



RESPOSTA DA BAÍA DE GUANABARA A EVENTOS EXTREMOS

Léo de Lacerda Andrioni

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Audalio Rebelo Torres Junior

Luiz Landau

Rio de Janeiro

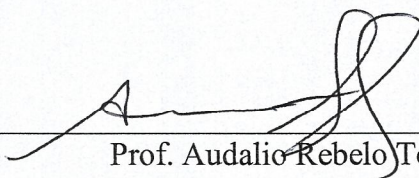
Maio de 2013

RESPOSTA DA BAÍA DE GUANABARA A EVENTOS EXTREMOS

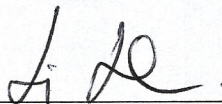
Léo de Lacerda Andrioni

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

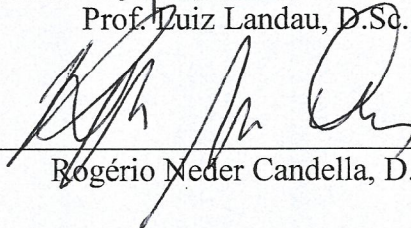
Examinada por:



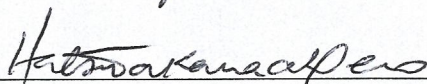
Prof. Audalio Rebelo Torres Junior, D.Sc.



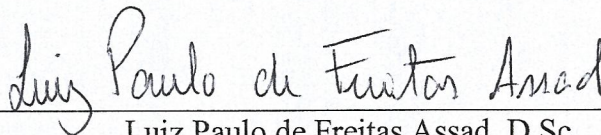
Prof. Luiz Landau, D.Sc.



Rogério Neder Candella, D.Sc.



Hatsue Takanaca de Decco, D.Sc.



Luiz Paulo de Freitas Assad, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2013

Andrioni, Léo de Lacerda

Resposta da Baía de Guanabara a eventos extremos/
Léo de Lacerda Andrioni. – Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2013.

XIII, 58 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Audalio Rebelo Torres Junior

Luiz Landau.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 54-58.

1. Baía de Guanabara. 2. Eventos extremos. 3.
Modelagem. I. Torres Junior, Audalio Rebelo *et al.* II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Até aqui nos ajudou o Senhor.

AGRADECIMENTOS

Ouvi falar que ninguém é uma ilha. Eu considero minha vida como um pequeno barco, navegando nesse imenso oceano que é a existência.

Agradeço aos construtores, que investiram seus capitais e tempo, sempre com muito entusiasmo, perseverança, esmero, honestidade, dedicação e amor incondicional, procurando fazer uma embarcação capaz de navegar com segurança. Tive o prazer de dividir o estaleiro com outros dois barcos muito importantes. Cada um deles com características muito especiais, que os tornam únicos e importantes. Tenho a certeza que, mesmo navegando para rumos diferentes, pertencemos à mesma frota e basta apenas um corvo branco anunciar o inverno para estarmos juntos novamente.

Há alguns anos embarcou em minha vida a tripulante mais importante, uma companheira que faria com que meus dias fossem menos solitários, meus invernos menos frios e minhas noites menos escuras. Amo vc me amor.

Há três anos parti rumo a uma nova aventura seguindo minha bússola quebrada, que, sem me dar conta, sempre mostrava apenas o que eu queria ver. Encontrei-me perdido, ao sabor dos ventos e quase à deriva, navegando mares revoltos, infestados de perigos, vagas procelosas e incertezas, quando finalmente tive a ventura de poder contar com o suporte e orientação de uma excelente sinalização náutica. Houve ainda a ajuda fundamental de um farol que, com sua luz de inúmeras candellas, me auxiliou na chegada a mais um porto.

Agradeço àqueles que contribuíram para esta viagem que encerro agora; aos amigos do Galeria Café por dividir o peso da noite, às equipes do PEC, do LAMCE e do LAMMA pela paciência e eterna disposição em ajudar; à tripulação do IEAPM pela acolhida e incentivos constantes; ao CHM por ceder os dados utilizados; à Comandante Isabel pela contribuição na caracterização de sedimentos; ao César Bartz pelas fotografias e finalmente à Fundação Lu de Incentivo ao Desenvolvimento Oceanográfico (FLUIDO). Agradeço também à Agência Nacional de Petróleo (ANP) que, através do Programa de Formação de Recursos Humanos (PRH02) financiou esse projeto.

Uma verdade é; com Cristo no barco tudo vai muito bem.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

RESPOSTA DA BAÍA DE GUANABARA A EVENTOS EXTREMOS

Léo de Lacerda Andrioni

Maio/2013

Orientadores: Audalio Rebelo Torres Junior

Luiz Landau

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta um estudo de variações no nível do mar, e as velocidades horizontais associadas, na Baía de Guanabara (BG), Rio de Janeiro, em cenários de eventos extremos, como por exemplo, tsunamis. Foi utilizado um modelo hidrodinâmico de diferenças finitas, configurado em seu modo barotrópico e calibrado com dados de nível do mar registrados em dois pontos da Baía de Guanabara, pela Marinha do Brasil (MB), no período do ano de 2010. Os resultados obtidos ao forçar o modelo com o sinal medido no marégrafo da Ilha Fiscal foram comparados aos obtidos usando apenas a maré astronômica como forçante. A análise dos resultados demonstra a necessidade de estudar eventos extremos, visto que, quando estes interagem com a hidrodinâmica local podem responder por variações de nível da ordem metros e de velocidades quase o dobro das esperadas. Devido à importância da BG, o estudo desses fenômenos, mesmo que de maneira qualitativa, constitui uma ferramenta capaz de ajudar na tomada de decisões, tanto para a indústria do petróleo com seus cabos e embarcações quanto para a engenharia e operação de portos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

GUANABARA BAY'S ANSWER TO EXTREM EVENTS

Léo de Lacerda Andrioni

May/2013

Advisors: Audalio Rebelo Torres Junior
Luiz Landau

Department: Civil Engineering

This work presents a study of the variations of the horizontal speed and sea level high in the Guanabara Bay, Rio de Janeiro, under scenarios of extreme events, such as surges and tsunami effects. A finite difference model was used, configured in its 2D mode and calibrated with data from sea level recorded at two points of Guanabara Bay, two Brazilian Navy tide stations. The values obtained were compared with the results calculated using only the astronomical tide. The results reinforce the need to increase the knowledge related to extreme events, since when low predictability events interact with the local hydrodynamics variations in the level of order meters and speeds almost double those expected can be observed. Due to the importance of GB was interesting to evaluate, even if qualitative manner, their behavior and the different observed responses. The study of these phenomena is a tool that can help in decision-making, both for the oil industry with their cables and boats as for engineering and ports operation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4 METODOLOGIA	8
4.1 PRINCETON OCEAN MODEL – POM	8
4.2 BATIMETRIA E LINHA DE COSTA	13
4.3 CALIBRAÇÃO	14
4.4 EFEITO DA RUGOSIDADE DO FUNDO	17
4.5 PONTOS DE INTERESSE	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 CASO 1 – EVENTOS DE BAIXA FREQUÊNCIA	24
5.1.1 ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS SIGNIFICATIVAS	26
5.1.2 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NA SUPERFÍCIE LIVRE	28
5.1.3 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NAS VELOCIDADES	35
5.2 CASO 2 – EVENTO DE ALTA FREQUÊNCIA, TSUNAMI	40
5.2.1 ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS SIGNIFICATIVAS	42
5.2.2 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NA SUPERFÍCIE LIVRE	44
5.2.3 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NAS VELOCIDADES	48
5.2.4 DECAIMENTO DE ENERGIA	50
6 CONCLUSÕES	52
7 BIBLIOGRAFIA	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica do mapa do Brasil, com destaque para o estado do Rio de Janeiro e a Baía de Guanabara, área de estudo.	5
Figura 2 – Sistema de coordenadas sigma, adaptado de Mellor (2004).	11
Figura 3– Representação da Malha C de Arakawa e a correspondente localização das variáveis dependentes, componentes ortogonais da velocidade horizontal (u e v) e elevação da superfície do mar (η).	12
Figura 4 – Representação da batimetria e linha de costa, adotadas na modelagem.	13
Figura 5- Comparação entre nível medido e a maré astronômica, para as estações da Ilha Fiscal e Boqueirão, para o ano de 2010.	14
Figura 6– Marés astronômicas para o mês de janeiro de 2010. Previsões utilizando o T_Tide, PACMARÉ e o resultado obtido a partir do ajuste de mínimos quadrados.	15
Figura 7- Maré em comparação com a maré modelada (modelo), para as estações da Ilha Fiscal de do Boqueirão, obtidas utilizando $z0b=0,03$	17
Figura 8 – Maré em comparação com a maré modelada (modelo), para as estações da Ilha Fiscal de do Boqueirão, obtidas utilizando $z0b=-0,01$	18
Figura 9 – Mapa da distribuição de sedimentos na BG, elaborado a partir de dados obtidos junto ao BNDO.	19
Figura 10- Mapa da distribuição dos coeficientes de rugosidade, utilizada no modelo.	20
Figura 11- Representação da Baía de Guanabara, em coordenadas de malha, e as respectivas localizações dos pontos estudados.	23
Figura 12– Variações não astronômicas do nível do mar, no Ponto da Ilha Fiscal para 2010. Em preto.	25
Figura 13– Principais oscilações de baixa frequência, relacionadas às variações no nível do mar (VNM), observadas no ano de 2010.	25
Figura 14 - Espectro das frequências significativas, para os dados de variação das velocidades, com destaque para alguns picos bem definidos.	26

Figura 15 - Comparação das variações no nível do mar (VNM) com o nível médio do mar (NMM), calculados a partir da maré e do sinal modelados, MM e SM, Ponto da Ilha Fiscal, junho de 2010.	28
Figura 16 - Comparação das variações no nível do mar (VNM) com o nível médio do mar (NMM), calculados a partir da maré e do sinal modelados, MM e SM, Ponto da Ilha Fiscal, agosto de 2010.	29
Figura 17 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 15 às 06 h. Preamar com níveis da ordem de 0,70m, ocasionados pela passagem da crista da onda.	30
Figura 18 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 15 às 12 h. Baixamar positiva com níveis da ordem de 0,30m, ocasionados pela passagem da crista da onda.	30
Figura 19 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 15 às 18 h. Preamar com níveis da ordem de 0,70m, ocasionados pela passagem da crista da onda.	31
Figura 20 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 16 às 00 h. Baixamar positiva com níveis da ordem de 0,30m, ocasionados pela passagem da crista da onda.	31
Figura 21 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 19 às 06 h. Baixamar com níveis da ordem de -0,40m, ocasionados pela passagem do cavado da onda.	32
Figura 22 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 19 às 12 h. Preamar negativa com níveis da ordem de -0,10m, ocasionados pela passagem do cavado da onda.	32
Figura 23– Instante do campo de elevações para a BG, dia 19 às 18 h. Baixamar com níveis da ordem de -0,30m, ocasionados pela passagem do cavado da onda.	33
Figura 24 - Instante do campo de elevações para a BG, dia 20 às 00 h. Preamar negativa com níveis da ordem de -0,20m, ocasionados pela passagem do cavado da onda.	33
Figura 25 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes, calculadas pelo modelo, para o Ponto Monoboia, agosto de 2010.	35
Figura 26 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes, calculadas pelo modelo, para o Porto do Rio, junho de 2010.	36
Figura 27 – Componentes ortogonais de velocidade, calculados pelo modelo, para Tubiacanga, junho de 2010.	37

Figura 28– Componentes ortogonais de velocidade, calculadas para o ponto da Enseada de Jurujuba, agosto de 2010.	38
Figura 29– Componentes ortogonais de velocidade, calculadas para o ponto da Ilha Fiscal, junho de 2010.	39
Figura 30 – Sinal, Maré e tsunami, obtido da subtração do sinal pela maré. Dias 26, 27, 28 e 29/12/2004	40
Figura 31 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM.	41
Figura 32 - Valores calculados para o sinal modelado (SM), a Maré Modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, após correção do sinal.	41
Figura 33 – Espectro das frequências significativas, para os dados de variação da superfície livre (SL), com destaque para alguns picos bem definidos.	42
Figura 34 – Espectro das frequências significativas, para os dados de variação das velocidades, com destaque para alguns picos bem definidos.	43
Figuras 35 (A-E) – Registros fotográficos de variação extrema do nível do mar ocorrida na Enseada de Jurujuba. Fotografias cedidas por Cesar Bartz.	45
Figura 36 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, para o ponto da Enseada de Botafogo.	46
Figura 37 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, para o ponto do Porto do Rio.	47
Figura 38 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, para o ponto da APA.	47
Figura 39 – Componentes ortogonais de velocidade, calculados pelo modelo, para a APA, dezembro de 2004.	48
Figura 40 – Componentes ortogonais de velocidade, calculados para a Enseada de Jurujuba, dezembro de 2004.	49
Figura 41 - Sinal do tsunami, para o ponto da Ens. de Jurujuba, a partir de um filtro passa-baixa. O círculo (próximo de 6h) indica o início dos efeitos associados ao tsunami.	51

Figura 42 – Variâncias calculadas para intervalos de 6 h, com sobreposição de 3 horas.
A linha pontilhada indica a tendência de decaimento de energia, a partir de um ajuste de mínimos quadrados dos pontos selecionados. 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de correlação entre os valores medidos e modelados, para a Ilha Fiscal e Boqueirão.....	16
Tabela 2 - Coeficientes de rugosidade de fundo (z_{0b}), de acordo com o tipo de sedimento.....	21
Tabela 3 - Identificação dos pontos de interesse e suas respectivas coordenadas geográficas e de malha.	22
Tabela 4 - Principais coeficientes e parâmetros adotados na execução do modelo hidrodinâmico.....	24

1 INTRODUÇÃO

O nível do mar está continuamente oscilando em resposta aos forçantes astronômicos, atmosféricos e oceanográficos, em diferentes escalas de tempo e espaço (PUGH, 1987), e medição e o estudo das variações do nível do mar são subsídios indispensáveis para o desenvolvimento de diversas e importantes atividades relacionadas ao oceano. Segundo Mesquita (1997), “O nível do mar é, dentre as medições oceanográficas, a que sintetiza as influências de vários processos oceânicos, incluindo efeitos devido às correntes marinhas, efeitos meteorológicos, efeitos devido ao geopotencial terrestre, contornos oceânicos assim como os efeitos das forçantes astronômicas”.

Para o Brasil, uma breve revisão bibliográfica de trabalhos sobre as regiões sul e sudeste mostra, em diversas escalas temporais e espaciais, o estudo de processos considerando a influência de parâmetros atmosféricos e astronômicos. Silva (1992) estudou a variação de longo período do nível médio do mar na Ilha Fiscal (RJ). Paiva (1993) elaborou relatório técnico sobre a variação no NMM, bem como efeitos meteorológicos de vento, pressão atmosférica e a temperatura da água, na Ilha Fiscal (RJ) e em Arraial do Cabo (RJ) e a possível correlação entre as variações observadas em ambas às regiões. Kalil (1999) contribuiu com o estudo do nível médio do mar no Rio de Janeiro ao caracterizar o comportamento espaço-temporal das variações.

Fillipo et al. (2003) analisaram a influência meteorológica no nível do mar nos registros das estações maregráficas de Cananéia (SP) e Ilha Fiscal (RJ) nos anos de 1982 e 1983. Candella & Calil (2006) descrevem eventos com períodos superiores às principais componentes de maré astronômica, em Arraial do Cabo (RJ). Nunes (2007) mostrou os efeitos meteorológicos no nível do mar e seus efeitos na drenagem urbana.

Neste trabalho, foram definidas como eventos de baixa frequência as oscilações inframarés, associadas a períodos maiores que 25 horas. Já as ondas associadas a períodos menores que 6 horas foram definidas como oscilações de alta frequência. Essas oscilações de baixa frequência, associadas às ondas de plataforma e de maré, quando em águas rasas são influenciadas por efeitos não lineares que contribuem na distorção e dissipação de energia (DYER, 1997). Contudo, variações no nível do mar também podem ocorrer devido a efeitos induzidos por processos meteorológicos e estas oscilações, quando simultâneas às marés de sizígia, podem responder por variações com

amplitudes muito acima dos valores associados à maré astronômica. Segundo Rabinovich (2009), os principais forçantes para essas variações são ondas longas, de baixa frequência, geradas externamente e não variações atmosféricas locais.

Oscilações do nível do mar em alta frequência são regularmente observáveis em dados maregráficos. Entretanto, os eventos de altas frequências estudados neste trabalho estão relacionados ao sinal do tsunami Sumatra, ocorrido em dezembro de 2004, que teve seus efeitos registrados em diversas estações maregráficas ao longo da costa brasileira (FRANÇA & MESQUITA, 2007 ; CANDELLA *et al*, 2008). Dentre as estações que registraram o fenômeno encontra-se a estação maregráfica da Ilha Fiscal, situada no interior da Baía de Guanabara.

Embora existam trabalhos e estudos sobre variações de nível do mar na BG, poucos foram realizados associando fenômenos de alta e baixa frequência às variações extremas de nível. Com amplitudes reduzidas na maior parte do tempo, essas oscilações têm seus valores de amplitude aumentados substancialmente em algumas situações. Alguns aspectos dessas oscilações, suas variabilidades inter e intra-anuais, bem como a descrição e análise de alguns casos são apresentados em Candella & Andrioni (2008).

Variações no nível do mar relacionadas às marés astronômicas, de forma isolada, há muito são bem entendidas e previsíveis. Entretanto a interação destas com eventos extremos ainda precisa ser mais bem estudada, pois suas características podem causar muitos danos. São cenários de baixa previsibilidade, e acurácia ainda menor, que alteram o nível d'água por alguns instantes ou até mesmo dias e justamente por ocorrerem juntamente com as marés podem ocasionar variações extremas no nível do mar.

Candella & Candella (2011) corroboram a necessidade de entender melhor tais fenômenos, afirmando que “essas oscilações têm importância capital para as embarcações, especialmente as de grande porte, seja na influência que têm sobre o calado das vias marítimas, seja sobre os esforços que exercem nas espigas de atracação, entre outras.”.

Devido à atual limitação de prever eventos extremos, causados pela interação entre maré, oscilações induzidas pela atmosfera e movimentos oceânicos, de que forma o estudo destes pode ser benéfico? O simples discernimento do que pode vir a acontecer, quando da interação de diferentes forças da natureza, é uma ferramenta estratégica de extremo valor na mitigação de eventuais problemas. Saber a resposta do corpo d'água às variações nas velocidades, no nível do mar e na energia, fornece

subsídios para desenvolver habilidades e ferramentas capazes de prever, de maneira mais eficiente, tais eventos e interações.

Simular a física atuante em zonas costeiras ainda constitui um desafio para todos aqueles que trabalham nesta área, uma vez que muitos dos processos relacionados com os ambientes costeiros e, também, muitos aspectos relacionados com o desenvolvimento dos modelos ainda são mal compreendidos. As formulações matemáticas adotadas em estudos hidrodinâmicos, nas zonas costeiras, aumentam sua complexidade a cada dia e são baseadas, de uma forma geral, em equações não lineares. (ROSMAN, 1997).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a resposta do nível do mar na Baía de Guanabara (BG) a forçantes extremos, em comparação com variações astronômicas, com a utilização de técnicas de modelagem computacional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar um modelo hidrodinâmico barotrópico na BG;
- Configurar e calibrar o modelo, de modo a obter resultados coerentes com os valores medidos;
- Obter numericamente variações do nível d'água e as velocidades horizontais;
- Analisar a variação das velocidades horizontais associadas às variações no nível do mar.
- Identificar principais áreas sujeitas às variações extremas de nível;
- Analisar a propagação dos efeitos do tsunami de 2004 dentro da BG.

3 ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Guanabara (BG) é um dos mais importantes ambientes costeiros do Brasil. Um diversificado complexo de ecossistemas incluindo florestas, manguezais, brejos, alagados, lagunas, restingas, dunas, praias, rios, estuários, enseadas, sacos, gamboas, ilhas, lajes, coroas, costões, pontões rochosos e falésias. (AMADOR, 1996).

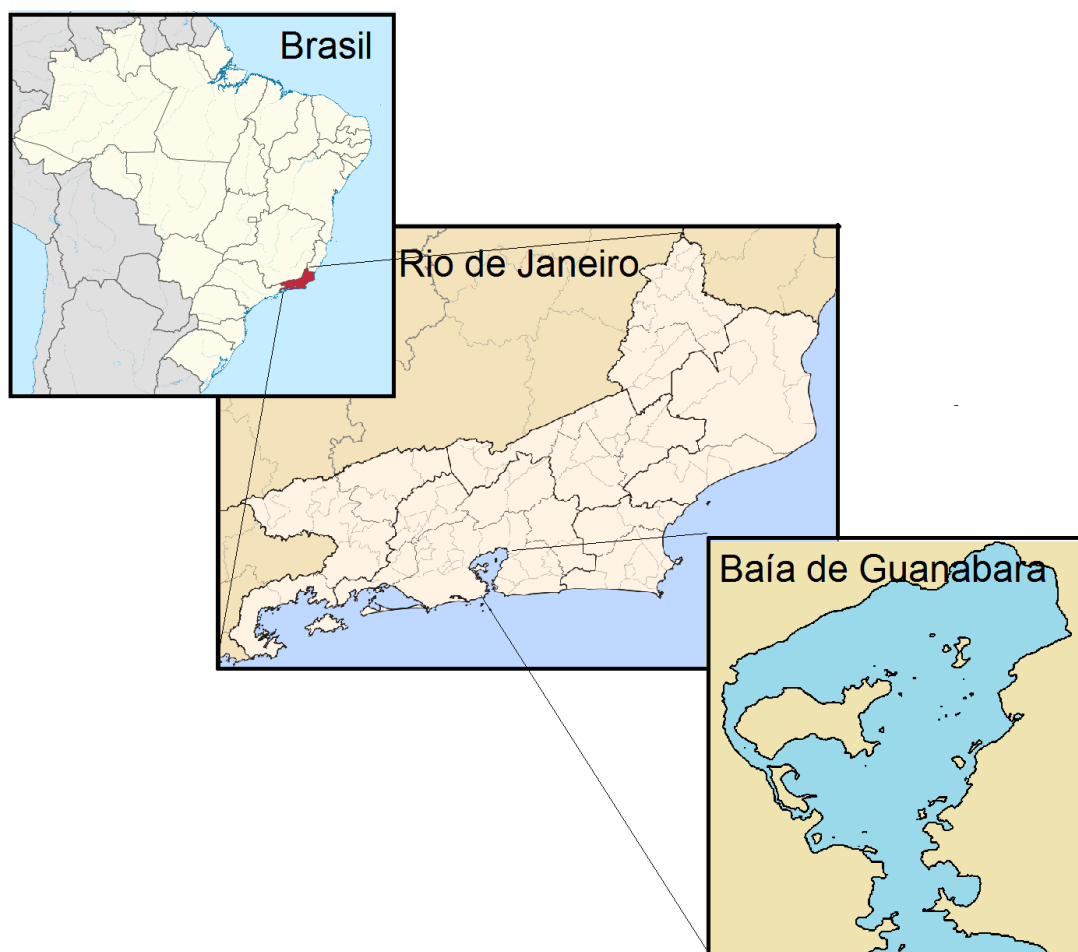


Figura 1 – Representação gráfica do mapa do Brasil, com destaque para o estado do Rio de Janeiro e a Baía de Guanabara, área de estudo.

Localizada na região sudeste do Brasil, no estado do Rio de Janeiro (Figura 1), entre 22°24' e 22°57' de latitude Sul e 042°33' e 043°19' de longitude Oeste, é uma das maiores baías do litoral brasileiro, com uma área aproximada de 380 km², espelho d'água com 377 km² e perímetro de 131 km (AMADOR, 1996). Tem sua barra localizada entre as Fortalezas de Santa Cruz e São João, com uma largura de 1,6 km, estendendo-se por 30 km na direção N–S e com uma largura máxima de 28 km na direção W–E. (KJERFVE *et al.*, 1997).

Na margem oeste da BG estão localizados a cidade do Rio de Janeiro e seu porto, um dos mais importantes do país, e na margem leste está Niterói e seu porto. Ao norte, junto à ilha do Governador, localiza-se um dos principais terminais de petróleo do país. Às margens, está um grande número de estaleiros construtores e reparadores de navios, além de um grande complexo industrial e 2 aeroportos. Em função da industrialização e da crescente população, tornou-se um dos estuários mais proeminentes e degradados do país (QUARESMA, 1997).

A BG apresenta uma geometria complexa, com inúmeras ilhas e áreas de manguezal. Rodeada por maciços montanhosos litorâneos e escarpas da Serra do Mar, sua forma atual é reflexo de sua formação geológica, da evolução do nível do mar e também dos diversos aterros realizados, como por exemplo, a praia do Flamengo e a Ilha do Fundão (KJERFVE *et al.*, 1997, BÉRGAMO, 2006). A topografia do fundo resulta do aporte sedimentar, transporte e deposição pelas correntes, responsáveis pela suavização da mesma (BÉRGAMO, 2006).

A BG apresenta profundidades variadas, segundo Mayr *et al.* (1989), com valores inferiores a 10 m em mais de 80% da área. As maiores profundidades são medidas ao longo do canal principal, chegando a 58 m no eixo N-S da baía, e as menores no extremo noroeste, em torno de 1 m durante a baixa-mar. Segundo Carvalho (2010) e adotando o limite sul da BG como proposto por Amador (1996), a profundidade média é de 7,9 m.

A hidrodinâmica marinha local é fortemente influenciada pela maré, que apresenta características de desigualdades semidiurnas, com o nível médio 0,7 m acima do nível de redução das cartas náuticas. Alturas máximas em torno de 1,1 m e mínimas de 0,3 m são observadas em períodos de sizígia e quadratura, respectivamente (KJERFVE *et al.* 1997). Existem 20 estações maregráficas cadastradas na Baía de Guanabara e entre estas as da Ilha Fiscal (Lat 22° 53,8' S e Lon 043° 09,9' W) e Ilha do

Boqueirão (Lat 22° 46' S e Lon 043° 09,1' W), onde as séries anuais utilizadas nesse trabalho foram registradas.

A corrente de maré, na época da sizígia, costuma ter a direção de enchente desde 4 horas antes da preamar. Na preamar, começa a inverter no trecho entre a ilha das Cobras e a barra, tomando a direção de vazante até 5 horas antes da preamar seguinte. A velocidade varia entre $0,10 \text{ ms}^{-1}$ e $0,77 \text{ ms}^{-1}$, sendo maior na vazante e em áreas com profundidades acima de 10m. (CHM, 2012).

4 METODOLOGIA

Modelos hidrodinâmicos computacionais são utilizados com o objetivo de reproduzir matematicamente a realidade e constituem uma ferramenta importante que permite simular processos e seus efeitos nas áreas de interesse. Tais simulações, até certo ponto, tornam possível a previsão de eventos, a análise das variações temporais de quantidades físicas e estimativas do fluxo de energia dentro de um sistema. Consistem em sistemas de equações capazes de representar a física envolvida nos escoamentos naturais presentes nos corpos d'água. Da representação do domínio contínuo em um domínio discreto, resultam equações algébricas cujas soluções podem ser obtidas através de algoritmos computacionais, os métodos numéricos.

4.1 PRINCETON OCEAN MODEL – POM

Na realização deste trabalho foi utilizado o *Princeton Ocean Model* (POM), modelo oceânico de domínio público, desenvolvido no *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), por Blumberg & Mellor (1983 e 1987). Apesar de ser um modelo oceânico, como o nome sugere, vem sendo utilizado para estudos em diversas escalas, da hidrodinâmica de bacias oceânicas a ambientes lagunares de pequena escala, incluindo ambientes estuarinos e de baía, como neste caso. O POM é programado em FORTRAN e a descrição geral do modelo é apresentada em Mellor (2004).

O POM vem sendo aplicado tanto para estudos diagnósticos, como acontece neste trabalho, como em estudos de modelagem de correntes oceânicas, vórtices e meandro e outros. As equações governantes do modelo são as equações primitivas de movimento, continuidade de volume, estado da água do mar, conservação de sal e calor.

É adotada a aproximação hidrostática e de Boussinesq, a primeira impõe que a pressão em qualquer profundidade seja considerada hidrostática, ou seja, a pressão resultante do peso da água circundante sobre a unidade de área. Já a aproximação de Boussinesq assume que é desprezível o efeito das variações de densidade sobre a massa do fluido se estas forem muito pequenas. As variações nas acelerações horizontais devido às diferenças de massa podem ser desprezadas, mas devem ser consideradas para o cálculo do campo de pressão.

As variáveis prognósticas do modelo são as componentes horizontais do momento, a temperatura e a salinidade, que juntas com a equação da continuidade e a equação hidrostática compõem o conjunto das equações governantes no modelo.

Equação da quantidade de momento, componente x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_x \quad 4.1.1$$

Equação da quantidade de momento, componente y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_y \quad 4.1.2$$

Equação de transporte de calor:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + F_\theta \quad 4.1.3$$

Equação de transporte de sal:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right] + F_S \quad 4.1.4$$

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad 4.1.5$$

Componente z:

$$\rho g = - \frac{\partial P}{\partial z} \quad 4.1.6$$

U, V: componentes da velocidade horizontal na direção x e y (m.s⁻¹);

W: velocidade vertical (m.s⁻¹);

f: parâmetro de Coriolis (s⁻¹);

ρ₀: densidade de referência (kg.m⁻³);

ρ: densidade (kg.m⁻³);

S: salinidade;

θ: temperatura potencial (°C);

g: aceleração da gravidade (m.s⁻²);

K_M: coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta (m².s⁻¹);

K_H: coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal (m².s⁻¹).

O modelo trabalha com superfície livre e a possibilidade de simulações bidimensionais e tridimensionais. O método de discretização temporal na direção horizontal é explícito, aonde os valores das variáveis dependentes num instante posterior são calculados diretamente a partir dos seus valores no instante anterior. Na direção vertical é implícito, sendo as variáveis independentes obtidas a partir da resolução de um sistema de equações, estabelecido a partir do esquema de diferenças finitas.

Para permitir a simulação do campo de velocidades e a propagação de ondas de gravidade, de elevada celeridade, o algoritmo de cálculo do programa recorre uma técnica conhecida por separação de modos, ou *mode-splitting*, que permite que sejam utilizados diferentes intervalos de tempo na integração. A divisão em módulos contribui no desempenho computacional do programa além de reduzir erros de truncamento, causados pela realização de operações desnecessárias, entretanto, fazendo-se indispensável definir um intervalo para ajustar os módulos entre si, evitando assim uma possível divergência das soluções.

O modo externo, barotrópico na vertical, é equivalente a um movimento médio, com o passo de tempo limitado pela condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy (CFL). É utilizado para o cálculo das elevações da superfície livre e das componentes horizontais da velocidade associadas à propagação de ondas de gravidade e sua formulação matemática resulta da integração vertical das equações primitivas, em coordenadas sigma. No modo interno, também conhecido como baroclínico, são calculadas as variáveis tridimensionais, portanto, mais exigente em termos computacionais e com um passo de tempo menos restritivo do que o utilizado no modo externo. Existem outros limites para o passo de tempo no modo interno, entre eles, os impostos pelas condições de difusão horizontal da quantidade de movimento e pelo termo de Coriolis.

O POM utilizada coordenada vertical sigma (MELLOR, 2004), definida como a parcela de coluna d'água, variando entre 0, na superfície livre, e -1 no fundo (Figura 2), e definem um mesmo número de níveis em todo o domínio, com espessuras dependendo da profundidade local ao invés de distâncias verticais e que, segundo Torres Junior (1995), têm como objetivo incluir uma topografia de fundo mais realista quando da discretização das equações.

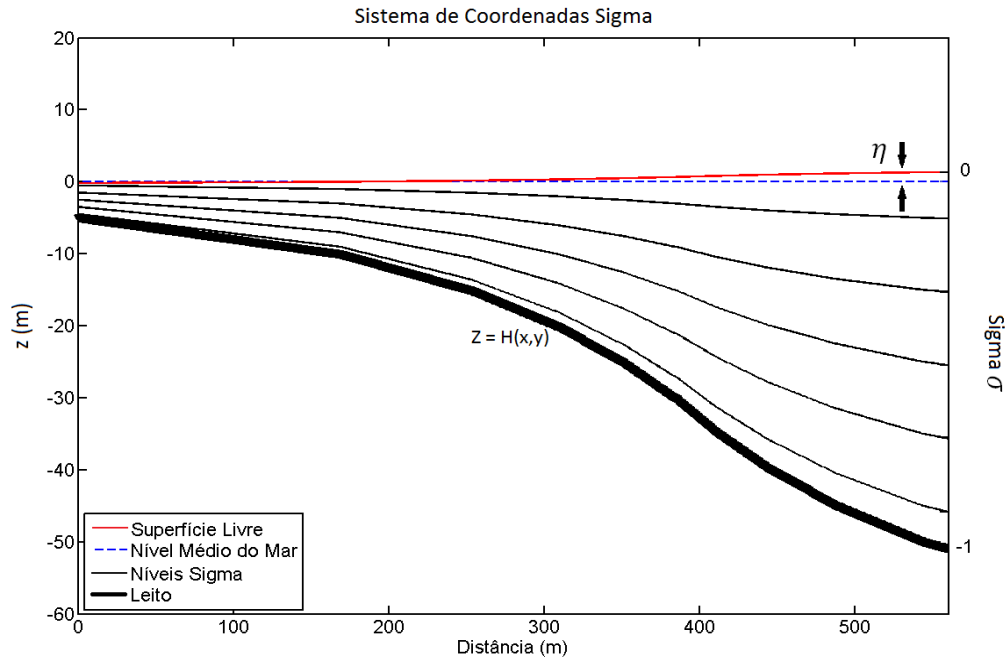


Figura 2 – Sistema de coordenadas sigma, adaptado de Mellor (2004).

A utilização de coordenada sigma como coordenada vertical (PHILLIPS, 1957) dá-se segundo as relações abaixo:

$$x = x^* \quad y = y^* \quad t = t^* \tag{4.1.7}$$

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \tag{4.1.8}$$

$$D = H + \eta \tag{4.1.9}$$

Onde:

(x,y,z) : sistema de coordenadas cartesianas

(x^*,y^*,σ) : sistema de coordenadas sigma

t : tempo;

$H(x^*,y^*)$: profundidade média local (m)

$D(x^*,y^*,t^*)$: profundidade local (m)

$\eta(x^*,y^*,t^*)$: elevação da superfície (m)

O POM está baseado no método das diferenças finitas (MDF), utiliza malhas estruturadas e, em relação à localização das variáveis dependentes na malha, adota a grade C de Arakawa, descrita em Mesinger & Arakawa (1976) e ilustrada na Figura 3.

Grade C de Arakawa

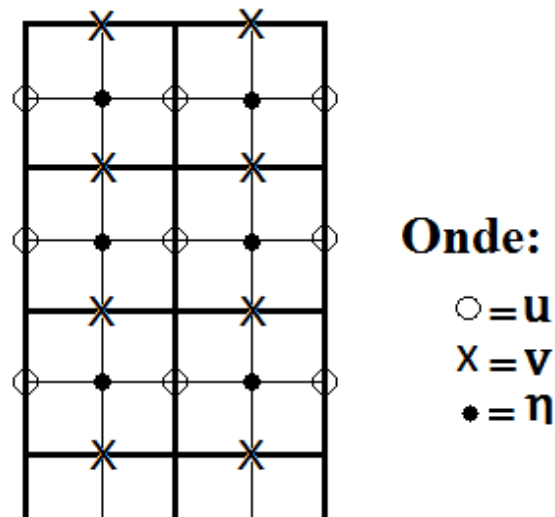


Figura 3– Representação da Malha C de Arakawa e a correspondente localização das variáveis dependentes, componentes ortogonais da velocidade horizontal (u e v) e elevação da superfície do mar (η).

4.2 BATIMETRIA E LINHA DE COSTA

Foram utilizadas a base batimétrica e a linha de costa elaboradas e descritas por Carvalho (2010), com exceção da resolução horizontal, que, neste trabalho foi de 100 m. A batimetria foi obtida da digitalização de folhas de bordo, cedidas pela Marinha do Brasil, e a linha de costa da digitalização de uma imagem LandSat V. A batimetria e a linha de costa foram interpoladas adotando uma máscara com zeros para pontos em terra, utilizando o método IDW (Inverse Distance Weighted), de modo que a interpolação respeitasse o contorno estabelecido (Figura 4)

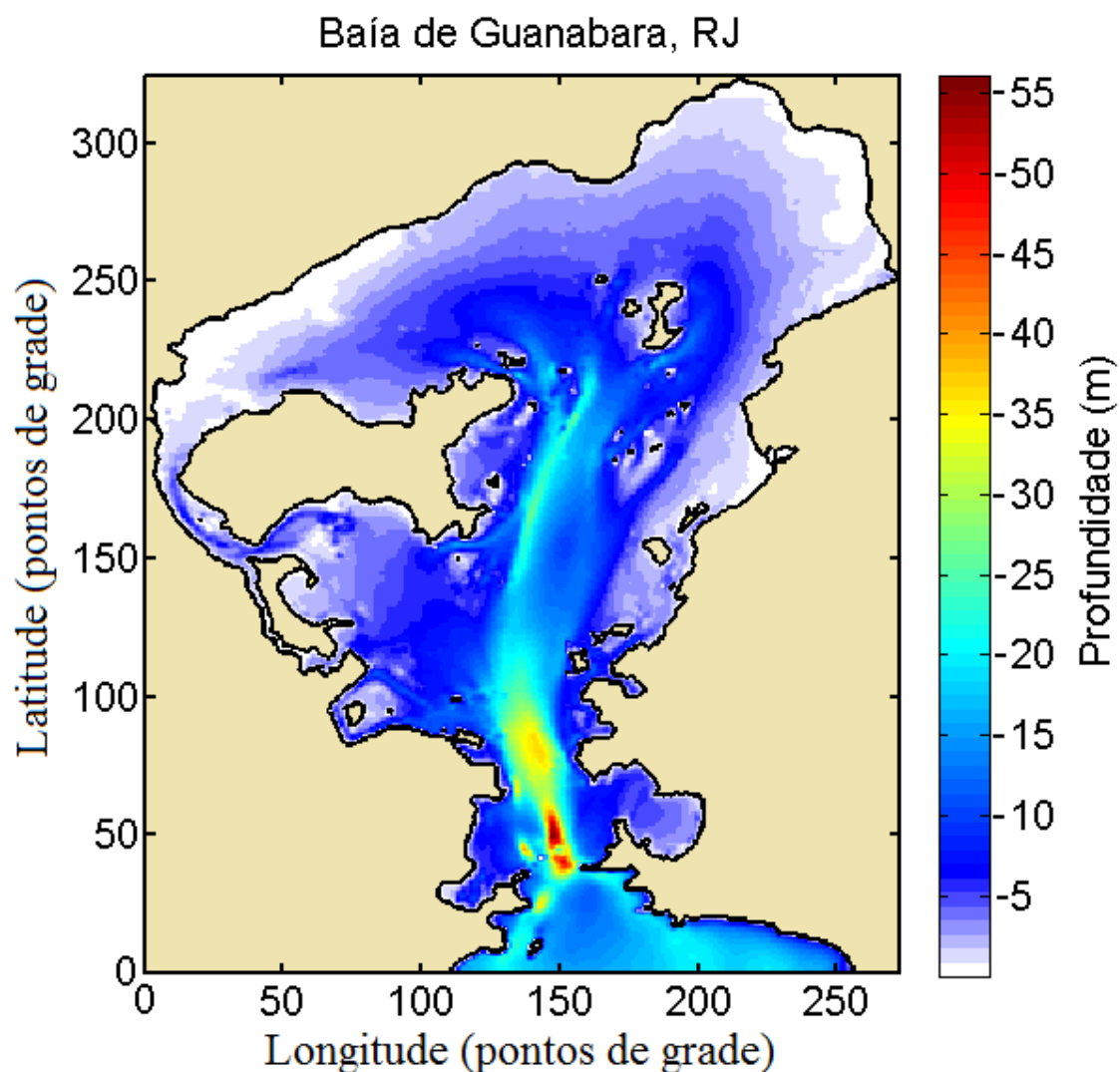


Figura 4 – Representação da batimetria e linha de costa, adotadas na modelagem.

4.3 CALIBRAÇÃO

Foram utilizados, na calibração, valores extraídos das séries de alturas do nível do mar, registradas nas estações maregráficas da Ilha Fiscal (Lat 22° 53,8' S e Lon 043° 09,9' W) e Ilha do Boqueirão (Lat 22° 46' S e Lon 043° 09,1' W), para o ano de 2010, obtidas junto ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), onde as séries foram pré tratadas para a retirada de ruídos e *outliers*.

Foram utilizadas, como forçantes astronômicas, as marés obtidas a partir de uma técnica de ajuste de mínimos quadrados (CANDELLA & CANDELLA, 2011). A Figura 5 apresenta estes valores para o mês de novembro de 2010, onde é possível observar a coerência entre os valores registrados na Ilha Fiscal, Ilha do Boqueirão e a maré astronômica para as estações.

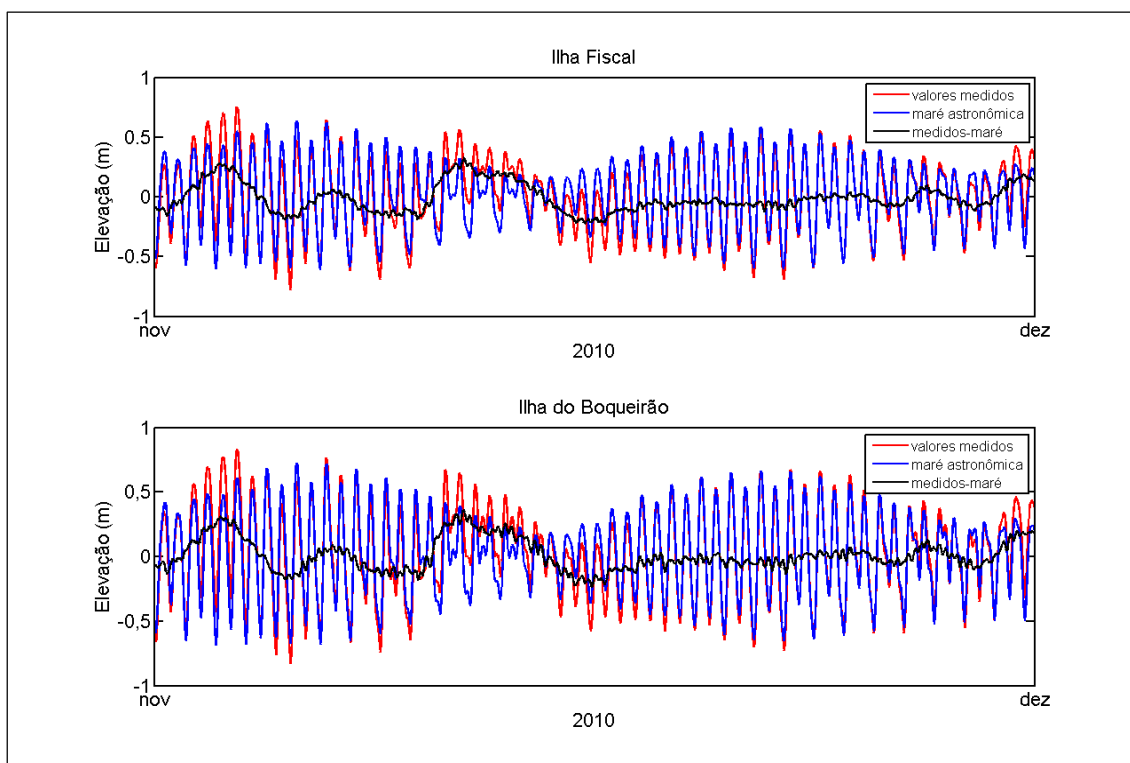


Figura 5- Comparação entre nível medido e a maré astronômica, para as estações da Ilha Fiscal e Boqueirão, para o ano de 2010.

Segundo Malta (2005), marés astronômicas reconstituídas a partir de seus principais constituintes harmônicos, conhecidas como marés sintéticas, podem ser aplicadas em simulações numéricas como, por exemplo, Fragoso (1999), Sampaio (2003), Barroso Junior (2009) e Carvalho (2010).

A fim de aferir os resultados obtidos foram geradas marés astronômicas a partir dos constituintes harmônicos, presentes no Catálogo de Estações Maregráficas (FEMAR, 2000), utilizando o PACMARÉ (FRANCO, 2000 e 2009) e MATLAB, através da toolbox T_tide (PAWLOWICZ *et al.*, 2002). As marés previstas foram comparadas à maré filtrada permitindo atestar a eficácia do método empregado, para separar as frequências astronômicas, a partir da coerência entre as séries (Figura 6).

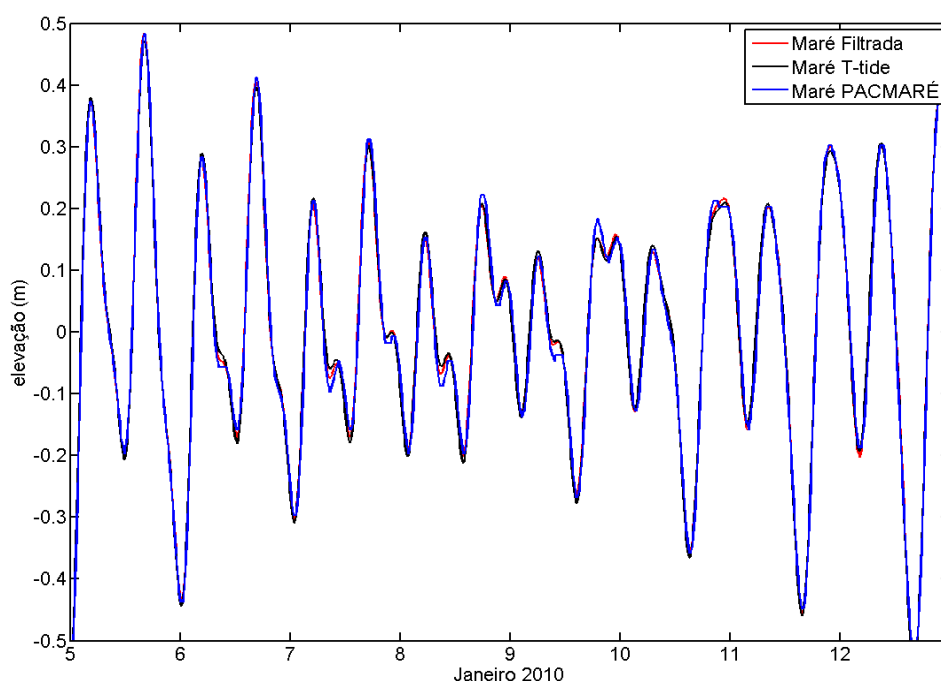


Figura 6– Marés astronômicas para o mês de janeiro de 2010. Previsões utilizando o T_Tide, PACMARÉ e o resultado obtido a partir do ajuste de mínimos quadrados.

Não havendo estações maregráficas ao longo da fronteira aberta do modelo, decidiu-se utilizar os valores medidos na estação existente na Ilha Fiscal, localizada 9 km ao norte da fronteira aberta. Devido à distância, fez-se necessário avaliar a capacidade do modelo reproduzir a amplitude e fase da onda de maré, sem correções nos sinais medidos, e para isto foram calculados os coeficientes de correlação linear entre os valores medidos e modelados (Tabela 1).

Após a análise dos coeficientes e estando o foco deste trabalho na análise qualitativa das elevações e velocidades, julgou-se desnecessário a adição ou subtração de diferenças para corrigir os forçantes, sendo estes utilizados inalterados e sem nenhum prejuízo ao estudo.

Tabela 1 - Coeficiente de correlação entre os valores medidos e modelados, para a Ilha Fiscal e Boqueirão.

	Modelo Ilha Fiscal	Modelo Boqueirão	Medido Ilha Fiscal	Medido Boqueirão
Modelo Ilha Fiscal	1	0,8525	0,9563	-
Modelo Boqueirão	0,8525	1	-	0,9435

A fim de facilitar o entendimento e padronizar os termos utilizados, o **signal medido** e a **maré astronômica filtrada**, a partir de agora, serão simplesmente **signal** e **maré**, respectivamente. Os valores calculados pelo modelo passam a ser chamados de **maré modelada** (MM), quando originados do forçante **maré**, e **signal modelado** (SM), quando obtido a partir do **signal**.

4.4 EFEITO DA RUGOSIDADE DO FUNDO

Durante a calibração, verificou-se uma clara dependência entre o valor da rugosidade de fundo (z_{0b}) e os resultados calculados pelo modelo. Para um mesmo valor em todo o domínio, a resposta do modelo divergia dos valores encontrados para as respectivas marés astronômicas. Adotando-se o valor de $z_{0b}=0,03$, os resultados apresentavam diferença nas fases e eram subestimados na amplitude da onda para a Ilha do Boqueirão, como pode ser observado na Figura 7. Quando adotado o valor de $z_{0b}=0,01$ os resultados para as amplitudes de maré da Ilha fiscal eram subestimadas, como apresentado na Figura 8.

As diferenças entre os valores calculados e medidos são associadas à capacidade que diferentes tipos de sedimento têm de interferir na velocidade de propagação da onda e, conseqüentemente, no comprimento. Mesmo em um estudo barotrópico, como é o caso, esse coeficiente mostrou-se capaz de comprometer ou prejudicar severamente os resultados,

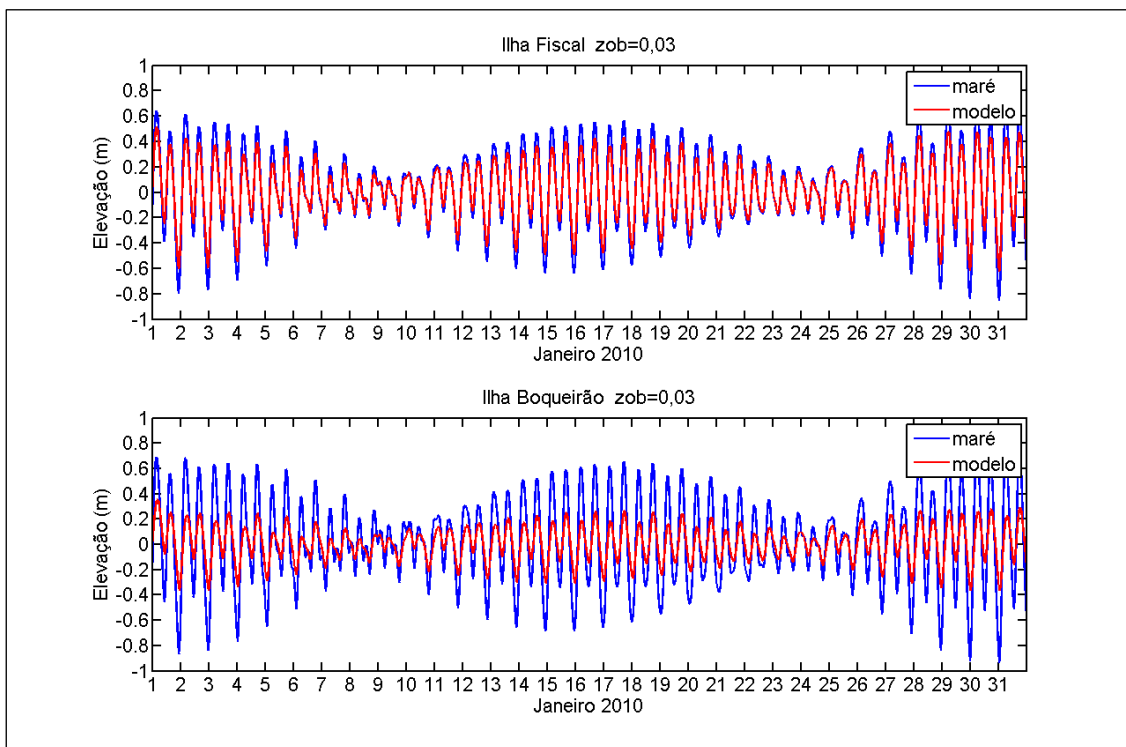


Figura 7- Maré em comparação com a maré modelada (modelo), para as estações da Ilha Fiscal e do Boqueirão, obtidas utilizando $z_{0b}=0,03$.

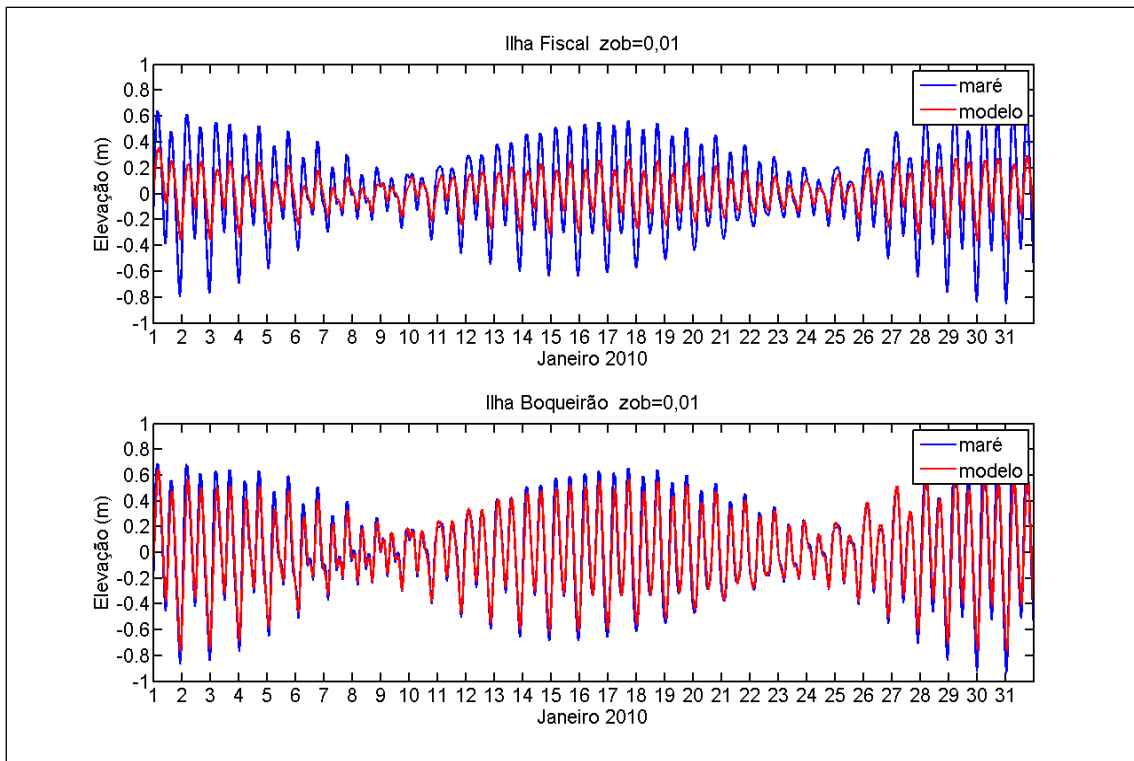


Figura 8 – Maré em comparação com a maré modelada (modelo), para as estações da Ilha Fiscal de do Boqueirão, obtidas utilizando $z_{0b}=-0,01$.

As estimativas de rugosidade de fundo com base na classificação do material do leito da Baía da Guanabara permitiram aprimorar a resposta do modelo. Tal caracterização foi obtida a partir de dados de coleta de sedimento presentes no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO). A Figura 9 apresenta o mapa de distribuição de sedimentos na BG e a interpretação deste levou à criação de faixas de rugosidade de fundo semelhante, possibilitando fornecer ao modelo, um coeficiente de rugosidade, variável no espaço.

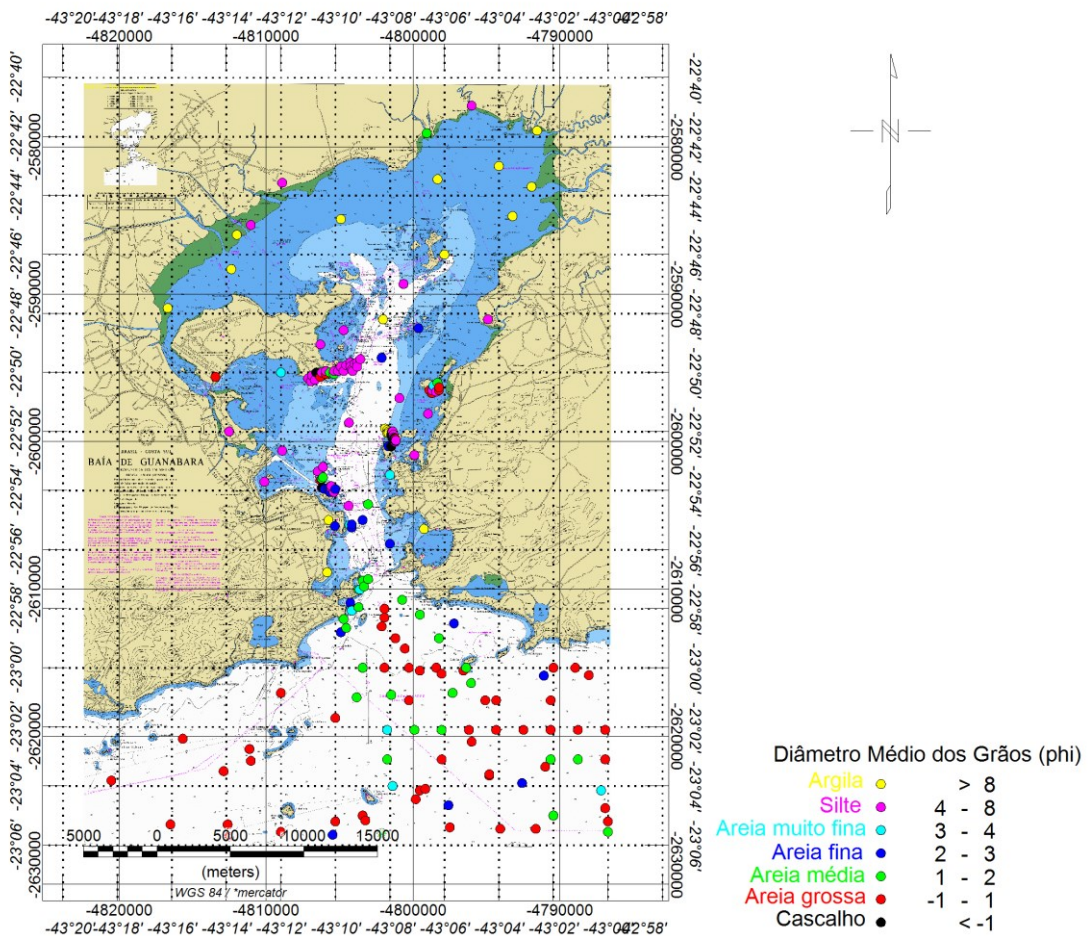


Figura 9 – Mapa da distribuição de sedimentos na BG, elaborado a partir de dados obtidos junto ao BNDO.

No presente trabalho, os valores foram estabelecidos após inúmeros testes e ajustes, de tal modo que o modelo fosse capaz de reproduzir, de maneira mais realística as medições na Ilha Fiscal e Ilha do Boqueirão. Foram definidos para os sedimentos mais grosseiros, presentes na entrada da BG, e para os sedimentos mais finos, presentes principalmente na região mais interna, os valores de $z_{0b}=0,03$ e $z_{0b}=0,01$, respectivamente. Foram definidos também valores intermediários, com gradiente suave entre eles, ainda segundo as isolinhas definidas, como pode ser visto na Figura 10.

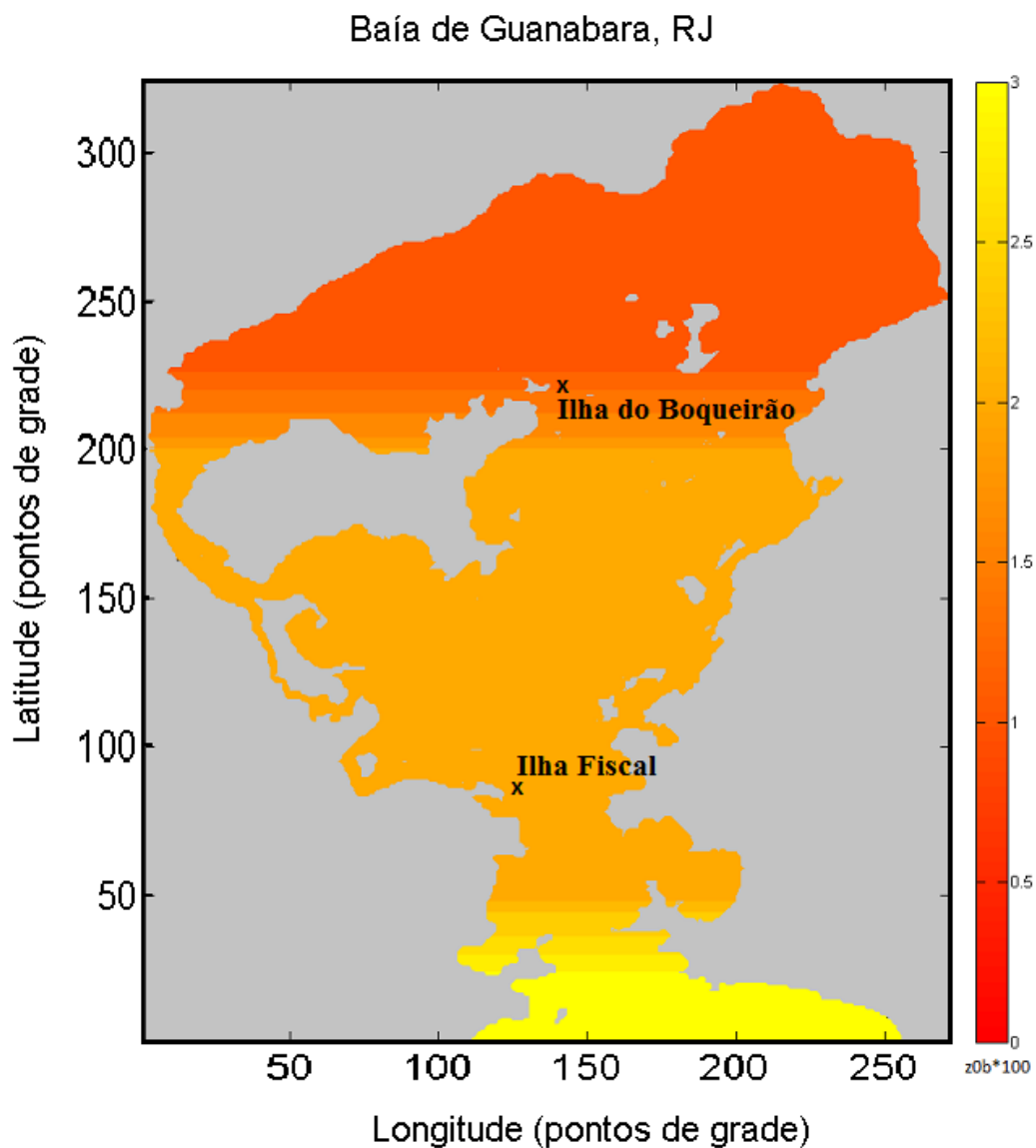


Figura 10- Mapa da distribuição dos coeficientes de rugosidade, utilizada no modelo.

Os coeficientes empregados para a amplitude da rugosidade estão condizentes com os propostos por Abbot & Basco (1989) e com os adotados em Malta (2005), para a mesma região estudada, Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de rugosidade de fundo (z_0), de acordo com o tipo de sedimento.

Tipo de Sedimento	Coeficiente de rugosidade de fundo (z_0)
Areia grossa	0,04
Areia média	0,03
Areia fina	0,025
Areia muito fina	0,02
Silte	0,015
Argila	0,01

4.5 PONTOS DE INTERESSE

Foram escolhidos sete pontos de estudos, segundo o interesse econômico e/ou hidrodinâmico, por exemplo, Monoboia e Ens. Jurujuba, o primeiro por apresentar interesse econômico, devido à presença de instalações petrolíferas, e o segundo devido à existência de registros de alagamentos associados ao tsunami de Sumatra, ocorrido em 2004 (RITTER, 2007). Os pontos têm suas coordenadas e nomes elencados na Tabela 3 e suas localizações na Figura 11.

Tabela 3 - Identificação dos pontos de interesse e suas respectivas coordenadas geográficas e de malha.

Identificação do Ponto	Coordenadas geográficas	Coordenadas de grade
Enseada de Botafogo	Latitude 22°56'79"S Longitude 043°10'19"W	x=113; y=029
Enseada de Jurujuba	Latitude 22°55'38"S Longitude 43° 6'19"W	x=190; y=051
Ilha Fiscal	Latitude 22°54'44"S Longitude 043°09'59"W	x=124; y=085
Porto do Rio	Latitude 22°53'02"S Longitude 043°12'35"W	x=075; y=100
Monoboia	Latitude 22°48'50"S Longitude 043°09'01"W	x=135; y=180
Tubiacanga	Latitude 22°46'06"S Longitude 043°13'47"W	x=050; y=225
APA	Latitude 22°43'23"S Longitude 043°04'07"W	x=210; y=280

Os pontos localizados na metade sul da BG são: Enseada de Botafogo – A oeste do morro do Pão de Açúcar, com profundidades entre 2m e 11m; Enseada de Jurujuba – A nordeste dos morros do Macaco e do Pico, com profundidades entre 2m e 5m; Ilha Fiscal– Na margem oeste e ligada à ilha das Cobras por um molhe; O porto do Rio de Janeiro - Situado na costa oeste da baía de Guanabara, estendendo-se desde a Praça Mauá, a oeste da ilha das Cobras, até a ponta do Caju, junto à ponte Rio–Niterói.

Na parte norte da BG localizam-se os pontos: Monoboia/Ilha d'Água – Localização do centro de operações do terminal da Baía de Guanabara e quase toda ocupada por tanques de armazenagem de petróleo e derivados; Tubiacanga – localizado ao norte na Ilha do Governador, profundidades menores que 2 m; APA - Área a nordeste da ilha de Paquetá que constitui o “Complexo Hidrológico da Área de Proteção Ambiental de Guapimirim”.

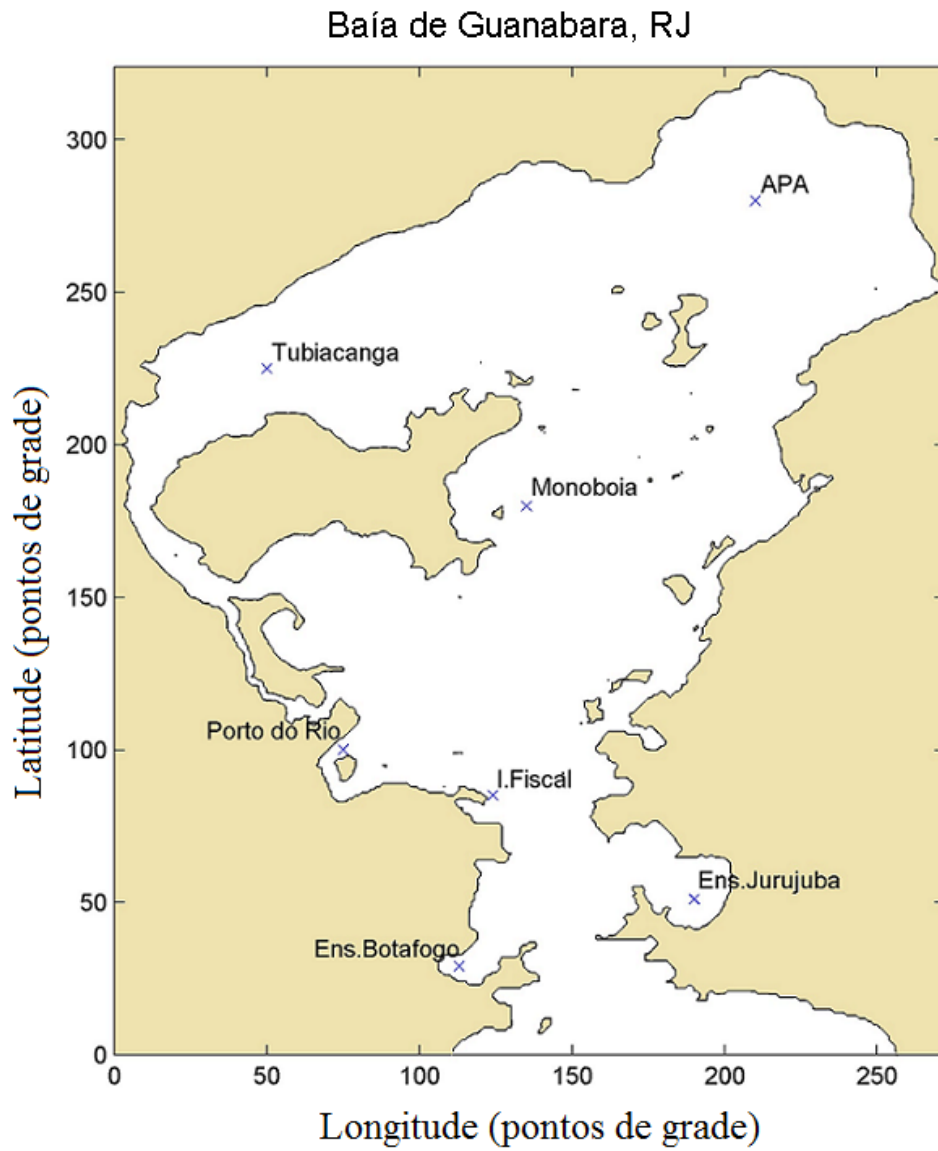


Figura 11- Representação da Baía de Guanabara, em coordenadas de malha, e as respectivas localizações dos pontos estudados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CASO 1 – EVENTOS DE BAIXA FREQUÊNCIA

Inicialmente foram simulados dois cenários: um, onde a Baía de Guanabara é forçada com o sinal, obtido a partir dos registros da estação maregráfica da Ilha Fiscal para o ano de 2010, e outro, com a BG sendo forçada com a maré, a mesma utilizada na etapa de calibração. O modelo calculou velocidades e elevações nos pontos de interesse, para o período de um ano, em intervalos de 5 minutos, utilizando os parâmetros e configurações da calibração, Tabela 4.

Tabela 4 - Principais coeficientes e parâmetros adotados na execução do modelo hidrodinâmico.

Parâmetros do POM	Valor
Número de níveis sigma (kb)	10
Distribuição dos níveis sigma	Log, nas 5 últimas
Passo de tempo interno (dti)	30 s
Passo de tempo externo (dte)	1.5 s
Isplit	20
Rugosidade de fundo (z0b), de acordo com distribuição.	0,03 à 0,01 m

Os resultados apresentados indicam que a contribuição não astronômica responde por variações da ordem de 0,20 m no nível médio do mar (NMM), uma alteração de cerca de 30% nas variações da superfície livre (SL) (Figura 12). Variações maiores, de até 0,5 m, são observadas nos meses de abril e dezembro. Agosto apresenta a maior onda, com 0,80 m de amplitude e um período de aproximadamente 6 dias, descrita em Candella & Candella (2011). O período associado a alguns eventos é outro fator interessante. Junho apresenta uma oscilação de 0,30 m, pouco maior que a média e até 50% menor que os máximos valores calculados apresentando, entretanto, um período aproximado de uma semana (Figura 13).

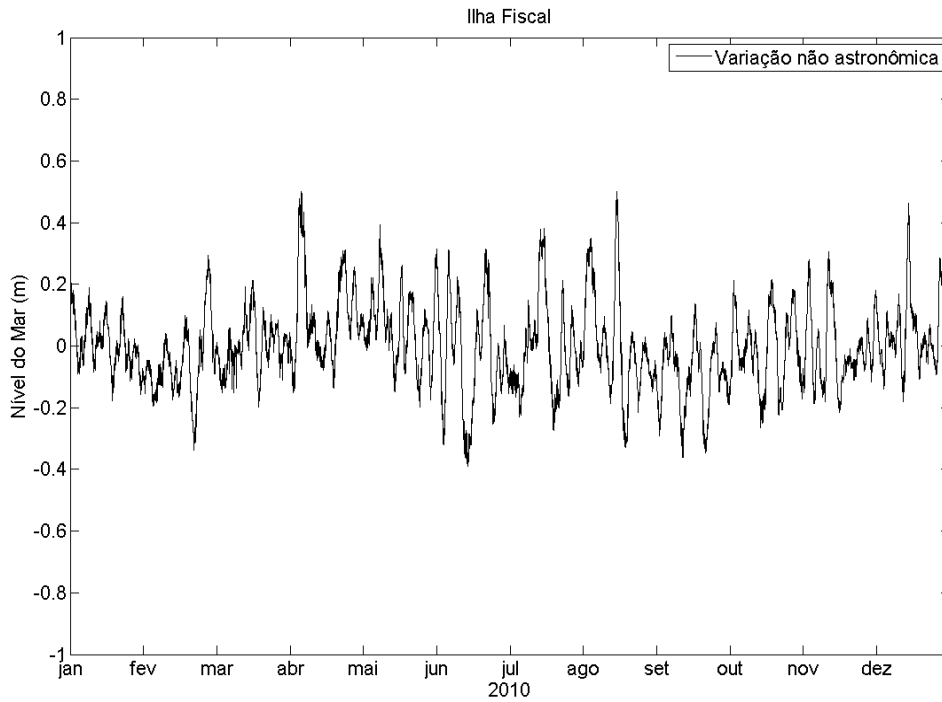


Figura 12– Variações não astronômicas do nível do mar, no Ponto da Ilha Fiscal para 2010. Em preto.

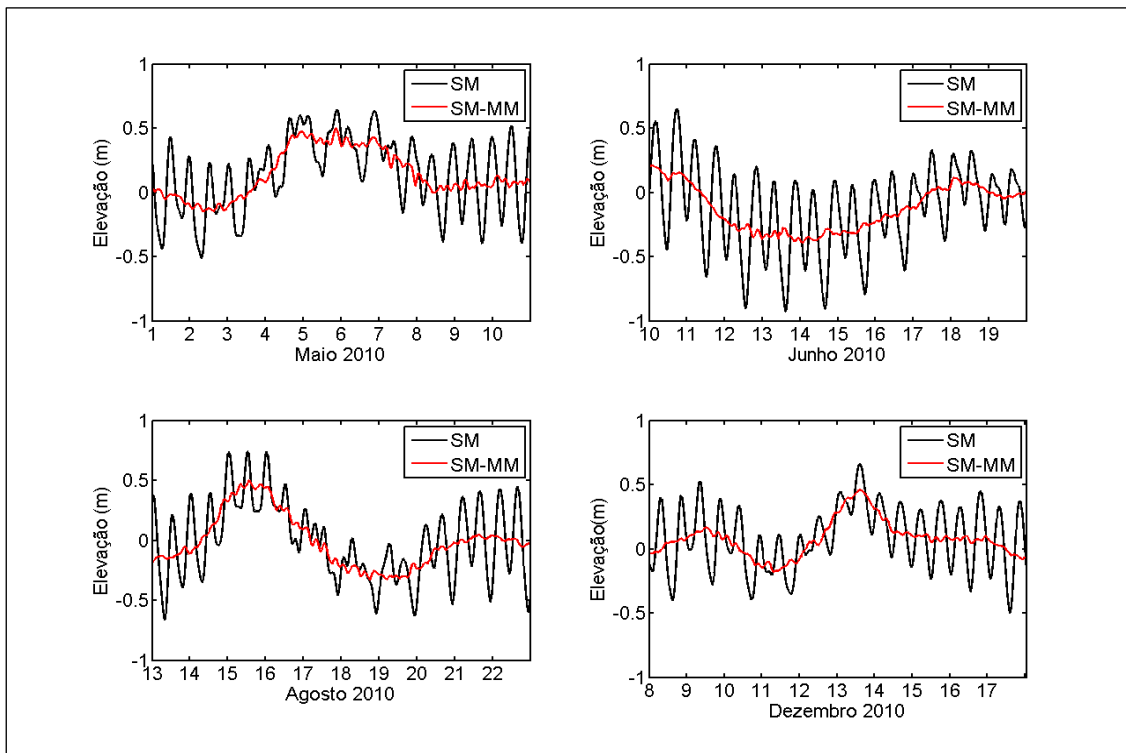


Figura 13– Principais oscilações de baixa frequência, relacionadas às variações no nível do mar (VNM), observadas no ano de 2010.

5.1.1 ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS SIGNIFICATIVAS

Utilizando FFT (Fast Fourier Transform), obteve-se o espectro das frequências significativas, em ciclos por horas (cph), para o intervalo simulado. Foram encontrados picos definidos, em períodos aproximados de 25, 12 e 4 h, e representativos em todo o domínio. Além das frequências da maré astronômica, foram obtidas frequências, maiores que as da maré, correspondentes a períodos de 30, 16 e 13 min, para as Enseadas de Botafogo e Jurujuba e para o Porto do Rio, Figura 14.

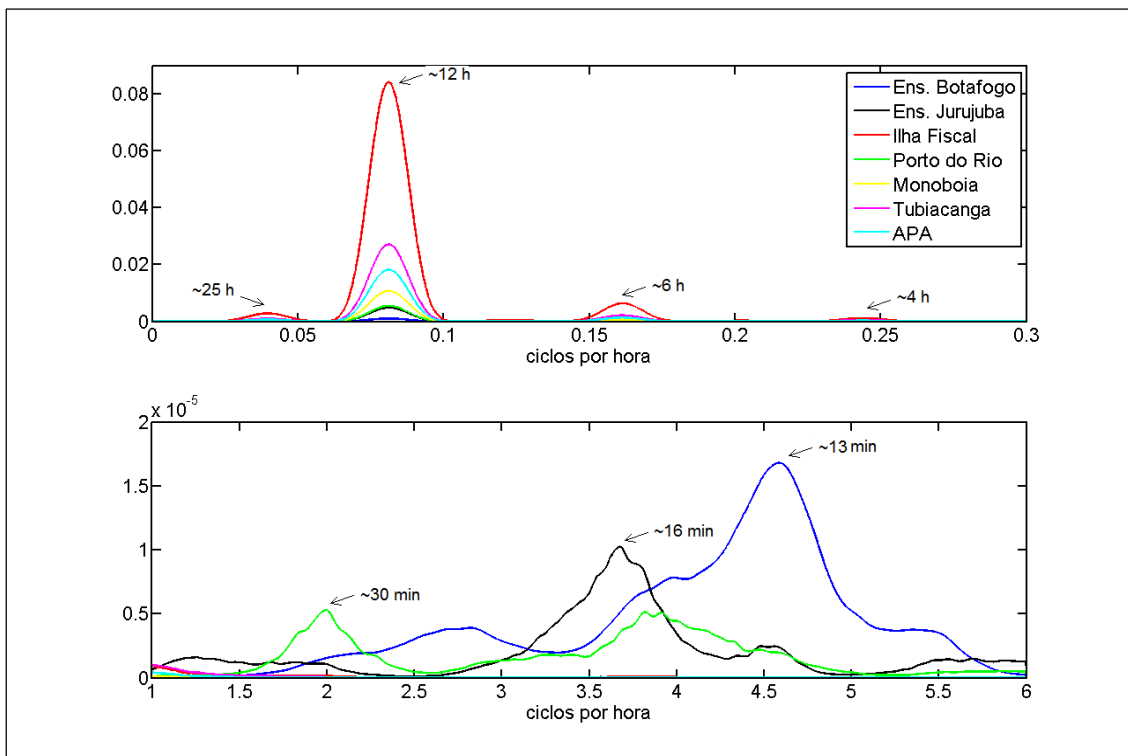


Figura 14 - Espectro das frequências significativas, para os dados de variação das velocidades, com destaque para alguns picos bem definidos.

O período de oscilação natural, de um corpo d'água, é o tempo necessário para uma onda se propagar até o outro lado do sistema, sofrer reflexão e retornar. As frequências encontradas podem ser associadas ao período de oscilação natural das enseadas, que são por sua vez, dependentes da geometria local. Para um corpo d'água semifechado, pode ser estimado, segundo Pugh (1987) e Rabinovich (2009), pela formulação abaixo:

$$T = \frac{4L}{(2n + 1)\sqrt{gH}} \quad \text{5.1.1.1}$$

Onde:

L: comprimento (m);

H: profundidade (m);

n: nodos. n=0, neste caso;

g: aceleração da gravidade (m.s⁻²).

A Enseada de Botafogo apresenta um comprimento (L) aproximado de 1400 m e profundidade média (H) de 5 m, o que resulta em um período de oscilação natural, estimado, de 13 min. Para a Enseada de Jurujuba (L≈1800 m; H≈5 m), estima-se um período de oscilação natural de 17 min. O local onde o Porto do Rio está instalado apresenta elevado gradiente de batimetria, variando de 11 m a 0,5 m na região central. Com L≈1900 m, tem um período de oscilação natural de 15 min.

Os períodos calculados são condizentes com aqueles encontrados a partir da análise de frequências, sendo que ambos são resultados aproximados, estando sujeitos à acurácia da batimetria utilizada e à definição horizontal da malha adotada, assim como, da correta estimativa das dimensões das enseadas.

Segundo Pugh (1987), sistemas que são forçados por oscilações próximas ao seu período natural, ou seus harmônicos, respondem aumentando a amplitude, apresentando um comportamento ressonante. Simplificadamente, o fenômeno da ressonância ocorre quando um sistema recebe um estímulo externo com uma frequência igual à sua frequência natural de vibração, produzindo um aumento na amplitude desta vibração.

5.1.2 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NA SUPERFÍCIE LIVRE

Em 2010 foram registradas diversas oscilações de baixa frequência relacionadas a variações no nível do mar (VNM). Dentre os eventos mais significativos, foram destacados aqueles entre os dias 12 e 18 de junho, e entre os dias 13 e 20 de agosto.

O primeiro destes eventos corresponde a uma oscilação inframaré, associada à formação de um centro de alta pressão atmosférica ao sul do estado do Rio de Janeiro, descrito por Candella & Candella (2011), que teve seus efeitos ampliados devido às elevadas baixa-mares e preamares, características da sizígia. O rebaixamento da superfície livre (SL), em até 0,30 m, gerou baixamares de até -0,90 m, ou seja, 0,20 m abaixo do nível de redução local. As preamares apresentaram valores próximos ao do nível médio do mar (NMM) entre os dias 13 e 16/06 (Figura 15)

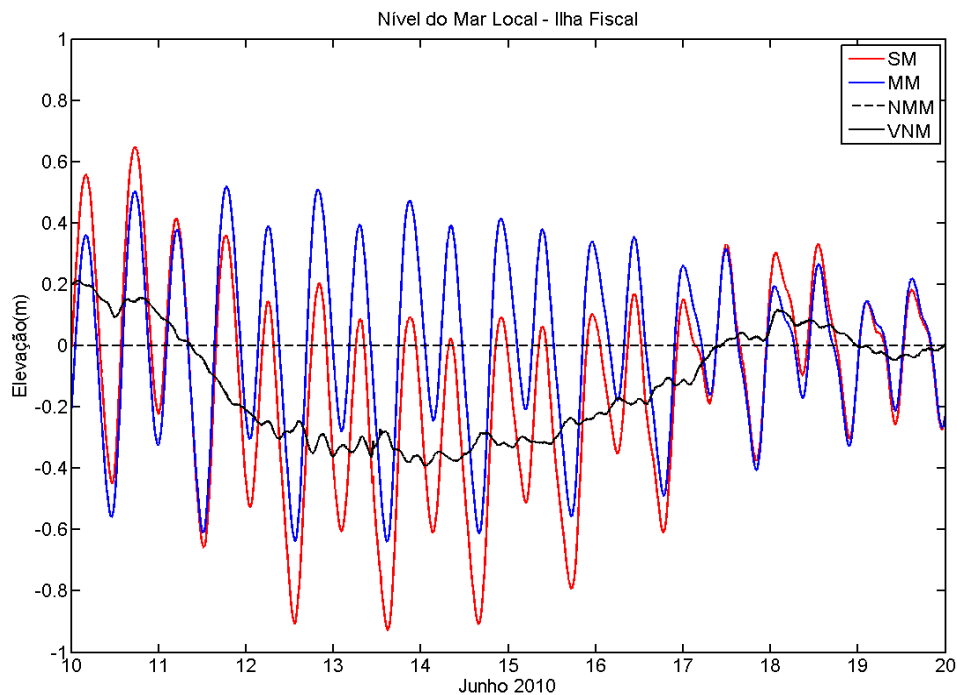


Figura 15 - Comparação das variações no nível do mar (VNM) com o nível médio do mar (NMM), calculados a partir da maré e do sinal modelados, MM e SM, Ponto da Ilha Fiscal, junho de 2010.

O segundo evento estudado ocorreu durante a quadratura. Uma onda com aproximadamente 0,80 m de amplitude máxima e período em torno de 147 h (aproximadamente 6 dias), segundo Candella & Candella (2011), relacionada à passagem de um ciclone extratropical ao sul do estado do Rio de Janeiro. Foram registradas variações absolutas da ordem de 0,70 m na SL, semelhantes a valores normalmente encontrados durante a sizígia, porém, muito maiores se comparados às baixas preamares e baixa-mares características da quadratura (Figura 16).

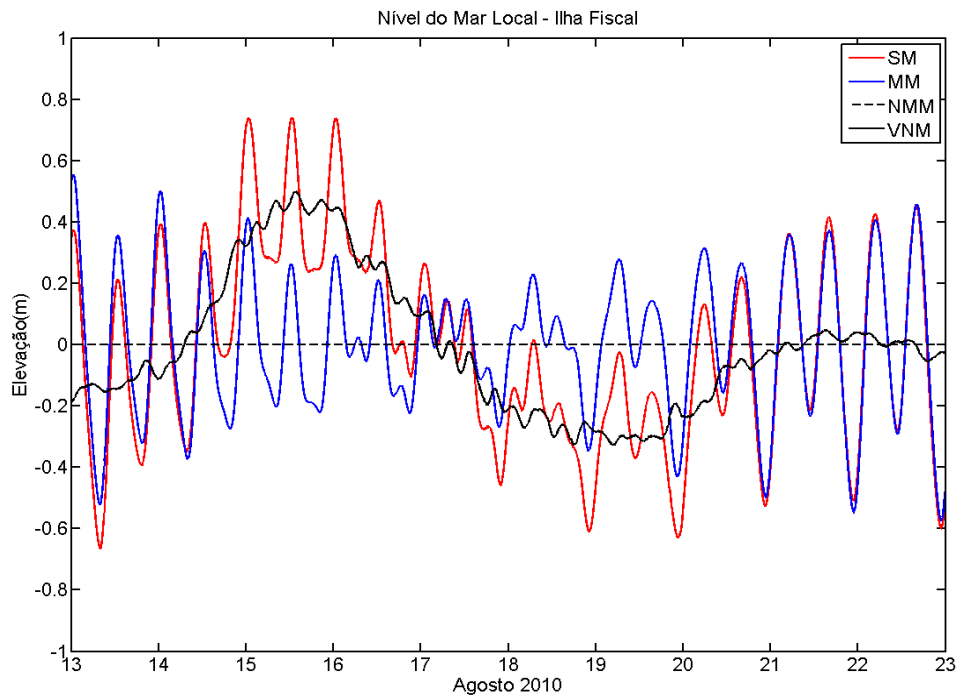


Figura 16 - Comparação das variações no nível do mar (VNM) com o nível médio do mar (NMM), calculados a partir da maré e do sinal modelados, MM e SM, Ponto da Ilha Fiscal, agosto de 2010.

Durante a passagem da crista da onda, de 15 a 17/08, o NMM foi elevado em até 0,50 m, causando baixa-mares e preamares positivas, ou seja, acima do nível médio, exemplificadas nos quatro instantes do campo de elevações, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20. A partir do dia 17/08 e até o dia 19/08, durante o cavado, o NMM foi rebaixado em até 0,30 m provocando baixa-mares e preamares negativas, como apresentado nos quatro instantes das Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

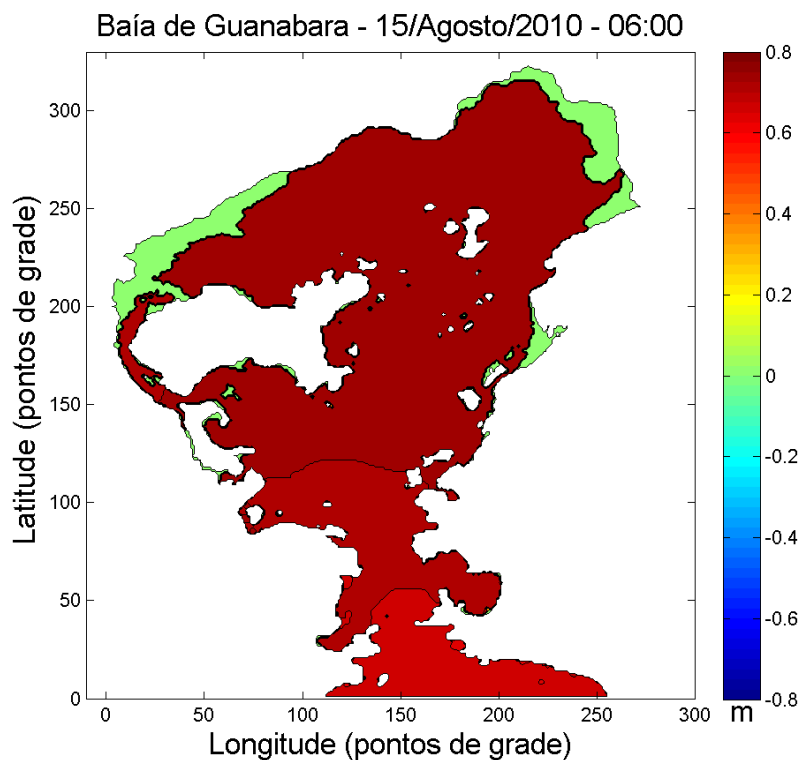


Figura 17 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 15 às 06 h. Preamar com níveis da ordem de 0,70m, ocasionados pela passagem da crista da onda.

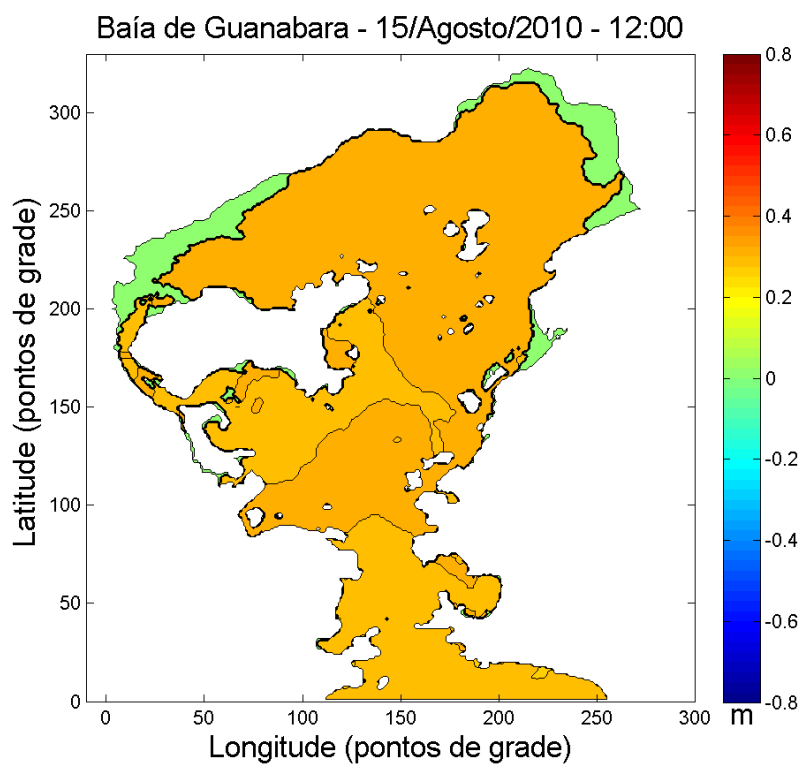


Figura 18 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 15 às 12 h. Baixamar positiva com níveis da ordem de 0,30m, ocasionados pela passagem da crista da onda.

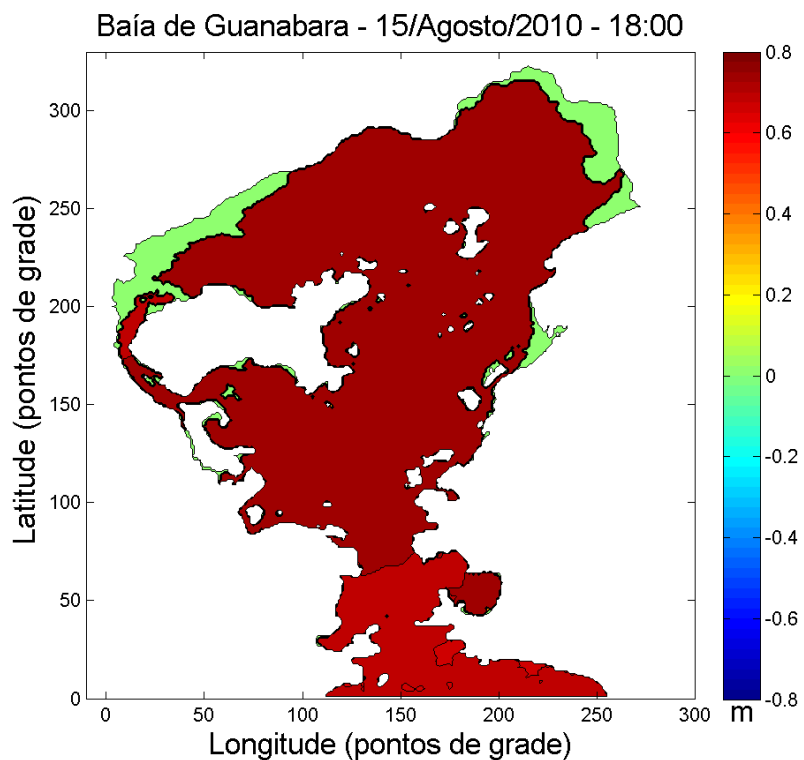


Figura 19 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 15 às 18 h. Preamar com níveis da ordem de 0,70m, ocasionados pela passagem da crista da onda.

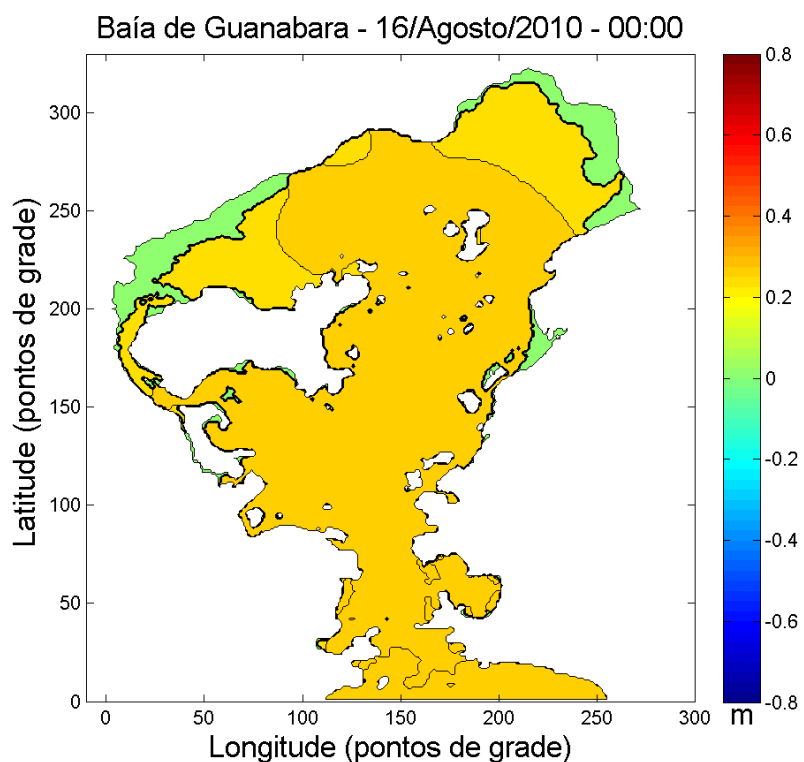


Figura 20 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 16 às 00 h. Baixamar positiva com níveis da ordem de 0,30m, ocasionados pela passagem da crista da onda.

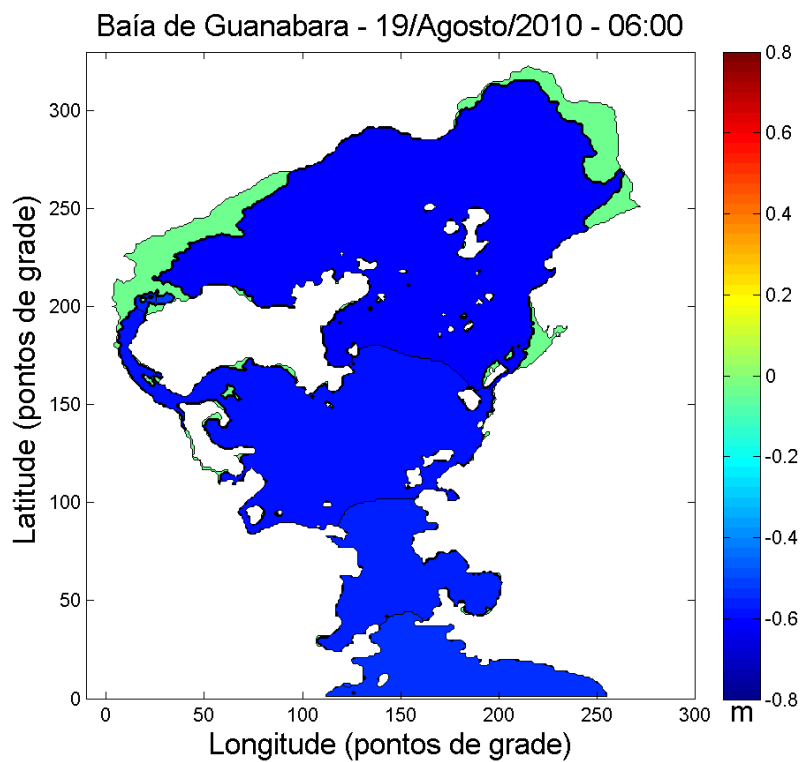


Figura 21 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 19 às 06 h. Baixamar com níveis da ordem de $-0,40\text{m}$, ocasionados pela passagem do cavado da onda.

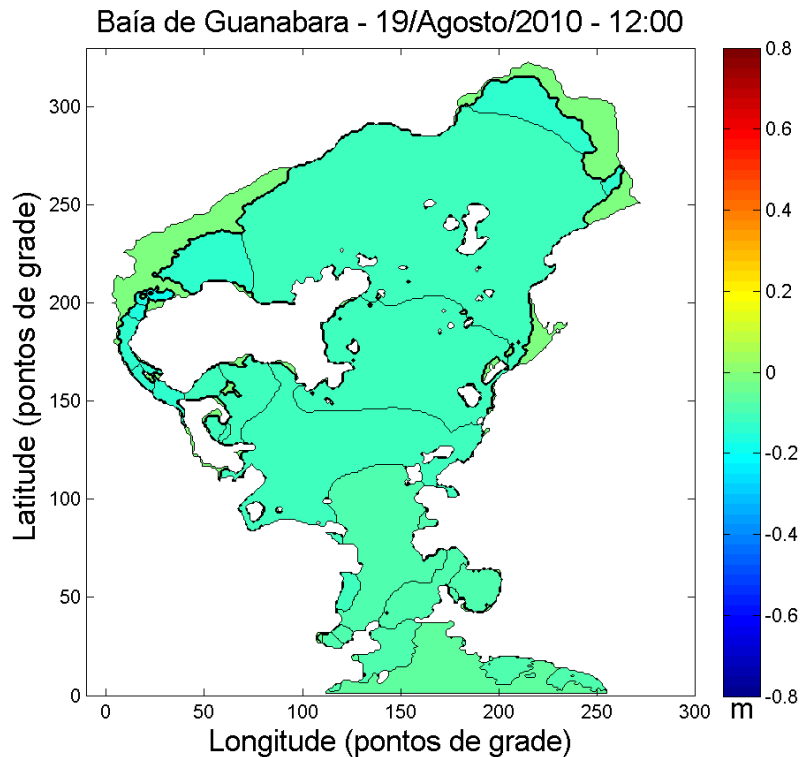


Figura 22 – Instante do campo de elevações para a BG, dia 19 às 12 h. Preamar negativa com níveis da ordem de $-0,10\text{m}$, ocasionados pela passagem do cavado da onda.

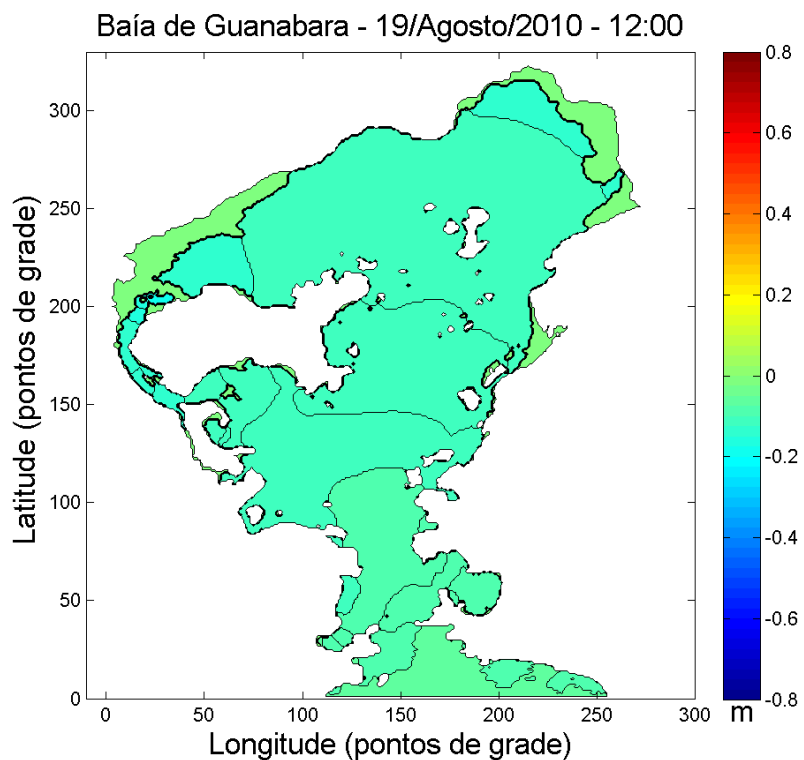


Figura 23– Instante do campo de elevações para a BG, dia 19 às 18 h. Baixamar com níveis da ordem de $-0,30\text{m}$, ocasionados pela passagem do cavado da onda.

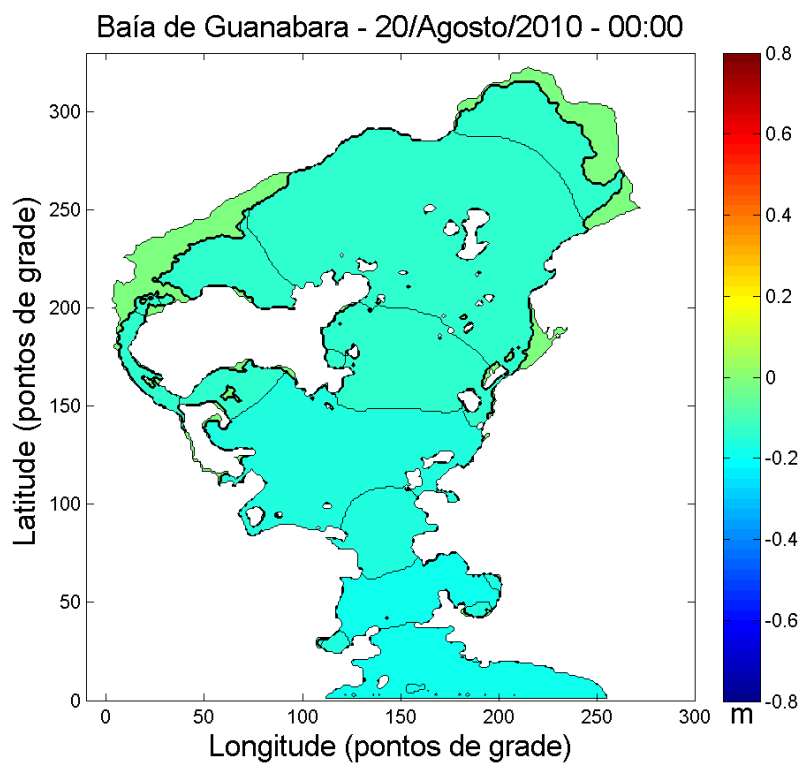


Figura 24 - Instante do campo de elevações para a BG, dia 20 às 00 h. Preamar negativa com níveis da ordem de $-0,20\text{m}$, ocasionados pela passagem do cavado da onda.

Os valores absolutos das VNM calculados para a Ilha Fiscal não apresentam diferenças significativas, se comparados aos demais pontos estudados, entretanto, regiões mais rasas perceberam um aumento proporcionalmente maior, se comparados à coluna d'água associada. Em pontos como Tubiacanga e na APA, com profundidades da ordem de 3 m, uma variação de 0,30 m corresponde a 10% da profundidade local. Já, oscilações da ordem de 1 m semelhantes à de Agosto/2010, nestas mesmas áreas, corresponderia a uma variação de aproximadamente 30% na coluna d'água.

Em regiões mais profundas, oscilações como estas poderiam passar despercebidas, considerando-se apenas a coluna d'água. Entretanto, em regiões portuárias, como é o caso do Porto do Rio, Monoboia, Enseadas de Jurujuba e Botafogo, variações da ordem de 1 m, ou até mesmo de 0,30 m, podem representar possíveis prejuízos às instalações e embarcações que estejam interligadas ao cais ou doca fixa. Mesmo embarcações fundeadas podem ser afetadas, devido à diminuição inesperada do calado.

Foi observada defasagem, de aproximadamente uma hora, entre a passagem de um cavado no ponto mais próximo da fronteira aberta e o mesmo cavado no ponto mais distante. Este valor é condizente com o valor calculado a partir da Teoria Linear de Ondas, aplicada em águas rasas. Variações na SL, associadas às marés e ondas com período inframaré, ocorrem quase simultaneamente nos pontos estudados e este efeito ocorre devido aos comprimentos dessas ondas serem maiores que a própria extensão da BG. Ambos os fenômenos descritos apresentam esta característica, portanto, optou-se por descrever a SL e as VNM com base apenas nos resultados obtidos para o ponto da Ilha fiscal, onde é possível comparar com os valores medidos.

5.1.3 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NAS VELOCIDADES

De forma análoga aos níveis, as variações de velocidade, na maré modelada (MM) e no sinal modelado (SM), foram comparadas. Esta comparação possibilitou estimar as contribuições de ondas de longo período, geradas externamente, para as velocidades locais. Sendo u e v componentes ortogonais, onde u representa a componente da velocidade zonal (E-W) e v representa a componente da velocidade meridional (N-S), faz sentido tratar a corrente como um vetor resultante.

As velocidades calculadas apresentam variações de acordo com as características de cada ponto. Localizados em regiões com maiores profundidades e menos abrigadas, Ilha Fiscal, Monoboia e APA apresentam correntes mais intensas que as calculadas para áreas rasas. Nesses pontos, as componentes meridionais são as grandes responsáveis pelo sentido e intensidade das correntes (Figura 25), sendo moduladas, na direção, pelas componentes zonais.

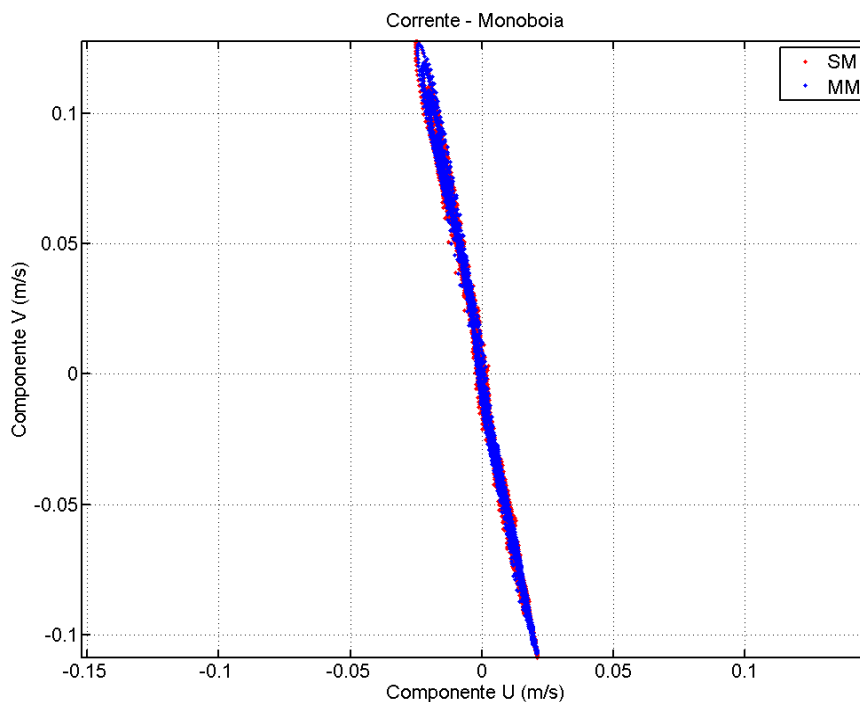


Figura 25 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes, calculadas pelo modelo, para o Ponto Monoboia, agosto de 2010.

Correntes menos intensas, em contrapartida, são observadas em áreas mais rasas e abrigadas, como é o caso dos pontos localizados em Tubiacanga, no Porto do Rio e nas Enseadas de Botafogo e Jurujuba. Nestes pontos, as velocidades zonais respondem, em grande parte, pelo sentido e intensidade das correntes (Figura 26), sendo moduladas, em sua direção, pela componente meridional da velocidade, em média 50% menor.

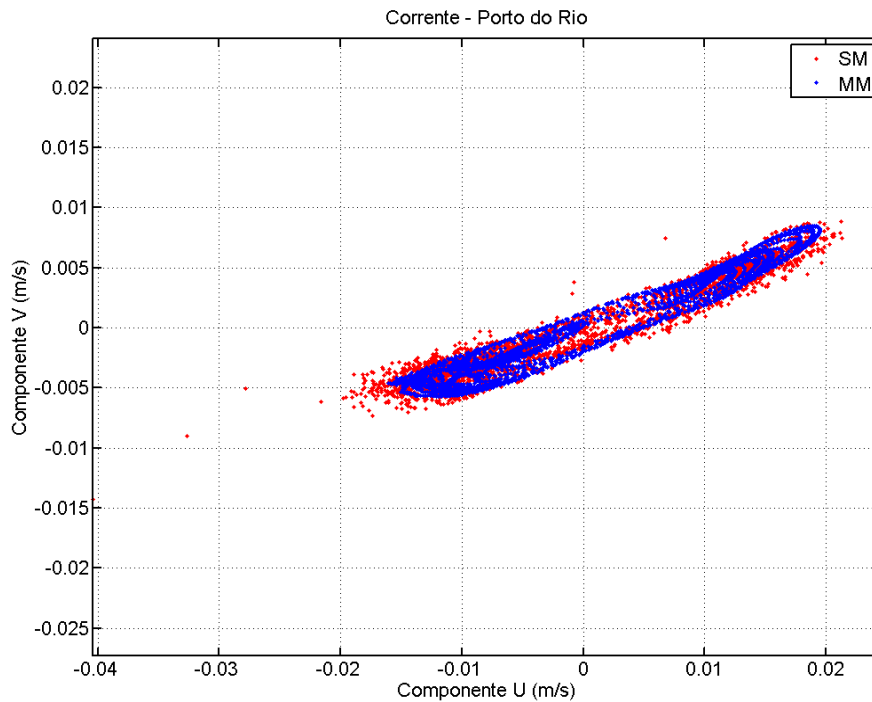


Figura 26 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes, calculadas pelo modelo, para o Porto do Rio, junho de 2010.

Foram observadas diferenças entre a duração dos estofos de maré enchente e vazante. Quanto menores as correntes, mais breves são os estofos. Em Jurujuba, Botafogo e Tubiacanga foram observados estofos com velocidades próximas de zero. No Porto do Rio, na Ilha Fiscal e Monoboia, as correntes só mudam de sentido, em média, 30 min após os estofos. O ponto APA foi o único a apresentar estofos ocorrendo antes da mudança de sentido das correntes, aproximadamente 20 min antes.

As velocidades respondem lentamente às variações de nível provocadas por ondas com longos períodos. O aumento na duração e intensidade das correntes pode ser associado às variações na superfície livre (SL), quando essas têm o mesmo sentido de propagação da onda. Analogamente, há diminuição, quando as correntes apresentam sentido contrário à propagação. Variações de velocidade semelhantes, em módulo,

foram observadas em todos os pontos. Entretanto, assim como acontece com as elevações, pontos cujas velocidades são regularmente menores apresentaram uma variação proporcionalmente maior.

Os aumentos nas velocidades em relação às velocidades observadas na maré modelada (MM), provocados pelos fenômenos estudados, são da ordem de $0,005 \text{ ms}^{-1}$. Tais valores podem ser considerados bem pequenos se comparados, por exemplo, às velocidades obtidas para a Ilha Fiscal (Figura 29) e Monoboia, da ordem de $0,08 \text{ ms}^{-1}$. Entretanto, quando observados os resultados obtidos para Tubiacanga (Figura 27) e Ens. de Botafogo, por exemplo, percebe-se que a contribuição é semelhante às velocidades encontradas.

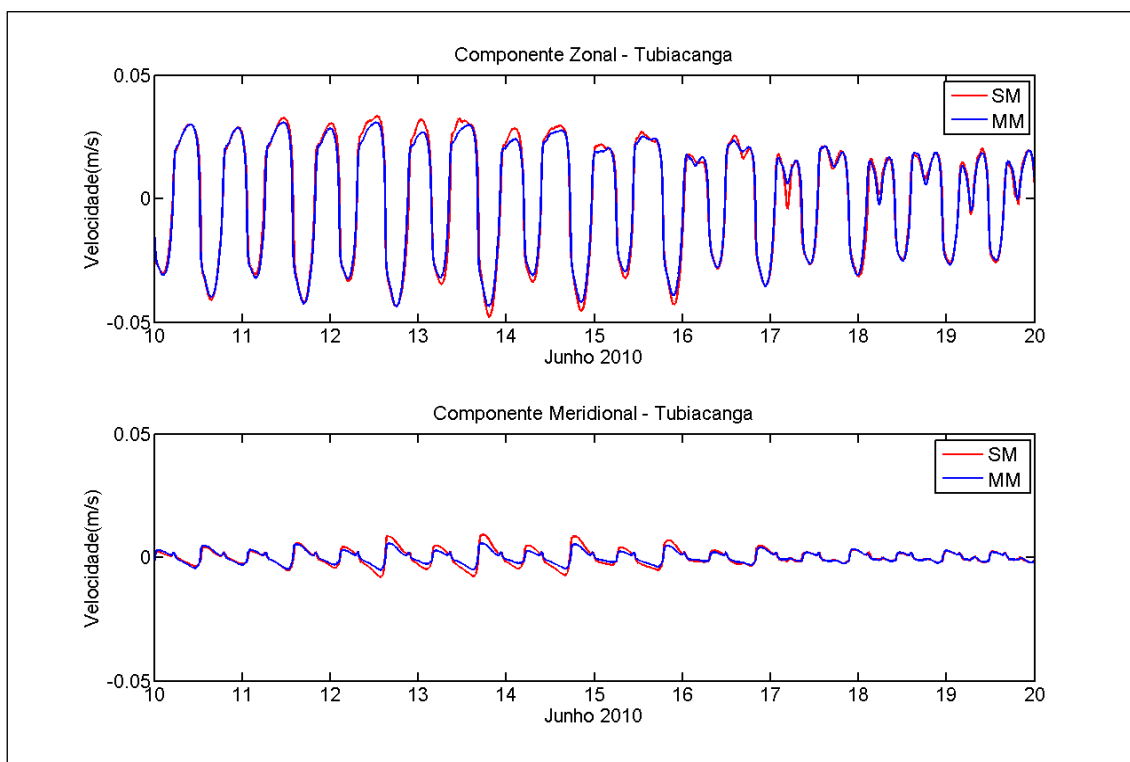


Figura 27 – Componentes ortogonais de velocidade, calculados pelo modelo, para Tubiacanga, junho de 2010.

Os pontos do Porto do Rio e Enseadas de Jurujuba e Botafogo apresentaram ressonância. Estas ressonâncias foram mais perceptíveis nos valores de velocidade que nas elevações, entretanto, presente em ambas. Nestes pontos e na Ilha Fiscal, no dia 13/06, o modelo calculou algumas variações na superfície livre (SL) que não são encontrados nos valores medidos.

Os períodos de 15 min, associados à ressonância, não são bem resolvidos pelo modelo, pois, o intervalo de amostragem de 5 min é demasiadamente curto para discretizar satisfatoriamente o fenômeno. Provavelmente este pode ter sido um dos motivos para a SL apresentar uma variação ruidosa nesses pontos (Figura 28). Em outros pontos, onde não foi identificada ressonância, percebe-se que as variações da SL e das velocidades não apresentam esse comportamento ruidoso.

De maneira geral, o comportamento das variações na SL e nas velocidades descritas para junho é semelhante ao de agosto. As principais diferenças entre os dois eventos são a intensidade das velocidades e a amplitude proporcional das variações no nível do mar (VNM). Como dito anteriormente, o segundo evento ocorreu num período de quadratura e, deste modo, as velocidades obtidas para MM foram menores em agosto, assim como as variações na SL.

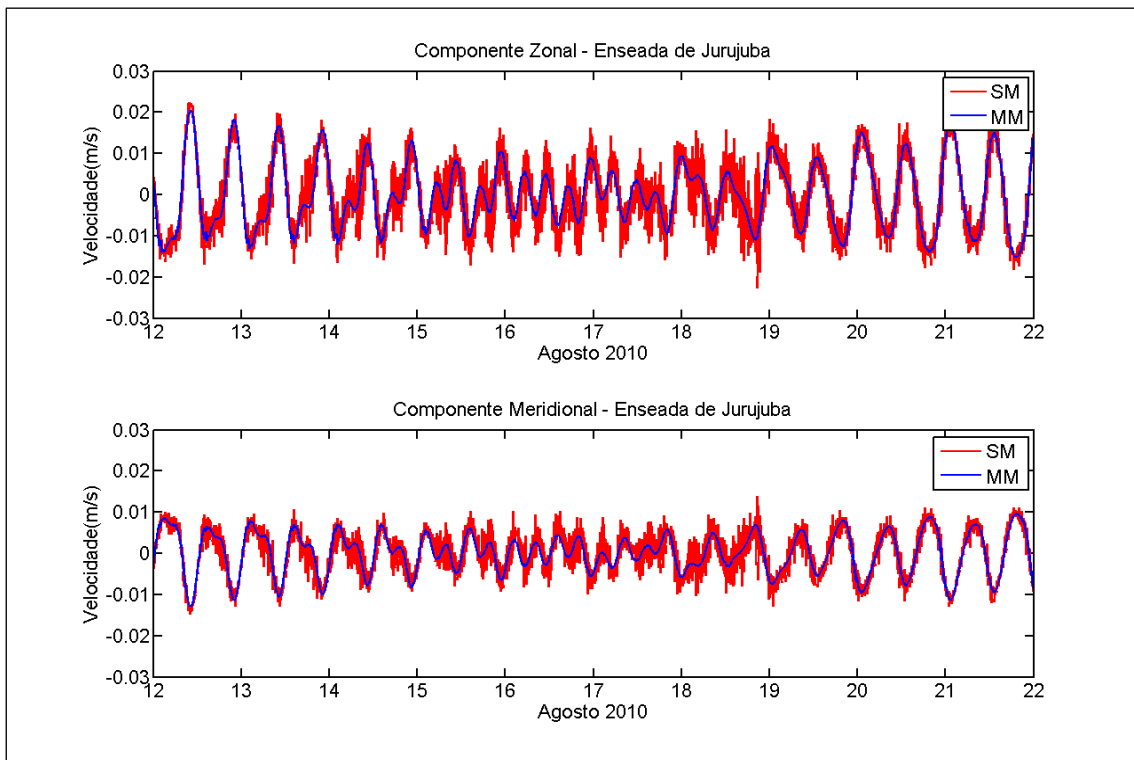


Figura 28– Componentes ortogonais de velocidade, calculadas para o ponto da Enseada de Jurujuba, agosto de 2010.

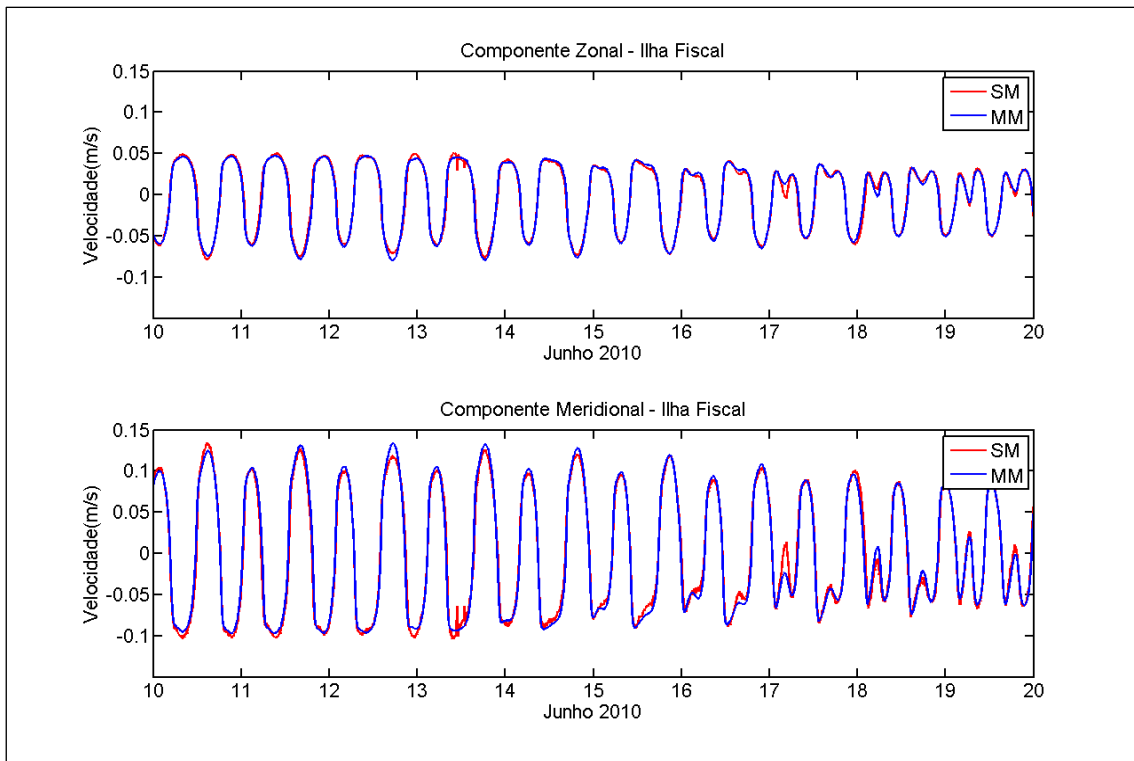


Figura 29– Componentes ortogonais de velocidade, calculadas para o ponto da Ilha Fiscal, junho de 2010.

5.2 CASO 2 – EVENTO DE ALTA FREQUÊNCIA, TSUNAMI

Dados maregráficos da estação da Ilha Fiscal registraram a atuação do Tsunami de Sumatra, 2004, no interior da Baía da Guanabara (Figura 30). As variações na superfície livre (SL) foram, em média, da ordem de 0,30 m, com períodos médios de 42 minutos. As variações começaram a partir das 21 horas do dia 26 estendendo-se pela manhã do dia 27/12, quando começaram a diminuir de intensidade. Os registros foram obtidos junto a DHN e apresentam valores com intervalo de 10 minutos.

Para avaliar a resposta da BG a este evento, foram simulados dois cenários: um, onde a BG é forçada com o sinal, obtido junto ao CHM, para o mês de dezembro de 2004, e outro, com a maré (sendo ambos forçantes interpolados para 5 min). O período das oscilações modeladas é ligeiramente maior do que os observados e as amplitudes significativamente menores (Figura 31), provavelmente devido à baixa resolução espacial do modelo e temporal dos forçantes empregados. Foram realizadas tentativas de corrigir o sinal do tsunami, compensando a amplitude perdida pela distância entre a fronteira aberta e o ponto de medição. A adição das diferenças obtidas pouco contribuiu para a melhoria do sinal modelado (SM), atenuando ainda mais os efeitos do tsunami (Figura 32).

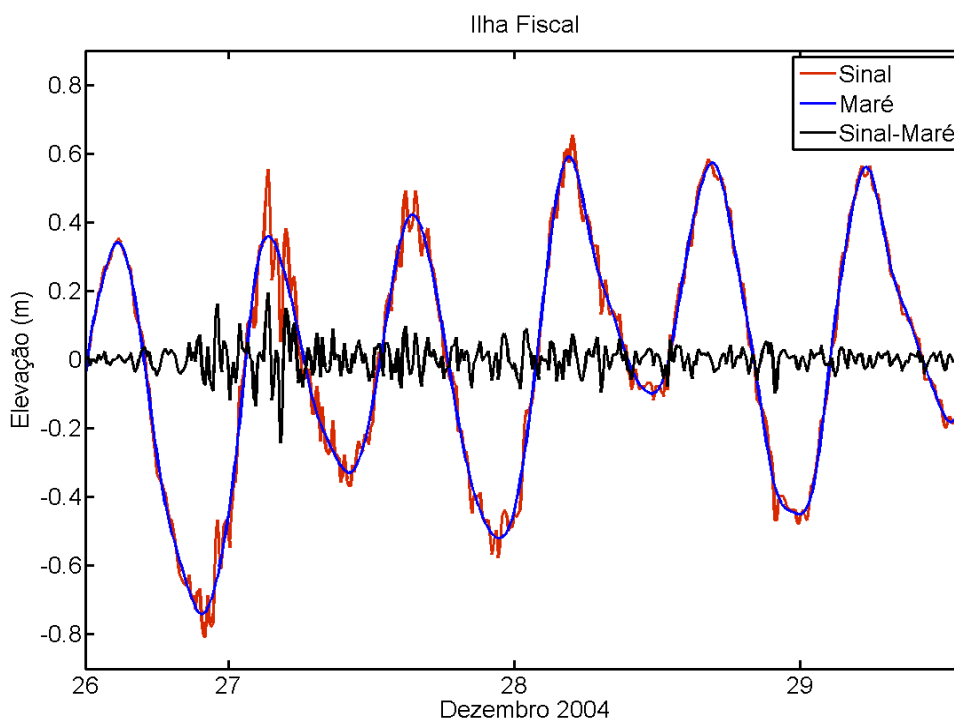


Figura 30 – Sinal, Maré e tsunami, obtido da subtração do sinal pela maré. Dias 26, 27, 28 e 29/12/2004

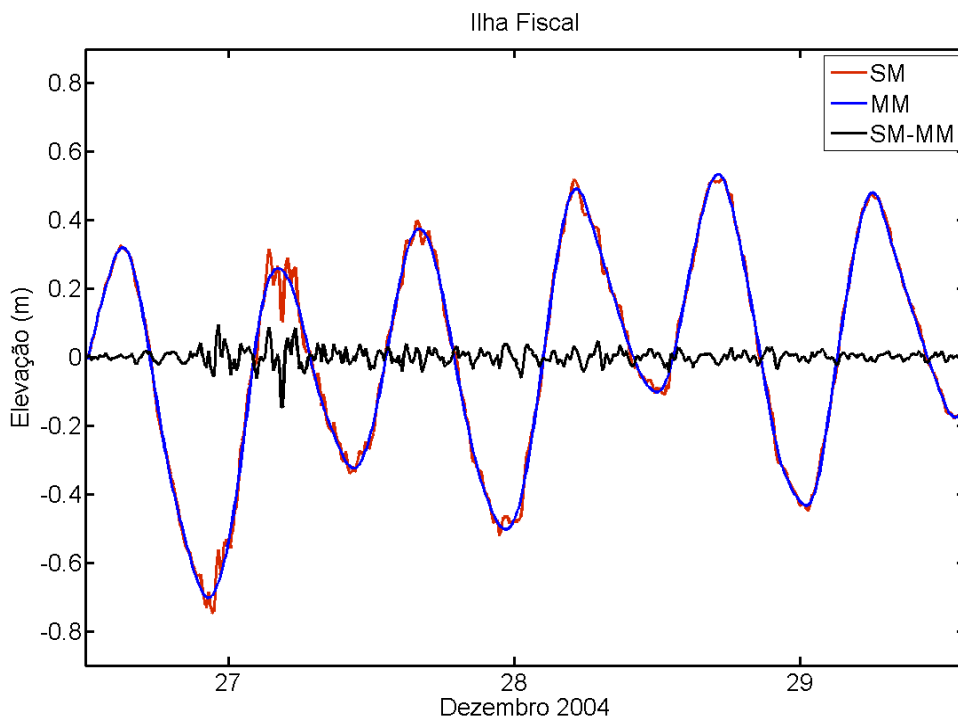


Figura 31 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM.

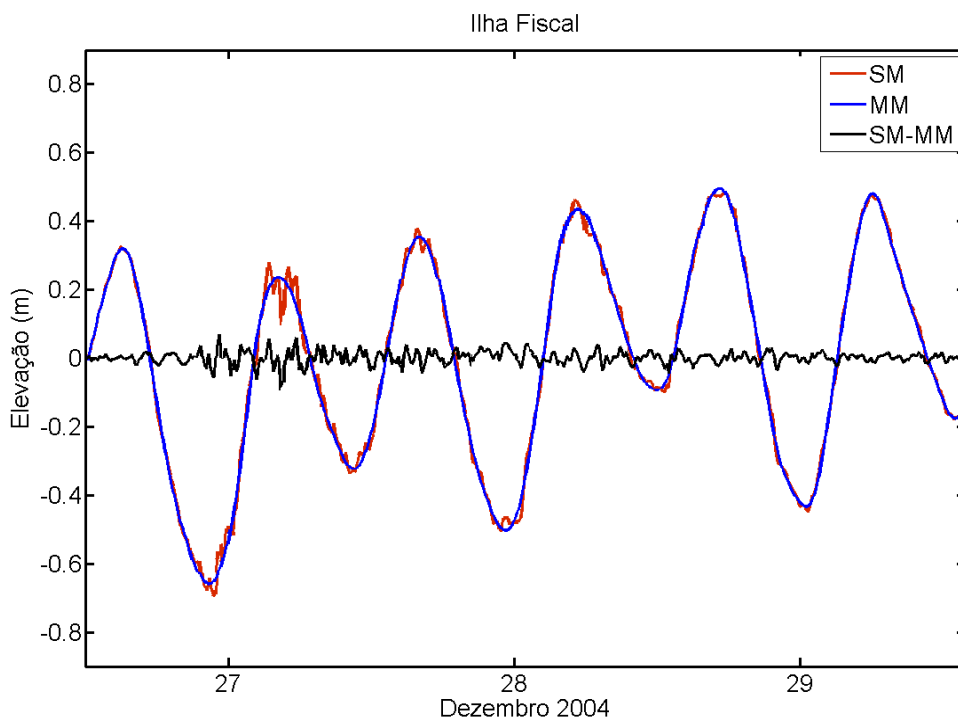


Figura 32 - Valores calculados para o sinal modelado (SM), a Maré Modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, após correção do sinal.

5.2.1 ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS SIGNIFICATIVAS

Foram observadas alterações na superfície livre (SL) associadas às oscilações de alta frequência do tsunami. Utilizando FFT, obteve-se o espectro das frequências significativas para os dados de variação da SL, em ciclos por horas (cph), para o intervalo simulado. Foram encontrados picos definidos, em períodos aproximados de 25 h e 12 h, representativos em todo o domínio. Além das frequências da maré astronômica, observa-se que os períodos bastante consistentes, em torno do valor de 40 minutos, para os pontos das Enseadas de Botafogo e Jurujuba e para o Porto do Rio, além de outro, em torno de 13 min, para Enseada de Botafogo (Figura 33).

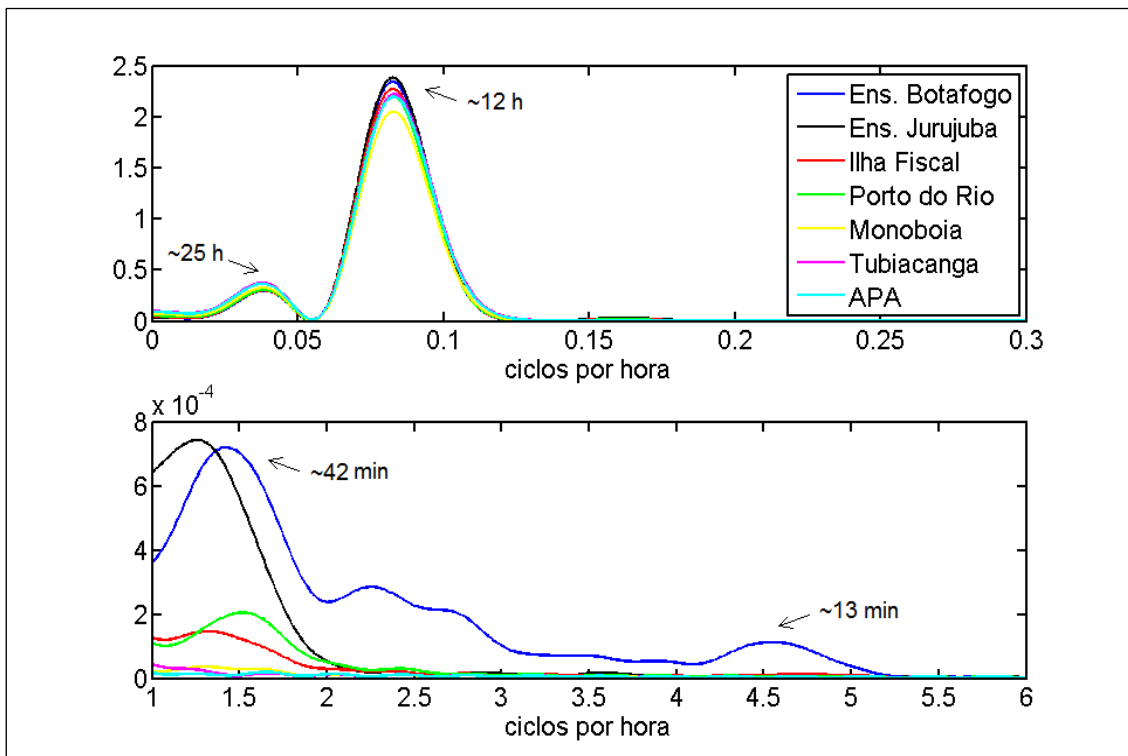


Figura 33 – Espectro das frequências significativas, para os dados de variação da superfície livre (SL), com destaque para alguns picos bem definidos.

O espectro das frequências, para a variação das velocidades, apresentou características semelhantes, sendo possível notar uma maior representatividade do período de 13 min na Enseada de Botafogo e de 40 min no Porto do Rio (Figura 34).

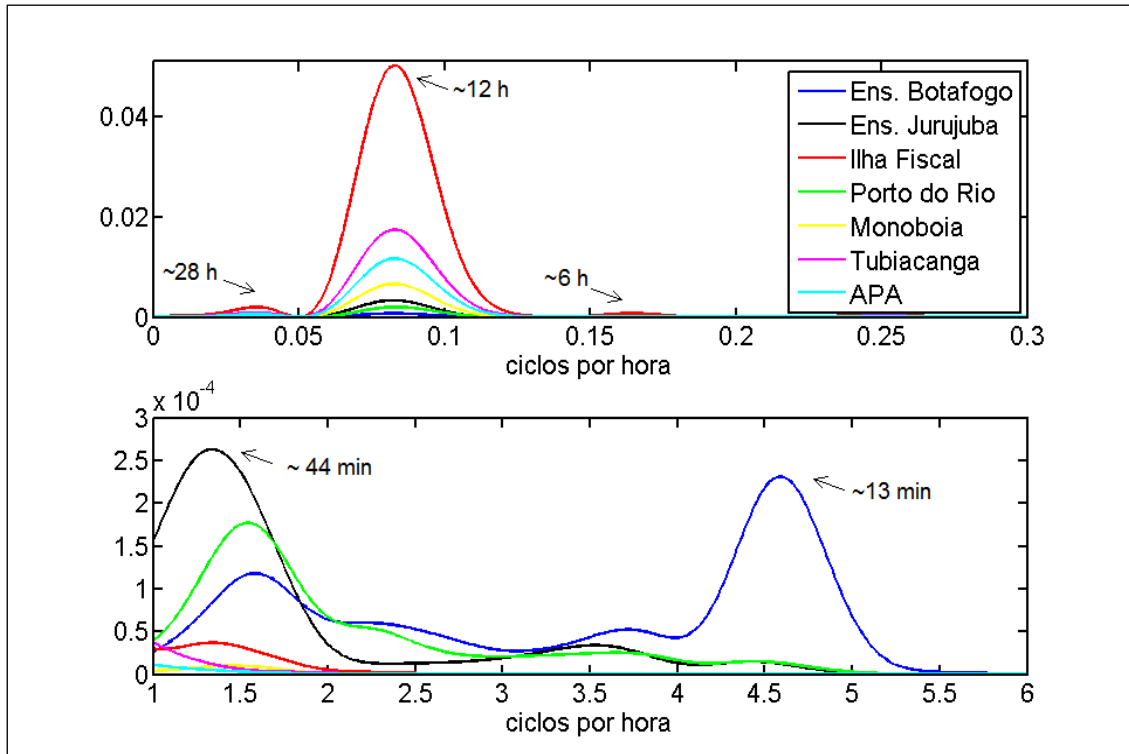


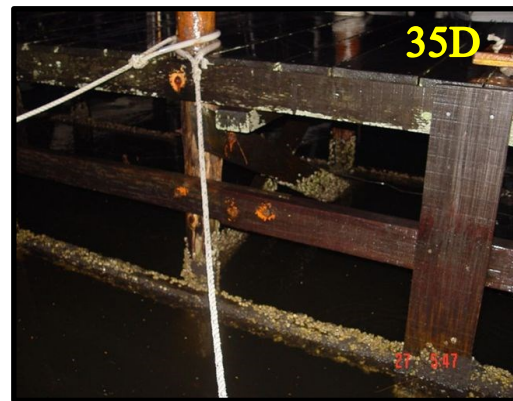
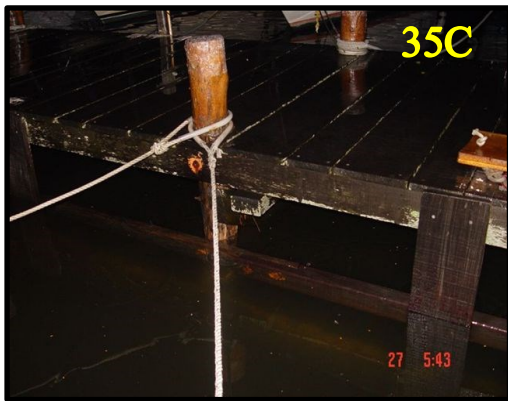
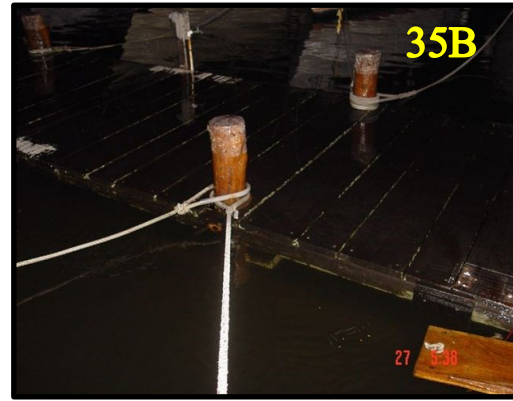
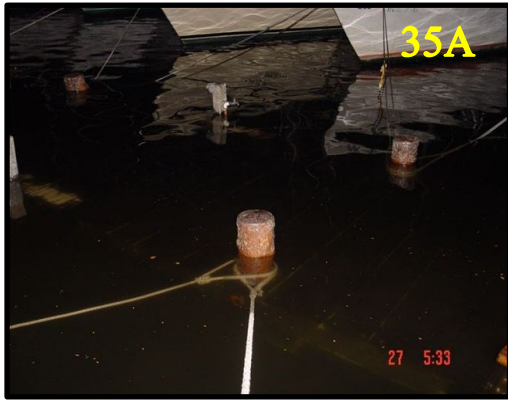
Figura 34 – Espectro das frequências significativas, para os dados de variação das velocidades, com destaque para alguns picos bem definidos.

5.2.2 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NA SUPERFÍCIE LIVRE

Durante esse evento, foi registrada uma inundação no bairro Charitas em Niterói, localizado às margens da Enseada de Jurujuba. Ritter (2007) apresenta o ocorrido: “Um episódio recente ficou na memória dos moradores. Quando do Tsunami, em 2004, na Ásia, os efeitos foram sentidos na região da praia, tendo a água invadindo a maioria das casas... Alguns moradores assustados com o fenômeno da maré que subia e descia em intervalos irregulares construíram pequenas barreiras de cimento nas suas portas”.

Uma grande variação de nível foi registrada a partir de fotografias (Figuras 35A-E) que retratam uma oscilação no nível do mar na Enseada de Jurujuba (Bartz, 2004), quase simultaneamente ao momento em que o marégrafo da Ilha Fiscal registrava a maior variação de nível. A observação das fotografias possibilita estimar uma variação de aproximadamente 1 m e, apesar da dificuldade de mensurar precisamente o valor, é possível constatar que foi consideravelmente maior que os 0,30 m registrados na Ilha Fiscal. A diferença entre os horários impressos na Figura 35A (05h33min, dia 27/12/2004) e na Figura 35E (05h49min, dia 27/12/2004) permite calcular uma onda com período aproximado de 30 min.

Esses registros não são suficientes para comprovar a ocorrência de ressonância e conseqüente amplificação das ondas na Enseada de Jurujuba, entretanto são coerentes com os resultados obtidos.



Figuras 35 (A-E) – Registros fotográficos de variação extrema do nível do mar ocorrida na Enseada de Jurujuba. Fotografias cedidas por Cesar Bartz.

Os pontos localizados na metade sul da BG apresentaram as maiores variações de nível e para o ponto da Enseada de Botafogo foram calculados os maiores valores, ondas com alturas da ordem de 0,30 m (Figura 36). Os resultados obtidos para as Enseadas de Botafogo e Jurujuba podem ser relacionados às grandes variações de nível, noticiadas em Charitas e em Botafogo, e associados às amplificações decorrentes da ressonância ocorrida. Os pontos da Ilha Fical e Porto do Rio apresentaram valores semelhantes para as amplitudes, menores que 0,20 m (Figura 37).

Foi observado que os efeitos do tsunami diminuem com a propagação das ondas em direção ao interior da baía, sendo praticamente inexistentes nos pontos de Tubiacanga e APA, como pode ser observado na Figura 38. Nesses pontos, assim como na Monoboia, não foram observadas variações significativas, associadas à ressonância, na SL ou velocidades. Em Tubiacanga, por exemplo, as elevações foram de aproximadamente 0,03 m e na APA os maiores valores não alcançaram 0,05 m.

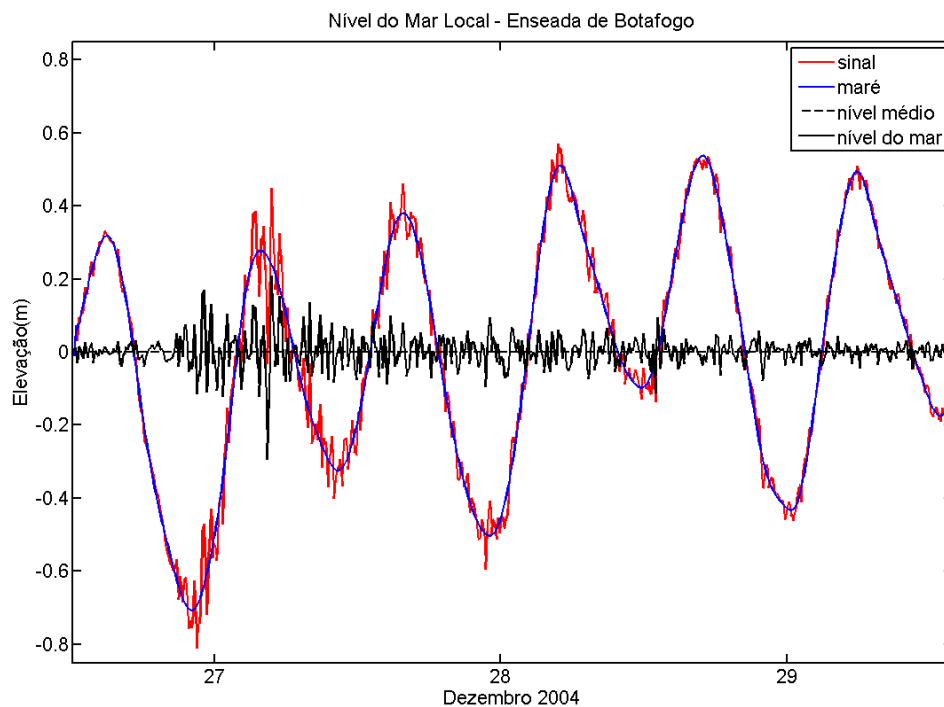


Figura 36 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, para o ponto da Enseada de Botafogo.

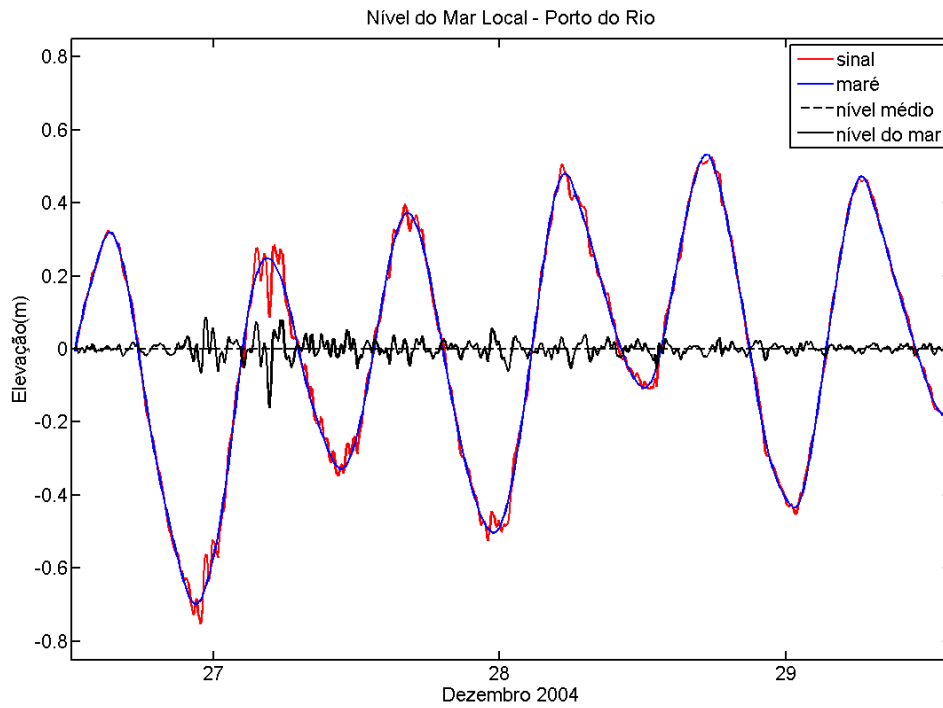


Figura 37 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, para o ponto do Porto do Rio.

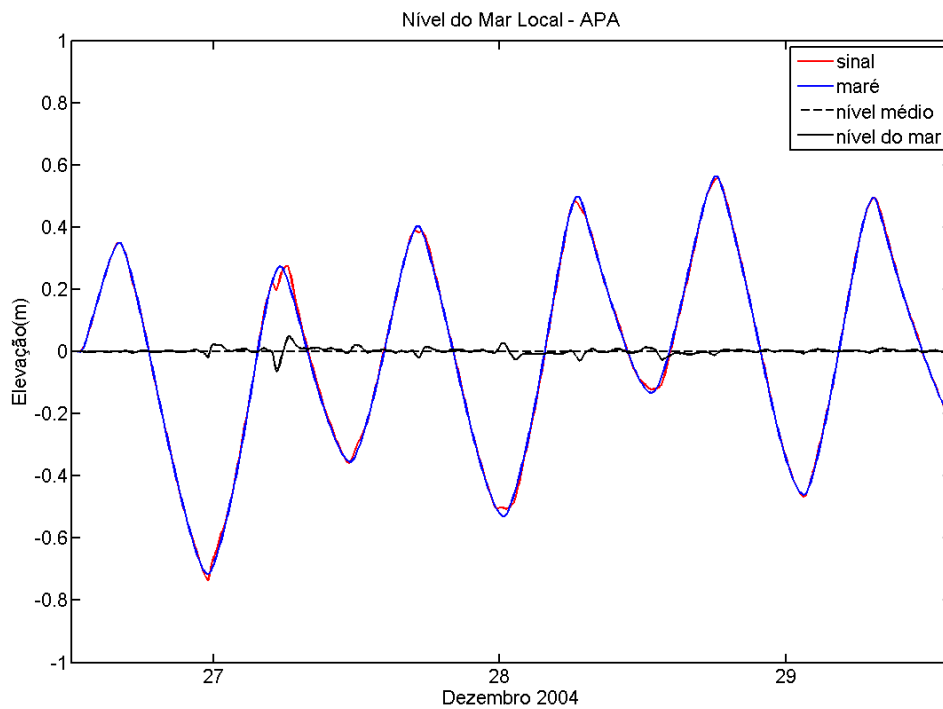


Figura 38 – Apresentação do sinal modelado (SM), a maré modelada (MM) e o tsunami, obtido da subtração do SM pela MM, para o ponto da APA.

5.2.3 ESTUDO DAS VARIAÇÕES NAS VELOCIDADES

De forma análoga aos níveis, foram comparadas as variações de velocidade, para maré modelada (MM) e o sinal modelado (SM), sendo possível estimar as contribuições das ondas de alta frequências, associadas ao tsunami, para as velocidades locais. Foram observadas variações nas componentes ortogonais da velocidade, em resposta às oscilações na superfície livre (SL), pontos que percebem pouca variação nas velocidades correspondem àqueles com as menores variações na SL.

As componentes, zonal e meridional, de velocidade para a APA (Figura 39) apresentam variações intensas somente nos instantes relacionados à passagem das ondas. Não foram verificados efeitos de amplificação, associados a possíveis ressonâncias. Comportamentos semelhantes foram observados em Tubiacanga e Monoboia.

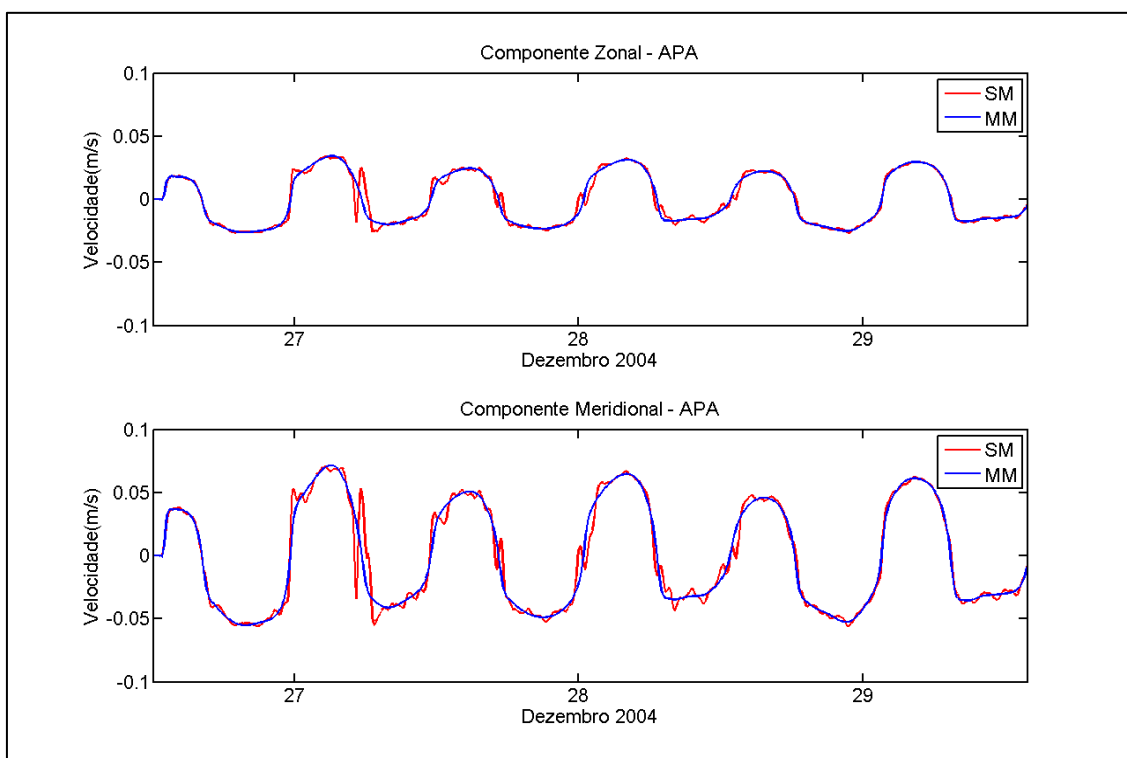


Figura 39 – Componentes ortogonais de velocidade, calculados pelo modelo, para a APA, dezembro de 2004.

A discretização das ondas do tsunami não é satisfatória a partir dos registros com intervalos de 10 min. O período típico do sinal do tsunami é aproximadamente 40 min (CANDELLA *et al.*, 2008), o valor obtido pela análise de frequências foi um pouco maior, aproximadamente 45 min, e bem definido em Tubiacanga, Enseada de Jurujuba,

Enseada de Botafogo e Porto do Rio. Um período aproximado de 13min ainda foi observado na Enseada de Botafogo, por isso talvez, as velocidades apresentem-se extremamente ruidosas nesse ponto.

Os pontos que apresentaram ressonância nas velocidades são os mesmos onde foram observados os eventos mais significativos de amplificação das ondas. A Figura 40 apresenta as componentes zonais e merionais, calculadas, para a Enseada de Jurujuba, onde são observadas velocidades intensas para o sinal modelado (SM), quando comparadas com as obtidas para a maré modelada (MM).

Nos pontos localizados na região sul da BG, Enseadas de Jurujuba e Botafogo, Ilha Fiscal e Porto do Rio, foram observadas variações nas velocidades, com períodos próximos àqueles calculados e caracterizados como períodos de oscilação natural para as regiões. Estes pontos são os mesmos que apresentaram ressonância para os eventos com frequências inframarés. São regiões portuárias, com a presença de clubes náuticos e diversas marinas, ou seja, as regiões que apresentaram maior propensão às ressonâncias, provocadas por ondas de alta e baixa frequência, são as mesmas com maior trânsito de embarcações.

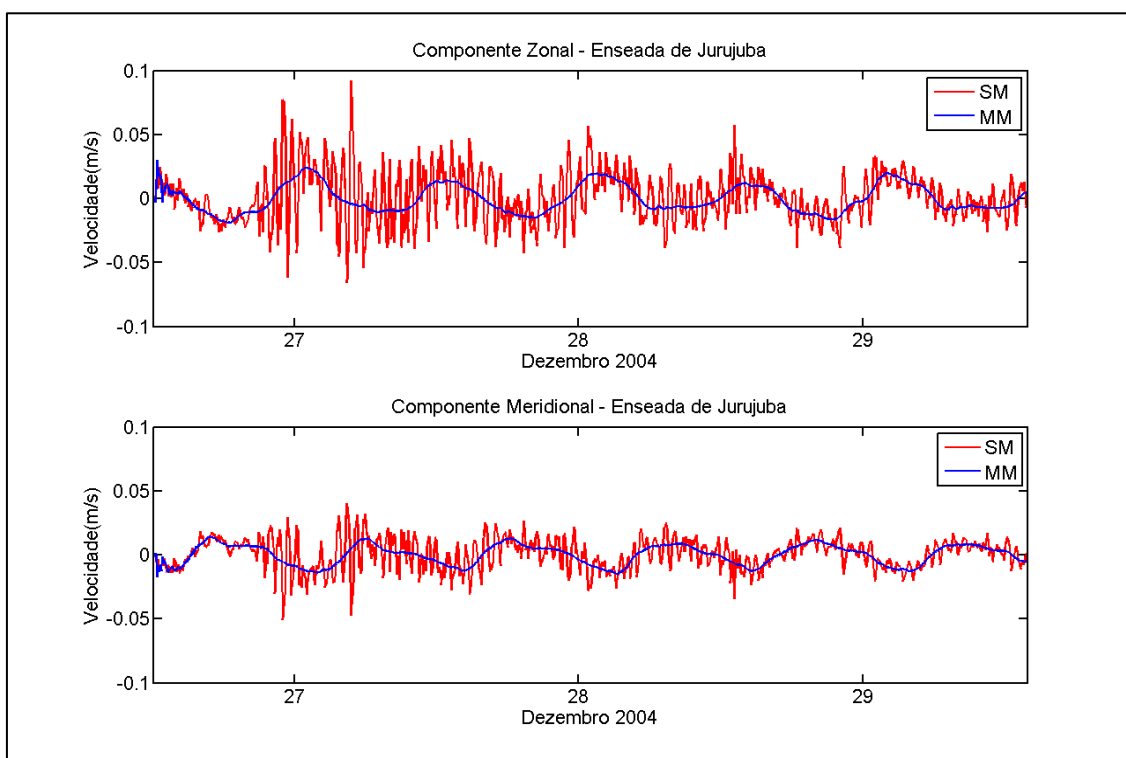


Figura 40 – Componentes ortogonais de velocidade, calculados para a Enseada de Jurujuba, dezembro de 2004.

5.2.4 DECAIMENTO DE ENERGIA

A energia do tsunami, calculado para a Enseada de Jurujuba, apresentou decaimento exponencial, no tempo, na forma: (MUNK, 1963, *apud* RABINOVICH *et al.*, 2011)

$$E(t) = E_0(t) \cdot e^{-\frac{t}{t_0}} \quad 5.2.4.1$$

Onde:

E_0 : Índice de energia do tsunami; Ponto a partir do qual inicia o decaimento exponencial;

t_0 : Tempo de decaimento de energia (atenuação).

Observam-se, também, pulsos de energia resultantes da reflexão do tsunami nos continentes, com período aproximado de 12 h (CANDELLA *et al.*, 2008). O comportamento observado é semelhante ao descrito por Rabinovich *et al.* (2011), no estudo realizado sobre o decaimento global da energia do tsunami de Sumatra (2004), nos oceanos, inclusive para o registro da Ilha Fiscal.

Para investigar a evolução da energia associada, ao longo do tempo, foram estimados valores para as variâncias, relativas às elevações da superfície, para segmentos de 6h, com sobreposição de 3 horas. Os valores obtidos, para as variâncias, foram utilizados no cálculo dos parâmetros de decaimento de energia e apresentados nas Figura 41e Figura 42. Os valores calculados para os parâmetros de decaimento, $E_0= 31 \text{ cm}^2$ e $t_0= 16,3 \text{ h}$, são coerentes com os valores encontrados por Rabinovich *et al.* (2011) para a Ilha Fiscal.

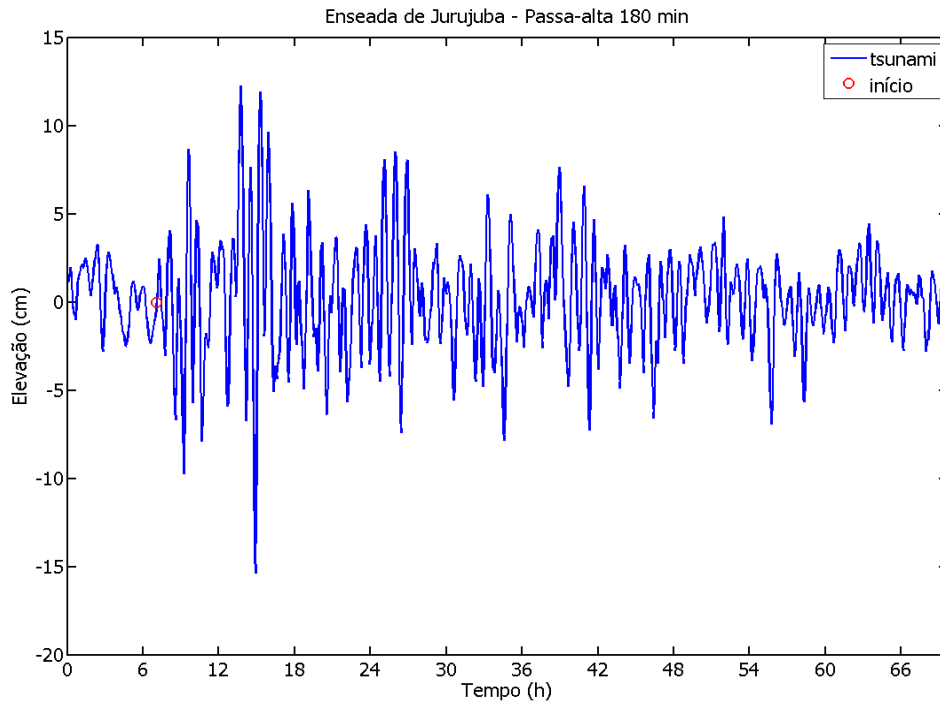


Figura 41 - Sinal do tsunami, para o ponto da Ens. de Jurujuba, a partir de um filtro passa-baixa. O círculo (próximo de 6h) indica o início dos efeitos associados ao tsunami.

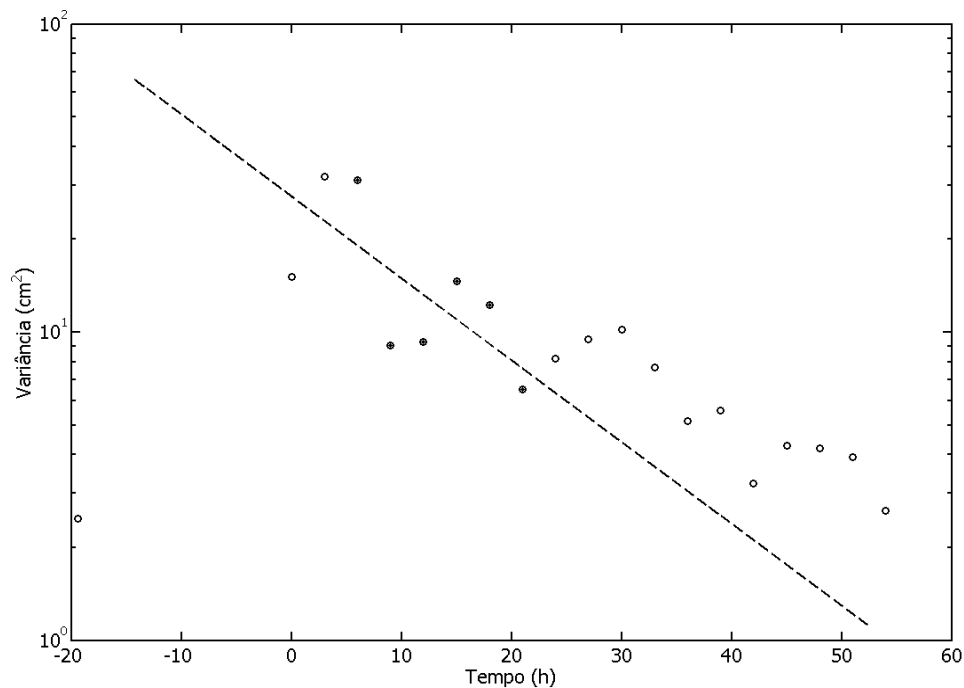


Figura 42 – Variâncias calculadas para intervalos de 6 h, com sobreposição de 3 horas. A linha pontilhada indica a tendência de decaimento de energia, a partir de um ajuste de mínimos quadrados dos pontos selecionados.

6 CONCLUSÕES

A análise dos resultados possibilitou comprovar que fenômenos gerados externamente à BG, sejam eles de alta ou baixa frequência, são capazes de provocar variações importantes no nível d'água e nas velocidades de corrente dentro desta, se comparadas às variações esperadas para a maré astronômica. Foi observado que ondas de alta frequência provocam respostas mais pontuais no nível e mais rápidas nas velocidades, tendo seus efeitos severamente reduzidos durante a propagação para o interior do estuário. Já ondas com frequências inframaré alteram o nível da BG como um todo e praticamente com a mesma intensidade, provocando alterações pequenas no campo das velocidades.

Durante a etapa de calibração, foi possível concluir que a amplitude adotada para o coeficiente de rugosidade do fundo (z_{0b}) é um parâmetro básico de calibração. A adoção de z_{0b} variável no espaço possibilitou resultados mais realísticos, se comparados à adoção de um valor único para todo o domínio. Presume-se que a definição de valores mais refinados de z_{0b} para a BG implicará em um ganho significativo nos resultados.

A resolução horizontal da batimetria utilizada, 100 metros, é apontada como um dos principais fatores responsáveis pela menor precisão dos resultados, principalmente em áreas de maior complexidade na linha de costa como, por exemplo, as enseadas. Embora os resultados obtidos tenham sido satisfatórios e suficientes para demonstrar o efeito dos fenômenos extremos e a influência destes nas variações de nível e correntes na BG, é esperado que a utilização de malhas mais refinadas possibilite simulações mais realísticas da hidrodinâmica da baía.

Este trabalho pode servir como base para um estudo das principais áreas de risco em caso de sobrelevação do nível do mar, a partir da identificação das principais áreas sujeitas à ressonância e consequentes amplificações. A inclusão de um forçante de vento permitiria comparar os efeitos destes aos obtidos pelo forçante de maré, além de possibilitar a análise da interação dos ventos aos fenômenos extremos de variação do nível do mar e das correntes.

Foi possível concluir que o monitoramento contínuo, e o registro eficiente, do nível do mar permite o estudo de fenômenos diversos, incluindo aqueles cuja previsão

ainda não se encontra avançada. Vale ressaltar que o efetivo emprego de modelos numéricos só se torna eficaz quando utilizados dados consistentes.

7 BIBLIOGRAFIA

- ABBOTT, M.B., BASCO, D.R. Computational fluid dynamics. 1 ed., New York, Longman Scientific and Technical with John Wiley and Sons. 1989
- AMADOR, E.S. *Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza*. Tese de D.Sc., Instituto de Geociências/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.
- BARROSO JUNIOR, V. *Metodologia para geração de cartas de correntes de maré em sistemas estuarinos e recintos portuários com aplicação na Baía de Todos os Santos, BA*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- BARTZ, Cesar. [2004]. 5 fotografias, color., 7,5 x 12 cm.
- BÉRGAMO, A.L. *Características hidrográficas da circulação e dos transportes de volume e sal na Baía de Guanabara (RJ): Variações sazonais e moduladas pela maré*. Tese de D.Sc. Instituto Oceanográfico/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2006.
- BLUMBERG, A.F., MELLOR, G.L. “Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight”, *Journal of Geophysical Research*, v. 88, pp. 4579-4592, 1983.
- BLUMBERG, A.F., MELLOR, G.L. “A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model”, *American Geophysical Union*. v. 4, pp: 1-16, 1987.
- CANDELLA R.N. “Meteorologically induced strong seiches observed at Arraial do Cabo, RJ, Brazil” *Physics and Chemistry of the Earth*, v.34, pp 989–997, 2009.
- CANDELLA R.N., ANDRIONI, L.L. “Oscilações do nível do mar em alta frequência em Arraial do Cabo, RJ” In: *VIII Simpósio Sobre Ondas, Marés, Oceanografia por Satélite e Engenharia Oceânica*, Arraial do Cabo, RJ, Brasil. 2008.

- CANDELLA R.N., CADELLA M.V. "Oscilações em frequências inframaré do nível do mar na Baía de Guanabara" *IX Simpósio Sobre Ondas, Marés, Oceanografia por Satélite e Engenharia Oceânica*, Arraial do Cabo, RJ, Brasil. 2008.
- CANDELLA, R. N.; CALIL, L. E. "Marés Meteorológicas em Arraial do Cabo, RJ" In: III Simpósio Brasileiro de Oceanografia, São Paulo, SP, Brasil, 2006.
- CANDELLA, R.N.; RABINOVICH, A. B.; THOMSON, R. E. "The 2004 Sumatra Tsunami as Recorded on the Atlantic Coast of South America", *Advances in Geosciences*, v. 14, p. 117-128, 2008.
- CARVALHO, G.V. *Influência do vento na hidrodinâmica da Baía de Guanabara (RJ)*. Monografia de Bacharelado, Faculdade de Oceanografia/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- CHM (CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA) *Carta de correntes da Baía de Guanabara*. Disponível em:
<<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/publicacao/ccm/CCM-Baia-de-Guanabara.pdf>>, Acesso em: 2 de outubro de 2012.
- DYER, K.R. *Estuaries: A physical introduction*. 2. ed., Chinchester, Wilwy, 1997.
- FEMAR (FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR). *Catálogo de estações maregráficas brasileiras*. 2000. Disponível em:
<<http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/183.html>>
Acesso em: 2 de julho de 2009.
- FILLIPO, A.; KJERFVE, B.; CANDELLA, R. N.; TORRES JR, A. R. "Variabilidade Meteorológica do Nível do Mar em Baixa Frequência em Cananéia, SP, e Ilha Fiscal, RJ". *Pesquisa Naval*, Rio de Janeiro, v. 16, 2003.
- FRAGOSO, M. R. *Um Modelo Numérico da Circulação Oceânica para as Bacias Leste e Sudeste do Brasil*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

- FRANÇA, C. A. S., de MESQUITA, A. R. “The December 26th 2004 tsunami recorded along the southeastern coast of Brazil”. *Nat. Hazards*, v. 40, pp. 209–222, 2007.
- FRANCO, A.S. *Marés - Programas para análise e previsão*. São Paulo, Copyright©1992-2000 Alberto dos Santos Franco, 2000.
- FRANCO, A. S. *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão*. 2 ed., Niterói, DHN, 2009.
- KALIL, A. F. D. *Contribuições ao estudo do nível médio do mar no Estado do Rio de Janeiro*. Dissertação de M.Sc.. COPPE/UFRJ: Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- KJERFVE, B., RIBEIRO, C.H.A., DIAS, G.T.M., *et al.* “Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil”. *Continental Shelf Research*, v.17(13), pp. 1609-1643, 1997.
- MALTA, F.S. *Estudo de correntes de maré do complexo estuarino da Baía de Guanabara - RJ*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- MAYR, L.M., TENENBAUM, D.R., VILLAC, M.C., *et al.* *Hydrobiological characterization of Guanabara Bay, in- coastlines of Brazil*, 1 ed., New York American Society of Civil Engineers, 1989.
- MELLOR, G.L.A. *Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. 2004. Disponível em:
< <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>>
Acesso em: 06 de fevereiro de 2011.
- MELLOR, G. L., EZER, T. & OEY, L. Y, “The pressure gradient conundrum of sigma coordinate ocean models”, *J. Atmos. Oceanic. Technolo.*, v. 11 (4), pp. 1126-1134, 1994.
- MESQUITA, A. R. “Marés, Circulação e Nível do Mar na Costa sudeste do Brasil.” São Paulo: IOUSP/FUNDESPA, 1997.

- MESSINGER, F., ARAKAWA, A. “Numerical methods used in atmospheric models”, *GARP Publications Series*, v.1 (17), pp.62, 1976.
- NUNES, A. L. *Determinação das marés meteorológicas na região da Baía do Espírito Santo e sua influência na drenagem de águas continentais*. Dissertação de M.Sc. Centro Tecnológico/UFES, Espírito Santo, ES, Brasil, 2007.
- PAIVA, A. M. “Estudo das variações do nível médio do mar em Arraial do Cabo, RJ,” Relatório de Pesquisa, FAPERJ-COPPE/UFRJ. 1993.
- PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. “Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE.”, *Computers and Geosciences*, v. 28, p. 929-937, 2002.
- PUGH, D.T. *Tides, surges and mean sea level, a handbook for engineers and scientists*, New York, John Wiley and Sons, 1987
- QUARESMA, V. da S. Caracterização da dinâmica sedimentar da Baía de Guanabara, RJ. Dissertação de M.Sc., Departamento de Geologia/UFF, Niterói, RJ, Brasil, 1997.
- RABINOVICH, A. B. “Seiches and harbour oscillations”. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Singapore, World Scientific, 2009.
- RABINOVICH, A. B. CANDELLA, R.N.; THOMSON, R. E., “Energy decay of the 2004 Sumatra Tsunami in the world ocean”, *Pure and Applied. Geophysics*. V. 168, 1919–1950, 2011.
- RITTER, P.D. *Da Roça ao Mar: Estudo de uma comunidade de marisqueiros em Jurujuba, Niterói (RJ)*, Tese de D.Sc, Instituto de Psicologia/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- ROSMAN, P.C.C., “Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos.” In: *Métodos numéricos em recursos hídricos*, v. 3, capítulo 3, Brasil, Associação Brasileira

de Recursos Hídricos, 1997.

SAMPAIO, M. *Estudo da circulação hidrodinâmica e trocas de massas d'água na Baía de Guanabara – RJ*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

SILVA, G. N. Variação de longo período do nível do mar: causas, conseqüências e metodologia de análise, Dissertação (mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1992.

TORRES JUNIOR, A.R. *Resposta de ressurgência costeira de Cabo Frio a forçantes locais*. Dissertação de M.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.