,09	2,18	0,36	35,09
0.05-0.1 m/s	0,55	8,55	8,91	6,00	6,55	15,45	2,73	0,18	48,91
0.1-0.15 m/s	-	3,09	1,82	0,36	2,18	5,27	-	-	12,73
0.15-0.2 m/s	-	1,09	-	-	0,36	1,64	-	-	3,09
0.2-0.25 m/s	-	-	-	-	0,18	-	-	-	0,18
0.25-0.3 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.3-0.35 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.35-0.4 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4-0.45 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL (%)	0,73	15,82	17,27	14,91	16,36	29,45	4,91	0,55	100,00

Um histograma dos dados de direção (Figura 19) foi definido para a classificação das correntes de enchente e vazante, levando em consideração a orientação do canal. Desta forma, em função da orientação da linha de costa, é definido que o setor com direções entre 135° e 315° indica as correntes com sentido de enchente e, seu oposto indica sentido de vazante. Observamos na figura que o escoamento não chega a ser bidirecional, porém conseguimos definir dois setores distintos para correntes de enchente e de vazante, em que as correntes de enchente predominam no registro. Assim, estas foram orientadas de acordo com os sinais positivos e negativos, em que, os valores negativos representam a enchente e os positivos a vazante.

Figura 19: Histograma de ocorrência das direções da velocidade da corrente.

A Figura 20, apresenta o comportamento da corrente ao longo da coluna de água referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá, mostrando a velocidade da corrente e suas direções. Os diagramas são compostos por camadas, em que cada camada corresponde a 1 m, totalizando o máximo da profundidade do fundeio (10 m), sendo a camada 1, a superfície e, 10, o fundo. As velocidades das correntes nas camadas superficiais são mais intensas que no fundo, chegando a até 0,7 m/s nas camadas superficiais e variando de 0 a 0,3 m/s ao longo da coluna de água (Figura 20a). As direções de corrente (Figura 20b) variam significativamente ao longo da coluna de água, porém as camadas superficiais apresentam ao longo do tempo maior ocorrência de correntes nordeste e leste, as camadas intermediárias apresentam correntes para sul e sudoeste, e as camadas de fundo maior ocorrência de correntes para leste, sul e sudoeste. É possível observar também que na maior parte do período amostrado, há uma mudança na direção da corrente ao longo de cada dia.

Figura 20: Diagramas ilustrando o comportamento da corrente ao longo da coluna d'água referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá, em que o diagrama superior (a) mostra à velocidade das correntes e o inferior (b) suas direções, sendo a parte superior de cada diagrama a corrente superficial e, a parte inferior a corrente no fundo. Em ambos os diagramas verifica-se o comportamento da elevação da água, através do tracejado da parte superior. No diagrama superior as correntes de enchente são representadas pelos valores negativos e as de vazante pelos positivos.

A principal componente atuante na região do Saco do Mamanguá é a componente longitudinal da corrente, o que pode ser verificado pela orientação

geográfica desta região. A Figura 21 apresenta o comportamento desta componente ao longo do período analisado e a elevação da água para este mesmo período (Figura 21b) e a série temporal do comportamento do vento (Figura 21a). Para uma melhor visualização dos dados, foram excluídas as camadas superficiais, que sofrem uma maior influência da atuação do vento. A Figura 21a ilustra o comportamento do vento da região. Nela observamos que nos dias 11, 12, 14, 15 e 16, ventos mais intensos, superiores a 6 m/s e oriundos de nordeste atuaram na região. Na Figura 21b, que ilustra o comportamento da corrente, podemos verificar que nestes mesmos dias houve uma mistura quase que completa na coluna de água, não havendo mudanças significativas na direção das correntes. Já no período restante dos dados, observamos uma inversão na direção da corrente da superfície para fundo. Sendo que, nos dias 10, 13 e 17 observa-se uma inversão na direção da corrente, da superfície para o fundo, em que correntes de enchente ocorrem na superfície e de vazante no fundo, e nos dias 9, 18, 19 e 20 também observamos mudanças na direção das correntes, ocorrendo na superfície e fundo correntes de vazante e no meio da coluna de água correntes de enchente.

Figura 21: Diagramas ilustrando o comportamento da componente longitudinal da corrente ao longo da coluna d'água referente ao ADCP fundeado no Saco do Mamanguá e do vento ao longo do período de análise, em que o diagrama superior (a) ilustra a velocidade e direção do vento, e o inferior a velocidade da componente longitudinal da corrente, juntamente com o comportamento da elevação da água (b), sendo a parte superior do diagrama de correntes é a corrente superficial e, a parte inferior a corrente no fundo. As correntes de enchente são representadas pelos valores negativos e as de vazante pelos positivos.

Observando as Figura 20 e 21 podemos concluir que, as camadas superficiais apresentam velocidades de corrente maiores que as seguintes devido à atuação do vento que age diretamente na superfície da água. Além disso, não conseguimos

verificar um padrão de direção de correntes influenciado pela maré, fato que pode ser justificado pelo relevante desempenho do vento, que influencia fortemente a dinâmica das correntes. Em que, na maior parte do tempo, a força do vento consegue sobrepor a da maré, fazendo com que a circulação geral da região do Saco do Mamanguá seja mais influenciada pela atuação do vento do que pela da maré, ou seja, a maior parte das correntes está associada a eventos meteorológicos, assim apesar da maré interferir na magnitude, o sentido das correntes é condicionado pela circulação gerada pelo vento, sendo o vento o principal responsável pela direção do fluxo das marés, correntes e formação das ondas, juntamente com a profundidade das águas.

5.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

No processo de implementação de um modelo numérico em determinada região, ele deve passar pelo processo de calibração e validação, de forma a avaliar e quantificar a sua qualidade. A calibração é o processo de ajuste de parâmetros do modelo, de modo a garantir uma melhor concordância entre os resultados medidos e os apresentados pelo modelo. Os parâmetros ajustados são a variação de rugosidade do fundo e do coeficiente de viscosidade. Em que se comparam os dados medidos e os dados simulados pelo modelo após o ajuste desses parâmetros, para o mesmo ponto de coleta e período.

Apesar da reprodução perfeita dos dados ser considerada impossível como consequência das limitações do modelo e erro das medições, um modelo numérico ainda deve ser validado através da comparação de seus resultados com as medições de campo. Desta forma, são utilizados os parâmetros ajustados na calibração, para outro período de dados, e os resultados reproduzidos pelo modelo são comparados com outros dados coletados, para assim verificar se a calibração foi realizada corretamente e se reproduziu fenômenos iguais ou similares aos medidos.

A calibração e validação foram realizadas qualitativamente, através de comparações gráficas, e quantitativamente, através de análises estatísticas. A análise quantitativa foi realizada através do Erro Absoluto Médio Relativo (RMAE) (Tabela 9), descrito por Van Rijn et al. (2003) e através do parâmetro de Skill, descrito por Warner et al. (2005), com os dados de elevação da superfície do mar e corrente.

Para os dados de maré:

$$\text{RMAE} = \frac{\langle |H_{mod} - H_{obs}| - E \rangle}{\langle H_{obs} \rangle}$$

Para os dados de corrente:

$$\text{RMAE} = \frac{\langle |V_{mod} - V_{obs}| - E \rangle}{\langle |V_{obs}| \rangle}$$

Em que $\langle \dots \rangle$ demonstra a média, $|\dots|$ o valor absoluto, *mod* e *obs* são os valores modelados e observados em campo e *E* é o erro do equipamento utilizado nas medidas em campo. O valor de *E* é determinado pelos fabricantes dos equipamentos usados nas coletas de campo. O ADCP, Aquadoop – Nortek apresenta um erro de 0,005 m/s.

Tabela 9: Classificação do RMAE de acordo com Van Rijn et al. (2003).

Classificação	RMAE maré	RMAE corrente
Excelente	< 0,05	< 0,1
Bom	0,05 – 0,1	0,1 – 0,3
Razoável	0,1 – 0,2	0,3 – 0,5
Pobre	0,2 – 0,3	0,5 – 0,7
Ruim	> 0,3	> 0,7

A equação de Skill permanece a mesma para maré e corrente, sendo:

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum |X_{mod} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{mod} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{mod}|)^2}$$

Em que *X* é a variável de interesse e $\bar{X}$ é a média temporal. O parâmetro de Skill varia no intervalo de zero a um, sendo 0 discordância entre os dados observados em campo e os modelados e 1 boa representação entre eles. Henriksen et al. (2003) classificou os intervalos de Skill de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10: Classificação de Skill de acordo com Henriksen et al. (2003).

Classificação	Skill
Excelente	$> 0,85$
Muito bom	$0,65 - 0,85$
Bom	$0,5 - 0,65$
Pobre	$0,2 - 0,5$
Muito pobre	$< 0,2$

5.2.1 Hidrodinâmica

5.2.1.1 Calibração

Conforme mencionado anteriormente, os parâmetros geralmente variados na calibração são a resistência com o fundo (número de Chézy) e o coeficiente de viscosidade. Estes foram então ajustados separadamente, enquanto um se mantinha constante o outro era ajustado e vice-versa. Para a calibração, o período de campanha utilizado foi de 24 a 25 de abril de 2014, em que como condições de contorno foram utilizadas uma série temporal com dados a cada meia hora de nível de água obtidos em campo e um campo de ventos instantâneos, obtidos a cada seis horas. Diversos testes com combinações de rugosidade e viscosidade foram realizados, tanto na variação do nível de água como na velocidade das correntes, até chegar aos melhores valores de concordância entre os dados medidos e os simulados. Para viscosidade foi definido o valor de $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$ e para rugosidade, Chézy igual a $70 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

A Figura 22 apresenta a comparação entre os dados de elevação do nível de água obtidos em campo e os simulados para o período de abril de 2014 e a Figura 23 apresenta a comparação entre a velocidade de corrente medida e simulada para o mesmo período.

Figura 22: Comparação entre os dados de elevação do nível d'água simulados e medidos em abril de 2014.

Figura 23: Comparação entre os dados de velocidade da corrente simulados e medidos em abril de 2014.

Graficamente verifica-se que a elevação do nível foi bem representada pelo modelo. Já a corrente simulada, durante determinados períodos seguiu o mesmo padrão dos dados medidos, porém foi subestimada pelo modelo praticamente ao longo de todo o período. A análise estatística pode ser observada na Tabela 11, onde verifica-se que o modelo para elevação foi classificado como “bom” em relação ao RMAE e “excelente” em relação ao Skill, e para corrente foi classificado como “razoável” em relação ao RMAE e “muito bom” para Skill.

Tabela 11: Resultados estatísticos referentes às variações de maré e magnitude das correntes durante a calibração.

	RMAE	SKILL
Maré	0,13	0,97
Corrente	0,48	0,55

5.2.1.2 Validação

Uma nova simulação foi realizada para validar a qualidade dos dados. Está foi realizada para um período diferente, porém com os mesmos parâmetros e condições de contornos utilizados na calibração. O período de dados em que a validação foi realizada foi referente à campanha de 09 a 20 de janeiro de 2014.

A análise dos resultados da validação seguiu a mesma aplicada na calibração, sendo apresentadas na Figura 24 as comparações de elevação do nível d'água e na Figura 25 a magnitude das correntes, geradas durante a validação do modelo. A Tabela 12 mostra os resultados dos testes estatísticos.

Figura 24: Comparação entre os dados de elevação do nível d'água simulados e medidos em janeiro de 2014.

Figura 25: Comparação entre os dados de velocidade da corrente simulados e medidos em janeiro de 2014.

Tabela 12: Resultados estatísticos referentes às elevações do nível d'água e magnitude das correntes durante a validação.

	RMAE	SKILL
Maré	0,10	0,95
Corrente	0,50	0,48

A comparação entre as séries temporais medidas e simuladas para a elevação (Figura 24) mostra uma boa concordância entre os valores, seguindo o mesmo padrão e magnitude durante toda simulação, mostrando um resultado satisfatório, reproduzindo com bastante precisão a variação de nível observada. De acordo com a Tabela 12, observa-se que ela foi classificada como “boa” de acordo com o RMAE e “excelente” para Skill.

A Figura 25 mostra que as velocidades de corrente simuladas apresentam alguma deficiência em relação à reprodução das velocidades medidas, e diferenças nas

magnitudes, porém as oscilações possuem um padrão semelhante em determinados períodos da simulação.

A Tabela 12 apresenta os resultados estatísticos, mostrando que a corrente foi classificada como “razoável” para o RMAE e “boa” para Skill. Apesar dos parâmetros selecionados na calibração serem os que melhor representaram os dados de campo, a falta de dados de vento, que não foi coletado em campo, assim como um período relativamente curto amostrado, pode ter inserido um erro nas análises relativas à velocidade das correntes. Porém apesar de certas diferenças, admite-se que o modelo reproduz satisfatoriamente o padrão geral de correntes.

Comparando a corrente medida com a simulada, observou-se uma diferença entre elas, conforme demonstrado pelas Figura 23 e 25, em que se observa uma subestimação da corrente simulada. Tal fato ocorre, pois, como este trabalho abrange apenas uma simulação bidimensional, somente a corrente superficial é considerada. Assim, quando a análise estatística é realizada, através da comparação do resultado das simulações com os dados medidos, que englobam dados da corrente na coluna vertical, apresentando valores de velocidade da corrente mais intensos na superfície, devido a influência do vento, e menores valores nas camadas intermediárias e de fundo, é esperado que a análise apresente resultados razoáveis, uma vez que foram considerados tipos de dados distintos, e que graficamente a série temporal dos dados seja desigual, exibindo maiores valores nos dados medidos, como ocorreu durante a calibração e validação da corrente.

5.2.2 Módulo de Transporte de Sedimentos

Na campanha amostral de janeiro de 2014, dados de material em suspensão foram coletados e disponibilizados pelo Laboratório de Nutrientes, Micronutrientes e Traços nos Oceanos - LabNut, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Estes dados foram coletados nos dias 16 e 17 de janeiro através de amostras de água ao longo do Saco do Mamanguá, filtrados e analisados em laboratório. Foram coletadas amostras nas camadas superficiais de cada ponto amostral, em horários aleatórios. Desta forma, os dados serviram para fins comparativos, sendo que através

deles foi verificado se os resultados do modelo de transporte de sedimentos apresentaram resultados semelhantes ao padrão real.

Para a comparação com os resultados do modelo, foram utilizados os dados coletados nos pontos A, B e D (Figura 26). Os resultados da concentração de material em suspensão coletados em campo podem ser observados na Tabela 13.

Figura 26: Localização dos pontos de onde foram extraídas as séries temporais dos resultados dos modelos numéricos. Sendo que, dos pontos A, B, C, D, F e H foram extraídos os resultados do modelo de transporte de sedimentos. Dos pontos A, C, E, F e G foram extraídos as séries temporais dos resultados dos modelos hidrodinâmicos e no ponto A foram extraídos as séries temporais dos resultados das trocas de fluxos e do modelo de ondas.

Tabela 13: Concentração de material em suspensão coletado em campo e disponibilizado pelo LabNut.

Ponto	Dia e horário de coleta	Material Particulado em Suspensão (g/l)
A	16/01/2014 - 15:26	0,96
B	17/01/2014 – 10:03	0,50
D	17/01/2014 – 16:50	0,13

5.3 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

5.3.1 Hidrodinâmica

5.3.1.1 Padrão geral da circulação no interior do Saco do Mamanguá

Foram executadas no total, 10 simulações (uma para caso de onda) para caracterizar os padrões hidrodinâmicos da região de estudo. Como os resultados obtidos ficaram muito semelhantes para cada direção de onda simulada, serão apresentados apenas os resultados de intensidade e direção de cada uma, ou seja, um resultado de Leste, um de Sul e um de Sudeste referentes a um período de enchente (20/01/2014 02:30) e outro de vazante (19/01/2014 21:30). As figuras ilustram os vetores que apontam a direção das correntes e a magnitude da velocidade em metros por segundo, para os dois instantes de maré enchente e vazante selecionados.

Para as ondas incidentes de Leste, Sul e Sudeste (Figura 27, 28 e 29 respectivamente) no instante de maré enchente, a velocidade da corrente é de 0 a 0,2 m/s, se intensificando na entrada e no meio do Saco do Mamanguá (SM) chegando a 0,3 m/s, e ao redor das ilhas Grande e Pequena até ao fundo do SM, chegando a 0,4 m/s. A corrente apresenta um fluxo longitudinal que se bifurca no afunilamento do canal, fluindo para o lado esquerdo e direito do fundo do SM. No instante de vazante, o padrão hidrodinâmico é semelhante, porém um pouco menos intenso, com variações de velocidade em magnitude de 0 a 0,2 m/s, se intensificando na porção leste da entrada do SM, ao redor das ilhas e na seção entre a Ponta do Bananal e a margem

oeste ao fundo do SM, chegando a 0,3 m/s. Nota-se também que a porção oeste do SM, da Ilha Grande ao fundo, apresenta correntes mais intensas que o seu restante.

Figura 27: Magnitude e direção da corrente para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e maré vazante (painel direito), para o caso de onda de Leste 2 (E2), com $H_s = 1,21$, $T_p = 7,81$.

Figura 28: Magnitude e direção da corrente para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e maré vazante (painel direito), para o caso de onda de Sul 2 (S2), com $H_s = 1,26$, $T_p = 10,83$.

Figura 29: Magnitude e direção da corrente para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e maré vazante (painel direito), para o caso de onda de Sudeste2 (SE2), com $H_s = 1,26$, $T_p = 10,83$.

Séries temporais de velocidade da corrente foram extraídas dos pontos A, C, E, F e G (Figura 30), para melhor observação do comportamento da corrente ao longo do SM. Assim, observa-se que não houve diferenças significativas na velocidade da corrente entre os pontos A e C (entrada e meio do SM). Havendo menores velocidades da corrente no fundo do SM e um aumento dela da constrição a frente da Ponta do Bananal, em direção ao fundo do SM (pontos E e G).

Figura 30: Séries temporais de velocidade da corrente extraídas dos pontos A, C, E, F e G.

5.3.1.2 Tempo de residência da água

O tempo de residência de um espaço fluído é o tempo médio de permanência de uma partícula fluída dentro deste espaço. No módulo hidrodinâmico – FLOW foi criada uma distribuição preliminar de partículas ao longo do Saco do Mamanguá, sendo que o modelo entende esta partícula como um traçador que é transportado de acordo com a dinâmica do ambiente. Desta forma, quando uma partícula sai do limite definido na região de interesse, tem-se o tempo de residência das águas regionais.

Ao todo, foram lançadas 75 partículas na camada superficial ao longo do SM (Figura 31) com o intuito de determinar áreas de maior ou menor dinâmica e

estimativas do tempo de residência no Saco do Mamanguá. As partículas foram lançadas na simulação do transporte de sedimentos, que foi forçado com o nível de água, vento e os diferentes casos de onda para um período de 20 dias.

Figura 31: Localização em que as partículas foram lançadas ao longo do Saco do Mamanguá, com os setores de entrada, meio e fundo delimitados pelo tracejado vermelho.

As partículas foram lançadas ao longo de todo Saco do Mamanguá (Figura 32). Ao longo da simulação as partículas percorreram praticamente toda a região, mas nem todas chegaram a sair do SM. De forma a sumarizar os resultados, o SM foi setorizado, como mostra a Figura 31, dividido em fundo, meio e entrada. Assim, são apresentados apenas o comportamento geral de uma partícula que sai do SM em cada um dos setores no período analisado, com exceção do setor de entrada que apresentou uma maior quantidade de partículas exportadas, sendo apresentados os resultados de uma partícula lançada nesta região na margem leste, oeste e ao meio das duas. Os

resultados de todas as partículas que saem do SM podem ser visualizados nos Anexos, Figuras 1A a 8A.

Como consequência da baixa dinâmica local, apenas 20 partículas deixam o SM. Dessas, 10 foram lançadas na margem leste, cinco na margem oeste e cinco entre ambas as margens do SM, sendo que apenas uma estava localizada no setor do fundo da região, 2 no setor do meio e 17 no setor da entrada.

A maioria das partículas que saíram do SM ao longo do período simulado foram lançadas em regiões menos dinâmicas, principalmente na margem leste da região, porém foram transportadas para regiões mais dinâmicas, até conseguirem sair por completo.

A Figura 32, mostra o trajeto da partícula 16 que foi a única lançada no setor mais ao fundo do SM que conseguiu sair. Ela foi lançada ao fundo pela margem leste, em uma região de baixa hidrodinâmica. Foi transportada até o fundo do Mamanguá, e conseguiu ir subindo através da margem leste, até chegar a Ilha Grande, em uma região mais dinâmica, onde foi transportada para margem oeste, percorrendo o meio e a borda oeste, até sair do Saco do Mamanguá depois de mais de 18 dias.

O comportamento geral do trajeto das partículas lançadas no setor do meio do SM, pode ser verificado através do trajeto percorrido pela partícula 44, observado na Figura 33. Esta partícula foi lançada no setor do meio na margem leste, acima da Ilha Grande, também em uma região de baixa capacidade hidrodinâmica, porém conseguiu atingir uma região mais dinâmica próxima a Ilha Grande, subindo pelo meio do SM e margem leste, até atingir a margem oeste, onde conseguiu sair da região depois de aproximadamente 14 dias.

O comportamento geral das partículas lançadas no setor da entrada, pode ser observado pelos resultados dos trajetos das partículas 53, 57 e 60. O trajeto percorrido pela partícula 53 pode ser observado na Figura 34. Ela foi lançada no setor da entrada, na margem leste em uma região de maior hidrodinâmica, conseguiu atingir a margem oeste onde ficou por alguns dias até voltar para a margem leste, onde conseguiu sair depois de aproximadamente 8 dias. A partícula 57 (Figura 35), disponibilizada para o ambiente também no setor de entrada, porém pela margem oeste em uma região de

maior hidrodinâmica, atravessou o Saco do Mamanguá, chegando a borda leste onde conseguiu sair depois de 10 dias. A partícula 60, observada na Figura 36, também foi lançada no setor de entrada, entre as duas margens, no meio do SM porém em uma região mais calma. Ela atingiu primeiramente a margem leste onde ficou por alguns dias, depois foi para margem oeste conseguindo sair depois de 18 dias.

As partículas que não conseguiram sair do interior do Saco do Mamanguá foram as que foram disponibilizadas para o ambiente nas regiões de maior competência hidrodinâmica, localizadas principalmente ao fundo, no afunilamento e na borda oeste do SM. Desta forma, a maioria delas foi impulsionada para o fundo do Mamanguá, ficando aprisionadas nestas regiões, não encontrando capacidade hidrodinâmica para saírem ou chegar perto da entrada do SM, já que o fluxo local força um aprisionamento de água, consequentemente de partículas. O restante das partículas que também não conseguiram sair, mas foram disponibilizadas em regiões de menor hidrodinâmica, foram transportadas para as regiões mais dinâmicas, fazendo com que estas não encontrassem capacidade de deixar a região.

Conclui-se então que o tempo de residência do Saco do Mamanguá, durante o período de análise e com as condições meteorológicas e oceanográficas encontradas neste mesmo período foi de aproximadamente 18 dias, conclusão esta obtida através do trajeto da partícula 16, já que apesar das partículas lançadas ao fundo da região não encontrarem capacidade para sair, esta foi a única lançada mais próxima ao fundo, que percorreu toda a extensão do SM, inclusive passando pelas regiões mais adentro.

Outra simulação para analisar o tempo de residência do Saco do Mamanguá foi realizada com as mesmas forçantes hidrodinâmicas utilizadas anteriormente, porém com um vento constante e favorável para a exportação de partículas, de sudoeste e com 6 m/s, em todo o domínio e durante todo o período de análise, com as mesmas localizações de despejo de partículas utilizados anteriormente.

Os resultados podem ser visualizados nos Anexos, das Figuras 9A a 27A. Eles mostraram que um número maior de partículas (36) conseguiu sair do interior do SM, mesmo nas regiões de maior hidrodinâmica. Além disso, o trajeto das partículas se mostrou bem diferente, demonstrando uma maior tendência a sair da região, e não um aprisionamento ou propensão a permanecer mais adentro do SM, fatos estes que

podem ser justificados graças a atuação do vento que favoreceu a saída da maioria das partículas.

Figura 32: Trajeto da partícula 16, a única lançada no setor de fundo que saiu do Saco do Mamanguá, depois de mais de 18 dias.

Figura 33: Trajeto da partícula 44 lançada no setor do meio do SM e na margem leste, saindo depois de aproximadamente 14 dias.

Figura 34: Trajeto da partícula 53, lançada na margem leste do setor de entrada, que saiu do Saco do Mamanguá em aproximadamente 8 dias.

Figura 35: Trajeto da partícula 57, lançada na margem oeste do setor de entrada, saindo do Saco do Mamanguá depois de mais de 10 dias.

Figura 36: Trajeto da partícula 60, lançada no setor de entrada no meio das margens leste e oeste, saindo do SM depois de 18 dias.

5.3.1.3 Troca de Fluxos

De acordo com Miranda (2012), as trocas de fluxos podem ser definidas como o transporte de volume e de massa que percorre através de uma seção transversal em uma unidade de tempo. Desta forma foi obtido através do resultado da simulação de transporte de sedimentos, o transporte de volume e de massa em uma seção transversal (Figura 37) localizada na entrada do Saco do Mamanguá (Ponto A - Figura 26), através da extração da descarga instantânea e cumulativa de água e sedimento em suspensão da região, com o objetivo de obter informações sobre a importação e exportação de material para o sistema.

Figura 37: Seção transversal do ponto A localizado na entrada do Saco do Mamanguá, de onde foram extraídos os resultados do transporte de volume e de massa.

O comportamento do fluxo de volume de água na entrada do Saco do Mamanguá pode ser observado na Figura 38, considerando que o volume que sai é representado pelos valores positivos, e o que entra pelos valores negativos. Entre os dias 11 e 12/01/2014 uma maior importação de volume de água ocorreu para o sistema, período em que também ocorreram maiores intensidade de ventos do quadrante norte. Nos dias 16 e 18/01/2014 uma maior exportação de volume de água foi evidenciada. Assim, durante o período de análise a descarga instantânea máxima foi de 4048 m³/s durante a vazante e 4312 m³/s durante a enchente. Sendo que, durante os períodos de vazante e enchente a descarga instantânea média foi de aproximadamente 1100 m³/s durante todo o período.

Na Figura 39 observa-se a descarga cumulativa de água do SM. Nela verifica-se que o volume que sai de água é superior ao volume que entra para o sistema, sendo que durante o período analisado e nas condições observadas neste período, a descarga cumulativa média de água importada para o sistema foi de 3.273.300 m³ e exportada foi de 6.340.200 m³, ocorrendo alguns picos de maior importação ou exportação influenciados principalmente pela ação do vento.

Figura 38: Descarga instantânea de água (m³/s) na entrada do Saco do Mamangá.

Figura 39: Descarga cumulativa de água (m³) na entrada do Saco do Mamangá.

O comportamento da descarga instantânea de sedimento em suspensão na entrada do Saco do Mamangá pode ser observado na Figura 40. Nela observamos que o volume de sedimento em suspensão que sai do sistema é significativamente maior que o que entra, havendo dois picos de maior exportação de material para o SM durante o dia 12/01/2014, onde houve predominância de ventos oriundos do quadrante sul, que contribuíram para uma maior exportação de volume de sedimentos e durante o dia 17/01/2014. Deste modo, a descarga instantânea máxima de sedimento em suspensão foi de $0,066 \text{ m}^3/\text{s}$ durante a vazante e $0,052 \text{ m}^3/\text{s}$ durante a enchente. Em que, a descarga instantânea média foi de aproximadamente $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ durante ambos os períodos de enchente e vazante.

O comportamento da descarga cumulativa de sedimento em suspensão do SM pode ser visualizado na

Figura 41. Nela verifica-se que durante o período de análise e com as condições físicas encontradas neste período, houve apenas exportação de sedimento em suspensão do SM para o sistema, sendo de em média 122.610 m^3 . Observa-se também que durante os períodos de maior exportação de volume de sedimento durante a vazante, dias 12 e 17/01/2014, por exemplo, uma maior descarga cumulativa é evidenciada, havendo maior exportação de sedimento em suspensão nestes períodos.

Figura 40: Descarga instantânea de sedimento (m³/s) na entrada do Saco do Mamanguá.

Figura 41: Descarga cumulativa de sedimento (m³) na entrada do Saco do Mamanguá.

5.3.2 Ondas

5.3.2.1 Propagação da onda no interior do Saco do Mamanguá

Foi calculada a força de onda através dos dados de ondas que serviram de entrada para o modelo e através dos dados extraídos do modelo (ponto A – Figura 26). A força da onda é calculada através da equação abaixo:

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (\text{W/m})$$

Onde:

ρ = Densidade da água do mar (1.027 kg/m^3);

g = Aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$);

H = Altura significativa da onda (m);

T = Período de pico (s).

A classificação da intensidade da onda com base em suas potências foi realizada por Costa (2015) como pode ser observada na Tabela 14.

Tabela 14: Classificação da intensidade da onda com base em suas potências, de acordo com Costa (2015).

Intensidade	Força da onda (W/m)
Extrema	$P \geq 50.000$
Intensa	$50.000 > P \geq 40.000$
Forte	$40.000 > P \geq 30.000$
Moderada	$30.000 > P \geq 20.000$
Fraca	$20.000 > P \geq 10.000$
Calma	$P < 10.000$

A Tabela 15 apresenta a força de onda calculada para todos os casos de onda que serviram de entrada para as simulações, obtidos através do clima de ondas. A força de onda dos dados extraídos do modelo de cada simulação pode ser observada na Tabela 16.

Observando ambas as Tabelas 15 e 16, verifica-se que apesar do clima de ondas obtido em um ponto próximo ao Saco do Mamanguá apresentar diferentes intensidades de onda, indo desde Calmo a Extremo, estas ondas quando chegam ao

SM além de perderem grande parte da sua energia, não conseguem entrar na região, por isso o ambiente é caracterizado como de intensidade Calma.

Tabela 15: Força e intensidade da onda de todos os casos de onda que serviram de entrada para o modelo.

Caso de Onda	Força da Onda (W/m)	Intensidade
E1	5.249	Calmo
E2	11.222	Fraco
E3	59.895	Extremo
S1	7.814	Calmo
S2	16.874	Fraco
S3	32.192	Forte
S4	54.075	Extremo
SE1	68.469	Extremo
SE2	14.092	Fraco
SE3	27.033	Moderado

Tabela 16: Força e intensidade da onda dos dados extraídos das simulações.

Caso de Onda	Força da Onda (W/m)	Intensidade
E1	0,006	Calmo
E2	0,013	Calmo
E3	0,081	Calmo
S1	0,004	Calmo
S2	0,004	Calmo
S3	0,009	Calmo
S4	0,016	Calmo
SE1	0,112	Calmo
SE2	0,023	Calmo
SE3	0,033	Calmo

Os resultados obtidos através das simulações ficaram muito semelhantes para cada direção de onda simulada. Desta forma, serão apresentados apenas os resultados de intensidade e direção de um caso de onda e seu caso extremo para cada direção incidente. Nas figuras podemos verificar os vetores que apontam a direção das ondas e a altura significativa em metros.

Em ambos os casos de onda de Leste (Figura 42), observa-se que as ondas que chegam ao Saco do Mamanguá vão perdendo energia ao entrar no canal. Elas perdem energia anteriormente, quando se aproximam da costa e atingem a Ponta do Buraco sofrendo difração, chegando quase perpendiculares à costa. No caso de onda E2, as ondas atingem a costa com uma altura média de 0,15 m, que vai reduzindo até sua total dissipação de energia. Pequenas variações de altura significativa são observadas apresentando uma média ao longo do SM de 0,09 m e período médio de 8 s. No caso

E3, que é o caso extremo para esta direção, observamos que as ondas conseguem adentrar um pouco mais no Saco do Mamangá. Estas ondas chegam com uma altura de 0,3 m e vão perdendo energia até chegarem a uma média de 0,10 m e 9,5 s ao longo do canal.

Os casos de onda de Sul (Figura 43) são os menos significativos em termos de altura de onda. Estas ondas atingem o SM com uma altura média de 0,1 m e praticamente não conseguem entrar no canal. Para o Caso S3, as ondas que entram permanecem com uma altura média de 0,03 m e período de onda de 11,8 s e no Caso S4 com uma altura média de 0,04 m e período de 12,2 s ao longo do canal.

Figura 42: Direção e altura significativa de onda, para o caso de onda Leste 2 – E2 (painel esquerdo), com $H_s = 1,2$, $T_p = 7,8$ e para o caso de onda Leste 3 – E3 (painel direito), com $H_s = 2,7$ e $T_p = 8,3$.

Figura 43: Direção e altura significativa de onda, para o caso de onda Sul 3 – S3 (painel esquerdo), com $H_s = 1,7$, $T_p = 10,9$ e para o caso de onda Sul 4 – S4 (painel direito), com $H_s = 2,2$ e $T_p = 11,2$.

Os casos de onda de Sudeste (Figura 44) são os que apresentam maiores alturas de onda comparadas às demais. No caso SE2 as ondas atingem o Saco do Mamangá com uma altura de onda média de 0,16 m e conseguem penetrar no canal até total dissipação de energia, permanecendo com uma altura média de 0,05 m e período médio de 9,7 s ao longo do canal. No caso extremo SE1, as ondas atingem o SM com uma altura de onda média de 0,3 m e conseguem penetrar mais no canal, permanecendo com uma altura média de 0,1 m e período de 10,9 s, até sua total dissipação de energia.

Figura 44: Direção e altura significativa de onda, para o caso de onda Sudeste 2 – SE2 (painel esquerdo), com $H_s = 1,2$, $T_p = 9,2$ e para o caso de onda Sudeste 1– SE1 (painel direito), com $H_s = 2,7$ e $T_p = 9,6$.

Para uma completa visualização das alturas significativas de todos os casos de ondas, séries temporais destas foram extraídas em um ponto localizado próximo a entrada do Saco do Mamanguá (ponto A - Figura 26). A Figura 45 ilustra as diferenças de altura significativa de onda para todos os casos de onda.

Figura 45: Séries temporais de altura significativa de onda extraídas do A para todos os casos de onda.

Como comentado anteriormente, o vento é o principal responsável pela dinâmica do SM. Desta forma, como atua diretamente na superfície da água, geram ondas de vento. As ondas geradas pelo vento são formadas pela transferência de energia do vento para água, crescendo a partir de ondas capilares. Assim, durante a campanha de janeiro de 2014, dados de ondas também foram coletados através do ADCP, no mesmo ponto do fundeio em que foram coletados os dados de nível de água e corrente.

A análise destes dados pode ser verificada na Figura 46, em que se observa o comportamento da altura significativa de onda, suas direções, e períodos durante o período de análise. Assim, nota-se que as alturas de ondas mantiveram-se baixas durante todo o período, apresentando uma média de 0,1 m. No dia 11/01/2014 ocorreu uma altura máxima de 0,2 m e, mínima de 0,05 m nos dias 17 e 18/01/2014. Sendo que estas alturas coincidem com a intensidade do vento demonstrado na Figura 21 – página 57, que apresentou maiores intensidades no dia 12 e velocidades menos intensas nos dias 17 e 18/01/2014. Durante todo o período ocorreram ondas oriundas principalmente do quadrante norte, sendo a maioria nordeste, com períodos médios de 5 s.

Figura 46: Ilustra o comportamento da altura significativa de onda, histogramas direcionais das alturas significativas (b) e dos períodos de pico (c) de ondas no Saco do Mamanguá referente ao período analisado em janeiro de 2014.

5.3.3 Transporte de Sedimentos

Devido à baixa dinâmica e granulometria da região os experimentos numéricos mostram que não existe a remobilização dos sedimentos de fundo. O transporte de sedimentos que ocorre no SM é o de sedimentos em suspensão (tamanho silte), apresentado através da análise do resultado das simulações.

Foram realizados diversos testes para a análise do transporte de sedimentos da região de interesse. Testes com sedimentos lançados apenas ao longo das fronteiras abertas do modelo hidrodinâmico mostram, que a areia não é transportada até o Saco do Mamanguá durante o período de análise, sendo grãos com tamanho silte os únicos

com capacidade de transporte. O segundo experimento inclui aporte de material sedimentar através das fronteiras abertas e no manguezal localizado ao fundo do SM, em que foram lançados silte e areia através dos três pequenos rios (Figura 10, página 40) existentes na região. Não existem informações da descarga desses rios, sendo aqui considerada, uma vazão de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, compatível com as suas dimensões.

Para uma análise quantitativa e comparativa do transporte de sedimentos no SM, seis pontos foram definidos para a extração das séries temporais das concentrações de sedimentos em suspensão (Figura 26, página 69). As Figuras 47 a 52 mostram a concentração da fração silte em suspensão nas diferentes posições.

Na Figura 47, observamos a série temporal de concentração de silte em suspensão para o ponto A, localizado na entrada do Saco do Mamanguá. Nela verificam-se picos de menor concentração de sedimentos nos primeiros dias de simulação, indo de $0,0005$ a $0,005 \text{ g/l}$. A concentração vai aumentando com o passar do tempo, chegando à $0,008 \text{ g/l}$ nos últimos dias de simulação.

O ponto B (Figura 48), localizado próximo à entrada do SM apresenta concentração de aproximadamente $0,006 \text{ g/l}$ no início da simulação, chegando a $0,011 \text{ g/l}$ no terceiro dia de simulação. Esta concentração vai diminuindo, porém apresenta picos ao longo da simulação, onde se mantém próxima de $0,008 \text{ g/l}$.

Praticamente no centro do SM, encontra-se o ponto C (Figura 49). Nele a concentração de silte em suspensão inicia com aproximadamente $0,002 \text{ g/l}$ e vai diminuindo chegando a muito próximo de zero no dia 12, onde atinge um pico de $0,008 \text{ g/l}$, voltando a diminuir até o fim da simulação.

A Figura 50 ilustra o comportamento da concentração de silte em suspensão no ponto D, que fica localizado abaixo da Ilha Pequena. Nele a concentração se inicia com aproximadamente $0,5 \text{ g/l}$ de silte, se mantendo entre 0 e $0,4 \text{ g/l}$ até o dia 16, que apresenta um pico de $1,8 \text{ g/l}$, voltando a diminuir ficando próxima de zero até o fim da simulação.

Ao fundo do SM ficam localizados os pontos F (Figura 51) e H (Figura 52). Nos dois pontos o padrão de concentração de silte em suspensão é muito semelhante, porém seus valores são diferentes, sendo que o ponto F apresenta maiores

concentrações de silte em suspensão do que o ponto H. Começando com 0,7 e diminuindo para 0,2 g/l no fim da simulação do ponto F. Já o ponto H inicia com 0,2 e chega a 0,9 g/l ao fim da simulação.

De um modo geral podemos observar que o silte apresentou maiores concentrações nos pontos D e F, e menores concentrações nos pontos A, B e C. Sendo que todos os pontos começaram com menores concentrações de silte em suspensão, que foram aumentando até o fim da simulação, com exceção dos pontos D e F que começaram com maiores concentrações no início e foram diminuindo até o fim da simulação.

Figura 47: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto A.

Figura 48: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto B.

Figura 49: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto C.

Figura 50: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto D.

Figura 51: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto F.

Figura 52: Série temporal de concentração de silte em suspensão (g/l) para o ponto H.

Comparando os resultados das concentrações de silte em suspensão com os dados coletados em campo, verifica-se que o modelo subestimou os resultados já que apresentou concentrações menores que as coletadas nos mesmos pontos e horários, como observado na Tabela 17, exceto no ponto D que apresentou na simulação um valor superior de silte em suspensão em relação ao coletado em campo.

Tabela 17: Comparação da concentração de material articulado em suspensão (MPS) coletado em campo e gerada pelo modelo de transporte de sedimentos.

Ponto	Dia e horário de coleta	MPS medido (g/l)	MPS simulado (g/l)
A	16/01/2014 - 15:26	0,96	0,002
B	17/01/2014 – 10:03	0,50	0,003
D	17/01/2014 – 16:50	0,13	0,18

As figuras a seguir apresentam o comportamento do transporte de silte em suspensão ao longo do Saco do Mamanguá. Sendo que o padrão de transporte ao longo

do tempo em todos os pontos apresentou grande semelhança com o padrão da concentração de silte em suspensão apresentada anteriormente.

Na Figura 53 podemos observar a distribuição do transporte de silte em suspensão no ponto A. Nela verificamos que o transporte se inicia com aproximadamente $0,0000005 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ de silte em suspensão, diminuindo a zero e apresentando um pico no dia 12, voltando a diminuir e se mantendo assim até o dia 17, onde volta a aumentar até o fim da simulação.

No ponto B (Figura 54) e C (Figura 55), o transporte de silte em suspensão é semelhante ao do ponto A, apresentando o mesmo padrão, porém um valor menor no pico que ocorre no dia 12.

No ponto D (Figura 56) o transporte se inicia com aproximadamente $0,00002 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ de silte em suspensão aumentando no segundo dia de simulação, apresentando oscilações ao longo do tempo até o dia 17, onde volta a diminuir se mantendo próximo de zero até o fim da simulação.

A distribuição do transporte de silte em suspensão do ponto F pode ser observada na Figura 57. Nela verifica-se que o transporte se mantém baixo, com uma média de $0,00001 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ até o fim da simulação, apresentando um pico apenas no dia 14.

No fundo do SM, no ponto H (Figura 58), o transporte de silte em suspensão continua baixo. Sendo que, no início do período de simulação o transporte é de aproximadamente $0,00001 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, chegando a $0,00008 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ até o fim da simulação.

Figura 53: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) para o ponto A.

Figura 54: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) para o ponto B.

Figura 55: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) para o ponto C.

Figura 56: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) para o ponto D.

Figura 57: Série temporal de transporte de silte em suspensão ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) para o ponto F.

Figura 58 Série temporal de transporte de silte em suspensão ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) para o ponto H.

Analisando os resultados das concentrações de silte e do transporte de silte em suspensão ao longo do Saco do Mamanguá durante o período de análise. Verificou-se que, as maiores concentrações de silte em suspensão ocorreram ao fundo do SM. E as menores concentrações ocorreram próximo a entrada e no meio do SM. Em relação ao transporte de silte em suspensão, maiores capacidades de transporte foram apresentadas no início do fundo e no fundo do SM. E menores valores de transporte de silte em suspensão na entrada e no meio do Saco do Mamanguá, valores estes compatíveis com as regiões de maior e menor capacidade hidrodinâmica. O sedimento fino em suspensão presente na região é disponibilizado principalmente pelos afluentes locais, pelo manguezal localizado na região e durante os períodos de maior pluviosidade, porém baixas concentrações deste sedimento em suspensão são encontradas ao longo do SM devido à baixa hidrodinâmica e a ocorrência de baixa velocidade das correntes, favorecendo desta forma a deposição da maior parte dos sedimentos finos que se encontram em suspensão.

Para uma melhor compreensão da hidrodinâmica e da dinâmica dos sedimentos da região do Saco do Mamanguá, dados da região foram coletados e analisados e um modelo hidrodinâmico bidimensional, de ondas e de transporte de sedimentos, em condições reais de maré, vento e diferentes condições de ondas foram aplicados. O presente trabalho apresenta a primeira avaliação da hidrodinâmica do SM.

De acordo com as análises dos dados medidos em campo, foi verificada que a maré do Saco do Mamanguá pode ser classificada como semi-diurna, ou seja, apresenta duas preamares e duas baixa mares em um ciclo de maré, sendo que a principal componente harmônica de maré é a M2 seguida pela S2. A maré também pode ser classificada a partir do Fator de Forma, que nada mais é do que a razão entre a soma das amplitudes das duas componentes diurnas e a soma das amplitudes das duas principais componentes semi-diurnas (Pond & Pickard, 1983).

Utilizando os valores de amplitude das componentes harmônicas de maré observadas no SM, foi encontrado um fator de forma igual a 0,20, confirmando a maré local como semi-diurna (F entre 0 e 0,25).

O relevo acidentado que circunda o Saco do Mamanguá, com diversos picos e montanhas, influencia o fluxo de ventos da região causando um afunilamento deste, fazendo-o fluir predominantemente no eixo principal da ria. Deste modo, o vento pode ser muito importante para potencializar a hidrodinâmica do SM, durante curtos períodos.

Em função da morfologia do Saco do Mamanguá, a componente transversal das correntes apresentou uma influência praticamente insignificante na região. Assim, analisando os resultados da componente longitudinal das correntes, é possível observar que nas camadas inferiores a velocidade da corrente é menor que nas camadas superiores, sendo que a corrente das camadas superficiais é controlada pelo regime de vento, enquanto as camadas inferiores são predominantemente controladas pela maré e pelos gradientes de densidade.

Ao longo de toda a coluna de água as correntes oscilam no eixo ENE-SSW, com o domínio do vento nas camadas superficiais mais dinâmicas. Porém, quando

ocorre a redução na intensidade nas camadas superficiais, há uma breve inversão da direção da corrente da superfície para o fundo. Na maior parte do período analisado, pelo fato da mínima influência fluvial e pela sobreposição do vento na maré, observa-se uma mistura na coluna de água. As correntes na região são grandemente influenciadas por eventos meteorológicos, em que a maré interfere na magnitude das correntes, porém o vento determina o seu sentido. Exemplo desse fenômeno é apresentado na Figura 21, página 61.

Quando o vento apresenta menores velocidades e é oriundo do quadrante NNE, as correntes conseguem entrar pela superfície e sair pelo fundo da ria; porém, com ventos mais intensos do quadrante SSW, que ocorrem na maior parte do tempo observado, uma mistura na coluna de água é verificada, onde a atuação do vento consegue sobrepor a da maré, forçando a água a deixar o Saco do Mamanguá. Este mesmo fenômeno foi observado por deCastro et al. (2000) que ao estudar a ria de Pontevedra, localizada no noroeste da Espanha, verificou que ventos mais intensos são capazes de dominar o padrão de correntes superficiais, fazendo com que a velocidade de corrente induzida pelo vento seja superior a induzida pela maré. Desta forma, neste estuário ventos mais intensos também conseguiram forçar a água a sair da região.

Freitas (2014) estudou a produção primária do SM e realizou coletas amostrais da entrada da ria a Ponta do Bananal em janeiro de 2014. As coletas foram realizadas nos dias 9, 10, 18 e 20 de janeiro, coincidindo com o início e final do período da análise deste estudo. O autor detectou uma termoclina bem definida, entre os 4 e 6 metros de profundidade ao longo de todo o perfil longitudinal durante a campanha dos dias 9 e 10, sendo observada uma temperatura máxima de 29 °C em superfície e mínima de 15 °C na camada de fundo. O mesmo padrão de estratificação foi observado para a salinidade, sendo observada uma haloclina bem definida ao longo de todo o perfil, com máximo de 37 psu na sub-superfície e mínimo de 35 na camada superficial. Na campanha dos dias 18 e 20 de janeiro, a zona de mistura estendeu-se até os 14 metros de profundidade, alcançando o fundo nos setores mais internos. A temperatura variou de 28,8 °C na superfície a 16 °C no fundo dos setores mais próximos à entrada do SM. Já a salinidade neste período foi verticalmente homogênea em todos os setores, apresentando variação longitudinal com máximo de 37 na camada de fundo do setor mais próximo a entrada da da ria, e mínimo de 33,5 na superfície do setor mais

interno, próximo a seção entre a Ponta do Bananal e a margem oeste do SM. Estes resultados mostram que deve existir uma circulação gerada pelos gradientes de densidade no período analisado.

Esta estratificação observada por Freitas (2014) de temperatura e salinidade ao longo do Saco do Mamanguá, está associada à presença de uma massa de água com características da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na camada de fundo da Baía de Ilha Grande, também observada por Ambrósio et al. (1991) durante estudos realizados no SM e por Signorini (1980) enquanto estudava a circulação da Baía de Ilha Grande na primavera de 1977. Neste mesmo estudo, foi verificado experimentalmente que parte da circulação da Baía de Ilha Grande pode ser controlada pela atuação do vento, principalmente pelos ventos de SW, que aumentaram a intensidade das correntes da região.

Compreende-se então, que as principais forçantes que influenciam a circulação do Saco do Mamanguá são a ação do vento, a maré e os gradientes de densidade. Porém, as observações mostram o domínio das correntes geradas pelo vento em relação às correntes geradas pela maré e pelos gradientes de densidade. Essas observações corroboram com resultados de Ambrósio et al. (1991 apud Bernardes, 1995), que descrevem o Saco do Mamanguá com características não usuais de sistemas estuarinos, em decorrência das correntes de maré pouco intensas associadas a fraca circulação gravitacional, devida à pequena descarga de água doce, além de ser um ambiente bem misturado, apresentando pequenos gradientes longitudinais de salinidade.

Desta forma a Ria do Saco do Mamanguá pode ser classificada como um ambiente bem misturado e parcialmente estratificado, concordando com o observado por Ambrósio et al. (1991), quando realizavam estudos nessa região durante 1989 e 1990, em que descreveram o SM como um ambiente estuarino vertical e longitudinalmente bem misturado. Dias & Lopes (2006) classificou a Ria de Aveiro da mesma forma. Em que apesar da estratificação da salinidade e temperatura observadas, a região se apresenta como um sistema bem misturado. Como a circulação gravitacional é suprimida pelo aumento da mistura vertical, não se espera que uma circulação gravitacional significativa ocorra na região. Além disso, o mecanismo de advecção e dispersão por cisalhamento do fluxo é o mecanismo dominante em

estuários bem misturados e parcialmente estratificados. Os ventos também afetam o regime hidrodinâmico influenciando os processos de mistura no Saco do Mamanguá, em que geram uma tensão de cisalhamento na superfície da água, produzindo desta forma, correntes superficiais e elevação da superfície da água. Em condições extremas, ventos mais intensos podem induzir determinados padrões de circulação, principalmente em áreas mais rasas, como foi verificado nos resultados dos modelos hidrodinâmicos e também observado por Dias (2006) na Ria de Aveiro.

O modelo aplicado ao SM conseguiu representar satisfatoriamente através da validação, a maré e a corrente. Nas comparações entre dados medidos e modelados, para a maré ele foi classificado como bom de acordo com o RMAE e excelente de acordo com o parâmetro de Skill. Para as correntes, a comparação foi avaliada como razoável de acordo com o RMAE e muito boa de acordo com o Skill. Com base no modelo hidrodinâmico calibrado e validado, foram executados experimentos também com os modelos de propagação de ondas e de transporte de sedimentos.

Como esperado, não foi possível observar diferenças significativas entre os resultados das simulações hidrodinâmicas para os diferentes cenários de onda, que não conseguem se propagar de forma efetiva para dentro do SM. A influência das ondas ocorre apenas na porção externa do SM, porém ondas de vento foram observadas na região e provavelmente ocorrem em toda sua extensão, devido a grande atuação do vento que permite a geração desse tipo de ondulação.

A partir de uma observação geral dos resultados obtidos através do modelo hidrodinâmico verifica-se que os ventos oriundos de N e NE geram correntes longitudinais a ria com sentido S e/ou SW e os ventos provindos de SW, normalmente associados à passagem de sistemas meteorológicos frontais, conduzem as correntes longitudinais para NE. Foi verificada também, uma intensificação das correntes do meio para o fundo do Saco do Mamanguá. Sendo que durante as correntes de enchente há uma intensificação destas na entrada, no meio, ao redor das ilhas Grande e Pequena, na margem oeste destas ilhas até a seção a frente da Ponta do Bananal e desta região ao fundo do Saco do Mamanguá. Durante a vazante, há uma intensificação das correntes ao redor das ilhas e da seção a frente a Ponta do Bananal até o início do fundo do Saco do Mamanguá. Porém, apesar dessa intensificação, as

correntes possuem magnitudes baixas, podendo a região ser considerada como um sistema de baixa energia, corroborando com o observado por Ambrósio et al. (1991).

Efeitos similares de intensificação da velocidade das correntes observadas nas áreas mais rasas desses ambientes corroboram com o observado por Lopes et al. (2007), na Ria de Aveiro. Este autor observou que, quando o vento sopra na direção de enchente, o fluxo impulsionado pelo vento aumenta a fricção na superfície, resultando em uma mudança no fluxo de marés, aumentando o fluxo máximo de enchente e retardando o fluxo máximo de vazante. Os efeitos não lineares induzidos pelos ventos são, portanto, mais pronunciados nas áreas mais rasas, aumentando a intensidade das correntes, principalmente durante as enchentes, como pode ser verificado, sobretudo na seção entre a Ponta do Bananal e a margem oeste do SM e no fundo do Saco do Mamanguá.

Conforme esperado, os resultados das simulações realizadas pelo modelo de ondas, não apresentaram resultados significativos para a região, demonstrando que estas não conseguem se propagar com intensidade no Saco do Mamanguá, não gerando grande influencia na sua hidrodinâmica. Em função de suas características geomorfológicas, o Saco do Mamanguá é uma região bem abrigada e protegida de praticamente todas as direções de ondas incidentes.

Em relação ao comportamento sedimentar da região, verificou-se que durante o período de análise dos dados, o silte apresentou maiores concentrações em suspensão próxima a entrada e a margem direita do fundo do Saco do Mamanguá, e menores concentrações no meio da ria e na margem esquerda do fundo. Já um maior transporte de silte em suspensão ocorreu próximo à entrada e na seção entre a Ponta do Bananal e a margem oeste do SM e menor transporte ocorreu no meio e ao fundo do Saco do Mamanguá.

Foi observado que as concentrações de silte em suspensão durante o período de simulação, iniciaram mais elevadas na maioria dos pontos analisados, e foram decaindo ao final da simulação. Porém, picos de concentração e de transporte de sedimento em suspensão foram observados ao longo de todo o período de análise, ocorrendo nos mesmos períodos de predominância dos ventos de SW e algumas vezes nos picos de maiores intensidades de vento. Este fato pode ser indicativo da atuação e

relaxamento do vento, que após soprar fortemente, faz com que o comportamento das variáveis fique mais próximo de suas condições iniciais. Já os pontos localizados ao fundo do Saco do Mamanguá não seguem este mesmo padrão, apresentando uma variação de acordo com a oscilação de maré, com menores concentrações e transporte durante o período de quadratura e aumentando de acordo com o período de sizígia.

Comportamento similar foi observado por Lopes et al. (2006) na Ria de Aveiro, em que foi observado que a influência das marés dominam as concentrações de sedimentos em suspensão, sendo a principal forçante no transporte de sedimentos em suspensão desta região. Porém a concentração de sedimentos em suspensão também sofre influência da ação do vento, que pode contribuir com a diminuição da concentração quando as correntes geradas pelo vento se encontram na direção oposta às correntes de maré. Deste modo, o estresse do vento pode contribuir para a diminuição da maré interferindo na concentração das partículas de sedimento em suspensão que irá diminuir por advecção, principalmente durante a enchente. Já durante a vazante, a corrente induzida se encontra na mesma direção da corrente de maré, causando uma ressuspensão de sedimentos, bem como um transporte advectivo e aumento da concentração de sedimentos em suspensão.

De forma geral, as concentrações e o transporte de sedimento em suspensão foram bem baixos ao longo de toda a região, causados pelo pequeno aporte pela drenagem continental e pela baixa dinâmica com pequenas velocidades de correntes, que favorecem uma deposição do material em suspensão e impedem a ressuspensão destes para a coluna de água. Exceto quando há mudança na amplitude de maré, quando ventos mais intensos e com direções favoráveis a exportação e material atuam na região, em períodos de maiores precipitações e quando as vazões dos afluentes locais aumentam.

Para um melhor entendimento da dinâmica do Saco do Mamanguá e obtenção de seu tempo de residência, partículas foram lançadas em diversos pontos de seu interior, sendo transportadas de acordo com a dinâmica do ambiente. As partículas são indicadoras do comportamento do transporte do material particulado em suspensão, sendo advectadas de acordo com a hidrodinâmica local. As partículas não estão relacionadas com a concentração de sedimento em suspensão na coluna de água.

Desta forma, é possível observar as diferenças nos processos de troca de água entre as diferentes áreas do SM. As áreas menos dinâmicas do SM apresentam maior tempo de residência. Porém, alterações ocorrem em função do padrão de ventos, que podem intensificar os processos de troca de água fazendo com que um número maior de partículas deixe o SM. Os resultados obtidos pelo modelo de trajetória de partículas demonstraram que o SM se comporta de forma particular no que se refere ao transporte de material em suspensão, já que possui baixa hidrodinâmica e apresenta a ação do vento e a força de maré como os principais modos de transporte. Com as condições hidrodinâmicas e meteorológicas exibidas durante o período de análise, apenas uma pequena fração de partículas (aproximadamente 27%) que foram lançadas em suspensão na região foram exportadas. Porém, quando a região é submetida a uma condição diferente e favorável em relação ao vento, uma maior fração de partículas (aproximadamente 50%) é exportada.

Foi possível observar também que as trajetórias das partículas estão diretamente ligadas à entrada do Saco do Mamanguá, já que a maioria das partículas que conseguiram deixá-lo foram lançadas mais próximas a essa região, indicando que uma importante quantidade de água e material são trocadas entre a ria e o oceano adjacente. As regiões mais próximas à entrada do Saco do Mamanguá foram as que apresentaram, portanto, menores tempos de residência se comparadas com o fundo e sua região central, que apresentaram valores mais elevados, indicando que estas regiões demonstram maior probabilidade de deposição de material em suspensão. Em função do padrão de maré, a trajetória das partículas apresenta um movimento elipsoidal periódico, muitas vezes fazendo com que partículas que já saíram do SM retornassem na próxima maré enchente.

O destino final do material em suspensão pode indicar também o destino final do transporte de poluentes e contaminantes na região. Por isso, os locais de maior concentração e acúmulo de sedimentos identificados pelas simulações, podem ser indicativos de áreas mais suscetíveis ao acúmulo de poluentes e impactos associados.

A análise das trocas de fluxos na região do Saco do Mamanguá também exibiram consideráveis trocas de água e material sedimentar entre a região de estudo e o oceano adjacente. Sendo verificado que o volume de água e sedimento que sai do Saco do Mamanguá é superior ao volume que entra. Durante o período estudado foi

verificado que o Saco do Mamanguá exportou aproximadamente 6.340.200 m³ de água, sendo que foi importado para o sistema 3.273.300 m³. E apesar das trocas de sedimentos terem sido pequenas em relação à exportação e importação, verificou-se que o Saco do Mamanguá durante o período de análise e com as características físicas deste período, apenas exportou sedimento em suspensão para o sistema, sendo aproximadamente 1.202.600 m³ de material exportado. Esses resultados estão de acordo com as observações de Spera (2014), que através de marcadores orgânicos moleculares no Saco do Mamanguá, aponta uma considerável influência continental para a região, sendo mais relevante que a marinha.

Por fim, estas análises demonstram que, apesar das correntes de enchente apresentarem maior importância para o Saco do Mamanguá do que as de vazante juntamente com a ação da maré, a atuação do vento, principalmente os do quadrante SSW, possuem grande importância para as trocas de água e sedimentos entre a região e o oceano adjacente, assim como, para a hidrodinâmica geral do SM.

7 CONCLUSÕES

O estudo realizado produziu as seguintes conclusões:

- A partir das análises realizadas nos dados coletados em campo, observa-se que a maré da região é tipicamente semi-diurna, sendo que a velocidade das correntes de enchente é superior as de vazante, com maiores velocidades nas marés de sizígia do que nas de quadratura;
- A magnitude do vento se mostrou como o fator dominante na influência da dinâmica das correntes no interior do Saco do Mamanguá, principalmente nas camadas superficiais, seguido da força da maré e dos gradientes de densidade, que juntos atuam no direcionamento e magnitude das correntes, trocas de volume e massa entre o Saco do Mamanguá e o oceano adjacente;
- Os ventos de sudoeste foram os que mais influenciaram a hidrodinâmica da região;
- O modelo hidrodinâmico representou de forma satisfatória a hidrodinâmica da área de estudo, através da comparação de seus resultados com os dados de elevação da água e correntes coletadas em campo;
- As análises de sensibilidade realizadas para apurar a influência dos coeficientes de viscosidade turbulenta e rugosidade nos níveis de água e velocidade de corrente demonstraram baixa influência destes parâmetros na hidrodinâmica e no transporte de sedimentos do Saco do Mamanguá, talvez pelo fato das baixas velocidades de correntes observadas fazer com que a variação destes parâmetros não provoque grandes mudanças;
- O uso de séries de nível de água como condições de contorno no modelo hidrodinâmico gerou melhores resultados, além de conseguir incluir nas simulações o efeito da maré meteorológica somado ao da maré astronômica;
- A partir da observação geral dos resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico, para a condição atual do Saco do Mamanguá, verifica-se uma intensificação das correntes na entrada, no meio, ao redor das ilhas, na margem oeste

das ilhas até a seção entre a Ponta do Bananal e a margem oeste da ria e desta região até o fundo do SM durante as correntes de enchente, e durante as correntes de vazante, há uma intensificação ao redor das ilhas e na seção entre a Ponta do Bananal e a margem oeste da ria até o início do fundo do Saco do Mamanguá;

- A região pode ser considerada como um sistema de baixa energia, bem misturado e parcialmente estratificado;
- O vento, a maré e os afluentes locais são os principais responsáveis pelo transporte de sedimentos em suspensão;
- As condições hidrodinâmicas do Saco do Mamanguá, com baixas velocidades, favorecem a retenção de partículas em seu interior. Porém a atuação do vento contribui para a exportação de material em termos de volume de massa;
- Os resultados do modelo numérico de ondas mostraram que estas não influenciam a hidrodinâmica da região;
- O manguezal e os afluentes locais são os grandes contribuintes de sedimentos para o Saco do Mamanguá;
- O tempo de residência do Saco do Mamanguá foi de aproximadamente 18 dias, sendo que a região indicou maior retenção de partículas em seu interior, exceto em condições de vento favorável para sua exportação ou em cenários de condições de frentes frias atingindo a região, quando um número maior de partículas é exportado;
- As análises de trocas de fluxos indicaram que o Saco do Mamanguá exporta mais material do que importa, principalmente em relação a volume de água e menos de massa.

8 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Devido à ausência de dados a respeito das concentrações de sedimentos em suspensão para realizar a calibração e validação do modelo de transporte de sedimentos, o modelo numérico fornece o padrão geral do transporte, mas as quantidades do transporte devem ser analisadas com cuidado. O padrão geral de transporte deve ser realístico em função do padrão hidrodinâmico local, no entanto valores das concentrações permitirão uma melhor quantificação do transporte;
- Pela falta de dados de salinidade durante o período de estudo uma melhor análise do comportamento das variações dos gradientes de densidade na influencia da dinâmica do ambiente não foi realizado, o que poderia complementar a análise do comportamento hidrodinâmico da região.
- Apesar deste trabalho fornecer importantes considerações sobre a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos do Saco do Mamanguá, estudos ainda devem ser realizados. Para tanto sugere-se a realização da coleta de dados de vento, material em suspensão no manguezal e em outros pontos de controle e vazão dos afluentes locais no mínimo de hora em hora e com um período maior de dados, para uma melhor realização da calibração, validação e simulação dos modelos numéricos. Além da realização de uma simulação tridimensional na região com o intuito do melhor entendimento da circulação ao longo da coluna d'água principalmente em relação aos gradientes de densidade.

REFERÊNCIAS

AMBRÓSIO JÚNIOR, O.; TEIXEIRA, C.; MIRANDA, L. B.; FURTADO, V. V. Condições oceanográficas do Saco do Mamanguá. In: SIMPÓSIO SOBRE OCEANOGRAFIA, 2., 1991, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1991. p. 99.

BENITES, M. **Estudo da ocorrência de gás raso nos sedimentos do Saco do Mamanguá, Paraty (RJ), através do método sísmico.** 2014. 42 p. Monografia (Bacharelado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

BERNARDES, R. A. **Estrutura e dinâmica da ictiofauna do Saco do Mamanguá (Paraty-RJ).** 1996. 145 p. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

BITTENCOURT, F. T.; SOARES, F. L. M.; GUERRA, J V.; GARCIA NETO, E. V. Utilização de equipamentos acústicos em estudos de dinâmica sedimentar de ambientes costeiros: Estudo de caso no estado do Rio de Janeiro. **In:** IV Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2010, Rio Grande.

BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.

CAMERON, W.N.; D.W. PRITCHARD. 1963. **Estuaries**, p. 306-324. In: M.N. Hill [Ed.], The sea. Vol. 2. New York, John Wiley & Sons.

CASTRO, B. M. **Correntes e Massas de Água da Plataforma Continental Norte de São Paulo.** 1996. 248 p. Tese (Livre-Docência) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

COELHO NETTO, A.L. & DANTAS, M.E. 1996. **Recursos Hídricos.** In: MITCHEL, G. & XIMENES, M. (org.). Mata Atlântica no município de Angra dos Reis, editado por Furnas Centrais Elétricas, Cap. 4, p. 111 - 150.

COSTA, M. B. S. F. **Wave and tidally induced processes on Rocas Atoll: geomorphological implications and future projections.** 2015. 129 p. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

COUCEIRO, M. **Dinâmica de sedimentos coesivos em um estuário altamente estratificado: rio Araranguá, SC.** 2015. 184 p. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

DECASTRO, M., GOMEZ-GESTEIRA, M., PREGO, R., TABOADA, J. J., MONTERO, P., HERBELLO, P., & PEREZ-VILLAR, V. (2000). Wind and tidal influence on water circulation in a Galician Ria (NW Spain). **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 51, 161–176.

DELTARES, 2013. **User Manual Delft3D-FLOW.** Simulation of multi-dimensional hydrodynamic and transport phenomena, including sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702p.

DELTARES, 2013. **User Manual Delft3D-WAVE.** Simulation of short-crested waves with SWAN. Deltares, Delft, The Netherlands. 220p.

DELTARES, 2014. **User Manual Delft3D-RGFGRID.** Generation and manipulation of curvilinear grids for Delft3D-FLOW and Delft3d-WAVE. Deltares, Delft, The Netherlands. 128p.

DIAS, J.M; LOPES, J. F. Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: The case of Ria de Aveiro Lagoon (Portugal). **Environmental Modelling & Software**, v. 21, p. 1-15, 2006.

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

EVANS, G., PREGO, R. Rias, estuaries and incised valleys: is a ria an estuary? **Marine Geology**, v. 196, p. 171-175, 2003.

FIEDLER, M. F. M. **Dinâmica estuarina em cenários de aumento do nível do mar: estuário de Santos, SP.** 2015. 130 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

FREITAS, G. R. **Produção primária do Saco do Mamanguá (RJ) em relação aos parâmetros ambientais: a contribuição do picofitoplancton**. 2014. 43 p. Monografia (Bacharelado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

GARCÍA-GARCÍA A.; GARCÍA-GIL S.; VILAS F. Quaternary evolution of the Ría de Vigo, Spain. **Marine Geology**, v. 220, p. 153-179, 2005.

GOMEZ-GESTEIRA M.; MONTERO P.; PREGO R.; TABOADA J. J.; LEITAO P.; RUIZ-VILLAREAL M.; NEVES R.; PEREZ-VILLAR V. A two-dimensional particle tracking model for pollution dispersion in A Coruña and Vigo Rias (NW Spain). **Oceanologica Acta**, v. 22, p. 167-177, 1999.

HENRIKSEN, H. J.; TROLDBORG, L.; NYEGAARD, P.; SONNENBORG, T. O; REFSGAARD J. C; MADSEN, B. 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. **Journal of Hydrology**, v. 280, p. 52-71, 2003.

KAMPEL, M.; SILVA JÚNIOR, C. L. Análise EOF da confluência Brasil-Malvinas a partir de imagens AVHRR. In: SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 775-780.

LISBOA, P. V.; ESPINOZA, J. M. A.; ZANOTTA, D. C. Análise EOF dos padrões espaço-temporais dos campos de velocidades superficiais do Estuário da Lagoa dos Patos – RS para análise de escala de tempo de transporte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 6897-6904.

LOPES, J. F.; DIAS, J. M.; DEKEYSER, I. Numerical modelling of cohesive sediments transport in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal. **Journal of Hydrology**, v. 319, p. 176-198, 2006.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. 2012. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. 2nd. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), v.2. 426 p.

NOGARA, P.; DIEGUES, A. C.; MELLO, D.; SCHARFFER-NOVELLI, Y.; FRANÇA, N. P.; FAJARDO, E. 2005. **Mamanguá – Berçário marinho e reduto tradicional de caícaras**. São Paulo, Ipsis Gráfica e Editora, 160 p.

PHILLIPS, N. A. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. **Journal of Meteorology**, v.14, 1957.

POND, S., AND G.L. PICKARD. 1983. **Introductory Dynamical Oceanography**. 2nd. Butterworth-Heinemann. 329 p.

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

SIGNORINI, S. R. A study of circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba. **Bolm. Instituto. Oceanográfico**, São Paulo, v. 29, p. 41- 55, 1980.

SPERA, A. **Registro de variações ambientais dos últimos 3000 anos da Região da Ria do Mamanguá, Rio de Janeiro, utilizando marcadores orgânicos moleculares**. 2012. 112 p. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo.

TEIXEIRA, C. L. **Caracterização do sedimento superficial de enseadas da Baía de Ilha Grande – RJ, com ênfase na distribuição espacial de metais**. 2009. 157 p. Dissertação (Mestrado) – Geociências, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

TOLMAN, H. L., **User Manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18**. Tech. note 166 [S.1.], 1999.

VAN RIJN, L.C., 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans (in Press). **Aqua Publications**. Amsterdam, The Netherlands.

VAN RIJN, L.C.; NIEUWJAAR, M.; VAN DER KAAY, T.; NAP, E.; VAN KAMPEN, A. Transport of Fine Sands by Currents and Waves. **Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering**, p. 123-143, 1993.

VAN RIJN, L. C.; WALSTRA D. J. R.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J.; PAN, S.; SIERRA, J. P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy

beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile model. **Coastal Engineering**, v. 47, p. 295-327, 2003.

WENTWORTH C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

WARNER, J. C.; GEYER W. R.; LERCZAK J. A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, C05001, 13p, 2005.

ANEXOS

Figura 1A: Trajeto da partícula 48 lançada na margem oeste do setor do meio e 52 lançada na margem leste do setor de entrada, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 2A: Trajeto da partícula 58 lançada ao meio do setor de entrada e 62 lançada na margem leste do setor de entrada, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 3A: Trajeto da partícula 63 lançada da margem leste do setor de entrada e 64 lançada na margem oeste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 4A: Trajeto da partícula 65 lançada na margem oeste do setor de entrada e 67 lançada ao meio do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 5A: Trajeto da partícula 68 lançada na margem leste do setor de entrada e 69 lançada na mesma margem e setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 6A: Trajeto da partícula 71 lançada na margem oeste do setor de entrada e 72 lançada ao meio do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 7A: Trajeto da partícula 73 lançada ao meio do setor de entrada e 74 lançada na margem leste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 8A: Trajeto da partícula 75 lançada na margem leste do setor de entrada, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com as condições físicas encontradas durante o período de análise.

Figura 9A: Trajeto da partícula 1 lançada na margem oeste do setor de fundo e 2 lançada na mesma margem e setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 10A: Trajeto da partícula 5 lançada ao meio do setor de fundo e 9 lançada um pouco abaixo da anterior, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 11A: Trajeto da partícula 12 lançada na margem oeste do setor de fundo e 18 lançada na margem leste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 12A: Trajeto da partícula 19 lançada na margem oeste do setor de fundo e 25 lançada na margem oeste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 13A: Trajeto da partícula 26 lançada na margem leste do setor do meio e 27 lançada acima da anterior no mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 14A: Trajeto da partícula 29 lançada na margem oeste do setor do meio e 31 lançada entre as margens do setor do meio, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 15A: Trajeto da partícula 32 lançada entre as margens do setor do meio e 39 lançada na margem oeste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 16A: Trajeto da partícula 40 lançada entre as margens do setor do meio e 43 lançada na margem leste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 17A: Trajeto da partícula 46 lançada na margem oeste do setor do meio e 47 lançada na margem mesma e setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 18A: Trajeto da partícula 49 lançada entre as margens do setor do meio e 50 lançada acima desta no mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 19A: Trajeto da partícula 51 lançada ao meio do setor de entrada e 55 lançada na margem oeste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 20A: Trajeto da partícula 57 lançada na margem oeste do setor de entrada e 58 lançada ao meio do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 21A: Trajeto da partícula 62 lançada na margem leste do setor de entrada e 63 lançada na mesma margem e setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 22A: Trajeto da partícula 64 lançada na margem oeste do setor de entrada e 65 acima desta no mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 23A: Trajeto da partícula 66 lançada ao meio do setor de entrada e 67 lançada acima desta no mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 24A: Trajeto da partícula 68 lançada na margem leste do setor de entrada e 69 lançada na margem mesma margem e setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 25A: Trajeto da partícula 71 lançada na margem oeste do setor de entrada e 72 ao meio do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 26A: Trajeto da partícula 73 lançada ao meio do setor de entrada e 74 lançada na margem leste do mesmo setor, durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.

Figura 27A: Trajeto da partícula 75 lançada na margem leste do setor de entrada durante a simulação de transporte de sedimentos forçada com vento de sudeste constante e favorável para a exportação das partículas.