



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ESTUDO DA HIDRODINÂMICA DAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA

THIAGO ZAMPROGNO MORDENTE

VITÓRIA  
2020

THIAGO ZAMPROGNO MORDENTE

ESTUDO DA HIDRODINÂMICA DAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da  
Universidade Federal do Espírito Santo.

Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Julio Tomás Aquije Chacaltana.

Vitória

2020

THIAGO ZAMPROGNO MORDENTE

ESTUDO DA HIDRODINÂMICA DAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial da obtenção do Grau de Mestre em Ciências em Engenharia Ambiental na Área de Concentração Recursos Hídricos.

Aprovada em 28 de abril de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. D. Sc. Diogo Costa Buarque  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador Interno

---

Prof. D. Sc. Marcos Nicolas Gallo  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Examinador Externo

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por todas as graças que pude alcançar durante o desenvolvimento desse projeto. Sem a ajuda Dele não seria possível chegar até onde cheguei nessa presente data. Agradeço também a minha família e amigos, os quais me apoiaram apesar de todas as dificuldades encaradas nessa caminhada. Em especial gostaria de agradecer a equipe do Laboratório de Simulação de Escoamento com Superfície Livre (LABESUL) que me ajudou e ensinou muito durante esse período de desenvolvimento do Mestrado, ao Gregório pela paciência e auxílio na reta final, e a minha namorada Gabriela, que sempre me apoiou com sua paciência sem limites e sabedoria para enxergar que tudo é possível, bastando se dedicar.

Agradeço pela oportunidade de realizar esse projeto de Mestrado em Engenharia Ambiental. Agradeço ao meu professor orientador, Julio Tomás Quije Chacaltana, que me direcionou no desenvolvimento da dissertação, sempre com bons conselhos e de forma profissional. Agradeço aos professores que fizeram parte da minha banca examinadora, sempre com valorosas observações e contribuições para este trabalho. Agradeço também pela disponibilidade da bolsa de estudo fornecida pela CAPES.

Por tudo isso dou glórias ao Pai, ao Filho e ao Espírito Santo. Amém!

## RESUMO

A hidrodinâmica é de extrema importância para diversas atividades que se desenvolvem em um estuário. E, a aplicação da fluidodinâmica computacional para o melhor entendimento da circulação é uma prática recorrente nos dias atuais. Nesse contexto, o presente trabalho visa utilizar as equações de Águas Rasas, resultantes de aplicar o conceito de onda longa nas equações de Navier-Stokes, com a finalidade de avaliar a hidrodinâmica do complexo estuarino das Baías de Ilha Grande e Sepetiba, sobre a influência das forçantes maré astronômica e vento. Afim de identificar a contribuição do vento na hidrodinâmica foram considerados 2 cenários: o Cenário 1 utilizando apenas a maré astronômica como forçante, e o Cenário 2, o qual utilizou a maré astronômica e o vento. Na calibração dos resultados simulados foram ajustados três parâmetros: passo de tempo, rugosidade de fundo e *wave continuity*. Para cada cenário foram calculados parâmetros estatísticos que indicaram o Cenário 2 como o melhor que se ajusta com os dados medidos. Na validação dos resultados do cenário 2, os valores dos parâmetros estatísticos encontrados foram de 0,09m para o Erro Médio Absoluto (MAE), de 0,12m para a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e de 0,96 para o Índice de concordância de Willmott (d). Os resultados apontam uma maior sensibilidade do modelo a forçante do vento, principalmente na Baía de Sepetiba. Adicionalmente, foi possível observar que o formato da Baía de Sepetiba é capaz de afetar o padrão de circulação em seu interior. Entretanto não foi possível observar o efeito ciclônico existente próximo de Ilha Grande. Portanto, modelagem considerando a maré e o vento como forçantes no modelo bidimensional do ADCIRC não foi capaz de representar a hidrodinâmica da região de forma satisfatória.

**Palavras chave:** ADCIRC, elementos finitos, Sepetiba, Ilha Grande e hidrodinâmica.

## **ABSTRACT**

Hydrodynamics is extremely important for several activities that take place in an estuary. Additionally, the application of computational fluid dynamics for a better understanding of the circulation is a recurring practice today. In this context, the present work aims to use the shallow water equations, resulting from applying the concept of long wave in the Navier-Stokes equations, with the purpose of evaluating the hydrodynamics of the estuarine complex of the Ilha Grande and Sepetiba bays, on the influence of the forcing astronomical tide and wind. In order to identify the contribution of the wind to the hydrodynamics, 2 scenarios were considered: Scenario 1 using only the astronomical tide as a forcing, and Scenario 2, which used the astronomical tide and the wind. In the calibration of the simulated results, three parameters were adjusted: time step, background roughness and wave continuity. For each scenario, statistical parameters were calculated that indicated Scenario 2 as the best that fits the measured data. In the results validation of scenario 2, the values of the statistical parameters found were 0.09m for the Mean Absolute Error (MAE), 0.12m for the Root Mean Square Error (RMSE) and 0.96 for the Willmott's Index (d). The results point to a greater sensitivity of the model to wind forcing, mainly in Sepetiba Bay. Additionally, it was possible to observe that the shape of Sepetiba Bay is capable of affecting the circulation pattern in its interior. However, it was not possible to observe the existing cyclonic effect near Ilha Grande. Therefore, modeling considering the tide and wind as forcing in the two-dimensional model of ADCIRC was not able to represent the hydrodynamics of the region in a satisfactory way.

**Key words:** ADCIRC, finite elements, Sepetiba, Ilha Grande and hydrodynamics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação entre solução analítica e numérica (adaptado DURÁN, 2005). .....	33
Figura 2: Mapa mostrando a localização das Baías de Sepetiba e Ilha Grande no Brasil .....	38
Figura 3: Mapa apresentando pontos de interesse: (1) Ilha de Itacuruça; (2) Ilha de Jaguanum; (3) Canal da Marambaia; (4) Ilha Grande; (5) Restinga da Marambaia; (6) Paraty; (7) Angra dos Reis; (8) Baía de Ilha Grande; (9) Baía de Sepetiba .....	39
Figura 4: Malha do domínio simulado .....	43
Figura 5: Legenda indicativa de qualidade da malha gerada através do SMS. ....	45
Figura 6: Batimetria interpolada através de dados globais GEBCO e de cartas náuticas do DHN .....	46
Figura 7: Localização das estações Cadim, Ilha de Jaguanum e EBN. ....	47
Figura 8: Dados medidos da estação Jaguanum e Maré meteorológica encontrada através do Filtro de Godin (24h, 25h e 25h) .....	57
Figura 9: Dados medidos da estação Cadim e Maré meteorológica encontrada através do Filtro de Godin (24h, 25h e 25h) .....	57
Figura 10: Dados medidos da estação EBN e Maré meteorológica encontrada através do Filtro de Godin (24h, 25h e 25h) .....	58
Figura 11: Dados medidos filtrados e dados simulados para a estação Jaguanum ..	59
Figura 12: Dados medidos filtrados e dados simulados para a estação Cadim .....	59
Figura 13: Dados medidos filtrados e dados simulados para a estação EBN .....	60
Figura 14: Dados medidos filtrados e dados simulados para o Cenário 2 na estação Jaguanum.....	62
Figura 15: Dados medidos filtrados e dados simulados para o Cenário 2 na estação Cadim.....	62
Figura 16: Dados medidos filtrados e dados simulados para o Cenário 2 na estação EBN.....	63
Figura 17: Detalhe da quadratura monitorada na estação Jaguanum comparando dados medidos filtrados e simulados .....	64
Figura 18: Detalhe da quadratura monitorada na estação Cadim comparando dados medidos filtrados e simulados .....	65

Figura 19: Detalhe da quadratura monitorada na estação EBN comparando dados medidos filtrados e simulados .....	65
Figura 20: Dados medidos filtrados e dados simulados para a validação na estação Jaguanum.....	67
Figura 21: Dados medidos filtrados e dados simulados para a validação na estação Cadim.....	67
Figura 22: Dados medidos filtrados e dados simulados para a validação na estação EBN.....	68
Figura 23: Campo de velocidades durante uma vazante (sizígia) do Cenário 2 (validação).....	70
Figura 24: Campo de velocidades durante uma enchente (sizígia) do Cenário 2 (validação).....	70
Figura 25: Campo de elevações durante uma baixa-mar (sizígia) do Cenário 2 (validação).....	71
Figura 26: Campo de elevações durante uma preamar (sizígia) do Cenário 2 (validação).....	72
Figura 27: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Sepetiba durante o mesmo instante de tempo da Figura 23 .....	73
Figura 28: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Sepetiba durante o mesmo instante de tempo da Figura 24 .....	73
Figura 29: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Ilha Grande durante o mesmo instante de tempo da Figura 23 .....	74
Figura 30: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Ilha Grande durante o mesmo instante de tempo da Figura 24 .....	75
Figura 31: Detalhamento do campo de velocidades demonstrando resultado mais próximo do efeito ciclônico próximo de Ilha Grande .....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos dados da malha simulada.....	43
Tabela 2: Estações maregráficas com dados atuais consistentes na região de estudo .....	47
Tabela 3: Amplitude e fase dos harmônicos característicos da região de estudo .....	48
Tabela 4: Fórmula dos parâmetros estatísticos que serão utilizados na dissertação	54
Tabela 5: Análise estatística dos resultados encontrados no Cenário 1 .....	60
Tabela 6: Análise estatística dos resultados encontrados no Cenário 2 .....	63
Tabela 7: Análise estatística dos resultados encontrados na validação .....	68

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
3.1. ESTUDOS RELACIONADOS A HIDRODINÂMICA ESTUARINA DE FORMA GERAL.....	17
3.2. RESUMOS E DESCOBERTAS DE ESTUDOS DESENVOLVIDOS NA BAÍA DE ILHA GRANDE E SEPETIBA .....	18
3.3. O ADCIRC.....	21
3.3.1. Equações de conservação.....	25
3.3.2. Equações governantes .....	28
3.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	34
3.5. CONDIÇÕES INICIAIS.....	34
3.6. RESUMOS E DESCOBERTAS DE ESTUDOS QUE UTILIZARAM O MODELO NUMÉRICO ADCIRC .....	35
4. METODOLOGIA .....	38
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	38
4.2. IMPLANTAÇÃO DO MODELO ADCIRC .....	42
4.2.1. Malha.....	42
4.2.2. Batimetria.....	45
4.2.3. Condições de contorno .....	46
4.2.4. Condições iniciais .....	50
4.3. PROPOSTA DOS CENÁRIOS .....	50
4.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	51
4.5. VALIDAÇÃO .....	53
4.6. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS .....	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5.1. CALIBRAÇÃO .....	56
5.1.1. Cenário 1 .....	56
5.1.2. Cenário 2 .....	61
5.2. VALIDAÇÃO.....	66

5.3. HIDRODINÂMICA DAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA .....	69
6. CONCLUSÃO .....	77
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

## 1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são uma das mais visadas áreas de concentração populacional, fazendo com que essas áreas sofram uma quantidade significativa de impactos ao meio ambiente. Seja através da poluição, ou de atividades recreativas, ou até mesmo de práticas comerciais como o transporte marítimo, as zonas costeiras têm grande importância sócio econômica. Sendo assim, é de extrema importância que sejam conhecidas as condições hidrodinâmicas dessas zonas, com uma forma de melhorar o gerenciamento e planejamento dessas áreas (ALBUQUERQUE, 2005).

Existem diversas maneiras de se obter dados sobre a hidrodinâmica de uma região, entretanto, entre as mais usadas se destacam os estudos extensivos de campo e o estudo da fluidodinâmica computacional. O primeiro é realizado através longas campanhas onde são utilizados equipamentos e embarcações, para o monitoramento dos fenômenos de interesse na região de estudo e em áreas adjacentes que podem influenciar esses fenômenos. Todavia, essa abordagem exige um alto valor de investimento devido aos equipamentos e pessoal capacitado para operá-los. A segunda abordagem utiliza campanhas menores, onde são realizadas medições que serão utilizadas como condições de contorno e como forma de aferimento/calibração dos resultados obtidos através de um modelo físico (NASCIMENTO, 2013).

A fluidodinâmica computacional apresenta diversos benefícios quando comparada a outras abordagens para o estudo da hidrodinâmica, tais como o baixo custo, relativa simplicidade logística, e flexibilidade na obtenção de resultados para diferentes tipos de cenários utilizando um mesmo modelo físico quando alterada as condições de contorno e iniciais, tais como resultados para marés de sizígia e quadratura, diferentes estações do ano, alterações da topografia ou da linha de costa, e inclusão ou remoção de obstáculos (JI, 2008).

A fluidodinâmica computacional é capaz de representar fenômenos físicos através de equações matemáticas (Equações Diferenciais Parciais – EDPs). Essas equações são denominadas Equações Governantes, e no caso da análise da hidrodinâmica, são

representadas normalmente pelas equações de conservação da massa e quantidade de movimento (RAUCH et al. 1998).

O emprego da fluidodinâmica computacional necessita de amplo conhecimento sobre as forçantes capazes de afetar as condições de circulação dentro de uma determinada área. Isso se deve ao fato do modelo físico utilizar essas forçantes nas condições de contorno e iniciais. Portanto, se faz necessário um estudo criterioso dessas forçantes, pois ao se utilizar condições de contorno e iniciais impróprias, o modelo não será capaz de produzir resultados condizentes com a realidade (LINKER et al., 2002).

O conhecimento da hidrodinâmica de uma determinada região se faz necessários em diversos campos distintos. Tais como na análise de acidentes de óleo, onde o comportamento do espalhamento da pluma de óleo pode ser obtido através de diversos fatores, dentre eles a interação entre as correntes superficiais e o vento. Com esse conhecimento é possível construir medidas de contenção de forma a minimizar os impactos causados pelo acidente petrolífero (OLIVEIRA e MEYER, 2006).

Outro tipo de análise onde a hidrodinâmica é aplicada está relacionada com os trabalhos de qualidade da água e transporte de sedimentos. Nesse tipo de estudo as correntes, a salinidade e a temperatura da água são capazes de impactar tanto o transporte da substância/material estudado, como sua deterioração no tempo. E assim, a hidrodinâmica pode ditar o tipo de ação necessária para a situação estudada (CUNHA, ROSMA e MONTEIRO, 2002a; CUNHA, ROSMA e MONTEIRO, 2002b).

Vale ressaltar que o conhecimento da hidrodinâmica pode não só auxiliar em estudo científicos, mas também no estabelecimento de empreendimentos. Como é o caso da criação de zonas para criação de mariscos, onde é necessário se determinar as velocidades e direções das correntes de uma dada região, afim de determinar quais estruturas necessárias para a instalação das fazendas de mariscos (DUQUE, GIACOMINI e WASSERMAN, 2008).

A hidrodinâmica de uma região costeira está submetida a diversos agentes atuantes como a maré, os ventos, a estratificação, as correntes oceânicas e as ondas (BUNYA

et al., 2010; EBERSOLE et al., 2010). A hidrodinâmica é afetada fortemente pela geomorfologia de fundo, formato da linha de costa, a existência de obstáculos, áreas de alagamento com ou sem vegetação.

Por exemplo, a onda de maré ao adentrar em uma área costeira acaba por sofrer influências do fundo do mar e da linha de costa, podendo sofrer refração e reflexão causando o amortecimento e distorção da onda (GODIN, 1999). E, ao adentrar em estuários, a maré interage com vazões fluviais, estreitamentos causados pela geometria da região, e a vegetação do mangue (HUANG et al., 2008). Assim, a hidrodinâmica é particular em cada região costeira.

Devido a essa complexidade, certas regiões apresentam comportamentos particulares, como as Baías de Ilha Grande e Sepetiba. Essas baías estão localizadas no estado do Rio de Janeiro e apesar de estarem conectadas por um canal formado por Ilha Grande e o continente, essas baías apresentam comportamentos distintos quanto a hidrodinâmica.

A Baía de Ilha Grande apesar de possuir dois acessos, sendo um deles uma grande abertura com cerca de 18km, e receber a onda de maré diretamente do oceano, apresenta pouca influência dessa forçante, tendo o gradiente horizontal de densidade como principal agente influenciando a hidrodinâmica em seu interior. Por outro lado, a Baía de Sepetiba também possuindo dois acessos, acaba por ter a maré como principal agente capaz de impactar a hidrodinâmica dessa baía (FRAGOSO, 1999; CUNHA, ROSMAN e MONTEIRO, 2006; DUQUE, GIACOMINI e WASSERMAN, 2008; SIGNORINI, 1980b).

Outro comportamento particular dessa região está relacionado a uma corrente permanente no sentido oeste-leste que ocorre no canal de ligação entre as baías. Essa corrente já foi constatada através de medições de campo e da modelagem computacional, assim como a presença de uma circulação ciclônica presente nos arredores de Ilha Grande (IKEDA E STEVENSON, 1982; CORRÊA, 1994; MAHIQUES, 1987; FRAGOSO, 1999).

Apesar de existirem trabalhos realizados nessa região os qual estudou esse complexo estuarino analisando individualmente a influência das forçantes maré astronômica, vento e gradiente de densidade (FRAGOSO, 1999), ou que realizaram uma análise da hidrodinâmica utilizando a maré astronômica e o vento para um modelo apenas da Baía de Sepetiba (ROSMAN e MONTEIRO, 2006), não foi ainda realizado um estudo analisando a hidrodinâmica combinando os efeitos do vento e maré astronômica através da fluidodinâmica computacional englobando todo o complexo estuarino das Baías de Ilha Grande e Sepetiba.

Tendo em vista essas particularidades, este trabalho pretende estudar a hidrodinâmica da região que compreende o complexo estuarino das Baías de Ilha Grande e Sepetiba usando a técnica da fluidodinâmica computacional com o objeto de compreender a circulação, assim como avaliar a influência do vento e da maré astronômica na hidrodinâmica dessa região. Para este fim, o modelo ADCIRC baseado solução das equações de Navier-Stokes com onda de superfície será usado.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo principal dessa dissertação é compreender a circulação do complexo estuarino das Baías de Ilha Grande e Sepetiba. Assim como a influência do vento e da maré astronômica na hidrodinâmica dessa região.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Avaliar a sensibilidade do vento na hidrodinâmica na área de estudo;

Analisar os padrões da circulação do complexo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São apresentados nessa seção estudos desenvolvidos na Baía de Ilha Grande e Sepetiba, e estudos que utilizaram o ADCIRC como ferramenta para a modelagem hidrodinâmica, respectivamente. Anteriormente a essa relação, são apresentados outros trabalhos também relacionados ao presente trabalho como forma de introduzir alguns aspectos e características da hidrodinâmica em estuários. Para concluir a revisão bibliográfica, é apresentado um tópico com informações gerais sobre o ADCIRC.

#### 3.1. ESTUDOS RELACIONADOS A HIDRODINÂMICA ESTUARINA DE FORMA GERAL

Já é de conhecimento comum que os efeitos da maré são advindos da interação das forças gravitacionais do Sol e da Lua, e que associadas com a aceleração centrífuga, atuam nos oceanos da Terra. Esse efeito resultante que origina a maré, ao encontrar com um estuário, se propaga a montante desse canal como uma onda de água rasa, uma vez que seu comprimento excede em muitas vezes sua profundidade local. Portanto, é possível afirmar que os movimentos horizontais originados pela oscilação de maré são chamados de correntes de maré (DYER, 1997).

A amplitude da maré e a intensidade das correntes podem sofrer variações ao longo da trajetória da onda de maré, devido a interações entre a onda e a morfologia da área por onde passa. Outras alterações nas características dessa onda de maré podem ocorrer devido sua interação em regiões estuarinas, tais como o bloqueio gerado pela descarga fluvial e a dissipação de energia devido ao atrito de fundo e margens. Devido a essas interferências, as correntes de maré podem se deformar, o que resultaria na diferença entre a duração dos períodos de enchente e vazante. Essa diferença entre os períodos é denominada assimetria da onda de maré (DYER, 1997).

A descarga fluvial é de grande importância na dispersão de contaminantes, principalmente para escoamentos estáveis. Adicionalmente, existe uma relação não linear entre a magnitude do escoamento e a variabilidade da descarga fluvial no

cálculo da dispersão de poluentes. Além disso, deve ser ressaltado que mudanças na descarga fluvial podem alterar a estratificação do estuário, a hidrodinâmica, o tempo de residência, e por consequência a concentração de partículas suspensas e dissolvidas (AZEVEDO, BORDALO e DUARTE, 2010).

Nos estudos de DE SIQUEIRA (2007), foram analisados os mecanismos de alagamento e secamento do modelo hidrodinâmica SisBaHia (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), em um canal fictício com a finalidade de representar um estreito canal de maré circundado por uma grande planície de maré. O modelo utilizado nesse estudo faz o uso de elementos finitos, permitindo grande flexibilidade para criação do domínio a ser estudado. Com a utilização do método de alagamento e secamento real, o SisBaHia é capaz de configurar os contornos como se fossem impermeáveis, necessitando que o domínio possua áreas extensas que permaneçam secas durante a baixar e alagadas durante a preamar. Já o método de alagamento e secamento virtual configura os contornos como se fossem permeáveis, determinando uma cota no entorno da planície de maré, e quando essa cota é ultrapassada, o modelo considera uma planície de maré virtual para calcular o volume da água salgada. Os resultados desse estudo determinaram que o SisBaHia apresentou resultados satisfatórios quando aplicado o método de alagamento e secamento virtual. Vale ressaltar que o estudo aplicou o método virtual em um exemplo numérico, o qual gerou resultados com boa concordância. Além disso, ao utilizar o mecanismo de alagamento e secamento virtual, foi possível constatar que a interação entre a maré e a morfologia complexa da planície de maré provocaram assimetria da onda de maré ao longo de sua trajetória para a montante.

### 3.2. RESUMOS E DESCOBERTAS DE ESTUDOS DESENVOLVIDOS NA BAÍA DE ILHA GRANDE E SEPETIBA

No trabalho de OLIVEIRA E MEYER (2006) foi realizado um estudo de caso que se empenha em prever o movimento de uma mancha proveniente de derramamento de óleo no espaço e no tempo utilizando modelagem matemática. O modelo utilizado realiza uma simulação bidimensional do domínio, onde a movimentação da pluma de óleo é representada com diferentes níveis de concentração ao longo do tempo. Para

o movimento da mancha é utilizada a equação de difusão-advecção-reação. Com relação a circulação hidrodinâmica é utilizada a equação de Stokes. O estudo é realizado no Canal Central da Baía de Ilha Grande, pois há um importante terminal petrolífero nessa localidade. Os autores constataram que no cenário mais provável de acontecer um derramamento, a mancha de óleo atinge uma região de costões rochosos, praia localizadas próximas a muitos condomínios, e avança em direção a Mangaratiba. Os autores também afirmam que apesar do modelo ser bidimensional, e não tridimensional, ele se apoia em uma ampla gama de dados de entrada locais, e que, portanto, proporcionam confiabilidade ao usuário.

Para mostrar como a modelagem computacional pode ser utilizada para avaliar a condição de poluição por esgoto sanitário em um corpo d'água, na Baía de Sepetiba, CUNHA, ROSMAN E MONTEIRO (2002a) simulam as concentrações de OD e DBO. Esses parâmetros são utilizados, pois indicam se há matéria orgânica no local, comum em corpos d'água atingidos por descarga de esgoto sanitário. Suas simulações são realizadas: uma para o atual cenário em que o trabalho foi realizado; e outra para o ano de 2020, em que foi feita uma projeção populacional e suas implicações nas cargas poluidoras. Para a modelagem computacional foi utilizado o SisBaHia, em seu modo bidimensional. Um modelo de elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. Resultados apresentaram que esgotos lançados nos rios e canais chegam à Baía e acumulam-se principalmente nas regiões próximas aos estuários, comprometendo muito a qualidade da água da Baía de Sepetiba. Os mesmos resultados mostraram que em regiões mais externas o comprometimento da qualidade da água é menor. Além disso, foi constatado que em 2020 as condições de qualidade da água são agravadas, piorando principalmente a região leste da Baía de Sepetiba.

De forma complementar ao trabalho anterior, CUNHA, ROSMAN E MONTEIRO (2006) utilizaram o modelo computacional SisBaHia para caracterizar a circulação hidrodinâmica da Baía de Sepetiba em seu modo bidimensional. Para a calibração do modelo, resultados das simulações confrontados com dados medidos em campo apresentaram boa concordância. Além disso, resultados mostraram que, nessa baía, a magnitude das velocidades das correntes não ultrapassa 1,0 m/s na maré de sizígia

e 0,3 m/s na maré de quadratura. Ademais, velocidades residuais se apresentaram muito fracas, com exceção na embocadura de alguns estuários, além de apresentar vórtices nas regiões vizinhas às ilhas.

Em seu trabalho, CUNHA, MONTEIRO E ROSMAN (2002b) desenvolveram um modelo bidimensional de transporte, aplicado a escalares passivos e não-conservativos. Chamado pelo nome de Modelo de Transporte Euleriano Advectivo-Difusivo, ou FIST-ADE, é integrado na vertical e possui em seu escopo reações cinéticas de primeira ordem. O FIST-ADE foi desenvolvido para compor o SisBahia. A validação do modelo foi feita através da comparação entre a solução numérica e analítica de experimentos que já possuem soluções analíticas conhecidas, considerando diversos tipos de fontes. Além disso, o modelo também foi aplicado na simulação do transporte de sal na Baía de Sepetiba. Nos casos de validação do código comparando com experimentos de solução analítica já conhecida, o FIST-ADE demonstrou um bom desempenho no controle das oscilações numéricas, quando da utilização em condições adversas de simulação. Já em condições favoráveis, o resultado obteve uma excelente aproximação da solução analítica. Ao aplicar o modelo para o transporte de sal na Baía de Sepetiba, o FIST-ADE foi capaz de simular esse transporte, apresentando resultados consistentes com os valores observados, explicitando sua adequação com os objetivos do estudo.

Com o objetivo de subsidiar o Plano Local de Desenvolvimento da Maricultura de Paraty, Angra dos Reis e Mangaratiba, os autores DUQUE, GIACOMINI e WASSERMAN (2008) aplicaram o modelo hidrodinâmico AQUASEA (bidimensional) na Baía de Ilha Grande para descrever os padrões de circulação da área, determinando as áreas mais aptas para a maricultura. Com a malha de elementos finitos, foi possível simular diversas situações de ventos, e de marés. Resultados apresentaram que velocidades alcançaram até 1,8 m/s. As principais correntes são observadas nas grandes aberturas de comunicação das baías com o oceano. Como próxima etapa do projeto, são previstas simulações com a presença do modelo de transporte para averiguar a troca de material entre baías. Autores constatam a possibilidade da presença de áreas adequadas a instalação de parques aquícolas na Baía de Ilha Grande, pois não houve a formação de correntes de uma baía para outra.

Uma discussão sobre os aspectos da circulação da Baía de Ilha Grande e Sepetiba com relação a maré, vento e densidade foi levantada no estudo de SIGNORINI (1980b). Essa discussão foi fundamentada a partir da análise de dados históricos, hidrográficos e de correntômetros coletados em setembro de 1977. Dados mostraram um considerável contraste entre a circulação das duas baías. Autores verificaram que principais forçantes da circulação estuarina foram a maré, o vento e o gradiente de densidade, e que o sistema estuarino é parcialmente misturado. Foi constatado que a circulação na Baía de Sepetiba é fortemente influenciada pela maré, enquanto a circulação na Baía de Ilha Grande tem uma fraca influência da maré, sobreposta por um fluxo quase constante induzido pelo gradiente de densidade. A estratificação é mantida, pois a Baía de Ilha Grande é profunda, o que permite que água salina e mais fria vá em direção ao leste, para a Baía de Sepetiba, que contém água mais doce e quente, influenciada pela descarga de água do rio. Além disso, para a análise do vento, as séries de dados eram muito curtas para estabelecer uma correlação entre vento e correntes. Os campos de densidade e velocidade apresentaram oscilações que concordam muito bem com os modos derivados da teoria inerentes a geometria e estratificação de densidade local.

### 3.3. O ADCIRC

Sobre o ADCIRC, este modelo numérico foi desenvolvido como parte do *Dredging Research Program* (DRP) como ferramenta para gerar uma base de dados de constituintes harmônicos para elevação da maré e corrente em localizações discretas ao longo da costa dos Estados Unidos da América. Para gerar essa base de dados, foi criado um relatório que descreve a teoria, metodologia e a verificação do modelo, quando alguns módulos dele ainda estavam em fase de teste ou desenvolvimento (LUETTICH JR, WESTERINK e SCHEFFNER, 1992). Como os autores sabiam que a geração dessa base de dados produziria longas simulações numéricas em domínios muito grandes, o modelo foi desenvolvido para ter alta eficiência computacional, além de ter sido testado exaustivamente em relação a sua acurácia hidrodinâmica e estabilidade numérica.

O ADCIRC manipula a solução das equações tridimensionais de conservação da quantidade de movimento (CQM) e conservação da massa (CM) de dois modos distintos, conhecidos como modo externo e modo interno (LUETTICH JR, WESTERINK e SCHEFFNER, 1992). O modo externo utiliza as equações governantes verticalmente integradas (bidimensionais) para o cálculo da elevação da lâmina d'água. Calculado a elevação da superfície livre, esses resultados são inseridos no modo interno o qual é responsável pela definição do perfil de velocidades verticais do domínio (HUTTER, WANG e CHUBARENKO, 2014).

Com a finalidade de gerar tal modelo, o algoritmo incluso no ADCIRC: permite uma minimização nos graus de liberdade para um desejado nível de acurácia; separando eficientemente as equações diferenciais parciais em pequenos sistemas de equações algébricas com matrizes que não dependem do tempo; e é capaz de rodar uma simulação com duração de meses, ou até anos, providenciando cálculos detalhados. Além disso, a estrutura em que o ADCIRC foi construído permite acoplar a abordagem do modo externo com a do modo interno, e essa técnica tem mostrado seu enorme valor, pois pode reduzir o custo dos cálculos da circulação hidrostática tridimensional (LUETTICH JR, WESTERINK e SCHEFFNER, 1992).

Em paralelo a essa estrutura, o ADCIRC foi pioneiro ao lançar uma nova técnica de solução que substitui a velocidade pela tensão de cisalhamento como variável dependente nas equações do modo interno, chamada solução de tensão direta (*direct stress solution*, ou DSS). O ponto positivo do DSS foi permitir condições de contorno físicas mais realistas a serem incluídas explicitamente no modelo 3D. Com uma representação melhor das condições de contorno físicas para simulações em estuários que o fundo e a superfície abrangem uma parte significativa da coluna d'água, ou simulações em que os processos modelados são exacerbadamente dependentes da física das condições de contorno, como a modelagem da interação entre a onda e a corrente, do transporte de sedimentos, do movimento de um derramamento de óleo, da dissipação de energia, entre outras, há uma melhora valiosa nos resultados (LUETTICH JR, WESTERINK e SCHEFFNER, 1992). Por fim, testes realizados por esses mesmos autores apontam que o método DSS apresenta

vantagens sobre o método padrão, chamado de solução de velocidade (*velocity solution*, ou VS), apesar de ainda não ter sido totalmente implementado.

Através da realização de um alto número de simulações foi possível testar o nível de estabilidade e precisão oferecidos pelo modelo ADCIRC. Foi comprovado que o modelo é capaz de alcançar um alto grau de eficiência e precisão em áreas com escala local e regional, podendo o modelo ser executado com número reduzido de graus de liberdade (LUETTICH JR, WESTERINK E SCHEFFNER, 1992). Adicionalmente, também foi alegado que o modelo é impulsionado devido a otimização das equações governantes e flexibilidade da malha, devido a utilização do método de Galerkin de elementos finitos. Esse método permite a discretização espacial do domínio utilizando elementos quadrangulares e triangulares, permitindo imensa flexibilidade no desenvolvimento da malha para regiões que possuam geometria complexa. Situação essa que é muito diferente de modelos que utilizam do método de diferenças finitas, o qual é mais indicado para regiões consideradas mais simples geometricamente (FERZIGER E PERIC, 2002).

Esse programa é capaz de simular modelos hidrodinâmicos bidimensionais integrados na profundidade (2DDI) e tridimensionais (3D). O ADCIRC é capaz de alcançar grande precisão e eficiência em escala regional, além de poder ser executado com um número reduzido de graus de liberdade, quando comparado com outros modelos hidrodinâmicos presentes na literatura. Esse desempenho é consequência da flexibilidade da malha utilizada, da otimização da solução das equações presentes, assim como dos algoritmos numéricos executados (LUETTICH JR, WESTERINK e SCHEFFNER, 1992).

É importante ressaltar que para a utilização do modelo 2DDI do ADCIRC, a escala horizontal do domínio deve ser considerada com certa cautela. Uma vez que esse modelo (2DDI) necessita que a escala horizontal seja significativamente maior que a vertical, devido a aproximação da média vertical utilizada nas equações (DA SILVA, 2011).

Limitações de modelos devem ser sempre levadas em consideração antes de sua utilização, uma vez que impactam diretamente na construção dos cenários simulados e na representação dos mesmos. Entre as limitações presentes no programa ADCIRC, o passo de tempo é julgado como uma das mais importantes, já que as equações do modelo são resolvidas através do método implícito em vez do explícito (PANDOE, 2004).

O ADCIRC é um modelo hidrodinâmico que utiliza o método de elementos finitos para a discretização do domínio, sendo assim, essas malhas podem ser classificadas de acordo com sua estruturação. As malhas estruturadas, sendo uniforme ou não, são aquelas que seguem uma regra de formação, já as malhas não-estruturadas não seguem regras de formação. As estruturadas são mais utilizadas quando os contornos do domínio são mais regulares, já as não-estruturadas são preferíveis em casos onde o contorno é irregular. Os elementos que constituem as malhas podem ser triangulares, retangulares, quadrados, piramidais, e etc. Sua utilização depende do algoritmo numérico empregado para a solução das equações, podendo, em alguns casos, ser possível utilizar uma malha com elementos triangulares e retangulares (PACHECO, 2004). Portanto, devido à complexidade das regiões estuarinas, o método de elementos finitos é preferível.

Devido às características da maré, de avanço e recuo da água, um fator importante que deve ser observado na modelagem de regiões costeiras é o algoritmo de alagamento e secamento. Existe uma complexidade não trivial nesse processo de enchente e vazante da maré. Com a inundação de uma área anteriormente seca, o modelo necessita se adaptar para incluir essas áreas molhadas dentro do modelo. O contrário também se torna necessário, quando áreas antes inundadas se tornam secas devido ao recuo da maré. Assim, devido à complexidade dessa inclusão dentro do modelo, atualmente existem diversos algoritmos capazes de tal abordagem, como por exemplo o algoritmo de filme fino, de remoção de elemento, de extrapolação de profundidade e de profundidade negativa (MEDEIROS e HAGEN, 2012).

O ADCIRC utiliza o algoritmo de remoção de elemento para determinar como o modelo interpreta as regiões de alagamento e secamento. Esse algoritmo aplica um

sistema único de checagem para determinar se um elemento é seco, alagado, ou parcialmente alagado. Os elementos alagados são incluídos no domínio computacional e os secos não. Entretanto, nos casos dos elementos que estão parcialmente alagados, o ADCIRC determina um limite (altura da coluna de água) para determinar se o mesmo é definido como elemento alagado ou seco. Para tal, o algoritmo possui um mecanismo de estado variável do nó, onde o nó é definido como alagado (1) ou seco (0) caso ultrapasse, ou não, o limite da coluna de água. Assim, o elemento do domínio é classificado como alagado caso um certo número de nós permanecer alagado, além de considerar se existe alguma barreira ou fricção de fundo capaz de inibir o alagamento (LUETTICH JR e WESTERINK, 1999).

Como uma forma de minimizar os erros produzidos por causa de mudanças súbitas de classificação dos nós, foi implementada uma condição de erro de balanço de massa ocasionado por camadas finas de água em inclinações elevadas. Além disso, o algoritmo de alagamento e secamento possui um parâmetro que força a água a acumular no declive antes de fluir para cima. Esse parâmetro compara o gradiente decrescente do nó com a altura de coluna d'água mínima imposta pelo limite. Se o gradiente possuir uma profundidade menor que o valor do parâmetro, então o nó é considerado seco. Mas se o contrário ocorrer, então o nó é classificado como alagado (LUETTICH JR e WESTERINK, 1999).

Por essas razões foi adotada a utilização do ADCIRC para a modelagem hidrodinâmica na região de estudo, uma vez que sua aplicação é altamente indicada para áreas contendo estuários e batimetrias complexas, além de permitir a aplicação simultânea, ou individual, de diversas forçantes as quais são necessárias quando se é modelado áreas que possuem transição entre o fluxo oceânico e o fluxo de enseadas, rios e estuários (GONÇALVES, 2016; KUBATKO, WESTERINK e DAWSON, 2006; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2012.).

### **3.3.1. Equações de conservação**

Como descrito anteriormente, tanto os modelos ADCIRC 2DDI e 3D resolvem a equação da continuidade verticalmente integrada para definir a cinemática da

superfície livre. Entretanto, para se ter um melhor entendimento teórico da ferramenta, se faz necessário o entendimento das equações governantes que compõe tal modelo.

Para a aplicação do modelo, algumas considerações precisam ser feitas, como por exemplo, deve-se assumir que o fluido analisado é incompressível. Esse tipo de consideração tem o intuito de simplificar as equações de conservação mais genéricas, afim de torna-las mais específicas, e assim, mais simples de serem resolvidas através de modelo numéricos. Entretanto, deve ser ressaltado que ao se realizarem simplificações nas equações de conservação, certos tipos de características ou fenômenos podem não ser considerados na resolução dessas equações.

A mais fundamental equação de conservação é a Equação de Conservação de Massa na forma conservativa. Essa equação está disposta a seguir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = \frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

Onde  $u, v$  e  $w$  são as velocidades nas direções  $x, y$  e  $z$ , e  $\rho$  é a massa específica do fluido.

Como observado na equação acima, a massa específica  $\rho$  é capaz de variar no tempo, variar devido a influência da compressibilidade do fluido (ocasionado pelo escoamento do fluido), além de variar espacialmente. Entretanto, ao considerarmos o fluido incompressível (como no caso desse projeto), a Eq. 1 pode ser simplificada conforme demonstrado abaixo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(v)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial(u)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(v)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(w)}{\partial z} = \rho \left( \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

É possível realizar a demonstração das Eq. 2 e 3 pois ao se considerar o fluido como sendo incompressível, o operador está afirmando que não existem variações da

massa específica, ou essas variações podem ser desprezadas, quando essa partícula de massa de fluido se move pelo campo de velocidades do escoamento. Portanto, ao se realizar essa consideração a Eq. 1 pode ser descrita como a Eq. 4.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Esse é apenas um dos exemplos de como é possível simplificar o problema físico afim de beneficiar o modelo numérico. Outro conjunto de equações muito utilizado em problemas envolvendo hidrodinâmica é a Equação da Conservação da Quantidade de Movimento (CQM). Esse conjunto de equações, em sua forma conservativa, estão dispostos a seguir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \rho g_y + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \rho g_z + \frac{\partial \tau_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{wz}}{\partial z} \quad (7)$$

Onde  $\tau$  e  $\sigma$  representam as tensões que atuam nas paredes do volume de controle, e  $g$  a aceleração da gravidade.

Considerando-se a Lei de Newton, na qual apresenta que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional a taxa de deformação angular do fluido (Eq. 8, 9, 10, 11, 12 e 13), e aplicando-a nas equações 5, 6 e 7, é possível obter o conjunto de equações conhecido como Equações de Navier-Stokes (Eq. 14, 15 e 16).

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{xx} = -p - \frac{2}{3}\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (11)$$

$$\sigma_{yy} = -p - \frac{2}{3}\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (12)$$

$$\sigma_{zz} = -p - \frac{2}{3}\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (13)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade do fluido e  $p$  é a pressão termodinâmica local.

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho u)}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho v)}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho w)}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

### 3.3.2. Equações governantes

O modelo ADCIRC utiliza alguns mecanismos com o intuito de solucionar as equações de conservação apresentadas anteriormente. Nesta seção são apresentadas as considerações realizadas pelo modelo, assim como os métodos utilizados para solucionar as equações governantes.

Ao se integrar a equação da conservação de massa para um fluido incompressível (Eq. 4) na vertical, e considerando que a camada superficial do fluido é móvel, é

possível obter a equação da continuidade integrada na vertical, conforme mostrado na Eq. 17.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{J}_y}{\partial y} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

Onde:

$U, V = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u, v \, dz$  = velocidade horizontal (nas direções x e y) média na vertical;

$u, v$  = velocidade horizontal (nas direções x e y) verticalmente variante;

$H = \zeta + h$  = espessura total da coluna de água;

$h$  = profundidade batimétrica;

$\zeta$  = superfície livre a partir do geóide.

Já os termos  $\tilde{J}_x$  e  $\tilde{J}_y$  presentes na Eq. 18 são descritos através das equações abaixo,

$$\tilde{J}_x = J_x - gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (19)$$

$$\tilde{J}_y = J_y - gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (20)$$

Onde:

$$\begin{aligned} J_x = & -(UH) \frac{\partial U}{\partial x} - (VH) \frac{\partial U}{\partial y} + f(VH) - \frac{g}{2} \frac{\partial \zeta^2}{\partial x} \\ & - gH \frac{\partial \left[ \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + M_x - D_x - B_x \\ & + U \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tau_0(UH) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
J_y = & -(UH) \frac{\partial V}{\partial x} - (VH) \frac{\partial V}{\partial y} - f(UH) - \frac{g}{2} \frac{\partial \zeta^2}{\partial y} \\
& - gH \frac{\partial \left[ \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + M_y - D_y - B_y \\
& + V \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tau_0(VH)
\end{aligned} \tag{22}$$

É importante ressaltar que o termo  $\tau_0$  aparece nas equações descritas acima como um fator de ponderação. Ele aparece nas equações quando a Eq. 17 é transformada na Eq. 18. Essa Eq. 18 é denominada Equação da Continuidade Generalizada de Onda (*Generalized Wave Continuity Equation – GWCE*), e é deduzida quando a Eq. 17 é derivada no tempo, multiplicada por  $\tau_0$  (coeficiente denominado *wave continuity*), assumindo-se uma profundidade batimétrica que não se altera no tempo ( $\partial H / \partial t = \partial \zeta / \partial t$ ), e rearranjando os termos resultantes usando a regra da cadeia e a Equação da Conservação Quantidade de Movimento (CQM). Vale ressaltar que a equação da continuidade solucionada pelo ADCIRC é a Eq. 18.

Ao se considerar o efeito de rotação da Terra, fluido compressível, juntamente com a consideração dos efeitos de onda longa e aproximação da pressão hidrostática, e integrar verticalmente a equação CQM é possível obter a equação de águas rasas utilizadas pelo modelo ADCIRC, conforme mostrado abaixo.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial UQ_x}{\partial x} + \frac{\partial VQ_x}{\partial y} - fQ_y \\
= -gH \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + M_x - D_x - B_x
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial UQ_y}{\partial x} + \frac{\partial VQ_y}{\partial y} + fQ_x \\
= -gH \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + M_y - D_y - B_y
\end{aligned} \tag{24}$$

Onde:

$Q_x, Q_y = UH, VH$  = fluxo volumétrico por unidade de largura nas direções x e y;

$$D_x = \frac{\partial D_{uu}}{\partial x} + \frac{\partial D_{uv}}{\partial y} = \text{dispersão do momentum};$$

$$D_y = \frac{\partial D_{uv}}{\partial x} + \frac{\partial D_{vv}}{\partial y} = \text{dispersão do momentum};$$

$$D_{uu} = \int_{-h}^{\zeta} (u - U)(u - U) dz;$$

$$D_{uv} = \int_{-h}^{\zeta} (u - U)(v - V) dz;$$

$$D_{vv} = \int_{-h}^{\zeta} (v - V)(v - V) dz;$$

$$M_x = \frac{\partial H\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{xy}}{\partial y} = \text{gradiente da tensão lateral verticalmente integrada};$$

$$M_y = \frac{\partial H\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{yy}}{\partial y} = \text{gradiente da tensão lateral verticalmente integrada};$$

$$B_x = \int_{-h}^{\zeta} b_x dz = \text{gradiente de pressão baroclínica verticalmente integrado};$$

$$B_y = \int_{-h}^{\zeta} b_y dz = \text{gradiente de pressão baroclínica verticalmente integrado};$$

$$b_x = g \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\zeta} (\rho - \rho_0) / \rho_0 dz = \text{gradiente de pressão baroclínica};$$

$$b_y = g \frac{\partial}{\partial y} \int_z^{\zeta} (\rho - \rho_0) / \rho_0 dz = \text{gradiente de pressão baroclínica};$$

$\tau_{sx}, \tau_{sy}$  = tensão superficial imposta;

$\tau_{bx}, \tau_{by}$  = tensão de fundo, podendo ser linear ou quadrática;

$\rho$  = massa específica da água que varia com salinidade e temperatura;

$\rho_0$  = massa específica da água de referência;

$P_s$  = pressão atmosférica na superfície da água;

$\eta$  = equilíbrio do potencial de maré newtoniano.

Vale ressaltar que o termo de pressão das Eq. 23 e 24 foram descompactados afim de evidenciar os efeitos da pressão baroclínica, atmosférica e pressão causada pelo efeito do potencial de maré newtoniano.

Como pode ser observado na descrição dos parâmetros de dispersão do momentum e gradiente de pressão baroclínica, ambos necessitam de informações do perfil vertical, sejam elas de velocidade ou de massa específica. Sendo assim, esses parâmetros só podem ser calculados para o modelo 3D, sendo negligenciados no modelo 2DDI. Adicionalmente, outro ponto que deve ser observado é a utilização da

massa específica como sendo constante nas equações, mostrando uma simplificação das equações de CQM nesse caso.

Sendo assim, para esse projeto, o modelo não utilizará a pressão baroclínica, e portanto, deverá ser informado um valor para a massa específica da água de referência, o  $\rho_0$ .

Praticamente qualquer EDP pode ser resolvida através de modelos numéricos. Tais modelos visam transformar um problema físico com domínio contínuo em um problema numérico com domínio discreto. Para essa transformação ser realizada existem diversos tipos de modelos existentes, sendo os mais utilizados dentre os modelos clássicos o das diferenças finitas, dos elementos finitos e dos volumes finitos. Nestes modelos, o domínio de interesse é representado por uma grade ou malha, composta por células ou elementos (dependendo do modelo utilizado), essas células, ou elementos, são construídos através de nós, onde as variáveis dependentes das EDPs, discretizadas, são resolvidas (ROSMAN et al., 2006).

Para a resolução desse conjunto de equações, tanto do modelo 2DDI quanto do 3D, o ADCIRC se utiliza de três métodos, o método Galerkin de Resíduos Ponderados (RP) e Galerkin de Elementos Finitos (EF), além do método de Diferenças Finitas (DF) para discretização do tempo (LUETTICH JR e WESTERINK, 2004). O método Galerkin RP tem como objetivo reduzir a ordem das equações diferenciais, aproximando-as em uma combinação de funções lineares (funções teste). A precisão desse método depende da escolha dessas equações teste, e a solução aproximada deve satisfazer as condições de contorno do problema. Vale ressaltar que cada função teste possui um peso associado a ela (daí o nome Resíduos Ponderados). Esse método pode ser aplicado em equações diferenciais de segunda ordem e de quarta ordem (HAFTKA, 2010). Já o método Galerkin EF serve para discretizar o domínio simulado. Como o domínio das equações diferenciais é contínuo, isso faz com que a solução do problema se torne extremamente complexa.

Assim, discretizar o domínio em elementos, é uma forma para simplificar a solução da equação, fazendo com que se diminua a carga de processamento do algoritmo. Essa

discretização faz com que o domínio seja dividido em um número finito de elementos (sejam eles triangulares, quadrangulares, pirâmide) onde a solução de cada elemento é aproximada a uma forma polinomial simples (DURÁN, 2005). A figura abaixo demonstra essa discretização de forma simplificada.

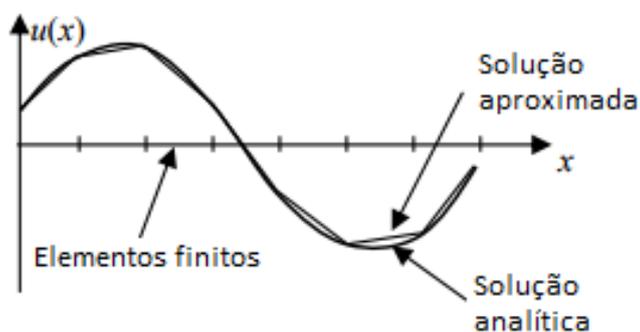


Figura 1: Comparação entre solução analítica e numérica (adaptado DURÁN, 2005).

Como pode ser observado, o domínio simulado foi discretizado em diversos nós, onde uma solução foi determinada para cada nó a fim de gerar um resultado que melhor se aproximasse do resultado analítico.

Por fim, o terceiro método empregado para a solução das equações governantes do ADCIRC é o método DF para a discretização do tempo. Esse método consiste na discretização do tempo em três pontos: passado, presente e futuro. Adicionalmente, o intuito dessa discretização é auxiliar na redução da ordem das equações diferenciais com a finalidade de simplificar a complexidade das mesmas. Após a discretização do tempo, o ADCIRC substitui as equações originais por versões aproximadas de acordo com o método empregado pelo algoritmo. Para a equação da conservação da continuidade, o algoritmo utiliza uma aproximação do tipo diferença central, onde os três tempos (passado, presente e futuro) são empregados numa série de Taylor. Já nas equações CQM, o algoritmo usa uma aproximação de diferença progressiva, onde são usadas variáveis do presente e futuro (também numa série de Taylor). Isso se deve ao fato da equação de conservação da continuidade apresentar uma derivada temporal de segunda ordem, e as equações CQM apresentarem apenas derivadas temporais de primeira ordem (JUSTO et al., 2018).

Outro ponto crucial para a resolução das equações de estado é a definição das condições de contorno e iniciais.

### 3.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno (CC) assumidas para o grupo de equações governantes, apresentadas na seção a cima, podem ser classificadas em dois tipos, condições de contorno aberto ou fechado. As condições de contorno aberto estão relacionadas com os limites do domínio que sofrem influência dos efeitos de maré diretamente, ou de rios. Esses contornos, denominados contornos abertos, estão localizados nos limites laterais do domínio e são responsáveis por introduzir o efeito de oscilação produzidos pela onda de maré, e/ou efeitos originados por descargas de água, sejam de entrada ou saída no domínio.

Já para a CC de superfície do domínio analisado, é necessária determinação de como o vento atuará nela. Para esse trabalho foi considerado que a incidência do vento resulta numa tensão de cisalhamento o qual é responsável por afetar a superfície de contorno.

As condições de contorno fechado estão relacionadas aos limites do domínio que sofrem influência do terreno, sejam esses contornos localizados nas laterais do domínio. Para as CC laterais utilizadas nas simulações foram escolhidas as condições de impenetrabilidade e não escorregamento. A condição de impenetrabilidade é definida como a não existência fluxo de massa através do contorno terrestre, em outras palavras, não existe infiltração da água no solo, nem entrada de água vindo do solo no domínio. A CC de não escorregamento define que a velocidade tangencial do fluido no contorno é nula.

Mais informações a respeito dessa condição de contorno podem ser obtidas na seção 4.2.3, onde são descritas como foram aplicadas ao modelo.

### 3.5. CONDIÇÕES INICIAIS

As condições iniciais, assim como as condições de contorno, devem ser fornecidas para solucionar as EDPs. Existem dois tipos de condições iniciais que podem ser adotados nesse caso, a partida quente e a partida fria. A partida quente utiliza dados de elevação e velocidade pré configuradas para todos os nós do domínio no instante de tempo  $t=0$ . Esses dados de elevação e velocidade devem corresponder a um padrão de circulação realista do domínio simulado. Já a partida fria faz a consideração que todos os nós do domínio, com exceção dos nós do contorno aberto, tenham elevações nulas, resultando em velocidades bem próximas de zero. Devido a essa condição, é necessário que o modelo “aqueça” durante um período de tempo, resultando em um período onde os dados obtidos não possam ser utilizados. Esse período varia de domínio para domínio, e deve ser analisado com cautela para que se evite erros de análise nos resultados finais.

### 3.6. RESUMOS E DESCOBERTAS DE ESTUDOS QUE UTILIZARAM O MODELO NUMÉRICO ADCIRC

O código do ADCIRC é amplamente utilizado ao redor do mundo. Diversos exemplos de seu uso foram focados em representar a hidrodinâmica de sistemas estuarinos (COLAÇO et al., 2017; DEB E FERREIRA, 2017; DA SILVA, 2011; PINOTES, 2014; PANDOE, 2004).

Um dos mais recentes estudos a utilizar o ADCIRC, realizados no Brasil, foi o trabalho desenvolvido por COLAÇO et al. (2017), onde foi aplicado esse modelo na região de Vitória – ES. O trabalho desenvolve um sistema de previsão de ondas e maré como forma de subsidiar operações na região de estudo, em destaque, a região do Porto de Tubarão. Esse sistema fornece diariamente o *status* do mar em malhas de alta resolução a fim de atender as demandas portuárias da região. O modelo é acoplado com a saída de dados do modelo global de ondas, o WAVEWATCHIII (WW3) e do modelo de onda costeiro *Simulation WAVes Nearshore* (SWAN) com o intuito de fornecer dados para o contorno do domínio simulado pelo modelo hidrodinâmico ADCIRC. Adicionalmente, o TOPEX/POSEIDON *Global Tide Model* (TPXO) fornece dados para a forçante maré astronômica, também inserida nesse contexto como condição de contorno. Além desses dados de contorno, o ADCIRC recebe dados de

vento, fornecido pelo *Global Forecast System* (GFC) e pelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF), sobre todo o domínio simulado. Apesar do complexo trabalho, o modelo utilizado ainda necessita de calibrações, tanto individualmente nos modelos acoplados e utilizados para *input* de dados no ADCIRC, quanto no próprio ADCIRC. Entretanto, mesmo sem calibrações refinadas, os resultados apresentados já possuem ordens de grandeza observadas na natureza.

DEB E FERREIRA (2017) realizaram um estudo com o intuito de avaliar a degradação do mangue em Sundarbans, localizado em Bangladesh. Esses autores criaram cenários hipotéticos para esse estuário que vislumbravam avaliar o impacto no tratamento do mangue utilizando um pântano arbóreo, e o impacto sofrido por transformar o mangue em uma área de pastagem por falta de tratamento. Para as simulações, foi realizado o acoplamento entre o ADCIRC e o SWAN. Foi realizada uma grande variação nos parâmetros de fricção de fundo (Manning), efeito de bloqueio da transferência de momentum entre o vento e a coluna de água causada pela vegetação, e a rugosidade de fundo devido a vegetação que pode impedir o fluxo e a tensão superficial da água que o vento aplica. Os resultados encontrados apontaram a importância do mangue em reduzir a elevação da água, a velocidade, a penetração da inundação na planície de alagamento e a área inundada.

Em seu estudo, DA SILVA (2011) simula o evento de sobre-elevação do nível do mar de origem meteorológica que atingiu a costa Portuguesa no período de 14 a 16 de outubro de 1987 usando o modelo hidrodinâmico ADCIRC. Para fazer isso são considerados dois domínios de escalas diferentes, um maior para simular a hidrodinâmica do fenômeno na costa portuguesa e outro menor para observar a resposta do estuário do Lima a esse evento. Ao analisar a interação entre as marés astronômicas e marés meteorológicas o autor afirmou que usando um método que acopla os dois tipos de maré há uma melhor reprodução da elevação do nível d'água quando a maré está alta, durante a tempestade. Por outro lado, ao usar um método que faz uma sobreposição desses dois tipos de maré, a representação, durante a tempestade, das marés baixas é melhor. Ademais, resultados também mostraram a importância do coeficiente de atrito para a calibração da corrente e a importância da

consideração do parâmetro de Coriolis variável quando o domínio é muito extenso em latitude.

No trabalho escrito por GONÇALVES (2016), o modelo ADCIRC foi utilizado para completar a série histórica de três marégrafos com o intuito determinar a elevação da superfície da água durante tempestades mais intensas identificadas por PINOTES (2014). Para a realização desse estudo foram utilizadas a maré astronômica e meteorológica como forçantes. Os resultados desse trabalho indicaram a importância das tensões de radiação devido à rebentação das ondas e da morfologia de fundo do mar, pois nas condições de tempestades intensas, as elevações ocasionadas pelas ondas de gravidade são maiores e mais consideráveis. Outro ponto discutido nesse trabalho foi a transferência de energia existente entre as marés astronômica e meteorológica, ao se utilizar essas forçantes em conjunto no ADCIRC. Foi possível realizar essa afirmação ao comparar os três cenários simulados por esses autores: apenas com maré astronômica, apenas com maré meteorológica e com as duas em conjunto. Ao se comparar os resultados provenientes entre esses três cenários, determinou-se o terceiro cenário (maré astronômica em conjunto com maré meteorológica) como tendo o melhor resultado.

PANDOE (2004) observou e identificou os padrões de circulação da água e do transporte de sedimentos em áreas costeiras e estuarinas, proporcionando uma melhor compreensão das correntes e sua variação temporal e espacial. Para o estudo, foi utilizada uma versão modificada do ADCIRC 3D, o qual se adicionou um módulo para realizar os cálculos para transporte de sedimentos, além de se considerar o efeito baroclínico nas simulações. Os resultados encontrados apontam para um erro na conservação de massa teórica dos sedimentos erodidos e sedimentados, erro esse menor do que 6%. Adicionalmente, foi constatado que a adição do efeito baroclínico se mostrou de grande importância para o transporte de sedimentos. Entretanto, apesar dos bons resultados encontrados, o modelo adaptado do ADCIRC 3D necessita de uma melhor calibração com dados de campo para sua posterior aplicação em ambientes naturais.

## 4. METODOLOGIA

Nesta seção são descritas as características da área de estudo e a implantação do modelo ADCIRC. Adicionalmente, são colocadas a proposta dos cenários simulados, o procedimento de calibração e de validação. Finalmente, são apresentados os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação dos resultados simulados com os registros de campo.

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

As Baías de Sepetiba e de Ilha Grande formam um complexo estuarino localizado aproximadamente a 60km ao sul da cidade do Rio de Janeiro entre as latitudes  $22^{\circ} 55' S$  e  $23^{\circ} 25' S$  e entre as longitudes  $44^{\circ} 42' W$  e  $43^{\circ} 34' W$ . Essas duas baías são interligadas, tendo Ilha Grande como elemento de separação entre elas. Pode-se definir a região como sendo um complexo estuarino formado por dois corpos d'água separados por uma constrição entre o continente e Ilha Grande como mostra a Figura 2 (SIGNORINE, 1980a).

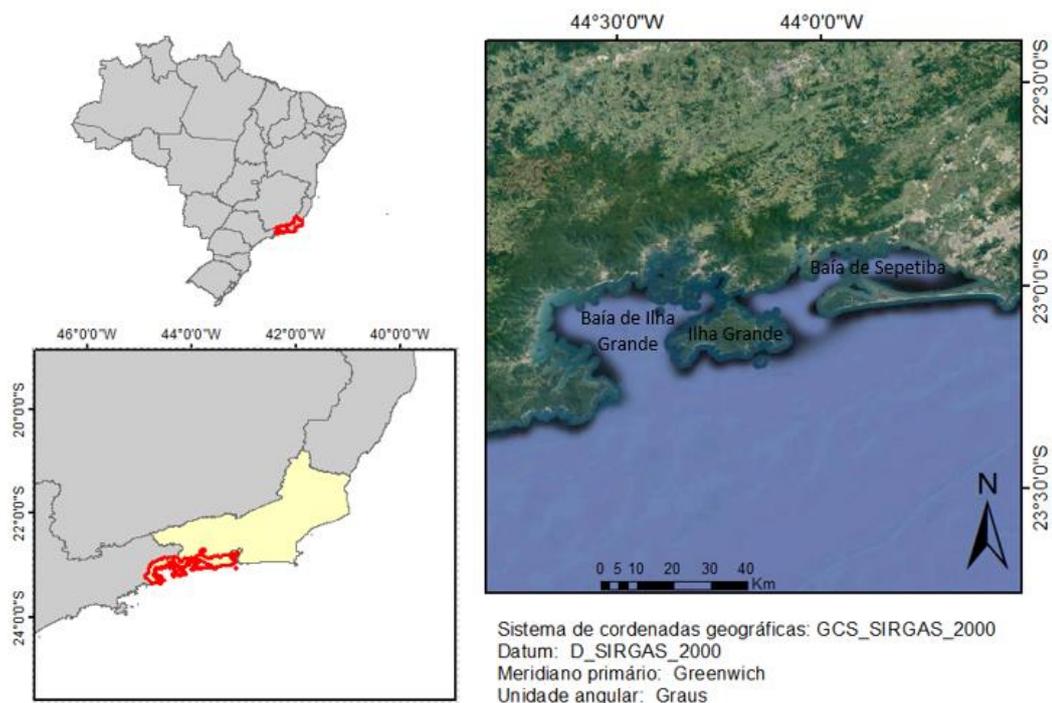


Figura 2: Mapa mostrando a localização das Baías de Sepetiba e Ilha Grande no Brasil

Na Figura 3 são mostrados alguns pontos da região que serão mencionados no desenvolver deste trabalho.

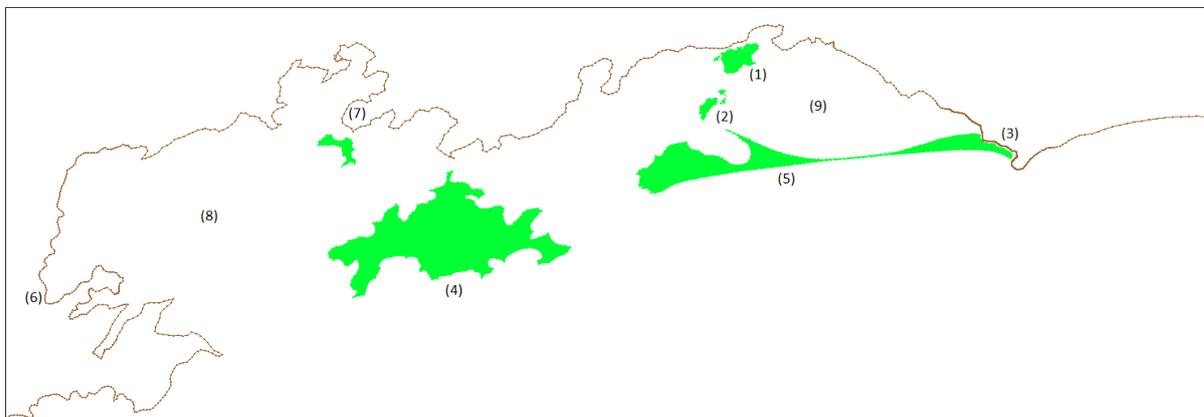


Figura 3: Mapa apresentando pontos de interesse: (1) Ilha de Itacuruça; (2) Ilha de Jaguanum; (3) Canal da Marambaia; (4) Ilha Grande; (5) Restinga da Marambaia; (6) Paraty; (7) Angra dos Reis; (8) Baía de Ilha Grande; (9) Baía de Sepetiba

Conforme pode ser visto pela Figura 2, o complexo estuarino da área de estudo é dividido por Ilha Grande (ponto 4), dessa forma a Baía de Ilha Grande constitui a baía a oeste de Ilha Grande e a Baía de Sepetiba constitui a baía a leste de Ilha Grande.

Esse complexo estuarino abriga duas usinas nucleares (Angra I e II), um terminal de transporte de petróleo (Terminal da Baía da Ilha Grande – Tebig), o Porto de Sepetiba, além de diversas indústrias presentes nessa região, como a de construção naval e de metalurgia. Esse porto apresenta intensa atividade, visto que atende 7 estados e ao Distrito Federal, onde escoam principalmente carvão mineral e alumínio (KALE, 2000). Onde todas essas atividades ocorrem em meio a reservas ecológicas (Restinga da Marambaia), áreas de proteção ambiental (Ilha Grande), grande biodiversidade de fauna e flora (mangue), além de uma zona de grande relevância para o turismo e atividade pesqueira. Todos esses fatos evidenciam como a região das baías de Ilha Grande e Sepetiba apresenta uma grande importância econômica, social e ambiental.

Por estar localizada na região costeira do estado do Rio de Janeiro, o complexo Sepetiba-Ilha Grande possui um clima tropical quente-úmido com uma precipitação média de 1400mm. Com uma área de aproximadamente 3100km<sup>2</sup> e um perímetro de 220km, essa região apresenta uma batimetria que chega a variar entre 0m (linha de

costa) a 30m (região entre as Ilhas de Itacuruça e de Jaguanum) (GENERAL BATHYMETRIC CHART OF THE OCEANS, 2019).

Apesar de bem próximas, as Baías de Sepetiba e Ilha Grande possuem comportamentos hidrodinâmicos bem distintos devido suas características geomorfológicas. A circulação das águas na Baía de Ilha Grande se dá predominantemente pelo efeito da onda de maré astronômica oriunda do oceano, devido à grande abertura existente, com aproximadamente 18km de extensão, que liga a baía com a plataforma continental. Outra característica importante dessa região é a existência de uma corrente permanente no sentido Oeste-Leste no canal entre o continente e Ilha Grande. Essa corrente existe mesmo durante o período o qual ocorre a baixa-mar, onde suas velocidades são reduzidas, mas sua direção permanece constante, apontando para o sentido leste. Isso ocorre devido à existência de uma corrente ciclônica, não induzida pela maré, localizada nos arredores e contornando Ilha Grande em locais onde a profundidade média é de aproximadamente 10m, a qual é responsável por lançar as águas mais quentes da Baía de Sepetiba dentro da Baía de Ilha Grande (IKEDA E STEVENSON, 1982).

A mistura das águas mais salinas e frias (provenientes do oceano) e as menos salinas e mais quentes (provenientes da Baía de Sepetiba) circula Ilha Grande, sendo relançadas em Sepetiba devido a corrente Oeste-Leste mencionada anteriormente (IKEDA E STEVENSON, 1980). Esse padrão permanente entre as baías é responsável gerar um gradiente horizontal de densidade o qual é responsável pela indução da corrente Oeste-Leste mencionada anteriormente. Esse resultado é reforçado por diferentes trabalhos, demonstrando consistência na existência de tal comportamento no complexo estuarino de Ilha Grande e Sepetiba (CORRÊA, 1994; MAHIQUES, 1987; FRAGOSO, 1999).

Com relação a onda de maré, a hidrodinâmica da Baía de Ilha Grande não sofre grandes influências. Isso se deve ao fato dessa baía possuir dois acessos, um que conecta a baía com o oceano e outro que conecta a Baía de Ilha Grande com a de Sepetiba. Esses dois acessos recebem a onda de maré em fase, mas se propagando

em direções opostas, fazendo com que seus feitos se cancelem parcialmente dentro da baía (SIGNORINE, 1980a; SIGNORINE, 1980b).

Por outro lado, a Baía de Sepetiba possui grande influência das vazões dos rios e canais que despejam água doce nessa área, sendo o Canal de São Francisco o mais significativo com uma vazão de média de 187,00 m<sup>3</sup>/s (ROSMAN et al, 2006).

Mesmo possuindo um cordão arenoso, formada pela Restinga da Marambáia, o qual dificulta o acesso ao oceano, essa baía sofre grande influência da maré (FRAGOSO, 1999). Esse bloqueio faz com que a Baía de Sepetiba possua dois pontos de conexão com o oceano, um a oeste (próximo de Ilha Grande) e um a leste (Canal da Marambaia). Apesar desse bloqueio parcial com o oceano, a influência da maré na hidrodinâmica local pode ser atribuída as dimensões dessa baía. Tendo seu comprimento característico bem próximo de um quarto do valor do comprimento da componente M<sub>4</sub>, a Baía de Sepetiba faz com que o efeito dessa onda seja amplificado.

Devido aos canais mais profundos localizados entre as Ilhas de Itacuruçá e a Ilha de Jaguanum, e entre o continente e a Ilha de Itacuruça, a Baía de Sepetiba apresenta as maiores velocidades de corrente, quando comparadas com a Baía de Ilha Grande, valores esses próximos de 1m/s, onde as profundidades variam entre 20m e 30m. Outro ponto importante é a influência do vento nessa região, uma vez que essa baía é fortemente influenciada pelos efeitos de tempestades de direção SE (CUNHA, ROSMAN e MONTEIRO, 2006).

Tanto a Baía de Sepetiba quanto a Baía de Ilha Grande possuem maré semi-diurna mista, assim como grande parte do litoral brasileiro. Entretanto, as amplitudes observadas nessas baías diferem, tendo a Baía de Ilha Grande amplitudes máximas da ordem de 0,6m durante os períodos de sizígia e valores entre 0,1m e 0,2m durante os períodos de quadratura. Já a Baía de Sepetiba possui amplitudes máximas da ordem de 1,6m durante os períodos de sizígia e de aproximadamente 0,7m durante os períodos de quadratura. A maré nessas baías sofre influências predominantemente das componentes M<sub>2</sub> e S<sub>2</sub>, e segundo o critério de Coutier, ao se relacionar a soma dessas duas componentes com a soma das componentes K<sub>1</sub> e O<sub>1</sub>, é possível

observar uma desigualdade diurna, o que resulta em valores de elevação diferentes alcançadas pelas baixa-mares ou preamares consecutivas (BRASIL, 2006; BAPTISTA FILHO et al., 2003).

Os ventos de sul/sudoeste são predominantes na região de complexo estuário, ocorrendo um maior número de vezes e com maiores intensidades que os demais. De acordo com dados provenientes da estação localizada na Base Área de Santa Cruz, a qual mostrou que os ventos mais frequentes vinham da direção sul, com velocidades médias variando entre 3 a 5 m/s (SIGNORINI, 1980a). O mesmo foi encontrado ao analisar os dados da estação localizada em Angra dos Reis, ao se identificar uma série de 30 anos, foi possível constatar que os ventos mais frequentes tinham direção sul, com velocidades variando entre 2 e 4 m/s (BORGES, 1990).

Esse resultado foi reforçado ao se analisar a série histórica de 10 anos, de 2007 a 2017, provenientes do banco de dados do INMET, da estação 83743 localizada na região da Ilha de Marambaia. Estação essa que foi utilizada para obter dados de contorno para as forçante do vento.

## 4.2. IMPLANTAÇÃO DO MODELO ADCIRC

Para a aplicação do modelo ADCIRC com o intuito de determinar a hidrodinâmica e os padrões de escoamento de uma determinada área, é necessário que se defina um conjunto de dados que devem ser fornecidos à malha do modelo, a qual representa a geometria da área modelada. Dentre esses dados, podem ser incluídos a própria malha do modelo, a batimetria da região, a amplitude de maré, as velocidades, as propriedades físicas da água e do vento, a rugosidade de fundo, dentre outros.

O detalhamento dessas informações encontra-se a seguir, bem como as condições iniciais e de contorno utilizadas no presente trabalho.

### 4.2.1. Malha

A malha utilizada nesse trabalho engloba as regiões das Baías de Ilha Grande e Sepetiba além de uma faixa litorânea adjacente a essas baías, conforme pode ser observado na Figura 4.

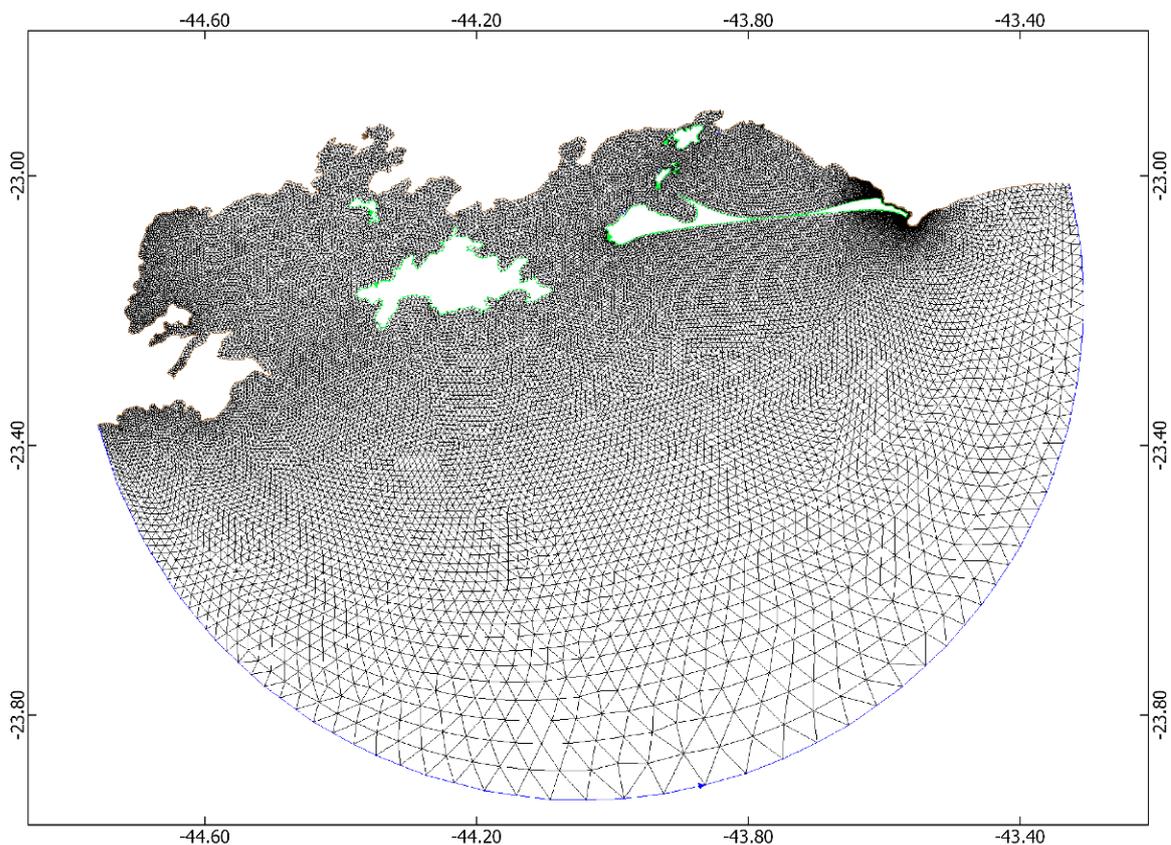


Figura 4: Malha do domínio simulado

Essa linha costeira adjacente foi adicionada com o intuito de se evitar que a instabilidade gerada pela interseção do contorno aberto e do contorno fechado se propagasse para dentro do complexo estuarino. Os dados detalhados sobre essa malha podem ser encontrados na tabela abaixo.

Tabela 1: Resumo dos dados da malha simulada

<b>Linha costeira</b>	1
<b>Ilhas</b>	9
<b>Número de nós</b>	21657

<b>Número de elementos</b>	41564
<b>Área</b>	12041,96 km <sup>2</sup>
<b>Perímetro linha de costa</b>	373,15 km
<b>Perímetro contorno aberto</b>	245,6 km

Essa malha possui uma maior densidade de elementos nas regiões com menores valores de profundidade, e nas áreas onde existe uma variação brusca dessas profundidades. Esse adensamento se fez necessário em função do detalhamento de informações buscadas nesse trabalho, assim como a necessidade em gerar uma maior estabilidade na simulação numérica.

A malha apresentada na Figura 3 foi construída utilizando o *software* Surface-water Modeling Simulation (SMS) produzido pela empresa Aquaveo. Apesar de possuir uma versão paga, o qual contém um acervo de diversos modelos hidrodinâmicos, entre eles o ADCIRC, o SMS também possui uma versão gratuita que contém uma ferramenta para criação de malhas estruturadas e não estruturadas.

Essa versão gratuita do SMS dispõe de um poderoso modelo capaz de gerar malhas de elementos finitos utilizando parâmetros tais como a profundidade, distância de um ponto de interesse, distancia normalizada, ou qualquer outro parâmetro que o usuário julgue ser necessário. Além da facilidade na geração da malha, esse programa ajuda a otimizar a malha indicando regiões com possíveis problemas assim como mostra a figura abaixo.

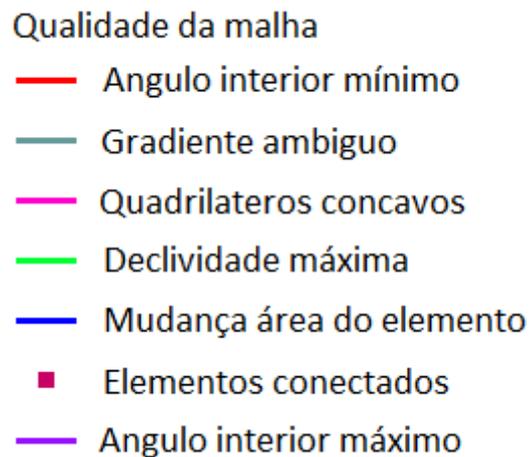


Figura 5: Legenda indicativa de qualidade da malha gerada através do SMS.

#### 4.2.2. Batimetria

Com relação a batimetria do domínio, esse conjunto de dados foi adquirido através da digitalização e interpolação de pontos obtidos de cartas náuticas provenientes da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e de dados da batimetria global GEBCO (GENERAL BATHYMETRIC CHART OF THE OCEANS, 2019). O resultado dessa interpolação pode ser observado na Figura 6.

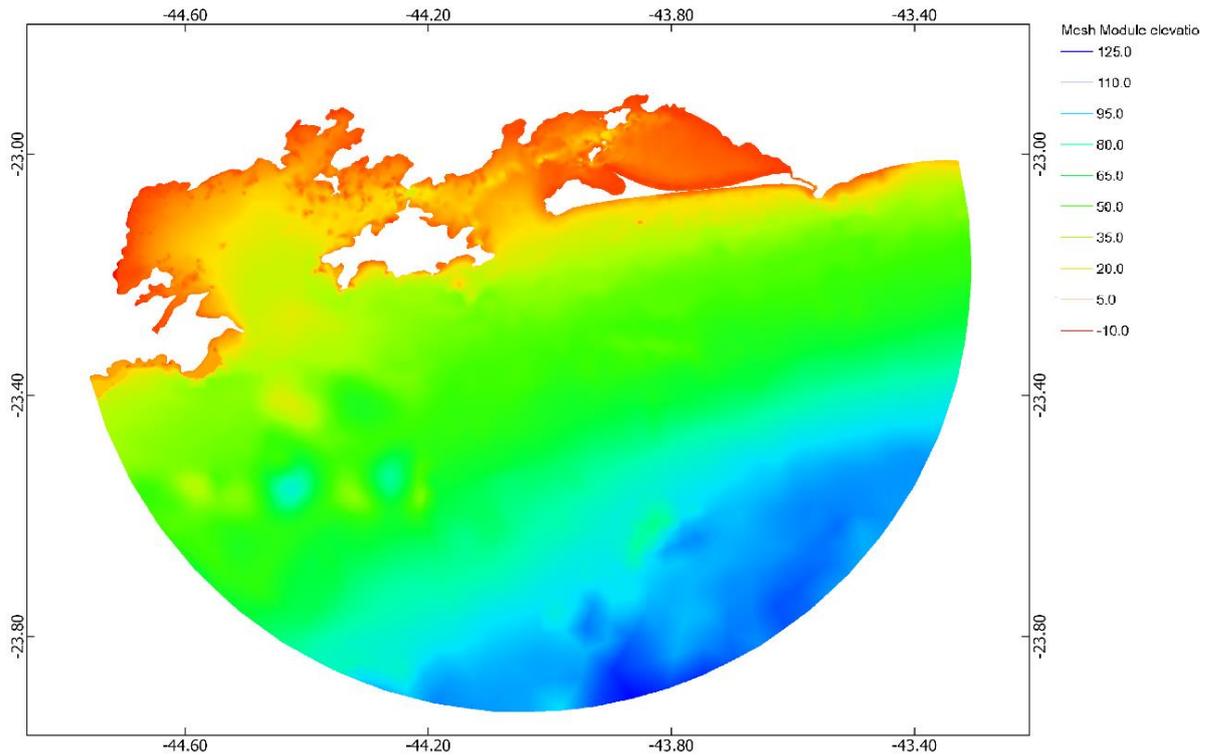


Figura 6: Batimetria interpolada através de dados globais GEBCO e de cartas náuticas do DHN

Como pode ser observado na Figura 5, existe um canal mais profundo localizado no estreitamento causado entre a Restinga da Marambaia e o continente, assim como no estreitamento entre as Ilhas de Jaguanum e Itacuruça. Esse canal mais profundo existe devido a existência de um porto localizado próximo à Ilha de Itacuruça.

#### 4.2.3. Condições de contorno

O ADCIRC dispõe de diversos tipos CC laterais tais como: radiação na elevação, radiação na velocidade, gradiente de elevação normal zero, gradiente de velocidade normal zero, fluxo específico e elevação específica. Para esse trabalho se optou por utilizar a elevação específica como CC lateral do contorno aberto, visto que através dela é possível implementar os harmônicos mais importantes para a região de estudo.

Dessa forma, nos nós do contorno aberto (linha azul da Figura 3), foi possível utilizar dados de amplitude e fase provenientes do modelo global *Finite Element Solution* (FES) (AVISO, 2014). O FES é uma versão revisada da solução hidrodinâmica das marés globais iniciado por Cristian Le Provost no início dos anos 90. Seus resultados

já foram desenvolvidos, implementados e validados, possuindo uma resolução de 1/16 de grau na versão utilizada nesse projeto.

Para a determinação de quais harmônicos utilizar, foram analisados dados proveniente de três estações maregráficas localizadas no interior da Baía de Sepetiba. Esses dados foram fornecidos pelo DHN e as estações escolhidas para essa análise se encontram na tabela abaixo, e suas respectivas localizações podem ser encontradas na Figura 7.

Tabela 2: Estações maregráficas com dados atuais consistentes na região de estudo

<b>Estação</b>	<b>Nome</b>
50188	Cadim
50184	Ilha de Jaguanum
50153	EBN

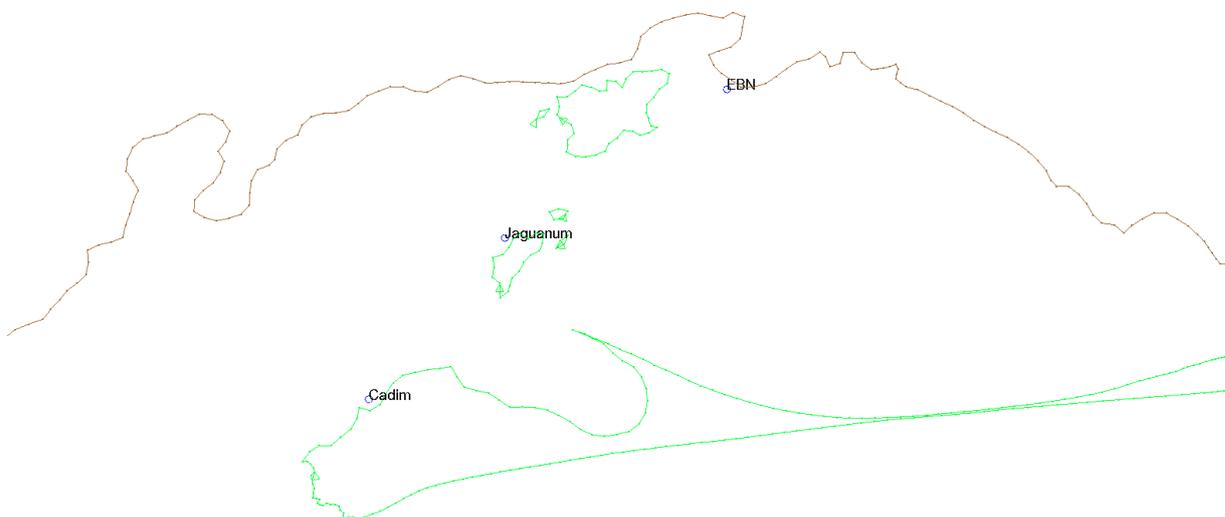


Figura 7: Localização das estações Cadim, Ilha de Jaguanum e EBN.

Essas três estações foram selecionadas em virtude da disponibilidade de dados consistentes, dentro de um mesmo período de tempo. Nesse caso, o intervalo de tempo analisado compreende o período entre 25/09/2015 e 23/11/2015.

Com os dados de elevação dessas 3 estações, foi possível extrair os principais harmônicos que compõe as ondas na região de interesse. Para isso foi utilizado o programa Pacmaré, que possui uma interface extremamente simples, e é de fácil manuseio. Os harmônicos escolhidos para constituírem o contorno aberto foram M2, S2, O1, K1, K2, N2, Q1, T2, L2, P1, 2N2 e MU2. Suas amplitudes e fases encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 3: Amplitude e fase dos harmônicos característicos da região de estudo

<b>Harmônico</b>	<b>Amplitude (cm)</b>	<b>Fase (º)</b>
M2	31,56	77,10
S2	17,73	78,03
O1	10,88	82,22
K1	5,27	134,17
K2	4,82	78,11
N2	4,60	130,96
Q1	3,38	51,93
T2	1,05	78,07
L2	0,68	125,70
P1	1,74	130,27
2N2	0,61	184,81
MU2	0,84	141,33

Já com relação a vazão dos rios presentes na região de estudo, foi considerada apenas a vazão do Canal de São Francisco, o qual possui uma vazão média de 187,0 m<sup>3</sup>/s (Comitê da Bacia Hidrográfica Guandu, 2012). As vazões dos demais estuários não foram consideradas devido aos baixos valores quando comparadas ao do Canal de São Francisco.

Com relação aos dados de vento, os mesmos foram obtidos através da Rede do INMET pela estação localizada no Rio de Janeiro, com coordenadas (-43,18, -22,89). Os dados obtidos correspondem ao mesmo período da simulação realizada, de 25/09/2015 à 23/11/2015.

Devido a disponibilidade de dados, foi considerado que a intensidade e direção dos ventos variaram com um passo de tempo de 60min. Dessa forma o vento será considerado uniforme no espaço, mas variável no tempo.

Para determinar essa tensão de cisalhamento causada pelo vento, é necessário que se calcule o coeficiente de arrasto para a determinação da tensão de cisalhamento, conforme as equações abaixo (BLAIN, LINZELL e ESTRADA, 2007)

$$D_c = 0,001 * (0,75 + 0,067 * W_m), \quad (25)$$

*se  $D_c > 0,003$  então considerar  $D_c = 0,003$*

$$W_{sx} = D_c * 0,001293 * W_m * W_x \quad (26)$$

$$W_{sy} = D_c * 0,001293 * W_m * W_y \quad (27)$$

Onde,

$D_c$  é o coeficiente de arrasto;

$W_m$  é a magnitude da velocidade do vento;

$W_x$  e  $W_y$  são as componentes da velocidade do vento na direção x e y;

$W_{sx}$  e  $W_{sy}$  são as componentes da tensão de cisalhamento causada pelo vento nas direções x e y.

Com relação a CC de fundo, foi determinado que a batimetria não sofreria variação no tempo, dessa forma, os valores adotados para  $h$  são constantes no tempo, e variáveis no espaço. A CC de impenetrabilidade também foi aplicada para o fundo do domínio, dessa forma não são considerados a infiltração de água pelo fundo, tão pouco a entrada de água no domínio pelo fundo. Entretanto, foi adotado uma condição

de escorregamento baseada na rugosidade local do fundo. Mais detalhes sobre a rugosidade de fundo estão dispostos na seção 4.4.

Com relação a condição de contorno de alagamento e secamento, conforme detalhado na seção 3.4, o modelo analisa o elemento simulado e ao verificar uma altura mínima de coluna d'água determina se o elemento está seco ou alagado. A altura mínima utilizada foi de 5 cm.

#### **4.2.4. Condições iniciais**

Nesse projeto, optou-se por utilizar a partida fria na simulação, onde tanto as elevações quanto as velocidades das correntes são iguais a zero no instante inicial de tempo. Dessa forma, o modelo necessita de um certo período para se “aquecer” e então poder ser utilizado os dados simulados. Por essa razão foram excluídos a primeira semana de dados simulados a fim de evitar que erros numéricos de aquecimento se propagassem durante a análise dos resultados de elevação e velocidade.

Com relação aos demais parâmetros utilizados, foi adotado um valor de Coriolis variável, devido ao tamanho do domínio. Essa configuração é sugerida no manual técnico do modelo, entretanto o manual também faz uma ressalva avisando que pode ser utilizado um valor constante caso o operador julgue necessário.

Adicionalmente, os parâmetros gravidade e massa específica foram ajustados com os valores de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e  $1025,0 \text{ kg/m}^3$ .

### **4.3. PROPOSTA DOS CENÁRIOS**

Para esse projeto foram considerados dois cenários distintos a fim de avaliar os efeitos do vento na hidrodinâmica das Baías de Ilha Grande e Sepetiba. São eles:

Cenário 1: onde foi considerada apenas a maré astronômica como forçante do modelo;

Cenário 2: onde foram consideradas, além da maré astronômica, a forçante do vento.

Ambos os cenários foram utilizados para a calibração do modelo, onde o período simulado ocorreu entre os dias 19/09/2015 à 25/10/2019. Esse período de 37 dias foi simulado em virtude da partida fria (condição inicial), desse modo foi possível eliminar os primeiros 7 dias de simulação, de modo que o modelo aquecesse adequadamente, e assim, permitindo a análise de 2 ciclos de sizígia e quadratura nesse período de tempo.

Para a validação, apenas o cenário que apresentou o melhor resultado durante a calibração foi utilizado. O período simulado para a validação foi de 19/10/2019 à 24/11/2019. Da mesma forma como exposto anteriormente, foram desconsiderados os dados dos primeiros 7 dias em função da partida fria.

#### 4.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para a calibração do modelo ADCIRC, é necessário que alguns parâmetros sejam ajustados, visto que podem possuir uma gama de diferentes valores que são afetados pelas características domínio. Os parâmetros responsáveis pela calibração do modelo bidimensional, nesse caso, são o passo de tempo e os coeficientes *wave continuity* ( $\tau_0$ ) e de atrito de fundo (ou rugosidade de fundo), sendo o último utilizado no cálculo da tensão de cisalhamento de fundo. Para as CC de fundo, existe a condição de contorno relacionada ao escorregamento, a qual é definida através da escolha do coeficiente de atrito.

O passo de tempo foi determinado através da análise do número de Courant. Devido ao tamanho dos elementos criados na malha, e seu adensamento, foi optado por um passo de tempo de 10s, o qual resultou em um Courant próximo de 1, gerando simulações mais rápidas e estáveis.

O ADCIRC dispõe de 3 métodos para calcular as tensões de cisalhamento de fundo, que são o coeficiente linear, o quadrático e o híbrido. Para esse projeto, foi escolhido o coeficiente quadrático, visto que é o mais utilizado na literatura.

Nesse caso, a tensão de fundo é parametrizada como uma função quadrática da velocidade média vertical. O ADCIRC utiliza as seguintes equações para o cálculo desse parâmetro.

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_0} = C_f (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} U \quad (28)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_0} = C_f (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} V \quad (29)$$

Onde  $C_f$  é o coeficiente de fricção de fundo.

Para a calibração do coeficiente de fricção de fundo foram avaliados valores sugeridos pela literatura. Valores típicos para esse parâmetro podem variar entre 0,0025m e 0,03m, dependendo das características do material de fundo da região de estudo (PINGREE e MADDOCK, 1980; DILORENZO, HUANG e NAJARIAN, 2019; FIELDER et al, 2018). Para o complexo estuarino das Baías de Sepetiba e Ilha Grande, esse valor pode variar entre 0,0015m nas regiões que possuem areia como material de fundo, até 0,03m nas regiões de restinga e mangue (CUNHA, ROSMAN e MONTEIRO, 2002). Ao testar exaustivamente o modelo, foram adotados os valores para o coeficiente de fricção de fundo de 0,03m para regiões de mangue e 0,005m para demais regiões do domínio.

Valores maiores do que 0,005m para o atrito de fundo geraram problemas de atraso na onda simulada, resultando em simulações com problemas de fase, quando comparada com as medições das estações maregráficas, principalmente na estação Cadim.

Com relação ao parâmetro *wave continuity*, de acordo com o manual técnico produzido por LUETTICH JR, WESTERINK e SCHEFFNER (1992), seu valor pode sofrer alterações de acordo com o valor adotado de coeficiente de fricção de fundo, entretanto, é recomendado que se utilize valores entre 50% e 100% do valor adotado para a fricção de fundo. Após serem testados diversos valores, foi determinado que um  $\tau_0 = 0,005$  produziu resultados mais estáveis, e com melhor aproximação entre o

valores medidos e simulados. Apesar de existirem áreas onde o coeficiente de atrito utilizado foi de 0,03m, o modelo não apresentou problemas com essa configuração.

Vale ressaltar que os valores dos parâmetros passo de tempo, fricção de fundo e *wave continuity* foram encontrados ao se simular os Cenários 1 e 2 exhaustivamente. Os melhores resultados encontrados para os dois cenários encontram-se na seção 5, onde foram apresentados e discutidos. Para a aferição desses resultados, foram comparados os resultados simulados obtidos dos Cenários 1 e 2, com os valores medidos nas estações Cadim, Jaguanum e EBN, e para avaliar essa comparação foram utilizados três parâmetros estatísticos distintos, o Erro Absoluto Médio (MAE), o Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Índice de concordância de Willmott (d). A descrição desses parâmetros pode ser encontrada em detalhes na seção 4.6.

Adicionalmente, assim como mencionado na seção 4.3, o período de simulação utilizado para a calibração foi de 37 dias, entre os dias 19/09/2015 à 25/10/2019, sendo os primeiros 7 dias desconsiderados em virtude da condição inicial de partida fria.

#### 4.5. VALIDAÇÃO

A validação é utilizada a fim de testar os ajustes realizados nos parâmetros calibrados. Esse processo envolve realizar uma simulação no mesmo domínio, utilizando os mesmos valores para os parâmetros de calibração, mas em um período de tempo diferente do simulado durante a calibração. Com isso, é possível demonstrar que os parâmetros calibrados não possuem “vício”, e o modelo pode ser utilizado para realizar simulações em diferentes períodos de tempo e aplicado em diversos cenários desejados, desde que respeitado os parâmetros de calibração, e as considerações utilizadas previamente.

Sendo assim, a validação desse modelo utilizou o cenário que obteve melhor resposta durante a fase de calibração, em outras palavras, o cenário que apresentou a melhor resposta ao se avaliar parâmetros estatísticos.

O período utilizado nas simulações da validação foi de 19/10/2019 à 24/11/2019. Assim como na calibração, os primeiros 7 dias foram escolhidos devido ao “aquecimento” do modelo.

#### 4.6. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Para analisar a calibração e validação do modelo desse projeto, é necessário que se compare os resultados simulados com os medidos nas estações da Tabela 2. Para realizar essa análise, parâmetros estatísticos são recomendados pela literatura, visto que a comparação visual de resultados é sujeito a erros subjetivos por parte do usuário. Sendo assim, foram escolhidos três parâmetros estatísticos capazes de avaliar os erros e comparar os valores obtidos das variáveis com os valores medidos. São eles o Erro Médio Absoluto, em inglês *Mean Absolute Error* (MAE), a Raiz do Erro Quadrático Médio, em inglês *Root Mean Square Error* (RMSE), e o índice de concordância de Willmott (d). Suas formulações encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 4: Fórmula dos parâmetros estatísticos que serão utilizados na dissertação

Parâmetro estatístico	Fórmula
Erro Médio Absoluto	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $
Raiz do Erro Quadrático Médio	$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$
Índice de concordância de Willmott	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - \bar{O}  +  O_i - \bar{O} )^2}$

Diferente do erro médio (EM), o MAE não é afetado por valores negativos ou positivos encontrados no somatório. Por esse motivo, pode-se dizer que o MAE é um parâmetro mais robusto menos sujeito a erros anômalos extremos. Adicionalmente, analisando o MAE é possível determinar o afastamento médio entre os valores simulados e medidos, dessa forma, os valores próximos a zero podem ser considerados ideais (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011).

Já o RMSE é capaz de determinar a acurácia do modelo através da comparação dos resultados medidos com os simulados. Uma vantagem desse parâmetro quando comparado com o Erro Quadrático Médio, é que o RMSE produz resultados na mesma dimensão das variáveis analisadas, o que permite uma visualização simplificada do resultado. Assim como o MAE, valores de RMSE próximos de zero tendem a ser considerados ideais (WILKS, 2006).

E por último, o parâmetro de Wilmott ( $d$ ), o qual é capaz de indicar o nível de dispersão dos dados simulados em relação aos medidos que pode ser aplicado e interpretado facilmente, independente das unidades utilizadas. Esse índice varia entre 0 e 1, onde 1 indica concordância total, e 0 indica discordância total entre esses dados (DE OLIVEIRA, 2016).

É importante ressaltar que a análise de sensibilidade do modelo a influência da forçante do vento se dá pela utilização desses parâmetros estatísticos. Ou seja, ao se avaliar a diferença entre os parâmetros obtidos durante os Cenários 1 e 2 na calibração do modelo, é possível inferir essa sensibilidade.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados encontrados são apresentados separadamente por calibração e validação, sendo realizada uma análise da hidrodinâmica da área de estudo ao final dessa seção. Os valores simulados serão comparados com os dados de elevação medidos nas 3 estações apresentadas na seção 4.4, são elas as estações EBN, Cadim e Jaguanum. Sendo esses resultados avaliados através dos parâmetros estatísticos introduzidos na seção 4.6, o MAE, o RMSE e o índice de Willmott durante a calibração e validação do modelo. Por fim, os dados de corrente da validação serão comparados com resultados encontrados na literatura.

### **5.1. CALIBRAÇÃO**

#### **5.1.1. Cenário 1**

Nesse cenário, onde a forçante da simulação é apenas a maré astronômicas, foi necessário a utilização de um filtro de baixas frequências nos dados medidos das 3 estações. Dessa forma foi possível remover os efeitos da maré meteorológica nos dados medidos. O filtro escolhido foi o de Godin, onde foram aplicadas médias móveis de 24h, 25h e 25h (GODIN, 1972). Através das Figuras 8, 9 e 10 é possível identificar o efeito da maré meteorológica nos dados medidos.

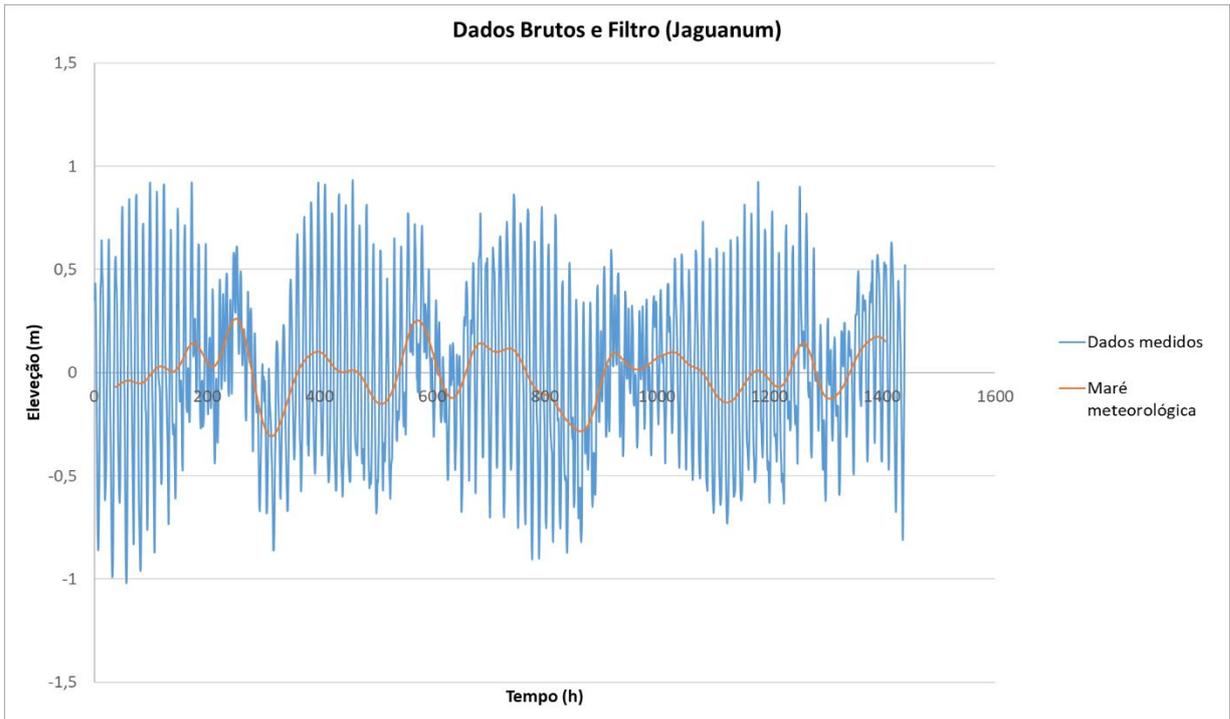


Figura 8: Dados medidos da estação Jaguanum e Maré meteorológica encontrada através do Filtro de Godin (24h, 25h e 25h)

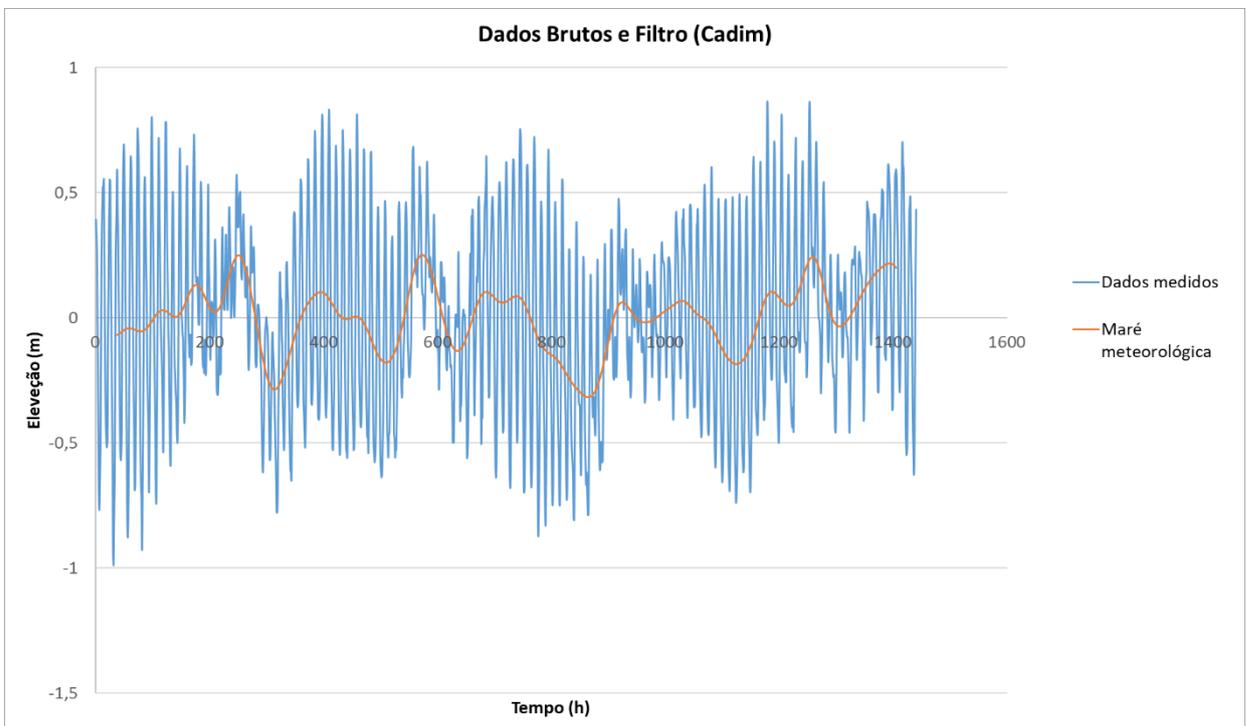


Figura 9: Dados medidos da estação Cadim e Maré meteorológica encontrada através do Filtro de Godin (24h, 25h e 25h)

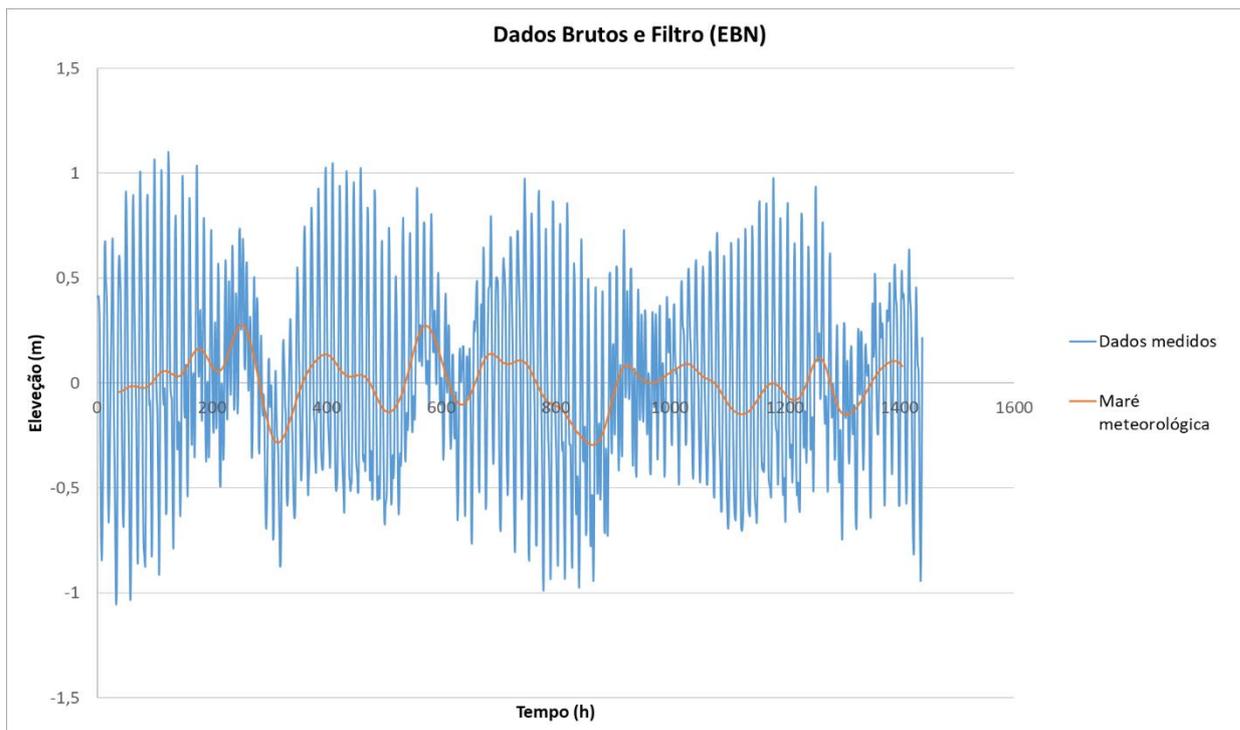


Figura 10: Dados medidos da estação EBN e Maré meteorológica encontrada através do Filtro de Godin (24h, 25h e 25h)

Ao se aplicar as três médias móveis de 24h, 25h e 25h nos dados medidos pelas estações, é possível encontrar o efeito causado pela maré meteorológica naquele local. Dessa forma, ao se subtrair essa maré dos dados medidos, seria possível obter os valores de elevação referentes a maré astronômica local (GODIN, 1972). Portanto, é correto que os dados simulados (Cenários 1 e 2) sejam comparados a com a diferença dos dados medidos e o resultado obtido ao se aplicar o Filtro de Godin.

Após a aplicação do Filtro de Godin, foi possível observar uma grande suavização nos dados medidos, principalmente na estação Cadim. Outro ponto que deve ser ressaltado foi que devido a aplicação do filtro, as extremidades da série analisada não podem ser utilizadas, mais especificadamente 72h de dados, sendo 37h iniciais e 35h no final da série. Esses dados não poderão ser comparados em virtude das médias móveis calculadas, pois o valor da média é inserido na posição da mediana da série histórica, resultando nas perdas mencionadas anteriormente.

Tendo o filtro sido aplicado, foi possível comparar os resultados das simulações com os dados filtrados para as estações EBN, Cadim e Jaguanum. Essas comparações encontram-se nas figuras a seguir.

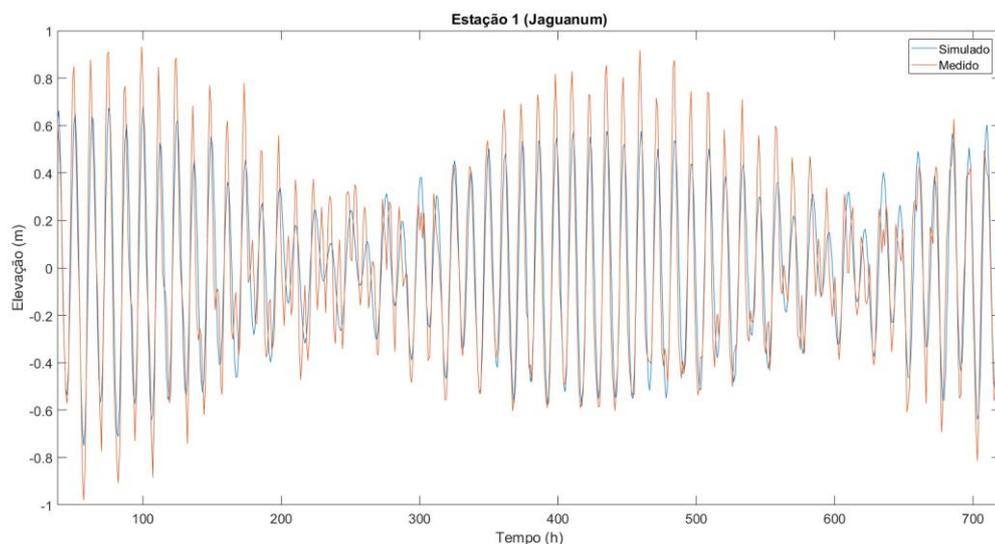


Figura 11: Dados medidos filtrados e dados simulados para a estação Jaguanum

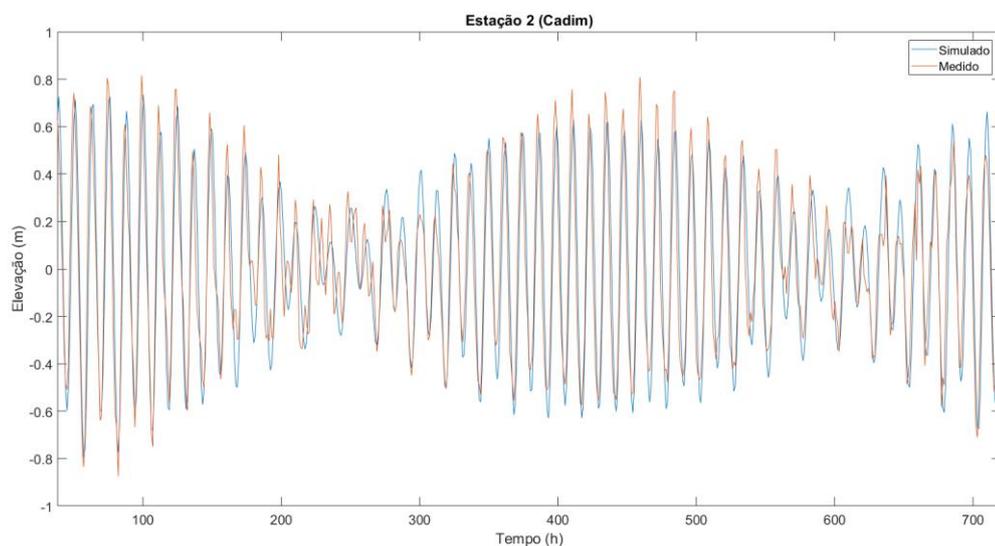


Figura 12: Dados medidos filtrados e dados simulados para a estação Cadim

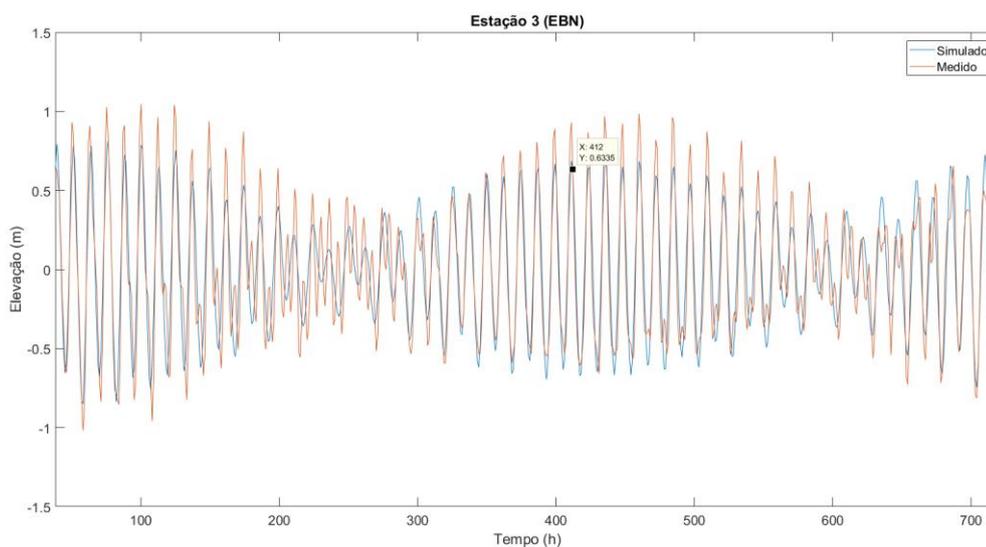


Figura 13: Dados medidos filtrados e dados simulados para a estação EBN

Como pode ser observado nas figuras acima, os resultados obtidos para elevação encontram-se em fase com os dados medidos, apesar das estações EBN e Cadim apresentarem valores superestimados durante as baixa-mares de certos períodos de tempo (entre 340h e 550h). Já com relação as preamares, os dados simulados apresentaram valores subestimados quando comparados aos medidos.

A fim de quantificar o ajuste dos dados simulados com os medidos nas estações maregráficas (Figura 7), foram realizados o cálculo das 3 variáveis estatísticas, são elas: MAE, RMSE e índice de Willmott. Seus valores para as 3 estações encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 5: Análise estatística dos resultados encontrados no Cenário 1

<b>Estação</b>	<b>MAE (m)</b>	<b>RMSE (m)</b>	<b>Índice de Willmott</b>
Jaguanum	0,14	0,17	0,93
Cadim	0,13	0,16	0,94
EBN	0,16	0,19	0,93

Assim como apresentado na tabela anterior, os valores encontrados para MAE e RMSE encontram-se dentro da mesma faixa para as 3 estações, sendo o melhor resultado apresentado pela estação Cadim, uma vez que possui menores valores para esses parâmetros.

Cadim pode ter apresentado os melhores resultados por estar localizado na região mais próxima da abertura da Baía de Sepetiba, entre a Restinga da Marambaia e Ilha Grande. Assim, essa estação acaba por receber menos influência dos efeitos da geometria da baía por estar mais próxima do oceano, do que as demais estações.

Com relação ao índice de Willmott, todas as estações apresentaram coesão em seus resultados, com valores acima de 0,93 para esse parâmetro. Isso representa uma grande consistência na simulação desse cenário.

### **5.1.2. Cenário 2**

Para o Cenário 2, foram consideradas as forçantes: maré astronômica e vento. O período simulado foi idêntico ao Cenário 1 com o intuito de permitir a comparação entre as simulações e apontar a influência do vento na hidrodinâmica do domínio analisado.

O vento foi aplicado uniformemente no domínio, para cada nó da malha, variando apenas temporalmente. Para a simulação desse cenário, foi considerado que essa forçante variou com passo de tempo de 60min.

Os resultados das simulações para o Cenário 2 podem ser observadas através das estações de medição Jaguanum, Cadim e EBN, conforme as figuras abaixo.

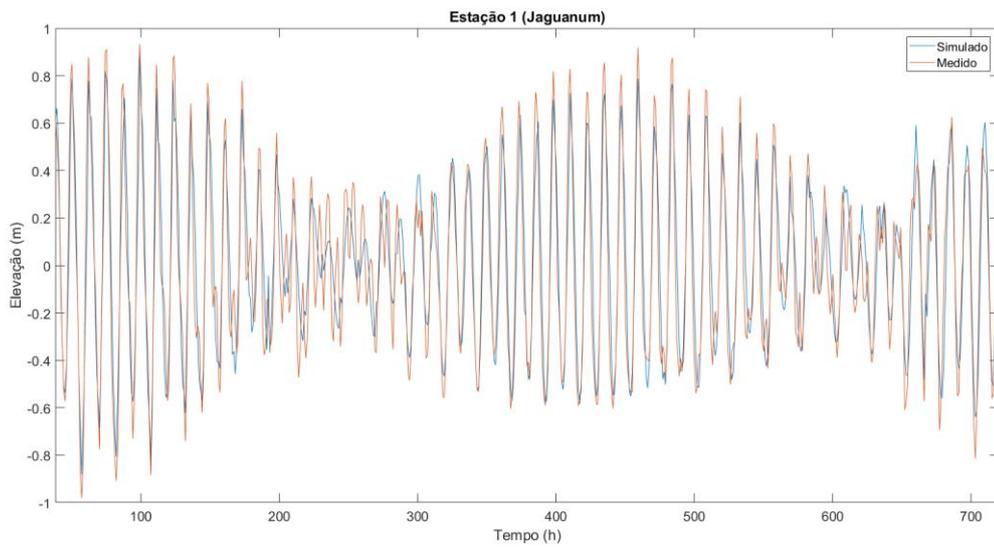


Figura 14: Dados medidos filtrados e dados simulados para o Cenário 2 na estação Jaguanum

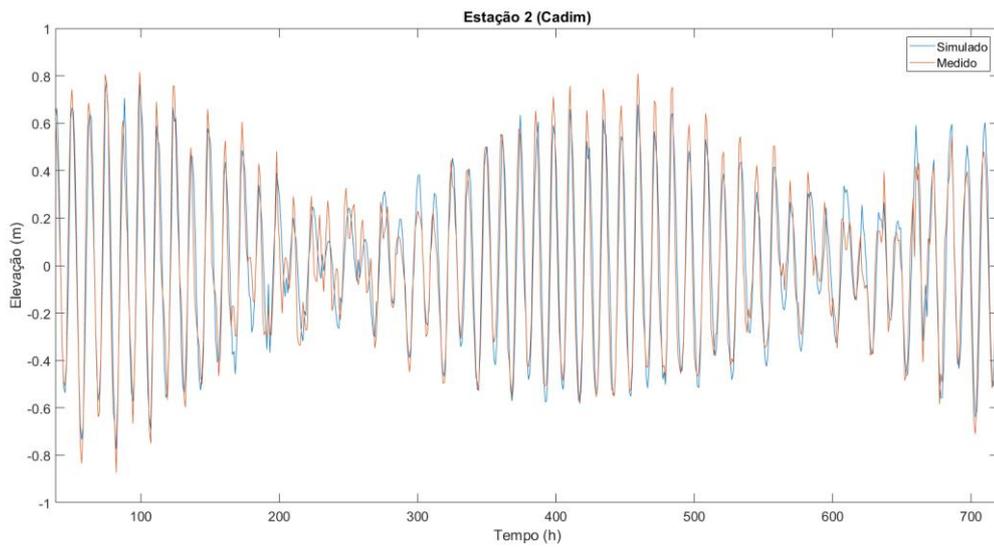


Figura 15: Dados medidos filtrados e dados simulados para o Cenário 2 na estação Cadim

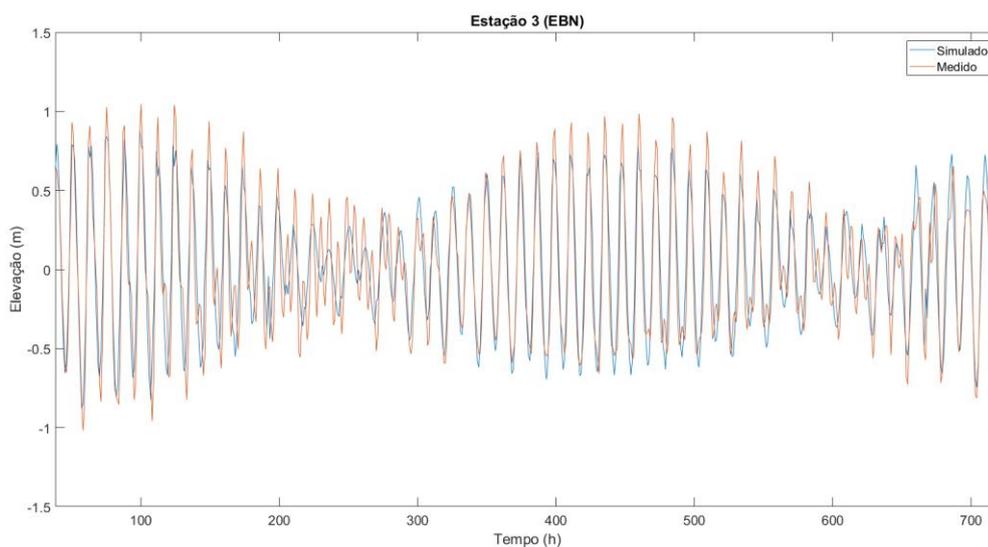


Figura 16: Dados medidos filtrados e dados simulados para o Cenário 2 na estação EBN

Como pode ser observado nas figuras acima, os resultados encontrados para o Cenário 2 se mostraram melhores quando comparados com os resultados do Cenário 1. As Figuras de 14 a 16 mostram que os resultados simulados apresentaram maior concordância com os medidos, principalmente nos instantes de preamar e baixa-mar de sizígia. Os resultados nos períodos de quadratura se mostraram similares aos do Cenário 1, mostrando que a configuração do modelo ADCIRC para esse domínio ainda pode ser melhorada. Uma das possíveis causas para essa dificuldade em sincronizar as elevações de quadratura pode estar ligada com a não utilização de harmônicos de longo período, tais como a  $MS_4$ ,  $M_m$  e  $M_f$ . Apesar desses harmônicos possuírem pequenas amplitudes, quando acoplados na simulação, poderiam gerar ressonância com os demais, e aumentar a acurácia dos resultados.

Para melhor visualizar as melhorias implementadas pelas forçantes vento, foram calculados os erros para esse cenário na Tabela 6.

Tabela 6: Análise estatística dos resultados encontrados no Cenário 2

<b>Estação</b>	<b>MAE (m)</b>	<b>RMSE (m)</b>	<b>Índice de Willmott</b>
Jaguanum	0,12	0,15	0,94
Cadim	0,10	0,12	0,96
EBN	0,15	0,19	0,93

Ao analisar a Tabela 6, é possível notar que a estação Cadim apresentou os menores erros (MAE e RMSE) e maior concordância, já a estação EBN apresentou os maiores erros e menor concordância. Isso pode estar relacionado a posição dessa estação dentro da Baía de Sepetiba. Como a estação Cadim está localizada na área mais externa da baía, ou seja, mais próxima de uma das conexões com o oceano, essa estação acaba por sofrer menos interferência dos efeitos sofridos no interior da baía. Já a estação EBN se encontra em situação contrária, estando localizada mais ao interior da baía, e sofrendo com mais intensidades os efeitos sobre as ondas de maré.

Ao se comparar as Tabelas 5 e 6 é notada uma redução nos erros MAE e RMSE das três estações, tendo a Estação Cadim os resultados mais notáveis. Essas reduções nos erros indicam uma melhora na configuração do modelo, mostrando que parte dos erros cometidos no Cenário 1 são advindos da não utilização da forçante do vento. Esse tipo de erro é inerente aos modelos que simplificam os fenômenos físicos a fim de simplificar as equações e tornarem menos custosos suas resoluções numéricas. O aumento nos valores do Índice de Willmott reforça essa ideia, uma vez que representam a concordância entre os resultados simulados e os dados medidos.

Os erros observados nos resultados de elevação primariamente relacionados ao período de quadratura, onde o modelo não conseguiu captar com grande precisão as irregularidades sofridas pela maré dentro da Baía de Sepetiba. Essas irregularidades podem ser melhores observadas nas figuras a seguir.

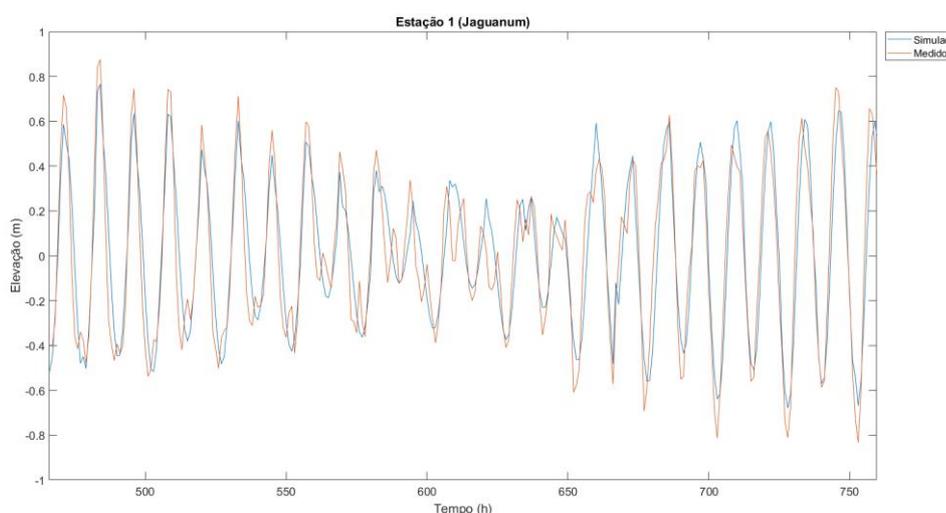


Figura 17: Detalhe da quadratura monitorada na estação Jaguanum comparando dados medidos filtrados e simulados

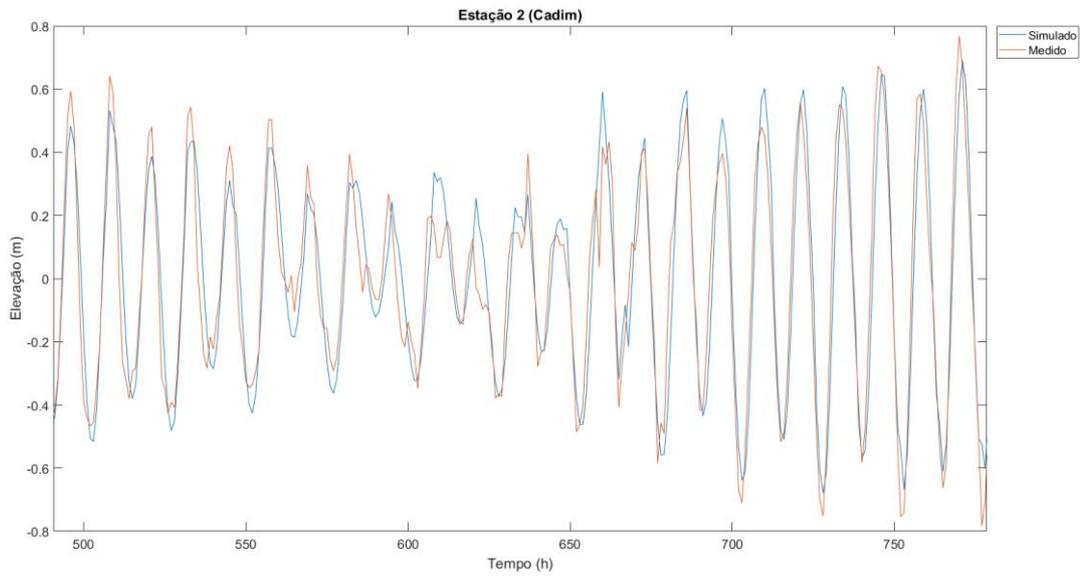


Figura 18: Detalhe da quadratura monitorada na estação Cadim comparando dados medidos filtrados e simulados

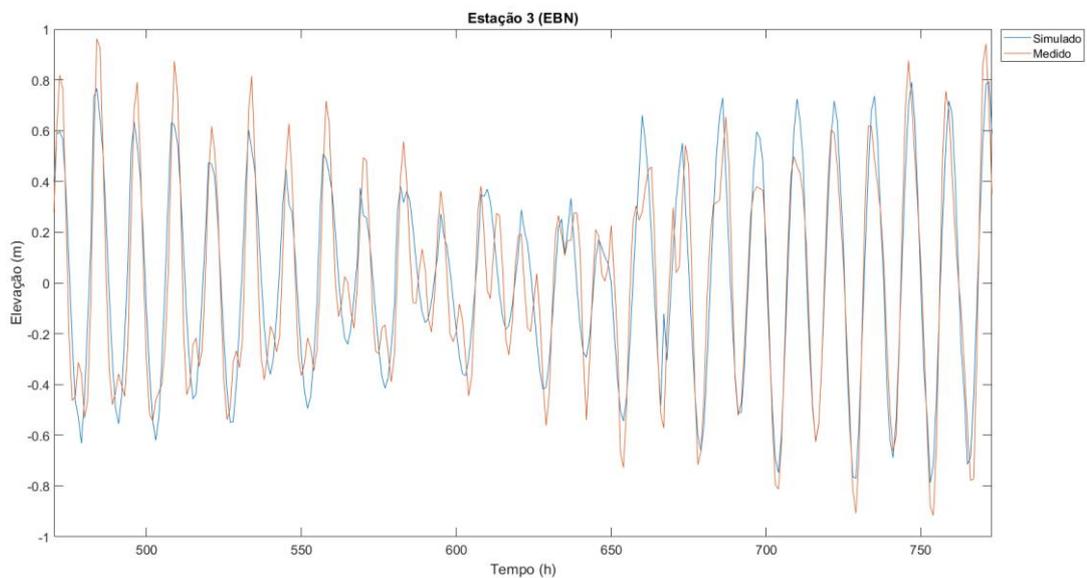


Figura 19: Detalhe da quadratura monitorada na estação EBN comparando dados medidos filtrados e simulados

Como pode ser observado nas Figuras 17, 18 e 19 existe uma pequena interferência durante o período de quadratura no qual o modelo não foi capaz de captar. Também é possível observar uma pequena defasagem de 1 hora entre os resultados simulados e medidos durante as preamares nos instantes de tempo 660h, 673h e 686h. Esse

comportamento ocorreu na estação EBN ao final dos períodos de quadratura simulados, mostrando que nessa região houve uma alteração no período das ondas simuladas que ali incidem. Adicionalmente, foi possível observar que os intervalos das preamares foram de 13h, e os das baixa-mares foram de 12h. Esse período da onda de 25h foi relatado por diversos autores, entre eles CUNHA, ROSMAN E MONTEIRO (2006).

Sendo assim, foi possível determinar que a utilização da forçante do vento obteve resultados positivos na calibração do modelo, melhorando os resultados referentes a elevação. E assim, ao aumentar o número de forçantes foi possível tornar o modelo mais próximo da realidade, ao diminuir suas simplificações.

Um ponto que deve ser ressaltado foi que a inclusão do vento no modelo teve efeito nas velocidades das correntes da Baía de Sepetiba. Apesar de pequena, durante a calibração do modelo, houve um aumento de cerca de 8% das velocidades no interior da Baía de Sepetiba. Entretanto, esse efeito não pode ser observado na Baía de Ilha Grande. Esses resultados se encontram em acordo com a literatura, assim como apresentados na seção 3.2.

Baseado nos resultados encontrados nas simulações dos Cenários 1 e 2, pode-se considerar o Cenário 2 obteve os melhores resultados, tendo em vista que apresentou os menores valores de MAE e RMSE, e os Índices de Willmott foram mais próximos de 1. Por essa razão, esse cenário foi escolhido para realizar a validação do modelo.

## 5.2. VALIDAÇÃO

Conforme apresentado na seção 4.6, a validação é responsável por reafirmar os resultados da calibração testando o mesmo cenário em um período diferente de tempo. Dessa forma é possível afirmar com mais fundamentos que os valores encontrados para os parâmetros de calibração não possuem “vício”. A simulação utilizada para validação consiste nas forçantes utilizadas no Cenário 2, para os dias 19/10/2019 à 24/11/2019. Os resultados encontrados para as estações Jaguanum, Cadim e EBN estão dispostos a seguir.

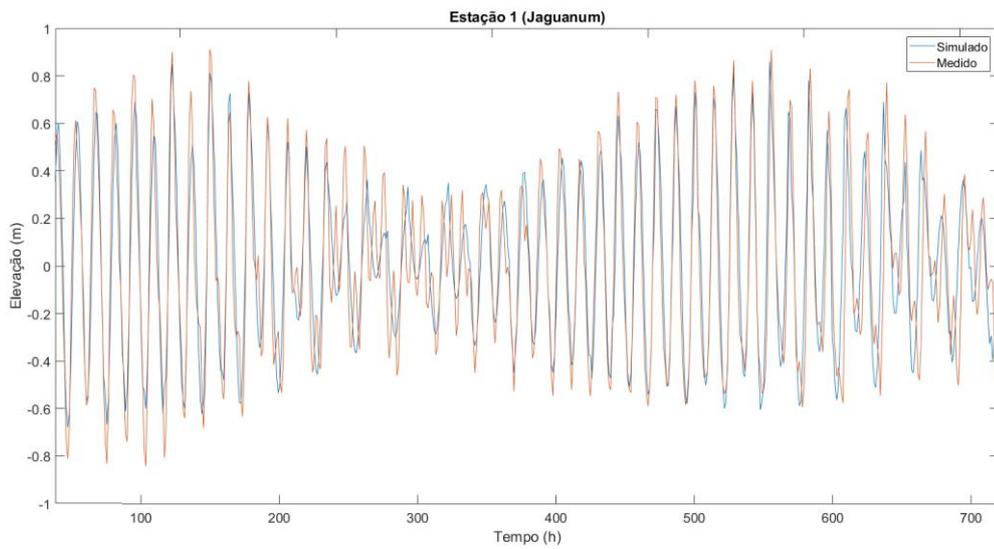


Figura 20: Dados medidos filtrados e dados simulados para a validação na estação Jaguanum

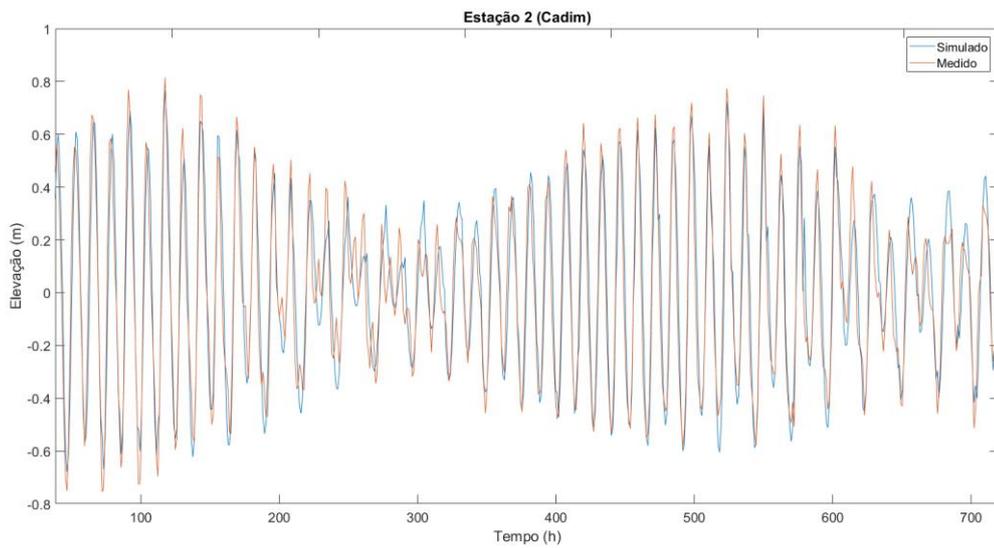


Figura 21: Dados medidos filtrados e dados simulados para a validação na estação Cadim

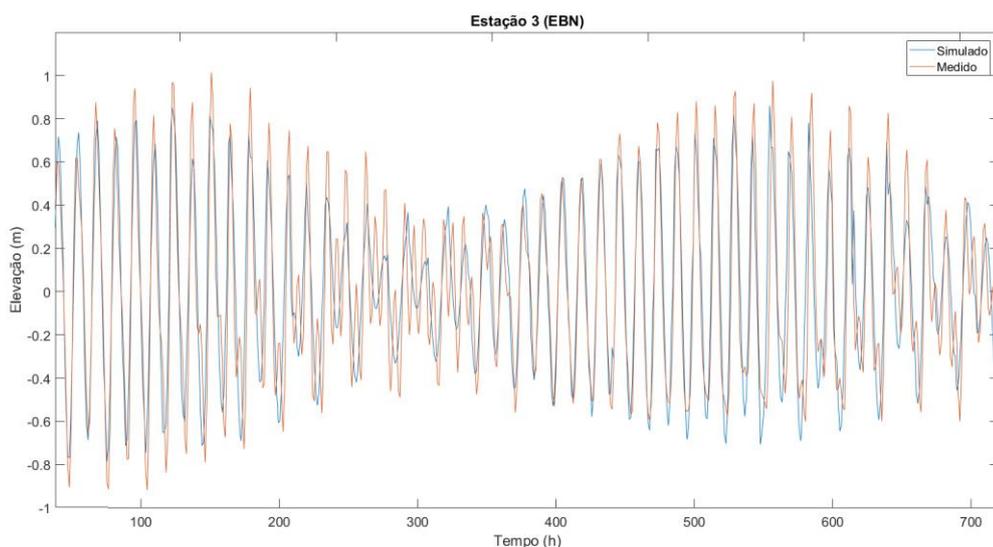


Figura 22: Dados medidos filtrados e dados simulados para a validação na estação EBN

Como pode ser observado pelas figuras, não houve mudanças notáveis quando comparados os resultados do Cenário 2 encontrados na calibração com os da validação. Isso fica mais aparente ao analisar os erros dispostos na tabela abaixo.

Tabela 7: Análise estatística dos resultados encontrados na validação

<b>Estação</b>	<b>MAE (m)</b>	<b>RMSE (m)</b>	<b>Índice de Willmott</b>
Jaguanum	0,12	0,15	0,94
Cadim	0,09	0,12	0,96
EBN	0,16	0,20	0,92

É possível notar através da Tabela 7 que, assim como ocorrida na calibração, a estação Cadim apresentou os menores erros (MAE e RMSE) e a maior concordância dos resultados simulados. Já a estação EBN apresentou os maiores erros e menor concordância.

Ao se comparar as Tabelas 6 e 7, é possível perceber uma pequena redução do MAE da estação Cadim, um pequeno aumento no RMSE e diminuição do Índice de Willmott da estação EBN.

Assim como observado na calibração do Cenário 2, os erros dos resultados obtidos na validação são provenientes principalmente dos períodos de quadratura, onde o

modelo não conseguiu responder com grande precisão aos efeitos de oscilação existente na Baía de Sepetiba.

Os erros mencionados acima podem estar associados com as simplificações empregados no modelo a fim de reduzir a complexidade das equações governantes. Simplificações como a utilização de um modelo 2DH ou a não consideração dos efeitos de estratificação ao não se utilizar os efeitos baroclínicos das equações CQM do modelo.

Outro ponto que pode estar associado a esses erros está relacionado a dificuldade em se obter resultados mais precisos em virtude da geometria da Baía de Sepetiba e sua ligação com o mar, a qual ocorre através do Canal da Marambaia e pela ligação lateral da baía com Ilha Grande (ROSMAN et al., 2006; FRAGOSO, 1999; CUNHA, ROSMAN e MONTEIRO, 2006)

Infelizmente, devido à falta de trabalhos na área de estudo que utilizaram parâmetros estatísticos como forma de averiguar os processos de calibração e de validação, não é possível comparar os valores obtidos das Tabelas 6 e 7 com outros trabalhos da literatura.

### 5.3. HIDRODINÂMICA DAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA

Com relação aos dados obtidos para velocidade, foi possível determinar que os maiores valores em magnitude dessa variável ocorrem dentro da Baía de Sepetiba, principalmente na região entre as ilhas de Itacuruça e Jaguanum e na entrada da Baía de Sepetiba. Esse comportamento pode ser observado durante os períodos de enchente e vazante, conforme apresentado nas figuras abaixo.

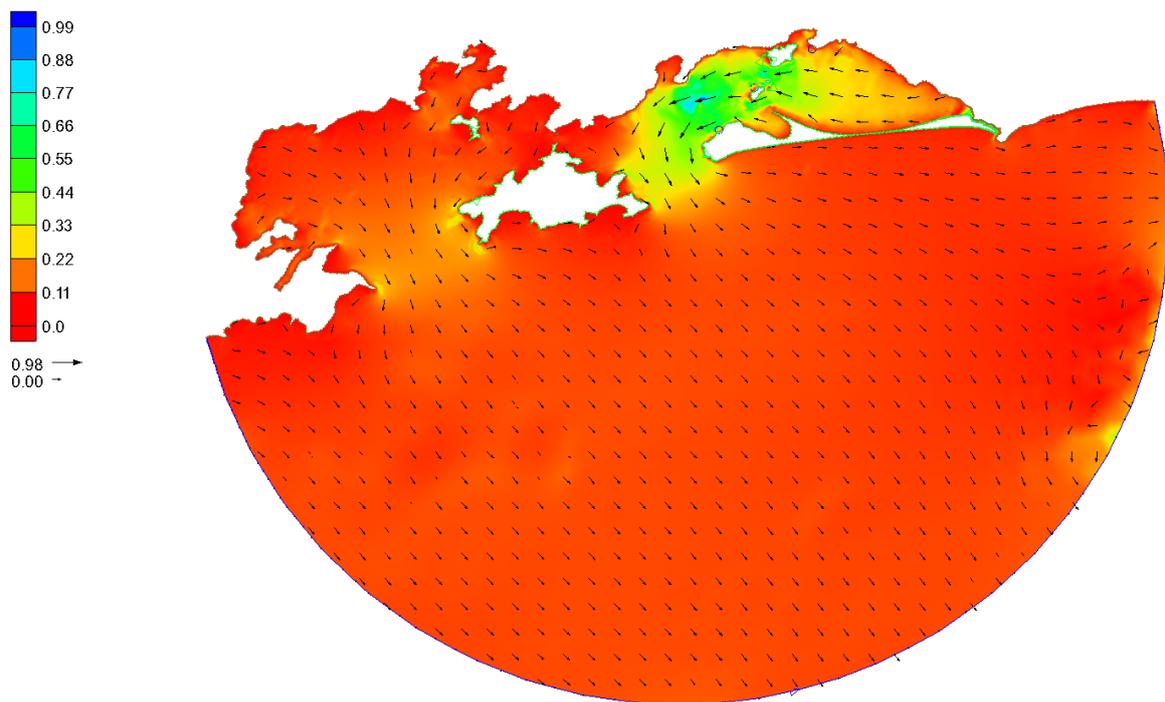


Figura 23: Campo de velocidades durante uma vazante (sizígia) do Cenário 2 (validação)

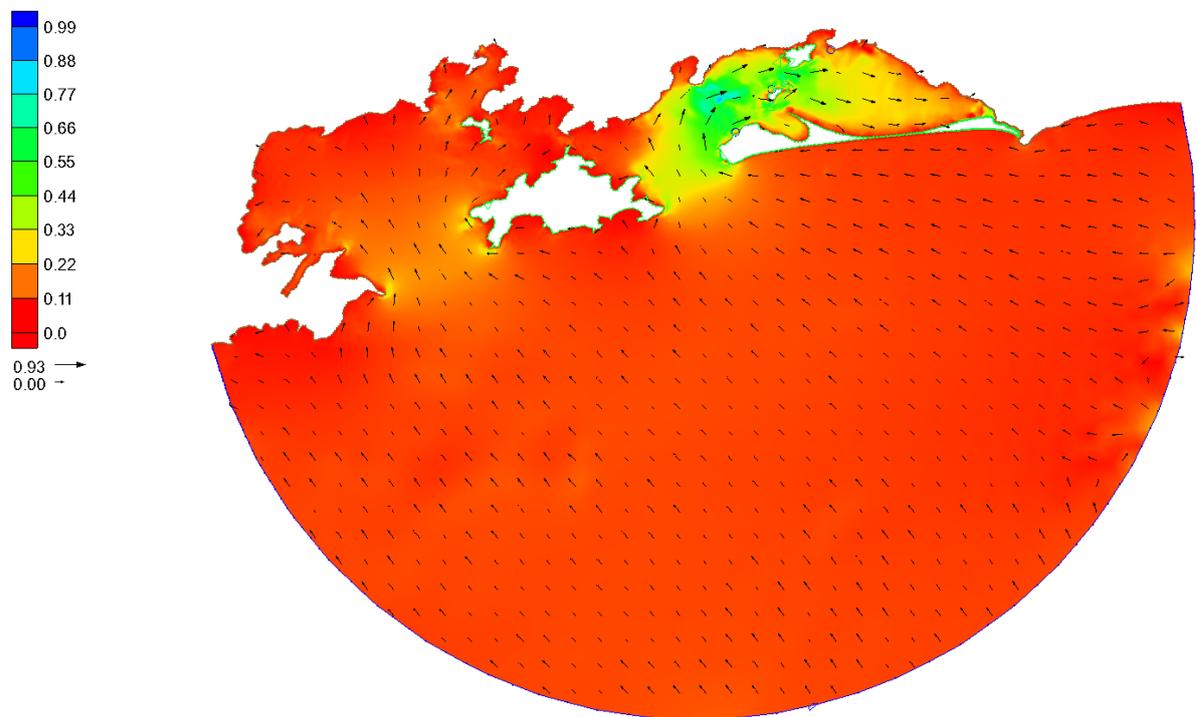


Figura 24: Campo de velocidades durante uma enchente (sizígia) do Cenário 2 (validação)

A ocorrência dessas maiores velocidades nessas duas localidades está diretamente ligada a presença de um canal, o qual existe devido a presença do Porto de Sepetiba. Esse canal pode ser melhor visualizado na Figura 5, na seção 4.2.2.

Com relação as velocidades observadas na Baía de Ilha Grande, foi possível determinar que seus valores foram menores e mais uniformes espacialmente, quando comparados com as velocidades da Baía de Sepetiba, mesmo durante as sizígias.

As únicas mudanças significativas se referem as intensidades das correntes e amplitude de maré observadas nas Baías de Sepetiba e Ilha Grande. Esses valores foram de 0,98m/s e 0,21m/s durante as vazantes de sizígia, e de 0,93m/s e 0,18m/s durante os períodos de vazante de quadratura. As amplitudes de maré da Baía de Sepetiba alcançaram valores máximos de 1,71m, enquanto a Baía de Ilha Grande alcançou valores de 1,23m durante a sizígia.

Outro ponto interessante se refere ao gradiente de elevação, o qual mostra como a onda de maré se propaga dentro do complexo estuarino estudado. Isso é possível ao se observar o campo de elevações presentes nas Figuras 25 e 26.

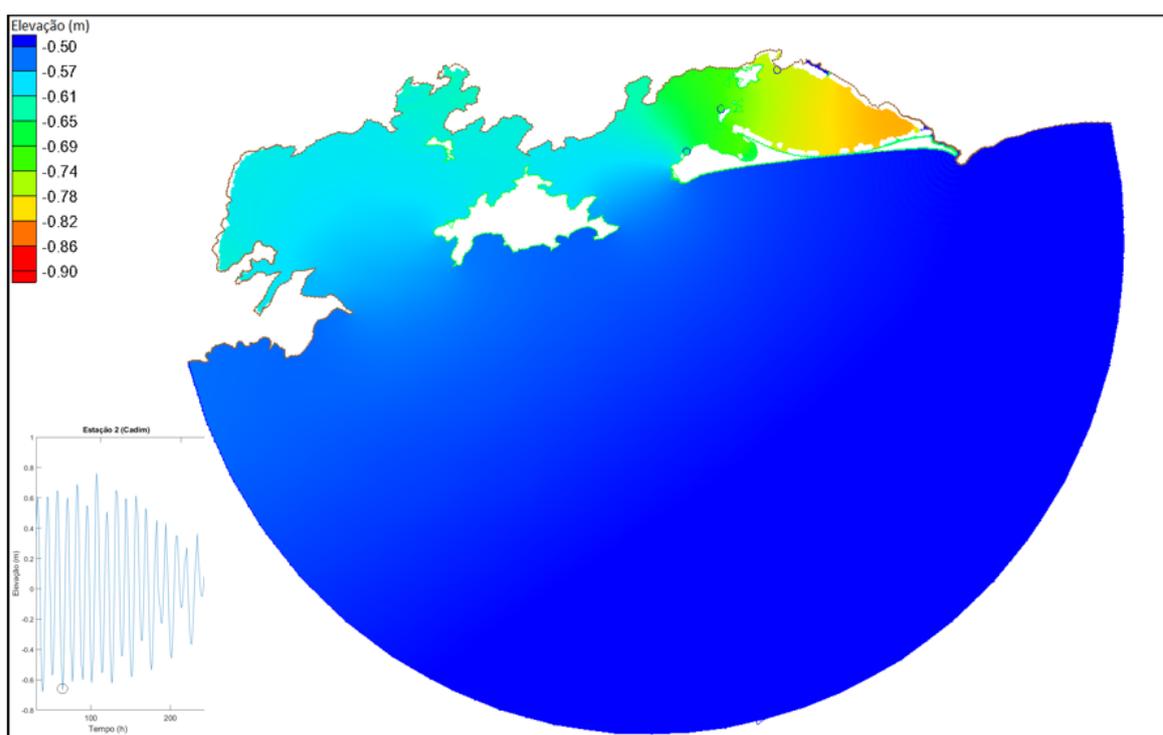


Figura 25: Campo de elevações durante uma baixa-mar (sizígia) do Cenário 2 (validação)

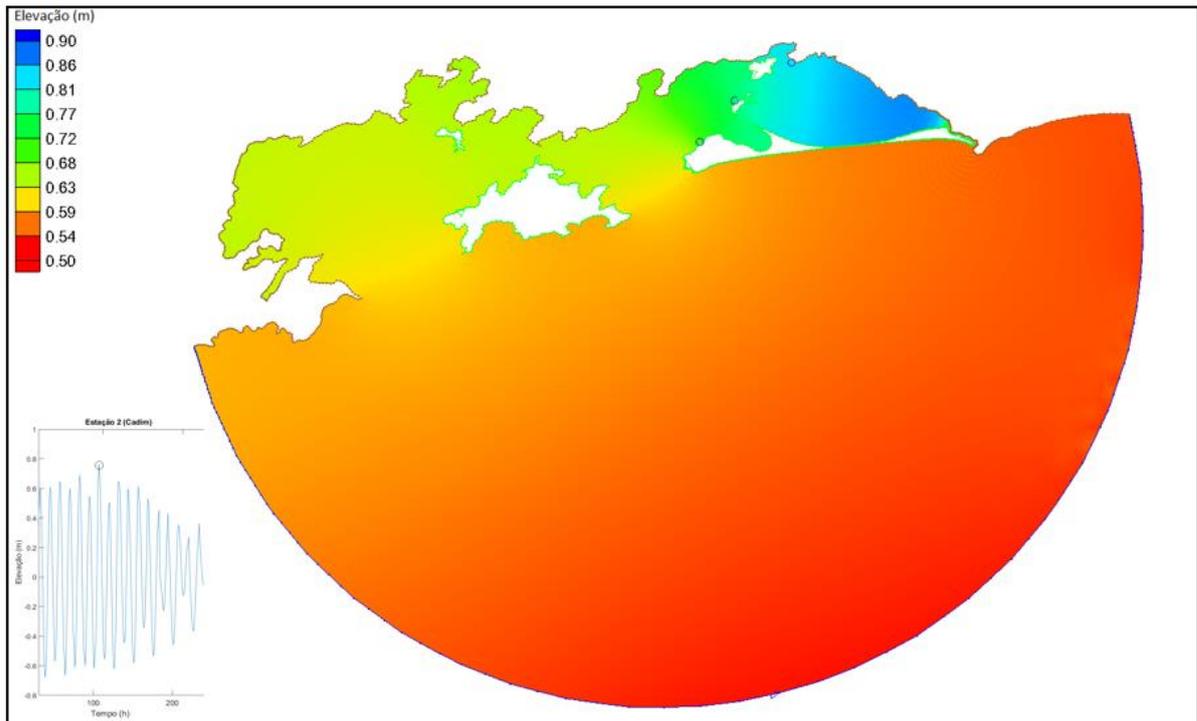


Figura 26: Campo de elevações durante uma preamar (sizígia) do Cenário 2 (validação)

Como pode ser observado pelas Figuras 25 e 26, o ponto do domínio onde existem as maiores variações de elevação se situa na região próxima do Canal da Marambaia, dentro da Baía de Sepetiba. Isso ocorre pois, durante uma baixar-mar (no início de uma enchente) essa baía recebe fluxos de água advindo de suas duas aberturas. O fluxo predominante durante a vazante ocorre na maior abertura da baía localizada entre a Restinga da Marambaia e Ilha Grande. Adicionalmente, o Canal da Marambaia apresenta menores profundidades e uma pequena seção transversal, permitindo assim um fluxo de entrada de água muito pequeno, fazendo com que haja esse acúmulo observado na Figura 26. Durante a preamar (no início de uma vazante), as duas aberturas funcionam como saídas de água, invertendo a correnteza local. Por conta das baixas profundidades observadas na região do Canal da Marambaia, é possível observar alguns pontos de secamento, onde os elementos se encontram em branco. Esses fluxos podem ser melhor observados nas Figuras 27 e 28.

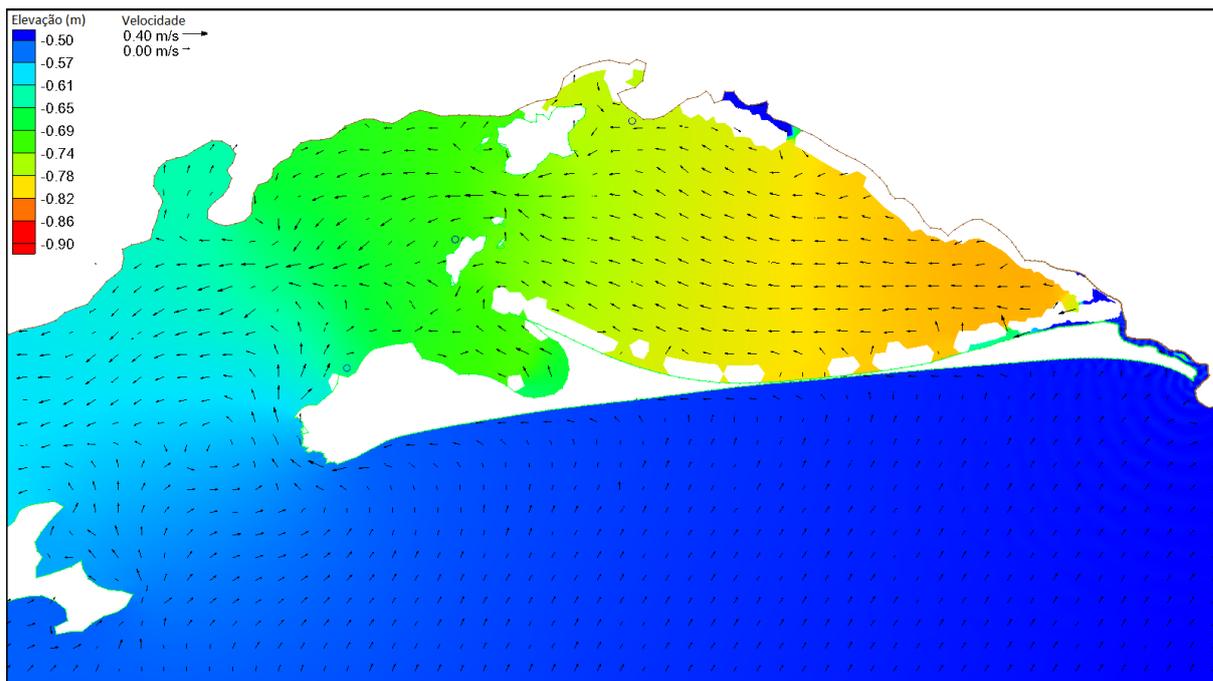


Figura 27: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Sepetiba durante o mesmo instante de tempo da Figura 23

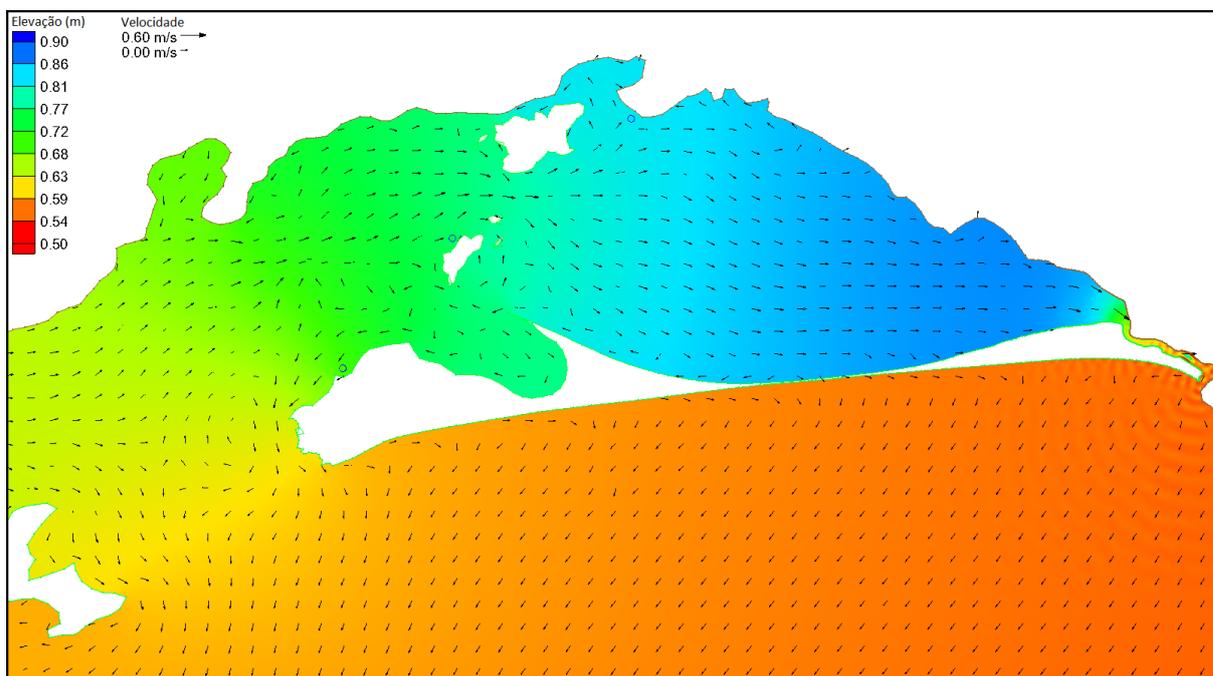


Figura 28: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Sepetiba durante o mesmo instante de tempo da Figura 24

Adicionalmente, também é possível notar alguns pontos de recirculação existentes nos pontos onde ocorre as maiores elevações da superfície livre durante o começo da vazante. Essa recirculação ocorre devido ao movimento de saída da água de dentro

da baía, o qual se utiliza das duas aberturas, fazendo com que ocorra esse efeito na área próxima do Canal da Marambaia.

Outro ponto interessante que pode ser notado na Figura 28 é o efeito de difração e de reflexão da onda ao sair do Canal da Marambaia em direção ao oceano. Esses efeitos ocorrem devido a pequena largura do canal por onde passa a onda e a posição de saída da boca do canal.

Com relação ao gradiente de elevação da Baía de Ilha Grande, esse pode ser melhor observado pelas Figuras 29 e 30.

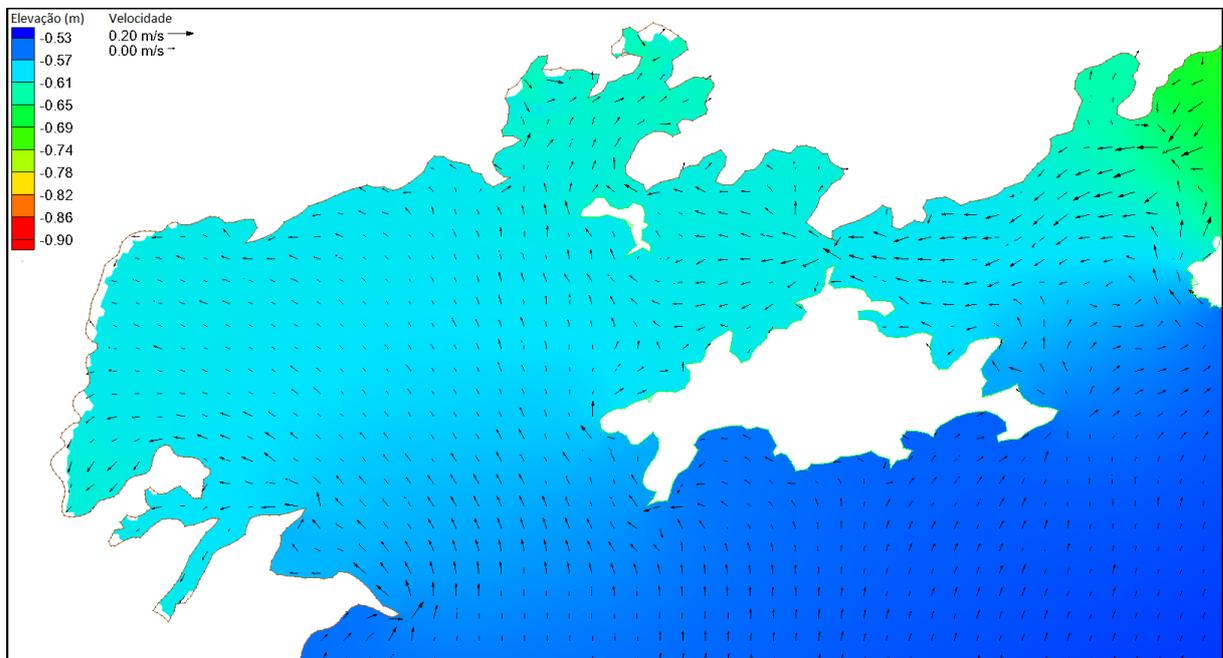


Figura 29: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Ilha Grande durante o mesmo instante de tempo da Figura 23

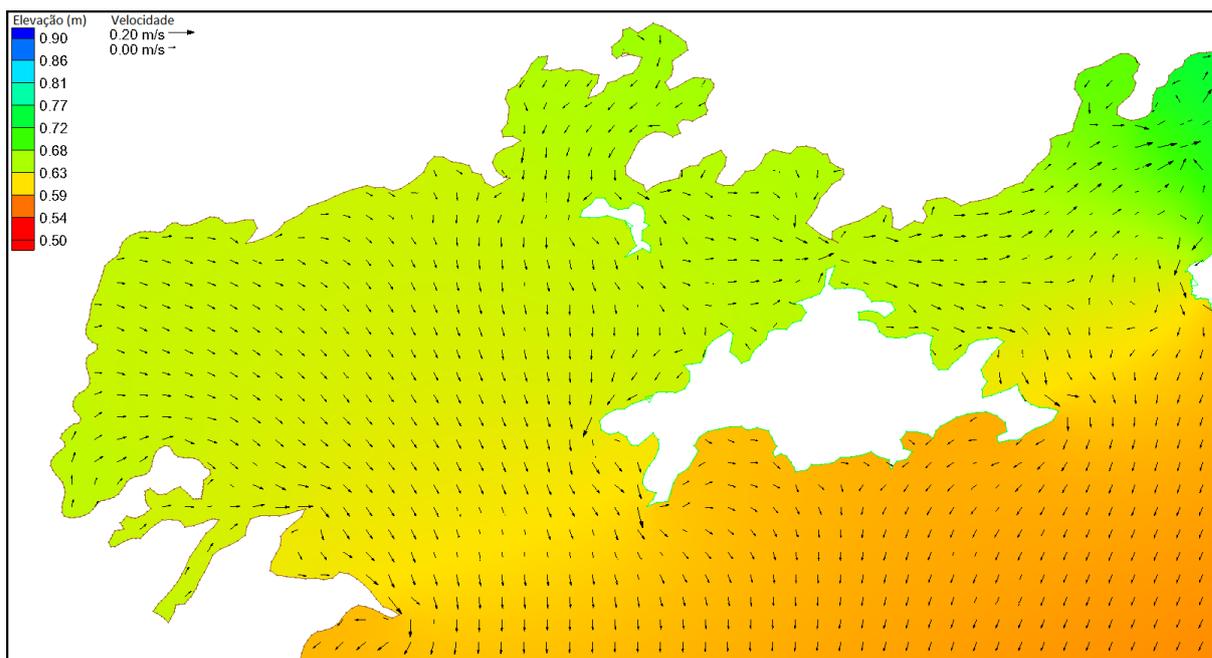


Figura 30: Detalhe do campo de velocidades (vetores) e elevações (contorno interpolado) da Baía de Ilha Grande durante o mesmo instante de tempo da Figura 24

A Baía de Ilha Grande apresenta um padrão de escoamento semelhante ao da Baía de Sepetiba, onde essa baía acaba recebendo fluxos de entrada de água, durante a enchente, e de saída, durante a vazante, pelos dois acessos. Esse comportamento se difere do observado na literatura, uma vez que devido a corrente oeste-leste permanente existente entre Ilha Grande e o continente, o fluxo de entrada de água deveria ocorrer apenas pela abertura maior, a qual dá acesso direto ao oceano.

Outro ponto em discordância com a literatura, está relacionado ao efeito ciclônico presente ao redor de Ilha Grande. Esse efeito não apareceu durante a simulação em virtude dos fluxos de entrada e saída da baía, localizados próximos de Ilha Grande. Devido a separação de correntes causada pela ilha, existe sempre pelo menos um trecho onde as correntes apontam na direção contrária do indicado pela literatura. Isso pode ser visto em mais detalhes na Figura 31.

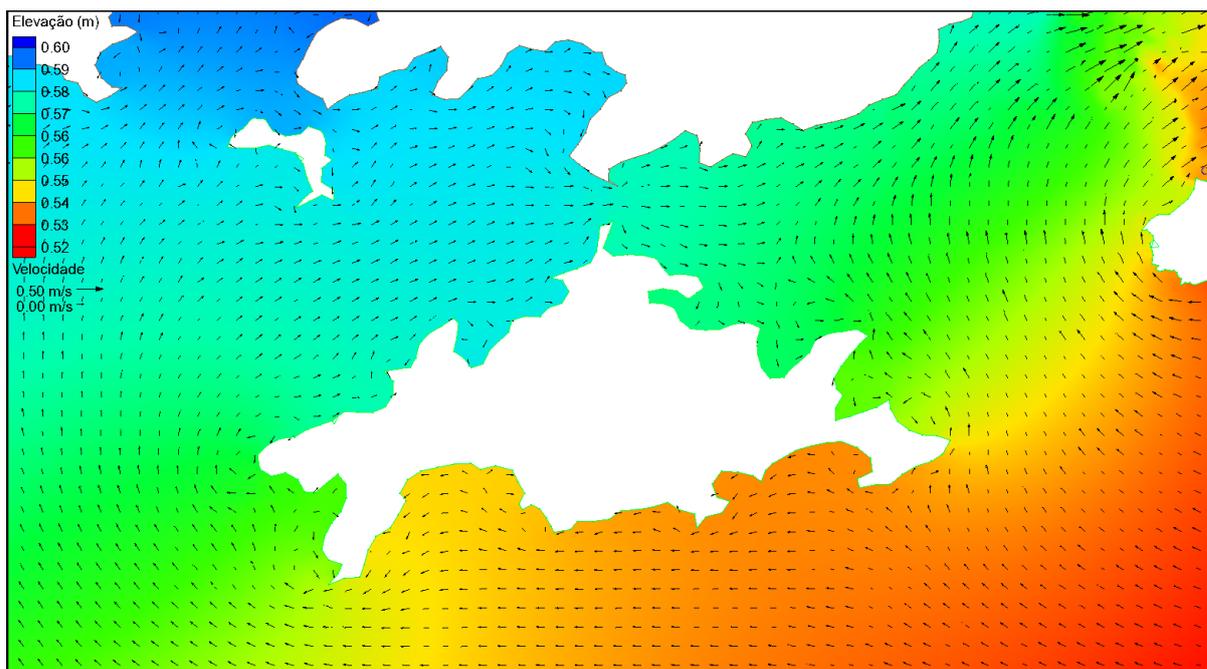


Figura 31: Detalhamento do campo de velocidades demonstrando resultado mais próximo do efeito ciclônico próximo de Ilha Grande

Sendo assim, pode-se evidenciar e comprovar que tanto o efeito ciclônico descrito por IKEDA E STEVENSON (1982), quanto a corrente permanente oeste-leste tem como principal forçante o gradiente de densidade horizontal, assim como apresentado por FRAGOSO (1999).

Portanto, apesar dos erros encontrados para as simulações dos Cenários 1 e 2 durante a calibração, e a validação do Cenário 2, pode-se considerar que o ADCIRC simulou de forma adequada a região do complexo estuarino das Baías de Ilha Grande e Sepetiba. Os erros encontrados estão ligados principalmente as considerações utilizadas para a simplificação das equações governantes, tais como a não utilização dos efeitos baroclínicos da equação, a utilização de um modelo 2DH, assim como a não utilização do efeito de vegetação do mangue.

## 6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos durante a calibração para os Cenários 1 e 2, onde foram utilizados como forçantes a maré astronômica e o vento podem ser considerados satisfatórios, quando comparados com os resultados de diferentes trabalhos da literatura, e quando analisados os parâmetros estatísticos MAE, RMSE e Índice de Willmott.

Com relação aos resultados encontrados durante a calibração, foi possível observar o efeito do vento atuando na Baía de Sepetiba, onde sob sua influência, houve um aumento de 8% nas velocidades das correntes, durante a vazante de sizígia. Já as elevações não sofreram grandes alterações, com valores variando aproximadamente 5cm. Esses resultados podem ser considerados esperados, uma vez que CUNHA, ROSMAN E MONTEIRO (2006) relataram um comportamento semelhante dessa baía em seus estudos.

Os resultados encontrados durante a validação do modelo se mostraram consistentes com os resultados da calibração. Sendo os valores encontrados para as simulações durante a validação dentro do esperado, de acordo com as simulações de calibração e com os dados obtidos da literatura.

Durante a validação foi possível observar que as maiores variações de elevação ocorreram próximas ao canal da Marambaia. Isso ocorreu principalmente devido aos dois acessos da Baía de Sepetiba, onde durante a enchente, direcionam o fluxo de água para o interior da baía. E devido as dimensões do canal da Marambaia, a massa de água tende a se acumular na região mais protegida da baía. Durante as vazantes, o comportamento dos acessos se reverte, direcionando o fluxo de água para fora da baía. Devido ao fluxo contrário nessa região, acabam por ocorrer algumas zonas de recirculação temporárias durante as vazantes.

Adicionalmente, os padrões de circulação da Baía de Ilha Grande se mostraram diferentes dos da Baía de Sepetiba. Apesar do comportamento dos acessos ser o mesmo, com as duas entradas direcionando os fluxos de água para o interior da baía

durante a enchente, e escoando a massa de água para fora da baía na vazante, a circulação no interior da baía se mostrou diferente da Baía de Sepetiba. Isso ocorreu principalmente devido à ausência de uma barra, tal como a Restinga da Marambaia, a qual acaba por proteger a baía. Além disso, vale ressaltar que não foi possível observar a corrente permanente que ocorre entre Ilha Grande e o continente, nem a corrente ciclônica que envolve Ilha Grande. Esses resultados se mostraram diferentes do encontrado na literatura.

Entretanto, esses resultados podem ter ocorrido principalmente pelo fato do modelo utilizado ter considerado apenas a pressão barotrópica em suas equações governantes. Sendo assim, não foi considerado o efeito baroclínico existente entre as baías analisadas. E, portanto, o resultado encontrado durante a validação não considerara o efeito do gradiente horizontal de densidade. Essa conclusão condiz com o observado em alguns trabalhos da literatura (IKEDA e STEVENSON, 1980); CORRÊA, 1994); MAHIQUES, 1987; FRAGOSO, 1999).

Devido a esses resultados, é possível concluir que o efeito do vento foi importante para melhor representação da região, especialmente na Baía de Sepetiba. Também foi possível contribuir para um melhor entendimento da hidrodinâmica do complexo estuarino das Baías de Ilha Grande e Sepetiba, assim como aumentar a compreensão de como as forçantes mare astronômica e o vento atuam na hidrodinâmica dessa região.

## **7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para futuros trabalhos, pode-se ser ressaltada a necessidade de: uma melhora no refinamento da batimetria do canal da Marambaia, uma vez que as cartas náuticas existentes não descrevem em detalhes essa região; utilização dos efeitos baroclínico para uma melhor representação das correntes na Baía de Ilha Grande, e por consequência uma melhora na hidrodinâmica do complexo estuarino Ilha Grande – Sepetiba; utilização de dados de corrente de ambas as Baías para uma melhor calibração do modelo; utilização de dados medidos em campo para validação do modelo; estudo da influência da precipitação na hidrodinâmica, realizando uma análise de períodos seco e chuvoso.

Assim como mencionado na seção 3, o estudo da hidrodinâmica de uma região abre portas para diversas possibilidades, sejam elas acadêmicas, econômicas ou sociais. O presente trabalho pode ser aplicado em estudos voltados a qualidade da água, transporte de sedimentos, gestão de portos ou até mesmo na gestão pesqueira da localidade.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, H. (diretor de projeto). **ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL DA USINA SIDERÚRGICA CSA**. ERM Brasil LTDA. Rio de Janeiro, 2005.

AVISO, 2014. FES (FINITE ELEMENT SOLUTION) - GLOBAL TIDE, Disponível em <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes.html>>, acessado em 20 de janeiro de 2020

AZEVEDO, I. C.; BORDALO, A. A.; DUARTE, P. M. INFLUENCE OF RIVER DISCHARGE PATTERNS ON THE HYDRODYNAMICS AND POTENTIAL CONTAMINANT DISPERSION IN THE DOURO ESTUARY (PORTUGAL). **Water Research**. v. 44, n. 10, p. 3133-3146, 2010.

BAPTISTA FILHO, L. S.; ROMANO, A. L. T.; DA SILVA, L. C.; VILLENA, H. H. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DA BAÍA DE SEPETIBA-RJ. **X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Rio de Janeiro, p. 1308 - 1313, 2003.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, FUNDAÇÃO DE APOIO A PESQUISA CIENTÍFICA E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (FAPUR). **PLANO DE MANEJO DA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE TAMOIOS**. Brasília, DF, p. 105–171, 2006.

BORGES, H. V. **DINÂMICA SEDIMENTAR DA RESTINGA DA MARAMBÁIA E BAÍA DE SEPETIBA**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geologia, IGEO-UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.

BLAIN, C.; LINZELL, R.; ESTRADE, B. **MAKEF22: NA ADCIRC MODEL FORT.22 INPUT FILE CREATION TOOL FOR SURFACE WIND AND PRESSURE FORCING**. US NAVY, Naval Research Laboratory, EUA, 2007.

BUNYA, S.; DETRICH, J. C.; WESTERINK, J. J.; EBERSOLE, B. A.; SMITH, J. M.; ATKINSON, J. H.; JENSEN, R.; RESIO, D. T.; LUETTICH JR, R. A.; DAWSON, C.; CARDONE, V. J.; COX, A. T.; POWELL, M. D.; WESTERINK, H. J.; ROBERTS, H. J. A HIGH-RESOLUTION COUPLED RIVERINE FLOW, TIDE, WIND, WIND WAVE, AND STORM SURGE MODEL FOR SOUTHERN LOUISIANA AND MISSISSIPPI. PART I: MODEL DEVELOPMENT AND VALIDATION. **American Meteorological Society**. v. 138, p. 345-377, 2010.

COLAÇO, G.; ROSA, P. H. T.; NOGUEIRA, I.; KAISER, J.; LOPES, I. T.; JESUS, L. C.; DELPUPO, D. F.; PARENTE, C.E. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA OPERACIONAL DE PREVISÃO HIDRODINÂMICA E DE ONDAS ACOPLADO PARA O PORTO DE TUBARÃO, VITÓRIA-ES UTILIZANDO O ADCIRC+SWAN. In: **SIMPÓSIO SOBRE ONDAS, MARÉS, ENGENHARIA OCEÂNICA E OCEANOGRAFIA POR SATÉLITE**, 12, Arraial do Cabo, Brasil. 2017.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA GUANDU, 2012. **Bacia Hidrográfica dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim: Experiências para a gestão dos recursos hídricos.** Disponível em < <https://www.comiteguandu.org.br/conteudo/livroguandu2013.pdf>>, acessado em 23 de março de 2020.

CORRÊA, M. A. **ANÁLISE DAS OSCILAÇÕES DAS CORRENTES OBSERVADAS NA BAÍA DA ILHA GRANDE (RJ)**. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 115 pp., 1994.

CUNHA, C. L. N.; ROSMAN, P. C. C.; MONTEIRO, T. C. N. HYDRODYNAMICS AND WATER QUALITY MODELS APPLIED TO SEPETIBA BAY. **Continental Shelf Research**. v. 26, p. 1940–1953, 2006.

CUNHA, C. L. N.; ROSMAN, P. C. C.; MONTEIRO, T. C. N. AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO POR ESGOTO SANITÁRIO NA BAÍA DE SEPETIBA USANDO MODELAGEM AMBIENTAL. In: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Gestión inteligente de los recursos naturales: desarrollo y salud. México, D.F, FEMISCA, 2002a. p.1-8.

CUNHA, C. L. N.; ROSMAN, P. C. C.; MONTEIRO, T. C. N. MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE TRANSPORTE DE ESCALARES NÃO-CONSERVATIVOS EM CORPOS D'ÁGUA RASOS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 7, n. 2, p. 63-79, 2002b.

DA SILVA, N. R. C. M. **STORM SURGE HYDRODYNAMIC MODELLING**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011.

DE SIQUEIRA, J. M. **ESTUDO DO MECANISMO DE ALAGAMENTO E SECAMENTO E MODELO COMPUTACIONAL 2DH BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

DE OLIVEIRA, E. A. **MÉTODOS PARA ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA: ESTUDO DE SIMULAÇÃO E APLICAÇÃO A DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Paulo, Piracicaba, 2016.

DEB, M.; FERREIRA C. M. POTENTIAL IMPACTS OF THE SUNDERBAN MANGROVE DEGRADATION ON FUTURE COASTAL FLOODING IN BANGLADESH. **Journal of Hydro-environment Research**. v. 17, p. 30-46. 2017.

DILORENZO, J. L.; HUANG, P.; NAJARIAN, T. O. OVERTIDE GENERATION IN SMALL INLET-BAY SYSTEMS. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**. v. 145, n. 5, 2019.

DUQUE, M. M. S.; GIACOMINI, J.; WASSERMAN, J. C., 2008. **MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DA BAÍA DA ILHA GRANDE E BAÍA DE SEPETIBA VISANDO SUBSIDIAR O PLANO LOCAL DE DESENVOLVIMENTO DA MARICULTURA**. Disponível em <<http://www.oads.org.br/associados/4/trabalhos/Modelagem%20hidrodin%C3%AAmica%20bidimensional%20DUQUE,%20et%20al%202008.pdf>>, acessado em 27 de fevereiro de 2020.

DURÁN, R. G. **GALERKIN APPROXIMATIONS AND FINITE ELEMENT METHODS**. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2005. Disponível em <[http://mate.dm.uba.ar/~rduran/class\\_notes/fem.pdf](http://mate.dm.uba.ar/~rduran/class_notes/fem.pdf)>, acessado em 05 de fevereiro de 2020.

DYER, K. R. **ESTUARIES: A PHYSICAL INTRODUCTION**. 2ª ed., Chichester: John Wiley & Sons, 1997, 342 pp.

EBERSOLE, B. A.; WESTERINK, J. J.; BUNYA, S.; DIETRICH, J. C.; CIALONE, M. A. DEVELOPMENT OF STORM SURGE WHICH LED TO FLOODING IN ST. BERNARD POLDER DURING HURRICANE KATRINA. **Ocean Engineering**. v. 37, n. 1, p. 91-103, 2010.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational methods for fluid dynamics**. 3ª ed., Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.

FIEDLER, J. W.; SMIT, P. B.; BRODIE, K. L.; MCNINCH, J.; GUZA, R. T. NUMERICAL MODELING OF WAVE RUNUP ON STEEP AND MILDLY SLOPING NATURAL BEACHES. **Coastal Engineering**. v. 131, p. 106–113, 2018.

FRAGOSO, M. R. **ESTUDO NUMÉRICO DA CIRCULAÇÃO MARINHA DA REGIÃO DAS BAÍAS DE SEPETIBA E ILHA GRANDE (RJ)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 1999.

GENERAL BATHYMETRIC CHART OF THE OCEANS, 2019. **Gridded Bathymetry Data**. Disponível em <[https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data)>, acessado em 20 de janeiro de 2020

GODIN, G. **ANALYSIS OF TIDES**. 1ª ed., Toronto: University of Toronto Press, 1972, p. 230-243.

GONÇALVES, A. R. A. **MODELAÇÃO DE SOBRELEVAÇÃO DE ORIGEM METEOROLÓGICA NA COSTA PORTUGUESA**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

HAFTKA, R. T. **LECTURE 6: WEIGHTED RESIDUAL METHOD**. University of Florida, Department of Mechanical & Aerospace Engineering, 2010. Disponível em <<http://web.mae.ufl.edu/nkim/eml5526/Lect06.pdf>>, acessado em 10 de fevereiro de 2020.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SIMULAÇÕES DE SISTEMAS CONVECTIVOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO COM O MODELO ARPS: SENSIBILIDADE A VARIAÇÕES COM OS ESQUEMAS DE ADVECÇÃO E ASSIMILAÇÃO DE DADOS. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.

HUANG, H.; CHEN, C.; BLANTON, J. O.; ANDRADE, F. A. A NUMERICAL STUDY OF TIDAL ASYMMETRY ON OKATEE CREEK. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v. 78, p. 190-202. 2008.

HUTTER, K.; WANG, Y.; CHUBARENKO, I. P. **PHYSICS OF LAKES: VOLUME 3: METHODS OF UNDERSTANDING LAKES AS COMPONENTS OF THE GEOPHYSICAL ENVIRONMENT**. Switzerland: Springer-Verlag, 2014, p. 130-133.

IKEDA, Y.; STEVENSON, M. R. DETERMINATION OF CIRCULATION AND SHORT PERIOD FLUCTUATION IN ILHA GRANDE BAY (RJ), BRAZIL. **Boletim do Instituto Paulista de Oceanografia**. v. 29, n. 1, p. 89-98, 1980.

IKEDA, Y.; STEVENSON, M. R. SEASONAL CHARACTERISTICS OF HYDROGRAPHY, TURBULENCE AND DISPERSION NEAR ILHA GRANDE (RJ), BRAZIL, BASED ON R/V "PROF. W. BESNARD" DATA. **Boletim do Instituto Paulista de Oceanografia**. v. 31, n. 1, p. 11-32, 1982.

JI, Z. G. **HYDRODYNAMICS AND WATER QUALITY: MODELING RIVERS, LAKES AND ESTUARIES**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

JUSTO, D. A. R.; SAUTER, E.; AZEVEDO, F. S.; GUIDI, L. F.; SANTOS, M. C.; KONZEN, P. H. A. **CÁLCULO NUMÉRICO**. Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Creative Commons, cap. 11, p. 329-332, 2018. Disponível <<https://github.com/reamat/CalculoNumerico/blob/master/main.pdf>>, acessado em 25 de janeiro de 2020.

KALE, E. **ESTUDO EXPERIMENTAL NA BAÍA DE SEPETIBA PARA OBTENÇÃO DE DADOS DE VELOCIDADE EM ÁGUAS COSTEIRAS PARA A UTILIZAÇÃO NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS**. Dissertação de Mestrado, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2000.

KUBATKO, E. J.; WESTERINK, J. J.; DAWSON, C. AN UNSTRUCTURED GRID MORPHODYNAMIC MODEL WITH A DISCONTINUOUS GALERKIN METHOD FOR BED EVOLUTION. **Ocean Modelling**. v. 15, p. 71-89, 2006.

LINKER, L.; SHENK, G.; WANG, P.; HOPKINS, K.; POKHAREL, S. A SHORT HISTORY OF CHESAPEAKE BAY AND THE NEXT GENERATION OF WATER SHED AND ESTUARINE MODELS. **Proceedings of the Water Environment Federation**. v. 14, p. 569-582, 2002.

LUETTICH JR, R. A.; WESTERINK, J. J.; SCHEFFNER, N. W. **ADCIRC: AN ADVANCED THREE-DIMENSIONAL MODEL FOR SHELVES, COASTS, AND ESTUARIES**. Dredging Research Program, Relatório Técnico, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 1992.

LUETTICH JR, R. A.; WESTERINK, J. J. **ELEMENTAL WETTING AND DRYING IN THE ADCIRC HYDRODYNAMIC MODEL: UPGRADES AND DOCUMENTATION FOR ADCIRC VERSION 34.XX**. Department of the U.S. Army, 1999.

LUETTICH JR, R. A.; WESTERINK, L., 2004. **FORMULATION AND NUMERICAL IMPLEMENTATION OF THE 2D/3D ADCIRC FINITE ELEMENT MODEL VERSION 44.XX.** Disponível em <[http://www.unc.edu/ims/adcirc/adcirc\\_theory\\_2004\\_12\\_08.pdf](http://www.unc.edu/ims/adcirc/adcirc_theory_2004_12_08.pdf)>, acessado 08 de fevereiro de 2020.

MAHIQUES, M. M. **CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SEDIMENTOS DE SUPERFÍCIE E DE FUNDO DA BAÍA DA ILHA GRANDE, ESTADO DO RIO DE JANEIRO.** Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

MEDEIROS, S. C.; HAGEN, S. C. REVIEW OF WETTING AND DRYING ALGORITHMS FOR NUMERICAL TIDAL FLOW MODELS. **International Journal for Numerical Methods in Fluids.** v. 71, p. 473-487, 2012.

OLIVEIRA, R. F.; MEYER, J. F. C. A. A ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS DE ACIDENTES COM DERRAME DE ÓLEO NA REGIÃO DO TERMINAL DE ANGRA DOS REIS, RJ: MODELAGEM, ANÁLISE E SIMULAÇÃO. **Tendências em Matemática Aplicada e Computacional (TEMA).** n. 1, p. 101-108, 2006.

PACHECO, C. G. **PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A CALIBRAÇÃO DE MODELOS COMPUTACIONAIS PARA UNIDADES DE CONTATO ATRAVÉS DE CURVAS DE PASSAGEM.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

PANDOE, W. W. **EXTENDED THREE-DIMENSIONAL ADCIRC HYDRODYNAMIC MODEL TO INCLUDE BAROCLINIC FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT.** Tese de Doutorado, Office of Graduate Studies - Universidade Texas A&M, Texas, 2004.

PINGREE, R. D.; MADDOCK, L. THE EFFECTS OF BOTTOM FRICTION AND EARTH'S ROTATION ON AN ISLAND'S WAKE. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom.** v. 60, n. 2, p. 499, 1980.

PINOTES, P. M. A. **IDENTIFICAÇÃO DE TEMPESTADES EXTREMAS NA COSTA PORTUGUESA**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

RAUCH, W.; HENZE, M.; KONCSOS, L.; REICHERT, P.; SHANAHAN, P.; SOMLYÓDY, L.; VANROLLEGHEM, P. RIVER WATER QUALITY MODELLING: I. STATE OF THE ART. **Water Science and Technology**. v. 34, n. 11, p. 237-244, 1998.

ROSMAN, P. C. C.; CABRAL, M. N.; CUNHA, C. N.; PÉCLY, J. O. G. SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), **Documentação de Referência Técnica**, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, 2006.

SIGNORINI, S. R. A STUDY OF THE CIRCULATION IN BAY OF ILHA GRANDE AND BAY OF SEPETIBA. PART I: A SURVEY OF THE CIRCULATION BASED ON EXPERIMENTAL FIELD DATA. **Boletim do Instituto Paulista de Oceanografia**. v. 29, n. 1, p. 41- 55, 1980a.

SIGNORINI, S. R. A STUDY OF THE CIRCULATION IN BAY OF ILHA GRANDE AND BAY OF SEPETIBA. PART II: NA ASSESSMENT TO THE TIDALLY AND WIND-DRIVEN CIRCULATION USING A FINITE ELEMENT NUMERICAL MODEL. **Boletim do Instituto Paulista de Oceanografia**. v. 29, n. 1, p. 57-68, 1980b.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2012. ADvanced CIRCulation Model. Disponível em: <<https://www.erdc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476698/advanced-circulation-model/>>. Acessado em 18 de março de 2020.

WILKS, D. S. STATISTICAL METHODS IN THE ATMOSPHERIC SCIENCES. **International Geophysics Series**, 2ª ed., Estados Unidos da América: Academic Press, 2006, v. 91.