



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Análise da Taxa de Renovação e Idade da Água do Sistema Estuarino da Baía de Guanabara

André Carneiro Porto e Laís Pereira Ponte

Projeto de graduação apresentado
ao curso de Engenharia ambiental
da Escola Politécnica,
Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
engenheiro

Orientador: Paulo César Colonna
Rosman

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2018

Análise da Taxa de Renovação e Idade da Água do Sistema Estuarino da Baía de Guanabara

André Carneiro Porto e Laís Pereira Ponte

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Ronman,
D.Sc.

Prof. Isaac Volschan Junior, D.Sc.

Prof. Monica Young Buckmann,
M.Sc.

Prof. José Paulo Soares de Azevedo,
Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2018

André Carneiro Porto e Laís Pereira Ponte

Análise da Taxa de Renovação e Idade da Água do Sistema Estuarino da Baía de Guanabara/ André Carneiro Porto e Laís Ponte – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2018.

X, 55 p.; il.; 29,7cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman.

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Ambiental, 2017.

Referências Bibliográficas: p. Páginas 54-55.

- 1.Circulação hidrodinâmica. 2.Renovação das águas.
- 3.Taxa de Renovação. 4.Idade da Água. 5.Sistema Estuarino da Baía de Guanabara. 6.Modelagem computacional.
- 7.SisBAHIA®. 8.Modelo hidrodinâmico.; I. Cesar Colonna Rosman, Paulo II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Análise da Taxa de Renovação e Idade da Água do Sistema Estuarino da Baía de Guanabara.

**Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.**

**ANÁLISE DA TAXA DE RENOVAÇÃO E IDADE DA ÁGUA DO SISTEMA
ESTUARINO DA BAÍA DE GUANABARA**

André Carneiro Porto e Laís Pereira Ponte

Fevereiro/2018

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman.

Curso: Engenharia Ambiental.

Para uma adequada gestão ambiental e correta tomada de decisões, em sistemas estuarinos, é extremamente importante o entendimento de como ocorrem as movimentações e trocas de massas d'água. A melhor forma para isto é um estudo da circulação hidrodinâmica destes ambientes. O presente trabalho apresenta um estudo da circulação hidrodinâmica e da renovação das águas com base nos parâmetros de Taxa de renovação e Idade da Água, para os períodos de verão e inverno no Sistema Estuarino da Baía de Guanabara (RJ) com enfoque na renovação pela maré e pelas descargas fluviais. O estudo foi feito por meio de modelagem computacional, utilizando como ferramenta o SisBAHIA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). Foram implementados um Modelo Hidrodinâmico e dois Modelos de Transporte Euleriano, de Taxa de Renovação e Idade da Água. As principais conclusões foram representadas em forma de mapas e/ou em séries temporais, indicando que, após 90 dias, a água da Baía de Guanabara não se encontra totalmente renovada, além de que existem massas de água com Idade de até 110 dias dentro no sistema, principalmente no período de inverno. Verificou-se diferenças mais relevantes na região ao fundo da baía devido a sazonalidade das vazões fluviais.

Palavras chaves: Circulação Hidrodinâmica, Renovação das Águas, Taxa de Renovação, Idade da Água, Sistema Estuarino da Baía de Guanabara, Modelagem Computacional, SisBAHIA[®] e Modelo Hidrodinâmico.

Abstract of Undergraduate Project Presented to POLI/UFRJ as a Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Engineer

ANALYSIS OF THE RENEWAL RATE AND WATER AGE OF THE
ESTUARINE SYSTEM OF GUANABARA'S BAY

André Carneiro Porto e Laís Pereira Ponte

February/2018

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman.

Course: Environmental Engineering.

In order to have an appropriate environmental management and correct decision-making, understanding how the water moves inside and estuary is of the most importance. The best way to determine this is the study of the hydrodynamic circulation. This research is a study about the hydrodynamic circulation and water renewal based on the Renewal Rate and Water Age parameters for the summer and winter periods in the Guanabara's Bay Estuary System (RJ) with a focus on the renewal by tides and rivers discharges. The study was made with computational modeling, based on SisBAHIA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). One hydrodynamic model and two Eulerian transport models of Renewal Rate and Water Age were implemented. The results obtained were represented in the form of maps and in time series, indicating that, after 90 days, the water from Guanabara's Bay is not completely renewed and, mainly or the winter's season, there are waters that are up to 110 days of age. The most relevant differences were found in the region around the north of the bay, caused by the seasonality of river flows.

Keywords: Hydrodynamic Circulation, Water Renewal, Renewal Rate, Water Age, Guanabara's Bay Estuary System, Computational Modeling, SisBAHIA[®] and Hydrodynamic Model

Sumário

| | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 2. Objetivos do projeto | 5 |
| 3. Descrição da região de interesse | 5 |
| 4. Metodologia | 7 |
| 4.1 Sistemas de Modelos utilizados | 7 |
| 4.1.1 Modelo Hidrodinâmico | 8 |
| 4.1.2 Modelo Euleriano | 8 |
| 4.1.3 Taxa de Renovação..... | 8 |
| 4.1.4 Idade da Água..... | 8 |
| 4.2 Domínio de modelagem..... | 10 |
| 4.3 Malha de discretização..... | 11 |
| 4.4 Batimetria..... | 12 |
| 4.5 Rugosidade equivalente do fundo..... | 13 |
| 4.6 Cenários de Modelagem | 15 |
| 4.7 Dados considerados na Modelagem | Erro! Indicador não definido. |
| 4.7.1 Dados de Maré..... | 15 |
| 4.7.2 Dados de Vento | 19 |
| 4.7.3 Correntes Costeiras Longitudinais..... | 22 |
| 4.7.4 Vazão dos Rios Afluentes | 22 |
| 5. Resultados | 27 |
| 5.1 Modelo hidrodinâmico..... | 27 |
| 5.2 Elevação da Superfície Livre..... | 28 |
| 5.3 Caracterização da maré..... | 30 |
| 5.4 Perfis de escoamento | 30 |
| 5.4.1 Cenário de Verão | 31 |
| 5.4.1.1 Meia Maré Enchente na Sizígia – Verão..... | 32 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.4.1.2 | Preamar na Sizígia – Verão | 33 |
| 5.4.1.3 | Meia Maré Vazante – Verão..... | 34 |
| 5.4.1.4 | Baixamar na Sizígia- Verão..... | 35 |
| 5.4.2 | Inverno..... | 36 |
| 5.4.2.1 | Meia Maré Enchente na Sizígia- Inverno | 37 |
| 5.4.2.2 | Preamar na Sizígia-Inverno | 38 |
| 5.4.2.3 | Meia Maré Vazante na Sizígia- Inverno..... | 39 |
| 5.4.2.4 | Baixamar na Sizígia – Inverno | 40 |
| 5.5 | Modelos Eulerianos | 41 |
| 5.5.1 | Modelo de Taxa de Renovação | 41 |
| 5.5.2 | Idade da Água..... | 45 |
| 5.5.2.1 | Estabilização da Idade da Água.. Erro! Indicador não definido. | |
| 6. | Discussão..... | 50 |
| 7. | Conclusão | 52 |
| 8. | Considerações Finais | 53 |
| 9. | Referências Bibliográficas | 54 |

Lista de Abreviações

- BM – Baixamar;
- MME – Meia Maré Enchente;
- MMV – Meia Maré Vazante;
- PM – Preamar;
- QD – Quadratura;
- SZ – Sizígia.

1. Introdução

A Baía de Guanabara é um ambiente de transição entre o oceano e o continente, a qual possui grande importância econômica para a cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana. Apesar disto esta vem sofrendo modificações morfológicas desde o século XVII. A remoção de morros para aterros de lagoas e incorporação de ilhas ao continente foram práticas adotadas amplamente ao longo da história da cidade do Rio de Janeiro.

No passado, pouco se conhecia sobre a circulação das águas no interior de sistemas estuarinos. Sua importância não era devidamente estudada e não se dispunha de ferramentas para tal. Desse modo, diversas obras que alteraram suas morfologias foram feitas sem uma real consciência da magnitude que estas alterações que poderiam causar.

Além de intervenções morfológicas, a qualidade da água da Baía também vem sendo modificada desde o século XVII, de onde datam as primeiras legislações municipais relacionadas ao meio ambiente, como por exemplo, a proibição do abate de baleias dentro da baía (COELHO 1937). Com o decorrer do tempo, as atividades econômicas foram se intensificando e o corpo d'água recebeu resíduos de origem industrial e oleosos, além dos resíduos sólidos urbanos e dos esgotos domésticos.

Ambientes como a Baía de Guanabara podem ser classificados como sistemas estuarinos.

“Um estuário é um corpo de água costeiro, semifechado com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental” (PRITCHARD 1955) essa definição não pode ser totalmente aplicável a ambientes mais complexos como baías. No caso da Baía de Guanabara, que recebe aporte de água de vários rios constituindo-se de vários estuários, aplica-se o termo sistema estuarino.

Esses sistemas possuem grande importância ecológica, uma vez que os nutrientes carregados pelos rios ficam retidos por longos períodos de tempo em seu interior, o que os proporciona serem mais produtivos que rios e oceanos. Desse modo, apresentam alta diversidade biológica pois a capacidade de acumular nutrientes em seu interior viabiliza que este seja um berçário para diversas espécies. Porém, da mesma forma que os nutrientes

permanecem no sistema por longos períodos de tempo, ocorre também o acúmulo de poluentes.

A cidade do Rio de Janeiro, em seu processo de expansão, foi, depois de Londres, uma das primeiras capitais do mundo a receber um sistema de coleta e tratamento de esgoto. Durante um grande período da história, este sistema sofreu expansão e modificações para atender o aumento da população. Com o adensamento populacional e o crescimento da região metropolitana, o sistema de coleta e tratamento de esgoto tornou-se obsoleto e insuficiente. Principalmente na região da Baixada Fluminense, a falta de infraestrutura de esgotamento sanitário torna os rios da região os principais canais de drenagem dos esgotos e dos resíduos sólidos, contribuindo assim para que este seja o principal problema em relação à poluição das águas nos dias atuais, segundo o IBGE (2017).

Para uma melhor análise da qualidade da água e uma melhor eficiência da Gestão da Baía de Guanabara é necessário o estudo de como ocorre a renovação das águas no corpo hídrico. Além da geometria, a descarga de água doce, a maré, a salinidade, a circulação da região oceânica adjacentes (correntes costeiras) e o vento são os principais fatores que influenciam na circulação das águas de um sistema estuarino segundo, PRITCHARD (1967).

Na área de oceanografia, utiliza-se frequentemente o conceito de Tempo de Residência para estimar a renovação de água em estuários. Tal conceito é também utilizado pela área de engenharia sanitária para dimensionamento de tanques e reatores e pela área de limnologia para estimar a renovação das águas de reservatórios. (ROSMAN,2017)

O Parâmetro Tempo de Residência consiste no tempo requerido para a renovação das águas de um determinado volume V . Tal conceito é bem aplicado à corpos d'água homogêneos ou bem misturados. No caso de sistemas estuarinos, a ação de várias forças naturais, junto com a não homogeneidade da coluna d'água, produzem efeitos hidrodinâmicos que levam a resultados errôneos sobre a renovação das águas se analisada pelo parâmetro Tempo de Residência.

O tempo para a renovação das águas de um determinado volume é dado por:

$$T_{Res} = \frac{V}{Q}$$

Onde:

V é o volume total do corpo hídrico;

Q a vazão total que passa por ele.

Sistemas estuarinos, por sofrerem influência da maré, a determinação da vazão Q não é trivial. Além disso, a ampla heterogeneidade da circulação hidrodinâmica torna ilógico e sem fins práticos um resultado único para o tempo residência do sistema. Logo, esse parâmetro não pode ser aplicado para um sistema estuarino.

Em regiões costeiras, como a Baía de Guanabara, a influência da maré é de grande importância. As marés astronômicas são oscilações do nível do mar causadas pela atração gravitacional de diversos astros, principalmente da Lua e do Sol, que atuam sobre a Terra. A frequência principal da onda de maré corresponde ao dia lunar médio, que é 50 min mais longo que o dia solar. O ciclo de maré, que corresponde a um período completo, é composto de fases de enchente e vazante. Na enchente, ocorre um aumento do nível de água e, na vazante, a diminuição deste. O instante de maior amplitude da onda de maré é chamado de preamar e o instante de menor amplitude, baixamar. Essa movimentação da maré em um sistema estuarino interfere diretamente na vazão dos rios que desaguam nele. Quando ocorre a fase de enchente, a água de maior salinidade se movimenta rio adentro, invertendo o sentido natural do rio. Na fase de vazante, a água retoma seu sentido natural. Este fenômeno ocorre na Zona de Influência de maré, caracterizada por um movimento unidirecional que muda de sentido de acordo com a fase do ciclo de maré.

Esse movimento oscilatório de advecção, aliado ao transporte difusivo, dificulta a estimativa da vazão de água no corpo hídrico, inclusive em corpos relativamente homogêneos. Desse modo, as taxas de renovação das águas de cada local do sistema podem ser bem diferentes do que se esperaria ao analisar o tempo de residência. Portanto, a utilização do parâmetro Tempo de Residência, para ambientes com circulação hidrodinâmica mais complexa, é inadequadamente aplicada. Em casos de sistemas estuarino, utiliza-se frequentemente o Tempo de Descarga Hidráulica, flushing time. Este corresponde ao tempo necessário para substituir a água doce do estuário, calculado pela razão entre o volume de água doce no estuário e a vazão de água doce afluente. Tanto o Tempo de Residência, quanto o tempo de Descarga Hidráulica, representam uma aproximação grosseira e inadequada para se determinar a real Taxa de Renovação nestes tipos de ambiente.

Os parâmetros Taxa de Renovação e Idade da Água vêm sendo utilizados para fim de estudos de renovação em ambientes estuarinos. ROVERSI (2016) estudou a Taxa de Renovação no sistema estuarino de Santos. FALKENBERG (2009) estudou a mistura das águas do sistema estuarino de Paranaguá, avaliando o parâmetro de Idade da Água.

Na análise de Taxa de Renovação, toda água presente dentro do sistema no instante inicial é considerada 0% renovada, enquanto as águas que entram no domínio (águas novas) são consideradas como 100% renovadas. A medida em que se misturam, e as águas do sistema se renovam progressivamente. Assim, para o resultado de Taxa de Renovação, um local com índice de 50% significa que, no momento analisado, 50% das águas daquele local entraram no sistema depois do instante inicial analisado, ou seja, 50% é água nova.

Já o conceito de Idade de Água, ou Idade de uma massa de água, indica o tempo decorrido desde o lançamento da massa de água no sistema, representado quanto tempo a massa de água está dentro da região de interesse. Assim, uma região com idade da água igual a uma semana, possui águas que estão há uma semana dentro do sistema analisado.

Enquanto que a Taxa de Renovação permite avaliar a renovação das águas em diferentes pontos do sistema, a Idade da Água possibilita analisar quanto tempo tem a água de cada setor. Em ambas as análises é possível a avaliar detalhadamente as variações ao longo do tempo e do espaço. Utiliza-se como base para estas análises a hidrodinâmica do corpo hídrico estudado. A combinação dos resultados destes dois modelos possibilita verificar o comportamento das massas de água e a identificar pontos onde o lançamento de efluentes e despejo de contaminantes é mais prejudicial à qualidade da água do sistema.

Tanto a Taxa de Renovação, quanto a Idade da Água, podem ser estudadas com a utilização da modelagem computacional. Atualmente já foram realizados estudos de modelagem para a região da Baía de Guanabara. SAMPAIO (2003) utilizou a modelagem para estudar a circulação Hidrodinâmica e a Mistura de Massas d'água, ROSMAN (2001) realizou simulações para estudo de dispersão de manchas de óleo, KAUFMANN (2009) estudou a circulação hidrodinâmica e qualidade da água no canal do fundão. Vários estudos hidrodinâmicos e de qualidade foram realizados, porém nenhum deles teve como foco a renovação das águas da Baía.

2. Objetivos do projeto

O presente trabalho tem como objetivo estudar a Taxa de Renovação e a Idade da Água do sistema estuarino da Baía de Guanabara nos períodos de inverno e verão. Para tais análises foi utilizada como ferramenta a modelagem computacional.

3. Descrição da região de interesse

A Baía de Guanabara é o sistema estuarino mais importante do Rio de Janeiro onde localizam-se portos, estaleiros, refinarias e diversas indústrias. Localizada na Região Metropolitana do Estado entre as latitudes 22°40' e 23°05' Sul e Longitude 43°00' e 43°20' Oeste, possui um espelho d'água de aproximadamente 384 km² com um volume de água de 3×10^9 m³ e um perímetro de 131km (SEMADS,2001). Do seu espelho d'água 40 km² é ocupado por ilhas.

Os limites da Baía dividem opiniões entre autores, segundo AMADOR (1997) o limite ao norte é a foz do rio Iriri e ao sul é limitado pelo arco formado entre a praia de Copacabana na cidade do Rio de Janeiro, e a praia de Itaipu na cidade de Niterói, possuindo 34km de extensão.

Por toda sua extensão a Baía pode ser dividida em três regiões, a região mais externa possui circulação de água governada pelas correntes de maré, a região intermediária abrange o canal central que possui as maiores profundidades e a região interior, no fundo da Baía, possui pouca circulação de correntes marítimas sofrendo maior influência das vazões dos rios. Cerca de 84% da profundidade da região é abaixo de 10m, a profundidade média é de 5,7m (KJERFVE,1997). As maiores profundidades chegam a 58m no estreitamento entre os Fortes de São João e Santa Cruz.

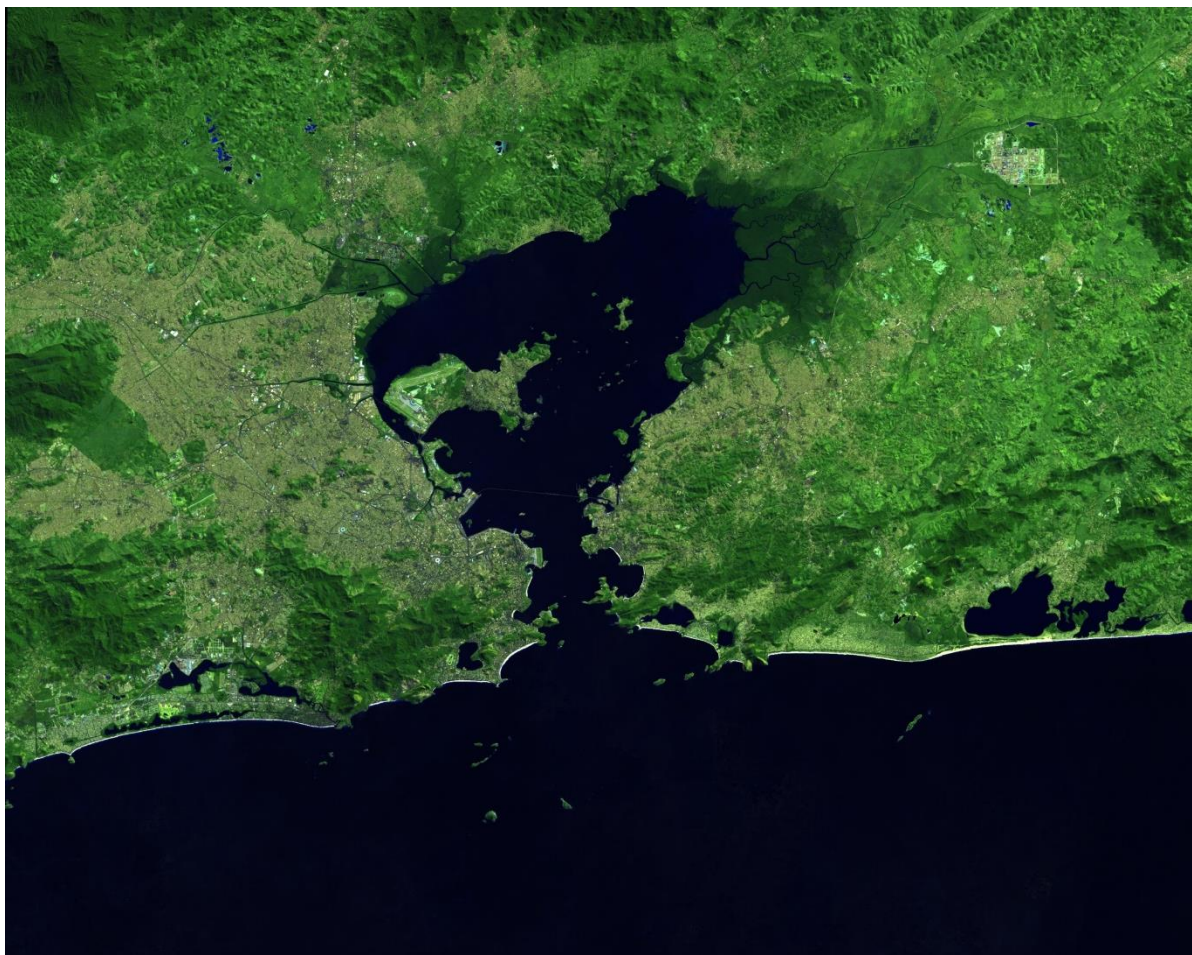


Figura 1 - Vista aérea da Baía de Guanabara-RJ. Mosaico gerado a partir de imagens do satélite Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) obtidas entre os anos de 2015 e 2016. Composição colorida R7G6B4.

O fundo é coberto por camada de lama e lodo que em algumas regiões chega a alcançar 10m de altura, nos trechos do canal central o fundo é predominantemente arenoso. (ANA)

A Baía de Guanabara e seus rios tributários compõem a região hidrográfica da Baía de Guanabara, a qual engloba 24 sub-bacias de drenagem, compreendendo uma área de 4000 km². Esta área engloba 16 municípios sendo 10 completamente incluídos (Belford Roxo, Duque de Caxias, São João de Meriti, Mesquita, Nilópolis, São Gonçalo, Magé, Guapimirim, Itaboraá e Tanguá) e 6 parcialmente incluídos (Rio de Janeiro, Niterói, Nova Iguaçu, Cachoeiras de Macacu, Rio Bonito e Petrópolis). A bacia é composta por 55 rios e canais que juntos contribuem com um aporte de 100 a 200m³/s de água. Dentre tais corpos d'água, os mais relevantes, em volume de água, são os rios Guapimirim, Caceribu, Iguaçu, Macacu,

Estrela, Sarapuí e São João de Meriti. Além da contribuição da área de drenagem, cerca de 25m³/s de água são aportados à Baía de Guanabara provenientes da transposição do Rio Paraíba do Sul que pelos sistemas Lajes e Guandu abastecem grande parcela da população da região.

As bacias Hidrográficas que compõem a região Hidrográfica da Baía de Guanabara englobam uma população de 10 milhões de habitantes, cerca de 80% da população do estado do Rio de Janeiro. Principalmente os rios que drenam a região da baixada fluminense possuem baixa qualidade da água devido à falta de estrutura de saneamento. Esta poluição dos rios contribui para a deterioração da qualidade das águas da baía que, além do aporte de esgotos domésticos sem tratamento, recebe ainda chorume do Aterro Sanitário de Gramacho, lixo flutuante que vem carregado pelos rios, efluentes industriais e óleo proveniente de vazamento das refinarias, estaleiros e eventuais acidentes.

4. Metodologia

Neste trabalho foi utilizado como separador de casas decimais o ponto, pois os modelos matemáticos utilizados trabalham com pontos ao invés da vírgula.

4.1 Sistemas de Modelos utilizados

Os modelos utilizados para modelagem da circulação hidrodinâmica, renovação da água e idade da água da Baía de Guanabara fazem parte do SisBaHiA[®] - **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental** desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e mantido pela COPPE/UFRJ. O sistema vem sendo atualizado e desenvolvido continuamente desde 1987. Maiores detalhes sobre o SisBaHiA[®] encontram-se disponíveis em: www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados os modelos: Hidrodinâmico 2DH e os modelos Eulerianos de Taxa de Renovação e Idade da Água.

4.1.1 Modelo Hidrodinâmico

Para o estudo da circulação hidrodinâmica foi adotado o modelo bidimensional promediado na vertical, que determina componentes médias na vertical possuindo dimensões (x,y,t) . Os dados utilizados nele são apresentados nas seções posteriores.

4.1.2 Modelo Euleriano

O modelo de transporte euleriano é utilizado na simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas. Para este estudo, foram utilizados os modelos de Taxa de Renovação e Idade da Água, vinculados com o módulo 2DH do modelo hidrodinâmico.

4.1.3 Taxa de Renovação

Na modelagem de Taxa de Renovação, é considerado um constituinte passivo e conservativo como substância de referência, ou seja, uma substância que não sofre reações cinéticas de produção e consumo e sem velocidade de sedimentação e ressuspensão. No instante inicial toda água dentro do domínio de interesse é marcada com concentração igual a 0 desta substância, referindo-se a uma água 0% renovada. As águas que entram no sistema pelo mar e as águas afluentes pelos rios são marcadas com concentração 100, equivalente a um índice de 100% de renovação. Desta forma, com o passar do tempo, estas águas com diferentes concentrações vão se misturando, esta mistura vai saindo do domínio de modelagem e a água dentro dele vai se renovando. Os valores iniciais da concentração, 0 e 100, são escolhidos com o propósito de indicar diretamente a porcentagem de renovação, assim, se em um determinado local o resultado após o período de modelagem for 60, revela-se que, para este tempo, neste local, que 60% das águas daquele local são novas e 40% já estavam no sistema estuarino no instante inicial de simulação da modelagem.

A taxa de renovação difere em cada ponto do domínio de modelagem pois depende da circulação hidrodinâmica.

4.1.4 Idade da Água

Diferentemente do modelo de Taxa de Renovação, que tem como resultado a porcentagem de renovação em diferentes locais em um intervalo de tempo, o modelo de Idade da Água retrata

o tempo que a água tem dentro da região de interesse, decorrido desde o início da modelagem, em diferentes locais.

Para a concepção deste modelo, adota-se a concentração 1 de uma determinada substância capaz de sofrer reação cinética de decaimento de primeira ordem, para todo domínio de modelagem. Toda a água nova que entrar no sistema também conterá concentração 1 da mesma substância. O mecanismo de funcionamento deste modelo baseia-se em estimar o tempo de decaimento, à taxa constante, desta substância.

Para o cálculo, considera-se um volume de água homogêneo com concentração inicial C_0 de tal substância. A cinética da reação de decaimento é de primeira ordem, assim a concentração da substância marcadora de idade da água, $C(t)$ é dada por:

$$\frac{dC}{dt} = -kC$$

Cuja solução analítica leva ao resultado:

$$C(t) = C_0 \exp(-kt)$$

Onde $t = \frac{-\ln(C/C_0)}{k}$.

A unidade k é a constante de decaimento, sendo o inverso do tempo. É de mais fácil interpretação se utilizarmos o tempo equivalente, como por exemplo, O parâmetro T_{90} é o tempo requerido para o decaimento de 90% da concentração de uma substância. Portanto para o T_{90} , $C/C_0 = 0.1$ e obtemos o respectivo $k = \frac{-\ln(0.1)}{T_{90}}$.

Desta forma, após tempo suficiente para a estabilização do resultado do modelo, pode-se aferir a concentração C em diversas regiões do domínio, conhecendo a concentração inicial C_0 , é possível calcular a idade da água em determinado local. Trata-se de uma forma de datação parecida com a técnica do carbono 14. (ROSMAN ,2017).

4.2 Domínio de modelagem

O domínio de modelagem possui os contornos de terra, de mar e de ilhas. Considerando o objetivo do trabalho, inclui-se no domínio de interesse o espelho d'água da Baía de Guanabara, os rios principais que compõem sua bacia hidrográfica e uma porção da região costeira adjacente. Os contornos dos mapas de terra e de água foram gerados a partir de imagens do Google Earth referentes ao ano de 2017, o mapa base utilizado como moldura de modelagem (Figura2) foi gerado pelo programa Surfer 13.

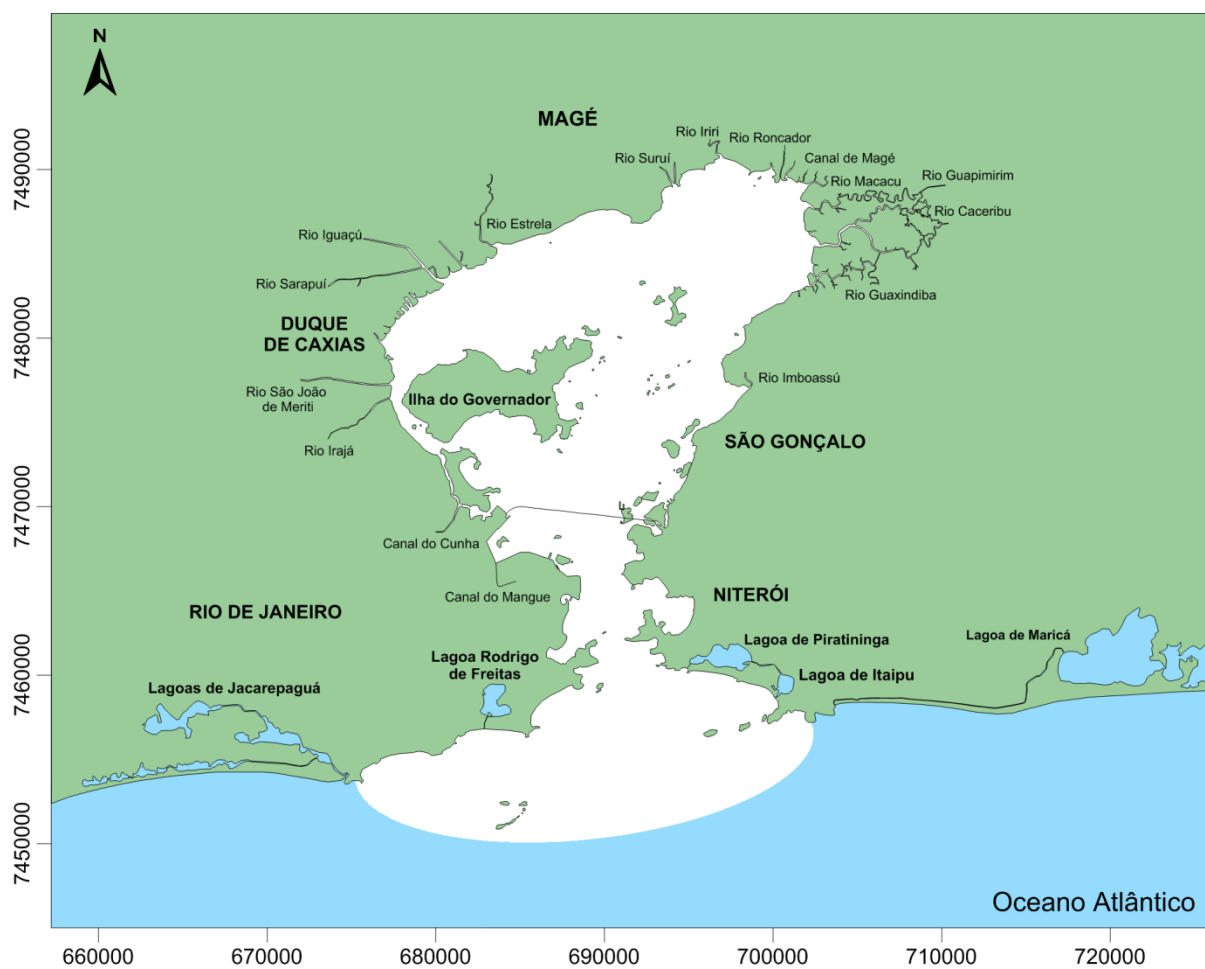


Figura 2– Mapa base da Baía de Guanabara

4.3 Malha de discretização

A partir dos contornos do mapa base gerou-se a malha no programa SisBAHIA[®] (Figura 3), utilizada em toda a modelagem. Ela é composta por 1412 elementos, sendo 1347 quadrangulares e 45 triangulares, contendo um total de 6356 nós de cálculo.

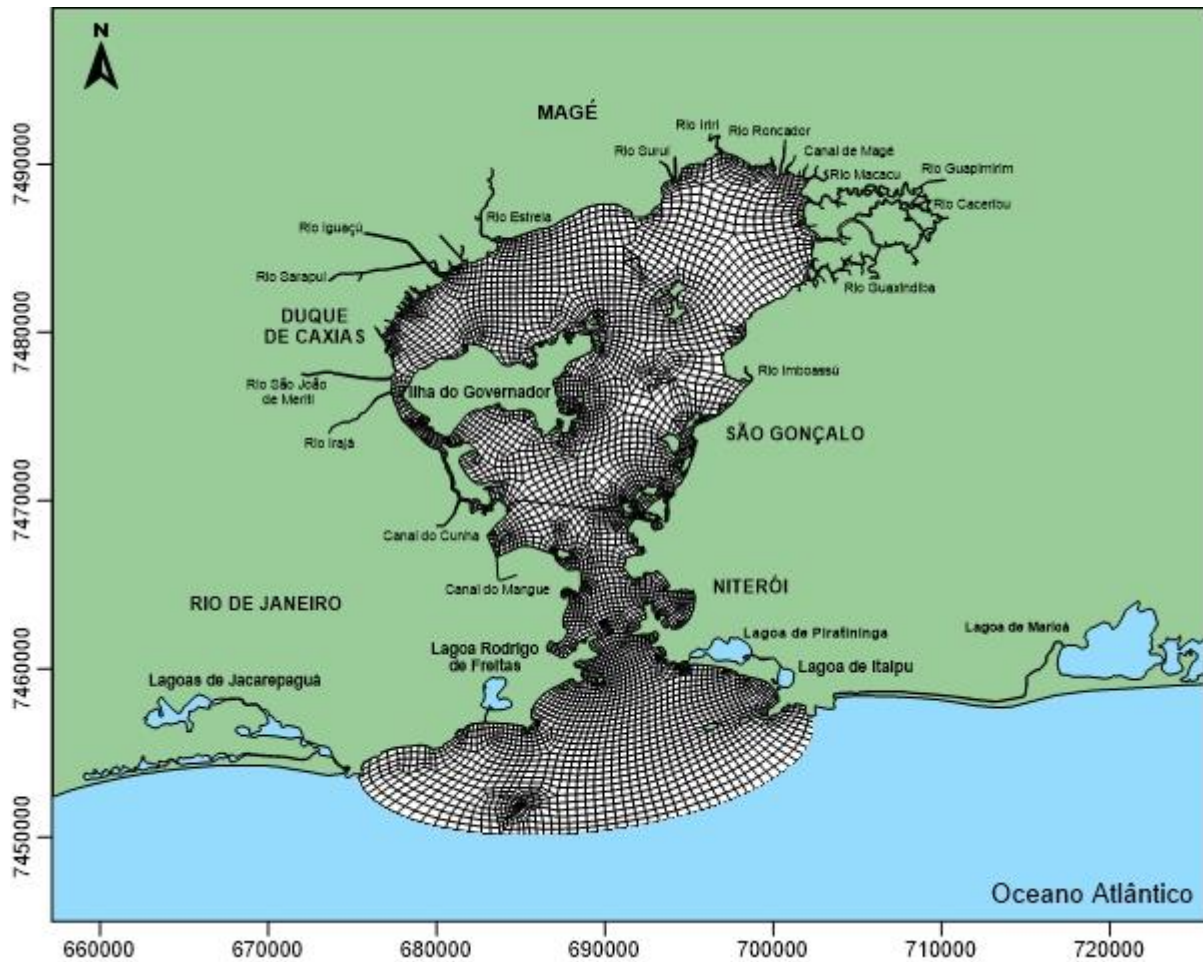


Figura 3 – Malha de discretização utilizada e domínio de modelagem.

4.4 Batimetria

Os dados de batimetria da Baía de Guanabara são provenientes das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN). Especificamente, das cartas náuticas Baía de Guanabara nº 1501 (escala 1:50.000), Barra do Rio de Janeiro nº 1511 (escala 1:20.000) e Porto do Rio de Janeiro nº 1512 (escala 1:20.000). Estes dados foram inseridos no modelo e gerou-se o mapa de batimetria (Figura 4), em relação ao nível médio do mar. Utilizou-se o Kriging como método de interpolação.

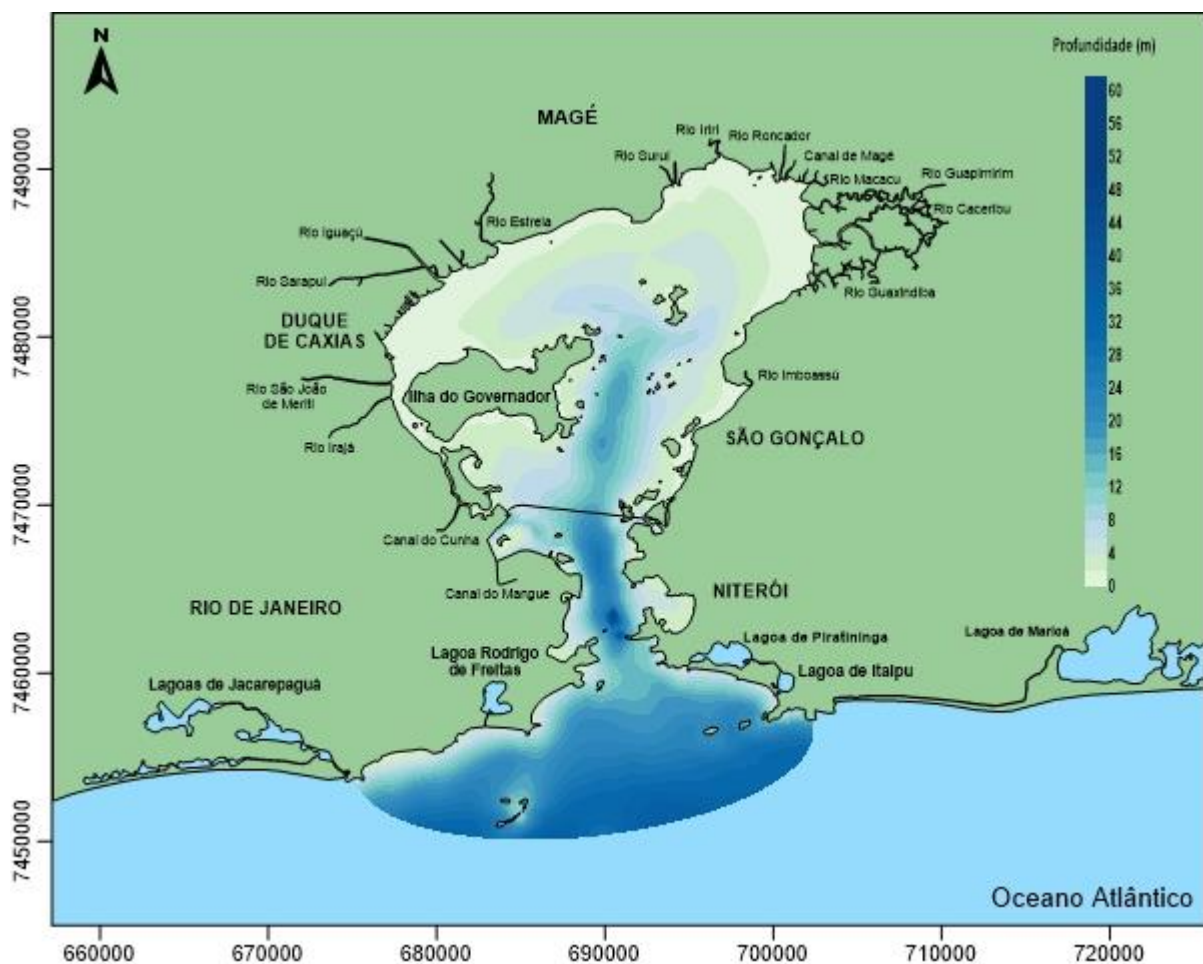


Figura 4 – Batimetria na Baía de Guanabara utilizada no domínio de modelagem.

4.5 Rugosidade equivalente do fundo

A tensão de atrito é influenciada diretamente pela rugosidade equivalente do fundo, relativa à natureza do sedimento. Os valores desta rugosidade utilizados neste trabalho baseiam-se na distribuição de sedimentos apresentada por AMADOR(2012) e adaptado por KAUFMANN(2009) (Figura 5). Observa-se que, ao norte da Baía, há predominância de argilas e silte, enquanto que, na região próxima ao canal central e embocadura, há predominância de areias finas. Já na região oceânica há predominância de areias médias a grossas.

Os valores utilizados na modelagem são recomendados para cada tipo de sedimento pela referência técnica do SisBaHiA[®] sugeridos por ABOTT e BASCO (1989) adaptado por ROSMAN (2017), como mostrado na Tabela 1. A partir dos dados inseridos no modelo e o método de interpolação Kriging, gerou-se o mapa de rugosidade (Figura 6) através do programa para geração gráfica, Surfer 13.

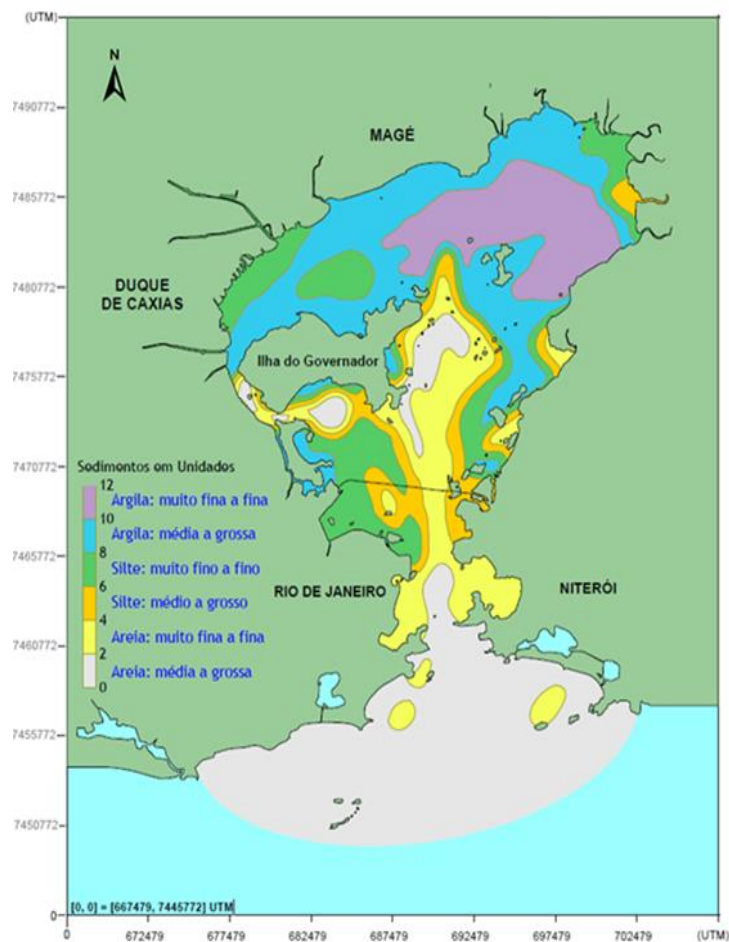


Figura 5 - Tipos dos sedimentos do fundo da Baía de Guanabara segundo distribuição mediana de Amador (2012) (Adaptada de Kaufmann, 2009).

| Leito de sedimentos com rugas e similares | Rugosidade equivalente |
|---|---|
| Predominância de siltes e finos | $0.0001 < \varepsilon < 0.0100\text{m}$ |
| Predominância de areias finas | $0.0070 < \varepsilon < 0.0150\text{m}$ |
| Predominância de areias médias | $0.0100 < \varepsilon < 0.0300\text{m}$ |
| Predominância de areias grossas | $0.0300 < \varepsilon < 0.0500\text{m}$ |

Tabela 1 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, ε , sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D. Adaptado de Abbot e Basco (1989) por Rosman (2017).

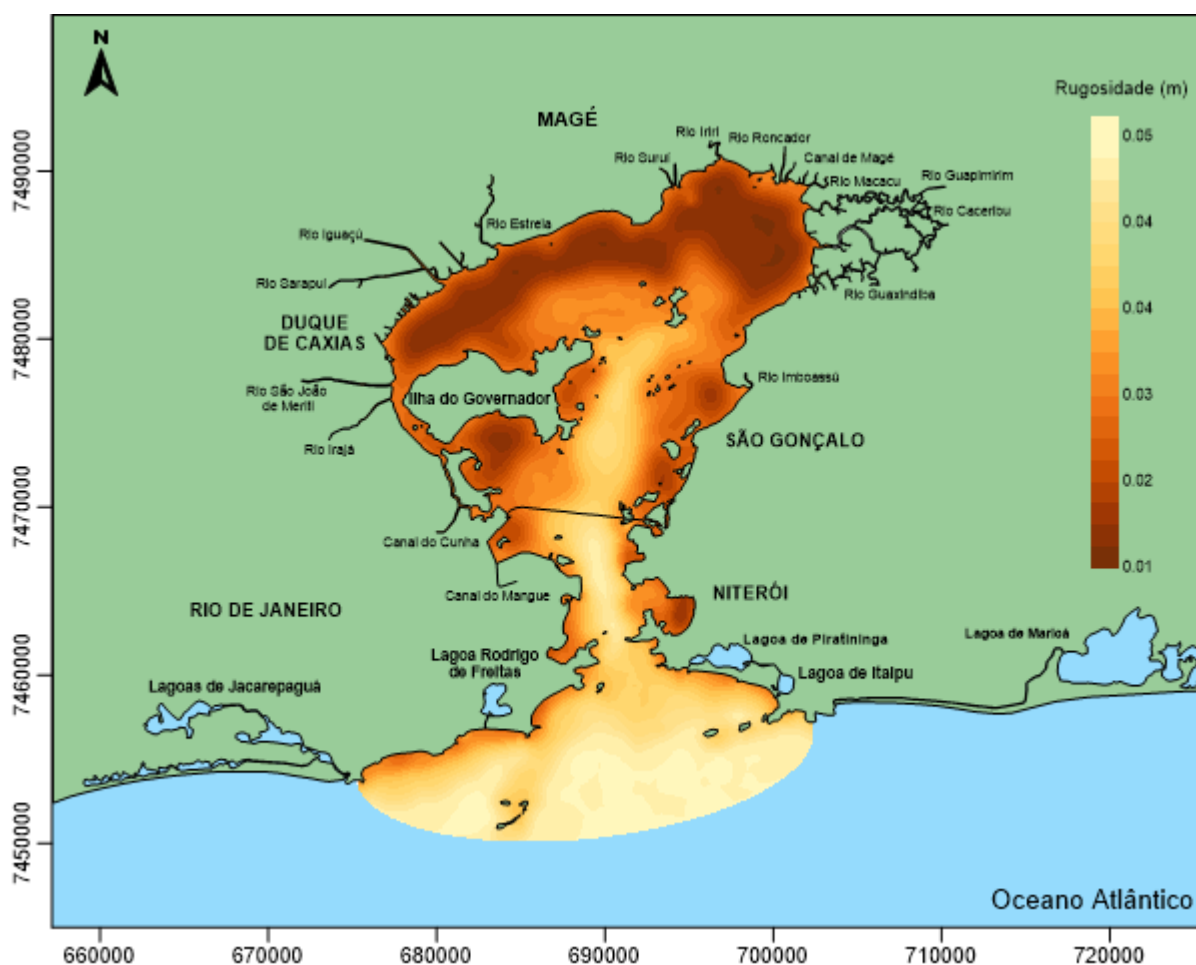


Figura 6 – Mapa da distribuição da rugosidade do fundo da Baía de Guanabara utilizada no modelo.

4.6 Cenários de Modelagem

Para um sistema estuarino como o da Baía de Guanabara prevê-se que o comportamento das marés astronômicas e meteorológicas não são os únicos fatores que influenciam na renovação da água da região. A sazonalidade das descargas fluviais e a transposição de águas também podem contribuir para uma diferença desta renovação. Para avaliar esta variação no sistema estuarino da Baía de Guanabara foram considerados dois cenários:

Cenário de Verão -utilizados dados dos meses de dezembro de 2015, janeiro e fevereiro de 2016.

Cenário de Inverno - utilizados dados dos meses de junho, julho e agosto de 2016.

4.7 Dados Ambientais

Nesta seção são descritos os dados de maré, ventos e vazões afluentes à Baía de Guanabara, utilizados na modelagem.

4.7.1 Dados de Maré

As constantes Harmônicas utilizadas no estudo foram obtidas das Tábuas de Maré da Fundação dos Estudos do Mar (FEMAR), para a estação Maregráfica do Porto do Rio de Janeiro- Ilha Fiscal.

Como a estação encontra-se dentro da Baía, foi necessária a calibração das constantes harmônicas para que estas fossem inseridas na fronteira aberta. A calibração foi realizada para a amplitude e a fase das constantes das famílias 1,2 e 4 famílias que tem maior energia na composição da maré. As constantes harmônicas calibradas para a fronteira aberta e utilizadas para a previsão da maré astronômica nos dois cenários de modelagem encontram-se listadas na Tabela 2.

| Constantes Harmônicas | | | |
|------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Constante | Período (s) | Amplitude (m) | Fase (grau) |
| M2 | 44714.16 | 0.315 | 58.38 |
| S2 | 43200.00 | 0.177 | 53.38 |
| O1 | 92949.63 | 0.092 | 166.74 |
| K1 | 86164.09 | 0.062 | 206.74 |
| K2 | 43082.05 | 0.056 | -16.62 |
| M4 | 22357.08 | 0.036 | 48.44 |
| MSf | 1275721.42 | 0.031 | 162.00 |
| MS4 | 21972.02 | 0.024 | 138.44 |
| Sa | 31556955.92 | 0.027 | 21.00 |
| Q1 | 96726.08 | 0.026 | 172.74 |
| N2 | 45570.05 | 0.026 | 139.38 |
| Mf | 1180292.34 | 0.023 | 126.00 |
| P1 | 86637.20 | 0.021 | 200.74 |
| MN4 | 22569.03 | 0.015 | 176.44 |
| Mm | 2380713.36 | 0.018 | 96.00 |
| Ssa | 15778463.36 | 0.015 | 320.00 |
| nu2 | 45453.62 | 0.015 | 128.38 |
| L2 | 43889.83 | 0.014 | 11.38 |
| mu2 | 46338.33 | 0.011 | 121.38 |
| 2N2 | 46459.35 | 0.010 | 201.38 |
| T2 | 43259.22 | 0.009 | 84.38 |
| M1 | 89399.69 | 0.007 | 151.74 |
| J1 | 83154.52 | 0.007 | 106.74 |
| MNS2 | 47258.16 | 0.007 | 90.38 |
| M3 | 29809.44 | 0.007 | 202.00 |
| OO1 | 80301.87 | 0.004 | 336.74 |
| MK3 | 29437.70 | 0.004 | 117.00 |

| | | | |
|------------|----------|-------|--------|
| SN4 | 22176.69 | 0.003 | 156.44 |
| MO3 | 30190.69 | 0.003 | 321.00 |

Tabela 2 – Constantes harmônicas calibradas para a fronteira aberta do domínio de modelagem, a partir da estação Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal).

Os dados referentes a Maré Meteorológica foram obtidos através da ferramenta de reanálise HYCOM (www.hycom.org), a qual fornece médias diárias da elevação associadas à maré meteorológica. Deste modo, foram obtidos dados para os dois cenários de modelagem referentes aos meses de Dezembro de 2015 a Fevereiro de 2016 e Junho de 2016 a agosto de 2016. A maré astronômica obtida pelas constantes harmônicas da Tabela 2 e a maré meteorológica obtida com o HYCOM pode ser observadas na Figura 7.

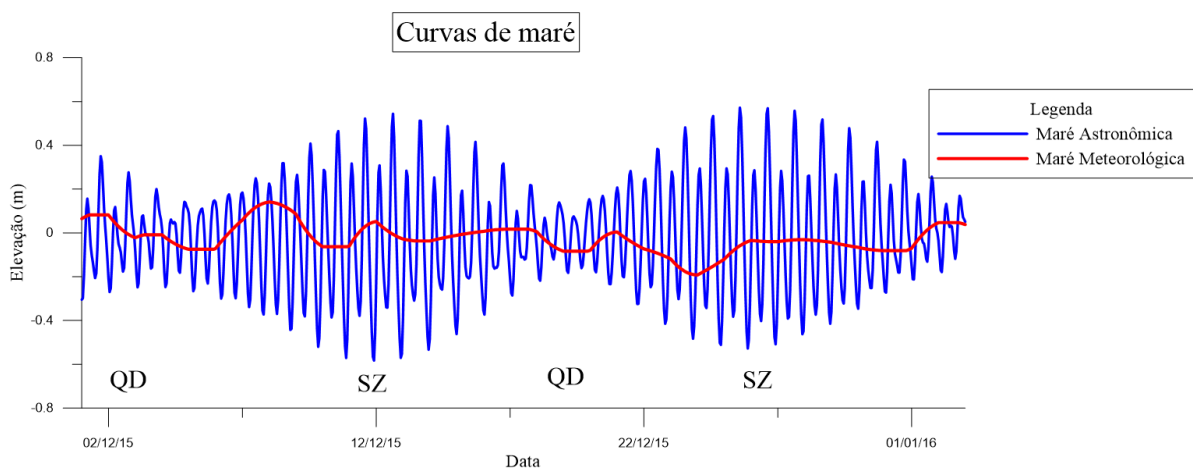


Figura 7 – Séries temporais de maré astronômica (calculada para a estação da ilha fiscal) e meteorológica (obtida pelo HYCOM) para o mês de dezembro de 2015.

A elevação inserida na fronteira aberta é composta pela soma da maré astronômica com a maré meteorológica, Figura 8 e Figura 9.

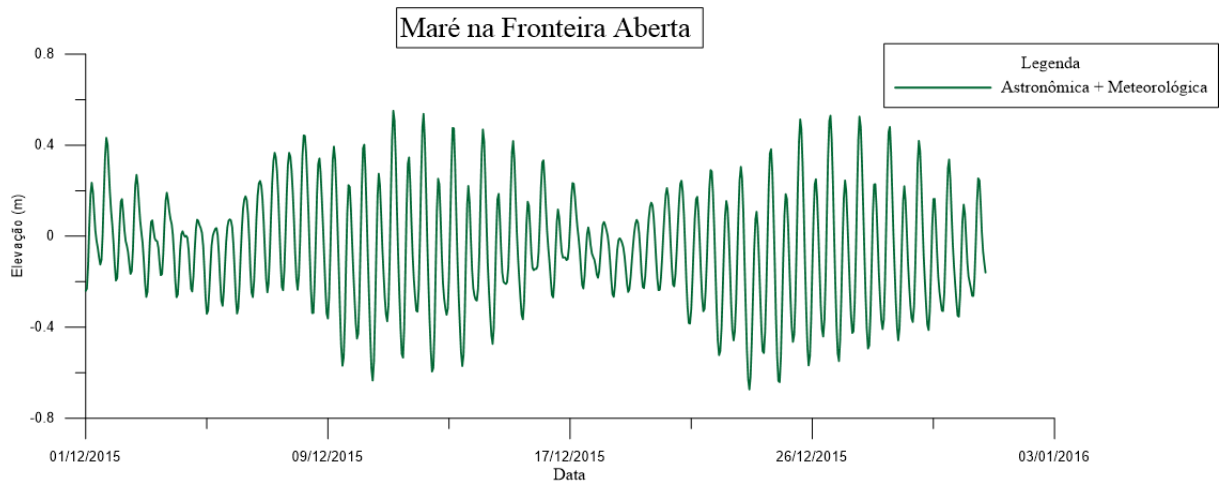


Figura 8 – Série temporal de elevação inserida na fronteira aberta no mês de dezembro de 2015.

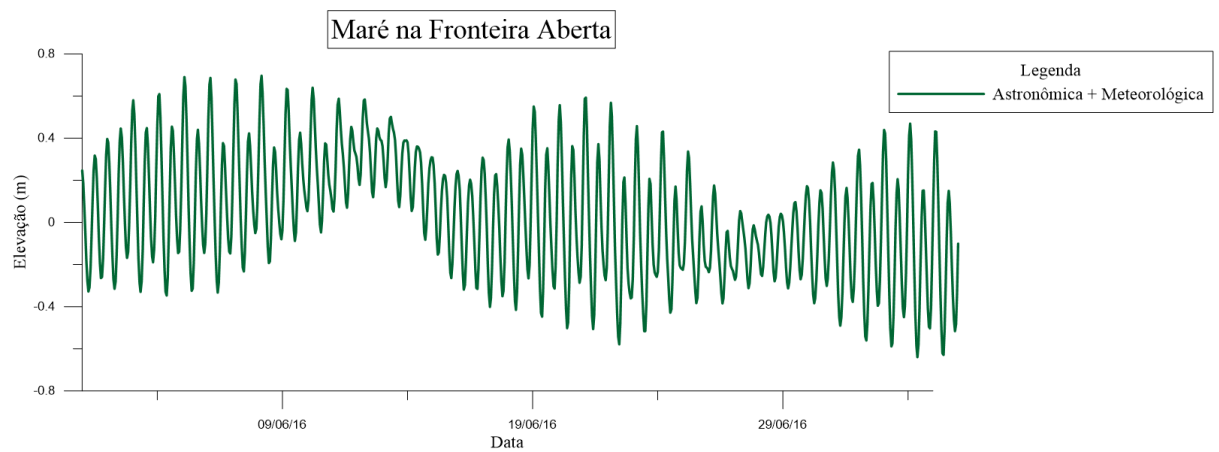


Figura 9 - Série temporal de elevação inserida na fronteira aberta no mês de junho de 2016.

4.7.2 Dados de Vento

Os dados de velocidade e direção do vento na superfície livre foram obtidos por reanálise disponibilizado pelo site ECMWF do Era-Interim. Extraiu-se dados temporais de 6 em 6 horas em 7 estações (Figura 10), para janeiro de 01/01/2016 a 31/01/2016, e julho de 01/07/2016 a 30/07/2016.

A Figura 11 e a Figura 12 ilustram os padrões de vento obtidos para os meses de dezembro de 2015 e junho de 2016.

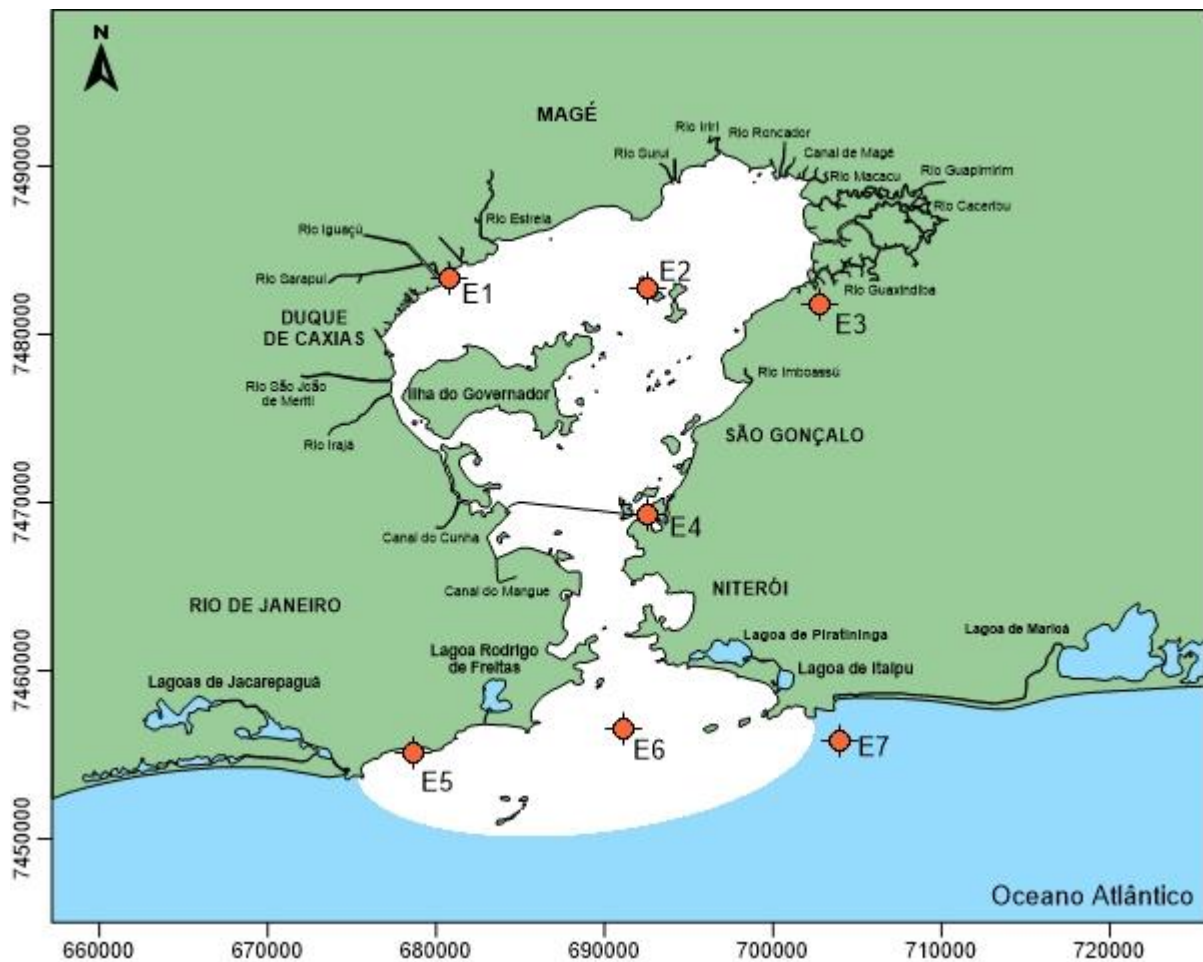


Figura 10 - Localização das estações nas quais foram obtidos os dados de vento do Era-Interim.

Dezembro de 2015

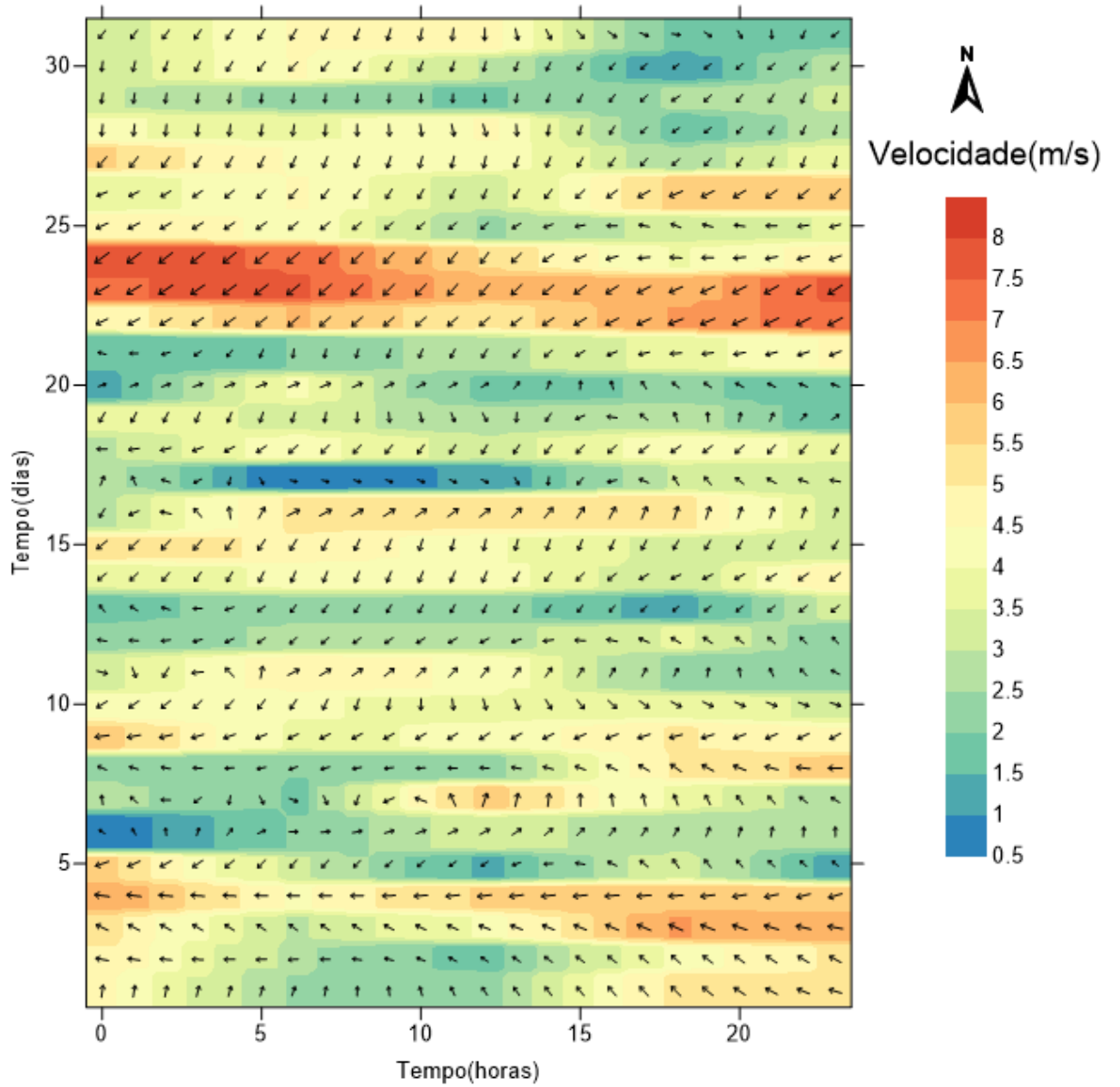


Figura 11 - Dados de vento referentes ao mês de dezembro de 2015 para a estação E6 inserida no modelo hidrodinâmico. As setas são proporcionais ao módulo da velocidade e a direção das setas indicam a direção do vento.

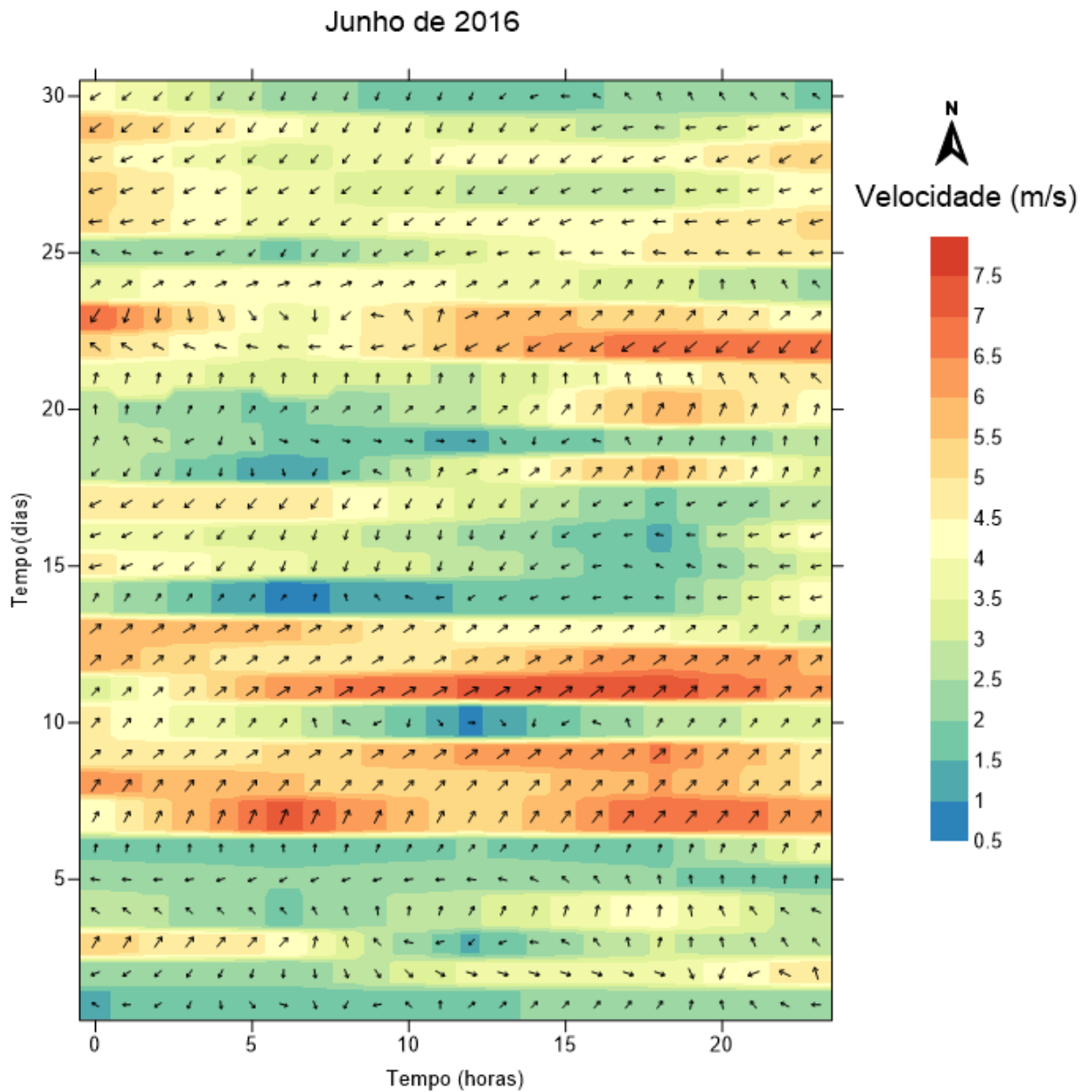


Figura 12 - Dados de vento referentes ao mês de junho de 2016 para a estação E6 inserida no modelo hidrodinâmico. As setas são proporcionais ao módulo da velocidade e a direção das setas indicam a direção do vento.

4.7.3 Correntes Costeiras Longitudinais

A fronteira aberta do modelo em questão encontra-se na zona costeira assim, além da variação da maré astronômica, é necessário a prescrição de uma Série Geradora de Nível médio diferencial (SGNMD), que irá reproduzir os efeitos de correntes residuais dissociados da maré astronômica.

A série geradora de nível médio diferencial utilizada foi obtida pelo modelo de reanálise HYCOM através do site (www.hycom.org), os valores obtidos são referentes às velocidades previstas nas proximidades da fronteira aberta. Assim, foram extraídos dados para os dois cenários de modelagem, referentes ao verão e ao inverno. Estes caracterizam as correntes Leste- Oeste que influenciam diretamente na renovação da água da Baía de Guanabara.

4.7.4 Vazão dos Rios Afluentes

Devido à falta de dados de vazões fluviais na região de interesse foi necessária a realização de um estudo de vazões.

O cálculo da vazão de cada rio presente no modelo foi realizado utilizando-se o método racional. O método estima a vazão de forma indireta, através da chuva, pela fórmula a seguir:

$$Q = CiA$$

Onde:

A= área da bacia (ha)

i= intensidade média de precipitação sobre a área drenada (mm/h)

C = coeficiente de escoamento superficial.

A área da bacia foi determinada utilizando-se a ferramenta ARCGIS e utilizando a base de dados levantadas por SILVA (2016). As intensidades médias mensais das chuvas nos períodos de verão e inverno foram obtidas através da medição da rede do sistema Alerta Rio para a cidade do Rio de Janeiro e considerada para toda a bacia hidrográfica da Baía de Guanabara. Os dados utilizados são referentes à altura de chuva (mm) média mensal considerando os anos de 1995 a 2007.

O coeficiente de escoamento superficial foi determinado para cada bacia utilizando-se o Mapa de uso e ocupação do Solo do Estado do Rio de Janeiro disponibilizado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Os valores referentes a cada tipo de superfície e uso do solo foram extraídos do relatório de Instruções Técnicas para estudos hidrológicos e projetos de drenagem na cidade do Rio de Janeiro disponibilizado pela Rio Águas. Os valores utilizados estão listados na Tabela 3.

Além da porção de água proveniente da chuva, a população do Trecho Leste da Baía de Guanabara é abastecida por água de um sistema proveniente de transposição de bacias. A cidade do Rio de Janeiro e os municípios da baixada fluminense são abastecidos pelo Sistema Guandu, o qual recebe água do Rio Paraíba do Sul através de uma transposição de vazão, contribuindo com cerca de 25m³/s de água para a Baía de Guanabara segundo KJERFVE 1997.

A água servida foi calculada para cada bacia em particular através da fórmula:

$$Q = \text{População da bacia} \times \text{Consumo Per capita} \times \text{Coeficiente de retorno}$$

A população de cada bacia foi determinada utilizando-se a ferramenta ARCGIS e os dados de População do Censo Demográfico de 2010 do IBGE. O consumo per capita considerado foi de 445 l/hab.dia considerando as perdas da concessionária (ANA), e o coeficiente de retorno adotado foi de 0.8 recomendado pela NBR 9.649 para projetos de Redes de Esgoto. O total de água servida afluente à Baía de Guanabara pelo Sistema Guandu é de 28m³/s.

A vazão total considerada no modelo para cada rio é composta pela vazão determinada pelo método racional somada à vazão de água servida em cada bacia que é abastecida pelo sistema Guandu (

| Curso d'água | C | Área (ha) | População | Água servida | Vazão média (m ³ /s) | |
|---------------------|-----|-----------|-----------|--------------------------|---------------------------------|---------|
| | | | | Vazão(m ³ /s) | Verão | Inverno |
| Canal do Mangue | 0.7 | 3905.12 | 588331 | 2.42 | 3.88 | 3.03 |
| Canal do Cunha | 0.7 | 6906.026 | 1282673 | 5.29 | 7.85 | 6.37 |
| Rio Irajá | 0.7 | 3971.452 | 415177 | 1.71 | 3.19 | 2.33 |
| Rio S. J. de Meriti | 0.7 | 15955.56 | 1857757 | 7.65 | 13.59 | 10.15 |
| Rio Sarapuí | 0.6 | 16290.94 | 1372351 | 5.65 | 10.85 | 7.84 |
| Rio Iguaçu | 0.5 | 55612.25 | 1301590 | 5.36 | 20.14 | 11.57 |

| | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|----------|---------|-------|--------|-------|
| Rio Saracuruna ou Inhomirim-Estrela | 0.5 | 35242.81 | - | - | 9.36 | 3.94 |
| Rio Suruí | 0.4 | 8460.993 | - | - | 1.80 | 0.76 |
| Rio Iri | 0.4 | 1966.913 | - | - | 0.42 | 0.18 |
| Rio Roncador | 0.4 | 11543.18 | - | - | 2.45 | 1.03 |
| Canal de Magé | 0.5 | 1647.293 | - | - | 0.44 | 0.18 |
| Bacia do Guapi-Macacu | 0.4 | 126237.3 | - | - | 26.83 | 11.28 |
| Rio Caceribu | 0.4 | 81230.21 | - | - | 17.26 | 7.26 |
| Rio Imboassú | 0.5 | 3059.349 | - | - | 0.81 | 0.34 |
| Rio Guaxindiba/Alcântarqa | 0.5 | 17536.48 | - | - | 4.66 | 1.96 |
| Total | - | 389565.9 | 6817879 | 28.09 | 123.52 | 68.22 |

Tabela 4).

Os valores inseridos no modelo são as médias das vazões dos meses considerados em cada cenário.

| <i>Tipologia da área de drenagem</i> | <i>Coefficiente de escoamento superficial</i> |
|--------------------------------------|---|
| Áreas Comerciais | 0.70 – 0.95 |
| Áreas centrais | 0.70 – 0.95 |
| Áreas de bairros | 0.50 – 0.70 |
| Áreas residenciais isoladas | 0.35 – 0.50 |
| Áreas suburbanas | 0.25 – 0.40 |
| Florestas | 0.25 -0.50 |
| Capoeiras ou pastos | 0.25 – 0.42 |

Tabela 3 – Valores de coeficiente de escoamento superficial C de acordo com as características da superfície e uso do solo da bacia de drenagem, adaptado de Rio Águas.

| Curso d'água | C | Área (ha) | População | Água servida | Vazão média (m ³ /s) | |
|-------------------------------------|-----|-----------|-----------|--------------------------|---------------------------------|---------|
| | | | | Vazão(m ³ /s) | Verão | Inverno |
| Canal do Mangue | 0.7 | 3905.12 | 588331 | 2.42 | 3.88 | 3.03 |
| Canal do Cunha | 0.7 | 6906.026 | 1282673 | 5.29 | 7.85 | 6.37 |
| Rio Irajá | 0.7 | 3971.452 | 415177 | 1.71 | 3.19 | 2.33 |
| Rio S. J. de Meriti | 0.7 | 15955.56 | 1857757 | 7.65 | 13.59 | 10.15 |
| Rio Sarapuí | 0.6 | 16290.94 | 1372351 | 5.65 | 10.85 | 7.84 |
| Rio Iguaçu | 0.5 | 55612.25 | 1301590 | 5.36 | 20.14 | 11.57 |
| Rio Saracuruna ou Inhomirim-Estrela | 0.5 | 35242.81 | - | - | 9.36 | 3.94 |
| Rio Suruí | 0.4 | 8460.993 | - | - | 1.80 | 0.76 |
| Rio Iriri | 0.4 | 1966.913 | - | - | 0.42 | 0.18 |
| Rio Roncador | 0.4 | 11543.18 | - | - | 2.45 | 1.03 |
| Canal de Magé | 0.5 | 1647.293 | - | - | 0.44 | 0.18 |
| Bacia do Guapi-Macacu | 0.4 | 126237.3 | - | - | 26.83 | 11.28 |
| Rio Caceribu | 0.4 | 81230.21 | - | - | 17.26 | 7.26 |
| Rio Imboassú | 0.5 | 3059.349 | - | - | 0.81 | 0.34 |
| Rio Guaxindiba/Alcântarqa | 0.5 | 17536.48 | - | - | 4.66 | 1.96 |
| Total | - | 389565.9 | 6817879 | 28.09 | 123.52 | 68.22 |

Tabela 4 – Valores de Vazões médias para cada período, calculadas para os principais rios da Baía de Guanabara.

5. Resultados

5.1 Modelo hidrodinâmico

Nesta seção serão apresentados os resultados do modelo hidrodinâmico para melhor entendimento da propagação da maré e da circulação hidrodinâmica na Baía de Guanabara.

O modelo simulou resultados de dezembro de 2015 até fevereiro de 2016, no período denominado verão, e de junho de 2016 até agosto do mesmo ano, para o período de inverno. Foram obtidos resultados de 30 em 30 minutos, onde podem ser gerados mapas em qualquer um desses tempos.

Os resultados como, elevação de nível do mar, velocidade e direção de corrente foram registradas em 8 estações dentro do domínio de modelagem. A Tabela 5 identifica as estações mostradas no mapa da Figura 13.

| <i>Estação</i> | <i>Localização</i> |
|----------------|---------------------------------------|
| <i>1</i> | <i>Fronteira Aberta(ao mar)</i> |
| <i>2</i> | <i>Canal Principal</i> |
| <i>3</i> | <i>Ilha Fiscal</i> |
| <i>4</i> | <i>Canal do Fundão</i> |
| <i>5</i> | <i>Ao Leste da Ilha do Governador</i> |
| <i>6</i> | <i>Noroeste da Baía de Guanabara</i> |
| <i>7</i> | <i>Norte da Baía de Guanabara</i> |
| <i>8</i> | <i>Nordeste da Baía de Guanabara</i> |

Tabela 5 – Localização das estações utilizadas para observação de resultados temporais.

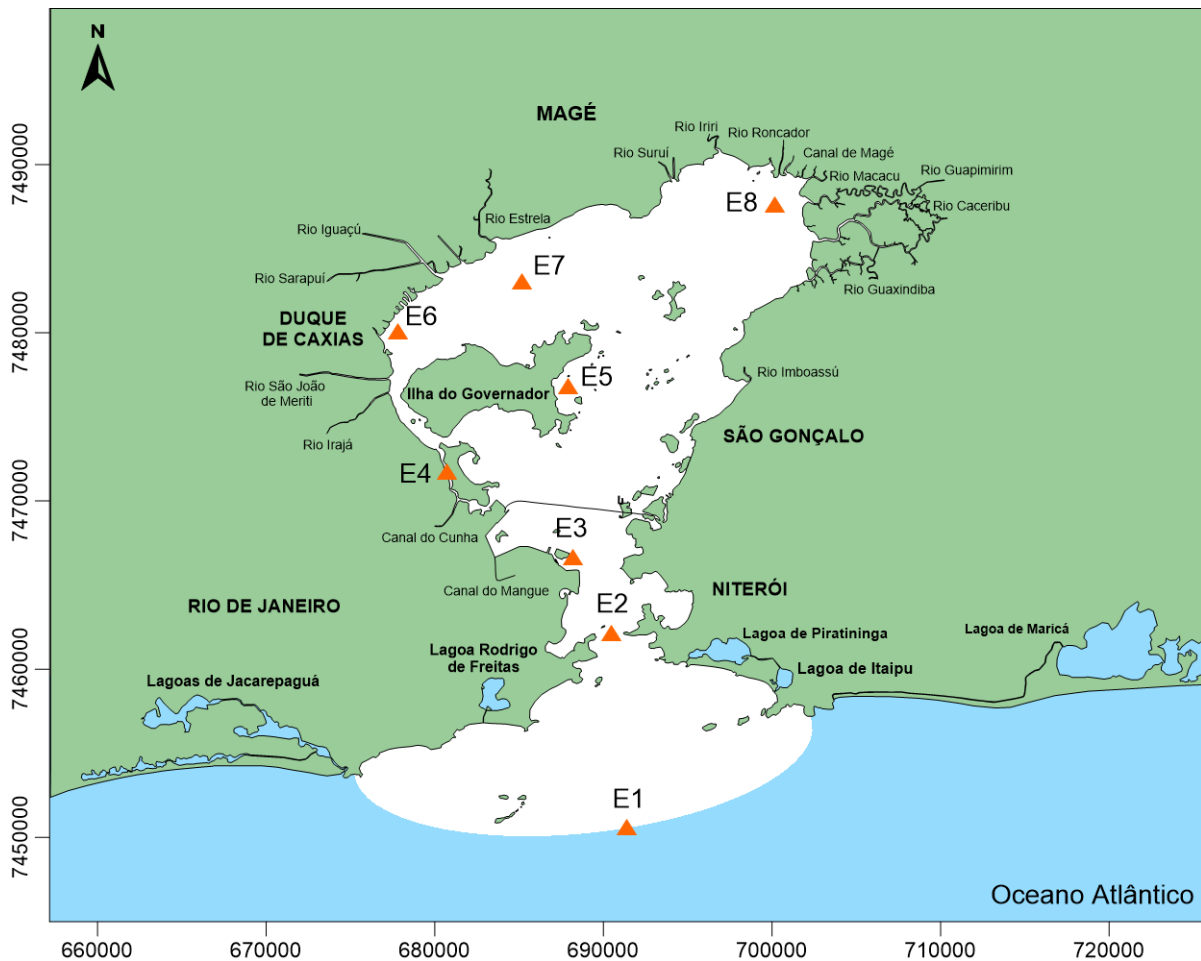


Figura 13 – Mapa das estações utilizadas para observação de resultados no modelo hidrodinâmico.

5.2 Elevação da Superfície Livre

O tempo necessário para uma onda de maré passar por duas estações é o resultado da divisão x/c , onde x é a distância entre os dois pontos e c é a velocidade de propagação da onda, também chamada de celeridade. Para águas profundas, a celeridade de uma onda pode ser calculada pela equação $C = L \times T$, onde L é o comprimento da onda e T seu período.

Ao aproximar-se da costa, uma onda de maré sofre alterações não lineares causadas pela batimetria. A força de atrito causada pelo fundo intensifica-se conforme a diminuição da profundidade. Este fenômeno resulta em uma desaceleração da propagação. Neste caso de águas rasas, a celeridade pode ser calculada,

aproximadamente, pela equação $C = \sqrt{gd}$, onde g é a aceleração da gravidade e d é a profundidade local.

Conforme a onda de maré propaga-se para dentro de uma baía ou sistema estuarino, a fricção com o fundo retira energia da onda e, conseqüentemente, diminui sua amplitude. Apesar disto, a morfologia do local pode causar múltiplas reflexões não lineares desta no seu interior e, assim, produzir interferências construtivas da onda principal de maré com suas reflexões, gerando uma amplificação da maré. Desta maneira, a magnitude da amplitude da onda no interior de uma baía ou sistema estuarino é uma competição entre os fatores: perda de energia pelo atrito e as interferências entre as ondas.

Com o objetivo de verificar como ocorre a propagação da onda de maré dentro da Baía de Guanabara foram verificados os resultados temporais de elevação da simulação em três estações adjacentes para um período de maré de sizígia (Figura 14), são estas as estações E1, E3 e E8 localizadas respectivamente na fronteira aberta, Ilha Fiscal e Fundo da Baía na Direção Nordeste.

Através da Figura 14 observa-se o fenômeno da amplificação da onda de maré ao adentrar o Sistema Estuarino da Baía de Guanabara. Tal fato expressa que a interferência construtiva entre a onda de maré e suas reflexões possuem maior influência na amplitude do que a perda de energia pelo atrito. Os estuários com esta característica são classificados como Hipersíncronos.

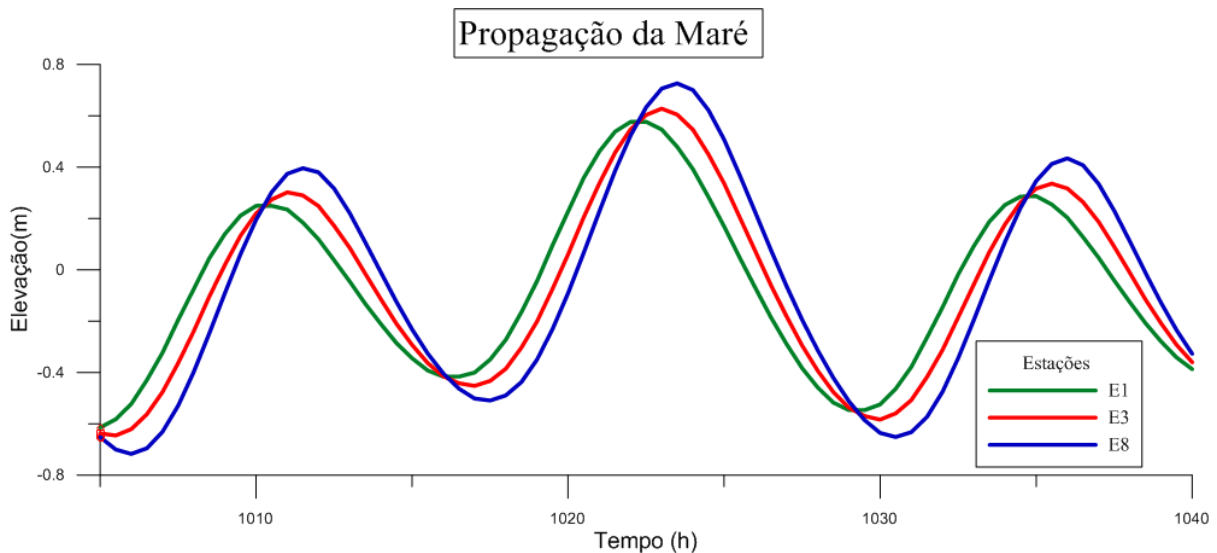


Figura 14 – Séries Temporais de elevação do nível d'água nas estações de controle da fronteira aberta E1, Ilha Fiscal E3 e Nordeste da Baía de Guanabara E8, para o período de sizígia de dezembro de 2015 compreendido entre os tempos 1005 h e 1040 h de simulação.

5.3 Caracterização da maré

No gráfico abaixo apresenta-se resultados de elevação de nível d'água e velocidade de propagação da onda de maré, obtidos na estação de referência E3 na Ilha Fiscal. Identifica-se os períodos de meia maré enchente (MME), preamar (PM), meia maré vazante (MMV) e baixa mar(BM) durante um período de sizígia compreendido entre os tempos de 1400 h e 1040 h de simulação do modelo hidrodinâmico. Observa-se que ao longo de um dia ocorrem duas preamares e duas baixa-mares que possuem uma desigualdade de amplitude caracterizando uma maré semi-diurna, com desigualdades diurnas.

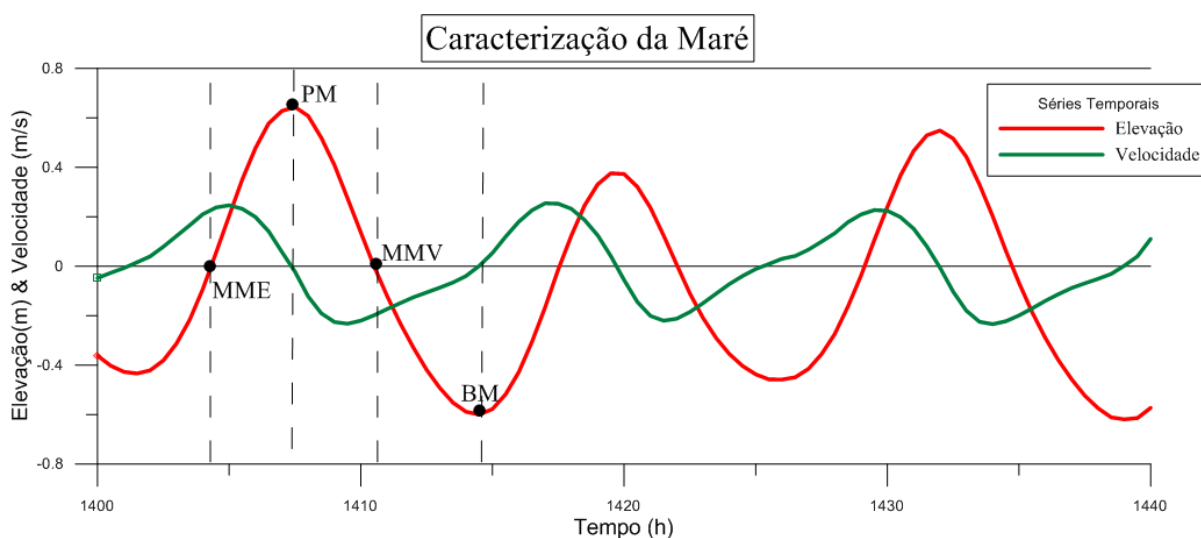


Figura 15 - Gráfico referente à elevação do nível d'água e velocidade durante o período de Sizígia no mês de janeiro de 2016 na estação de referência E3, Ilha Fiscal.

Verifica-se que nos momentos da PM e BM as velocidades são próximas de zero, enquanto que, nas MME e MMV, são próximas das máximas.

5.4 Perfis de escoamento

Para análise dos padrões de corrente, utilizou-se os períodos de registro que apresentaram as maiores amplitudes do nível d'água correspondente a um período de sizígia. A estação utilizada como referência para geração dos mapas de velocidade foi a E3 localizada na Ilha Fiscal. Para melhor entendimento dos dois cenários de simulação foram gerados mapas de Verão e Inverno.

5.4.1 Cenário de Verão

Os mapas gerados para o cenário de verão estão compreendidos entre o período de maré de sizígia de maior amplitude no 28 de janeiro de 2016. No gráfico abaixo são identificados os instantes dos mapas gerados.

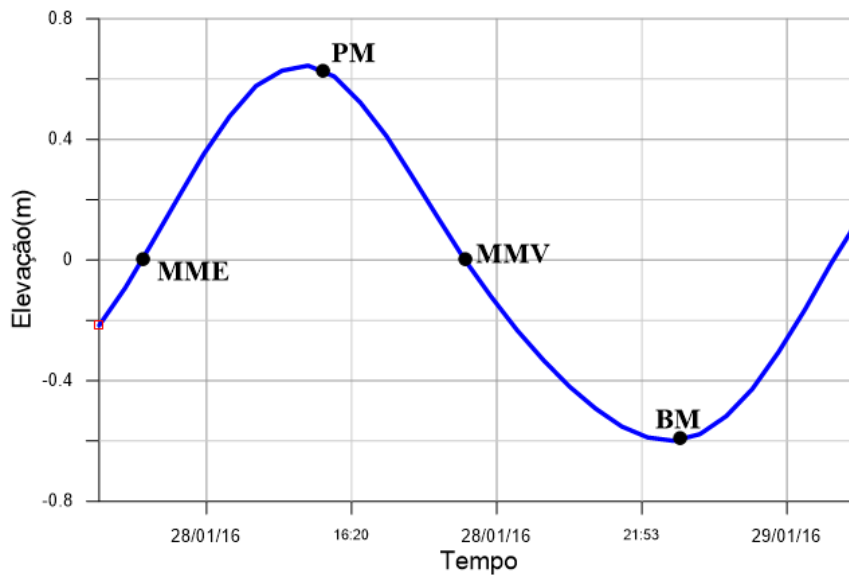


Figura 16 – Ciclo de maré de sizígia e instantes de tempo utilizados para extração de mapas de velocidade na Baía de Guanabara referente a sizígia de maior amplitude de nível d'água para a estação de referência E3- Ilha do Governador.

5.4.1.1 Meia Maré Enchente na Sizígia – Verão

Neste item são analisados os resultados do modelo hidrodinâmico para o instante de Meia Maré Enchente mostrado no gráfico da Figura 17.

Observa-se a entrada de água na Baía de Guanabara com as maiores velocidades no Canal Principal em torno de 0.7m/s no canal principal, na região costeira observa-se uma corrente predominante para Leste.

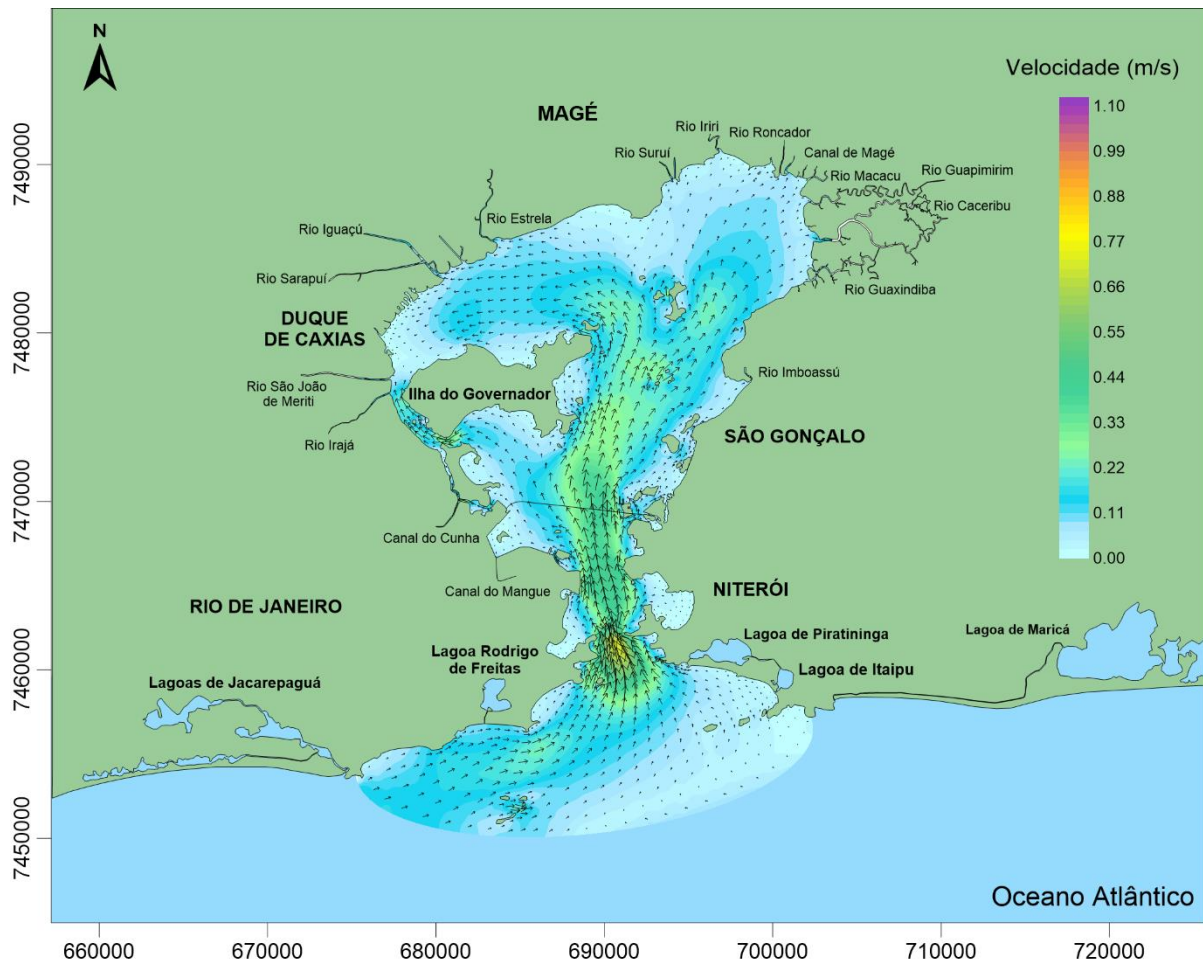


Figura 17 - Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação E3. As isolinhas representam a magnitude da velocidade das correntes e o campo de vetores indicam a direção do campo de velocidades

5.4.1.2 Preamar na Sizígia – Verão

Neste item são analisados os resultados do modelo hidrodinâmico para o instante de preamar de sizígia na estação E3- Ilha Fiscal como apresentado na Figura 17. Observa-se a diminuição da magnitude da velocidade apresentando velocidades próximas a 0 m/s na maior parte do domínio de modelagem.

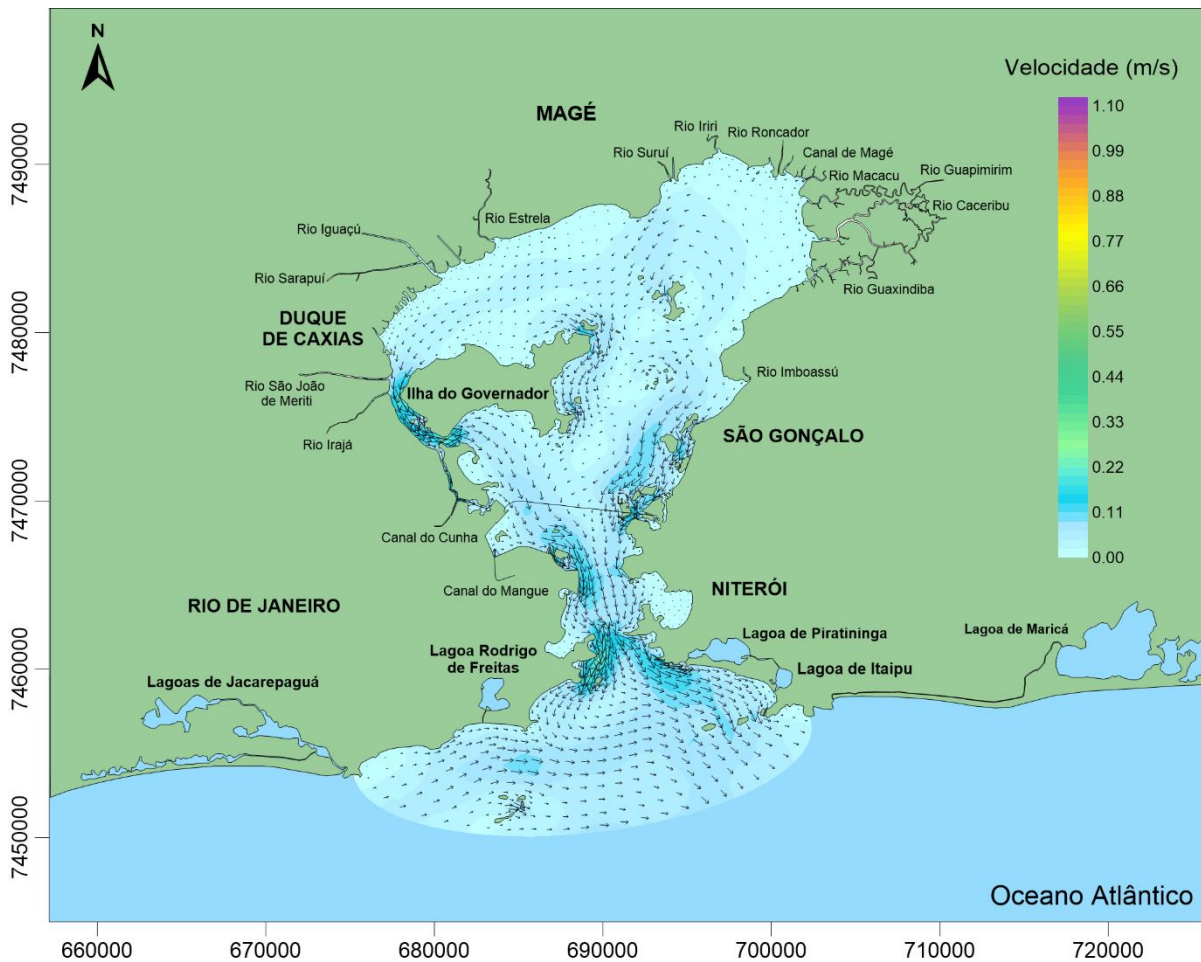


Figura 18 - Padrão de circulação referente a preamar na estação E3. As isolinhas representam a magnitude da velocidade das correntes e o campo de vetores indicam a direção do campo de velocidades.

5.4.1.3 Meia Maré Vazante – Verão

Neste item são analisados os resultados do modelo hidrodinâmico para o instante de meia maré vazante, identificado no gráfico da figura 17. Observa-se a saída de água da Baía e próximo aos rios a excursão de vazante. Neste instante são registradas as maiores velocidades devido a excursão de vazante das vazões dos rios afluentes, os pontos de maiores velocidades são registrados no canal principal com magnitude de até 1.00 m/s.

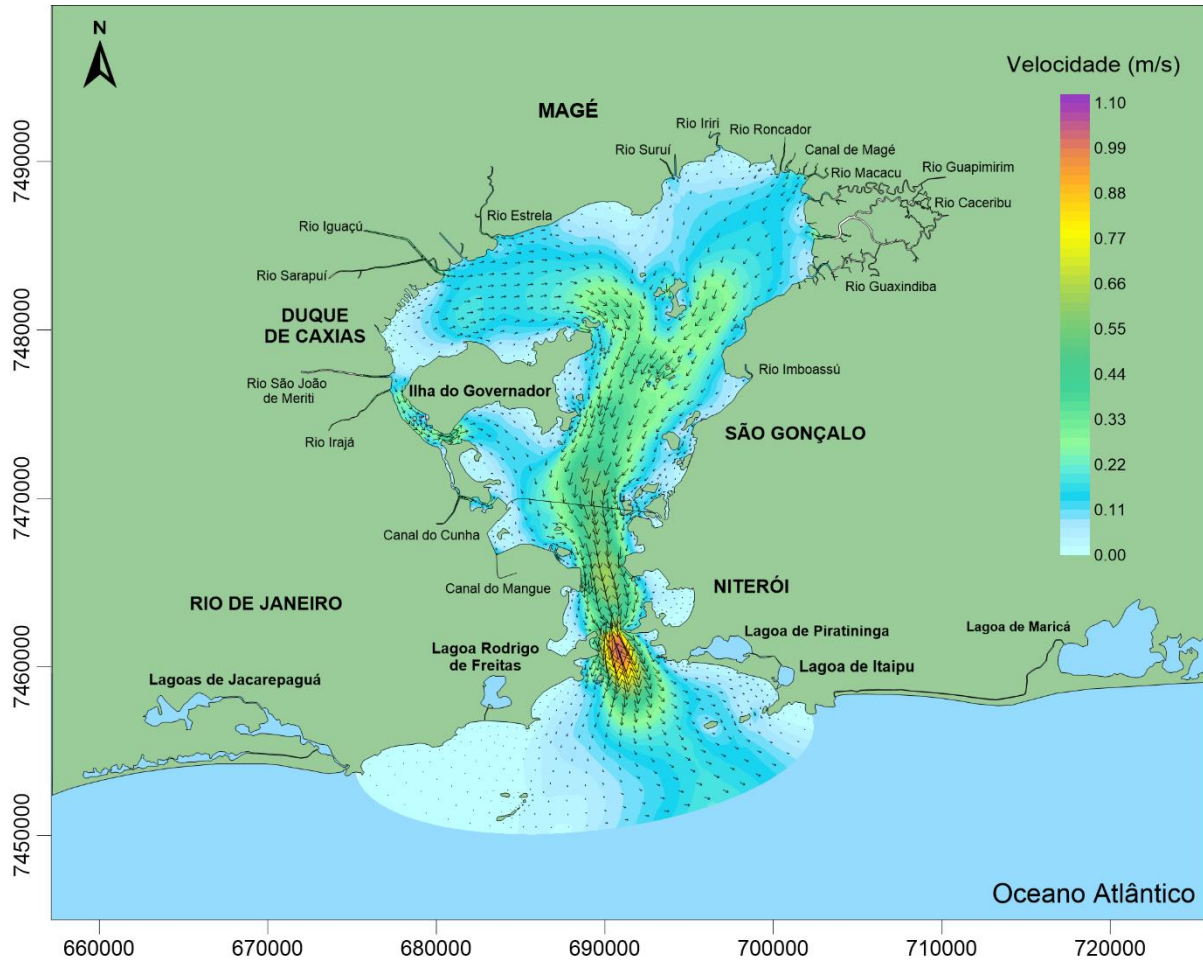


Figura 19 - Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação E3. As isolinhas representam a magnitude da velocidade das correntes e o campo de vetores indicam a direção do campo de velocidades.

5.4.1.4 Baixamar na Sizígia- Verão

Neste item são analisados os resultados do modelo hidrodinâmico para o instante de baixamar identificado pelo gráfico da figura 17. Observa-se velocidades muito próximas a 0 m/s em todo o domínio. As maiores velocidades são observadas na região costeira que possui corrente longitudinal na direção leste. Identifica-se na região do canal principal o início da inversão do sentido de correntes.

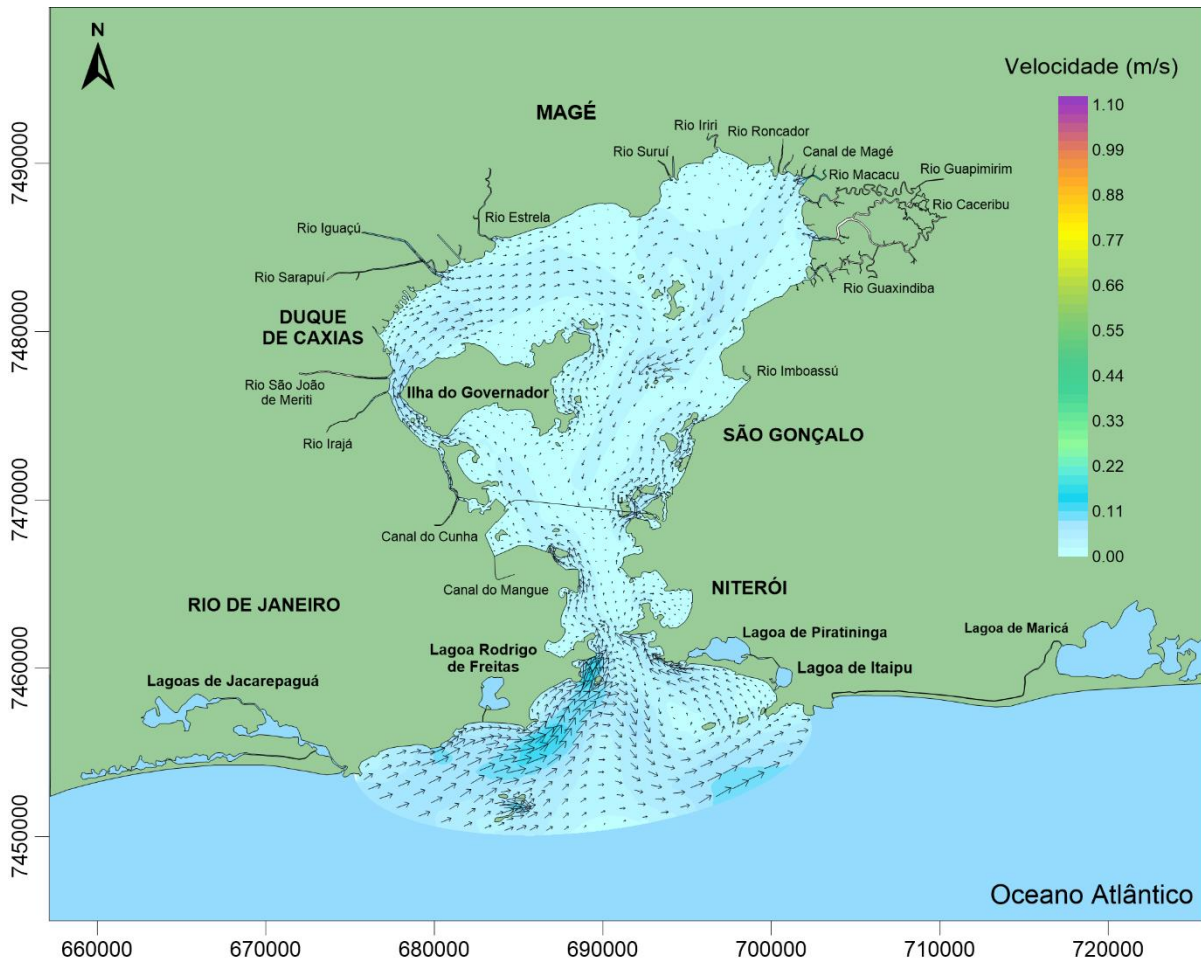


Figura 20 - Padrão de circulação referente a baixamar na estação E3. As isolinhas representam a magnitude da velocidade das correntes e o campo de vetores indicam a direção do campo de velocidades.

5.4.2 Inverno

Os mapas gerados para o cenário de inverno estão compreendidos no período de maré de sizígia de maior amplitudes de elevação, referentes ao intervalo de 21:00 h do dia 17/07/2016 às 08:30 do dia 18/07/2016. No gráfico abaixo são identificados os instantes dos mapas gerados.

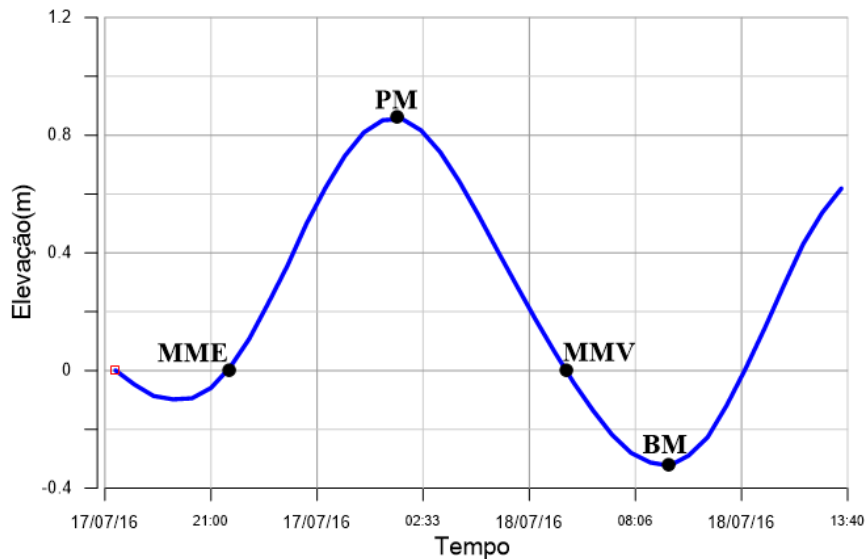


Figura 21 - Ciclo de maré de sizígia e instantes de tempo utilizados para extração de mapas de velocidade na Baía de Guanabara referente a sizígia de maior amplitude de nível d'água para a estação de referência E3- Ilha do Governador.

5.4.2.1 Meia Maré Enchente na Sizígia- Inverno

Neste item são analisados os resultados do modelo hidrodinâmico na Meia Maré Enchente (Figura 17). Observa-se a entrada de água na Baía de Guanabara com as maiores velocidades no Canal Principal possuindo magnitude máxima de 0.91m/s, na região costeira observa-se uma corrente predominante para Leste com intensidade maior que a corrente no período de verão.

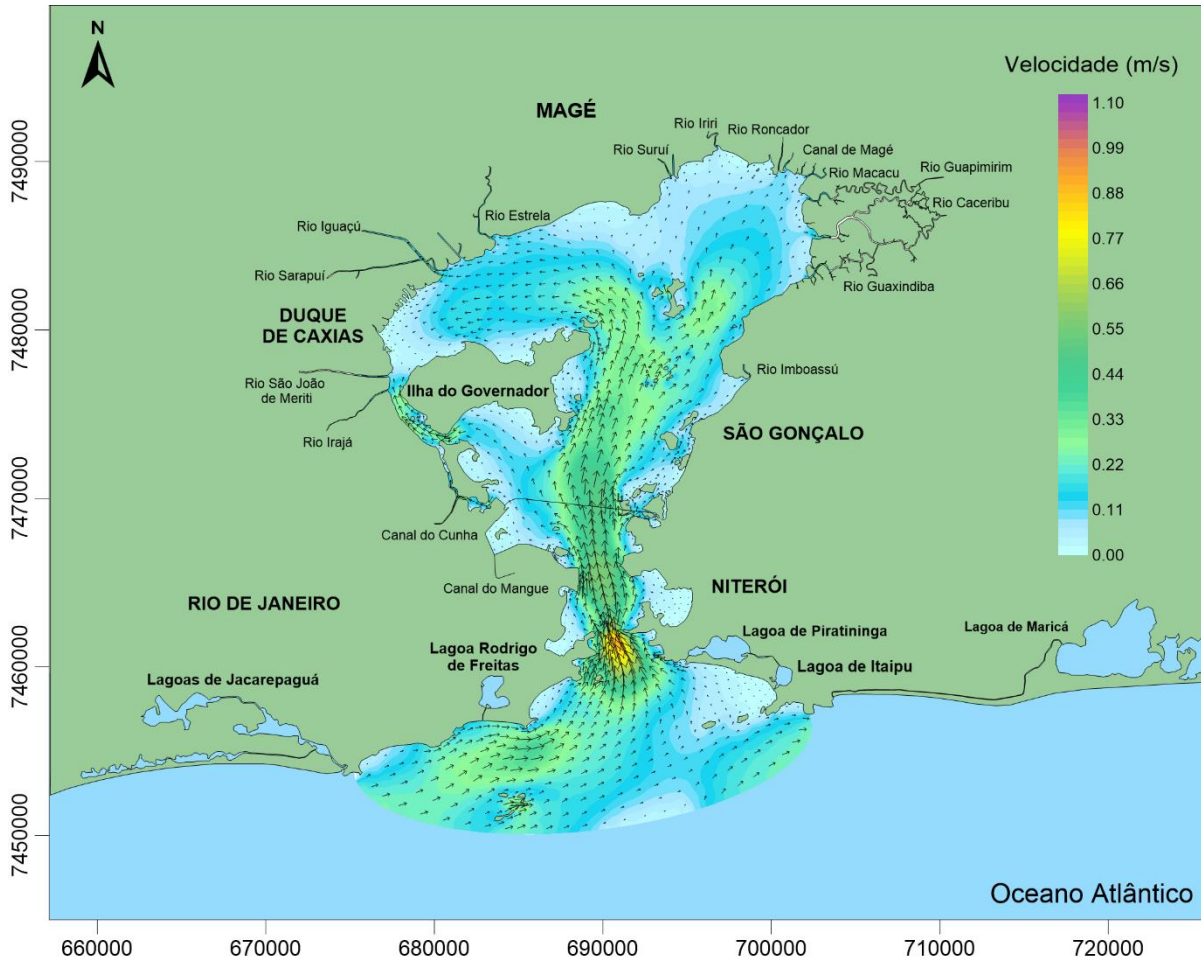


Figura 22 - Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação E3 para o período de inverno. As isolinhas representam a magnitude da velocidade das correntes e o campo de vetores indicam a direção do campo de velocidades.

5.4.2.3 Meia Maré Vazante na Sizígia- Inverno

Neste item são analisados os resultados do modelo hidrodinâmico para o instante de meia maré vazante, identificado no gráfico da figura 17. Neste instante são registradas as maiores velocidades devido a excursão de vazante das vazões dos rios afluentes, os pontos de maiores velocidades são registrados no canal principal com magnitude de até 1.0/s.

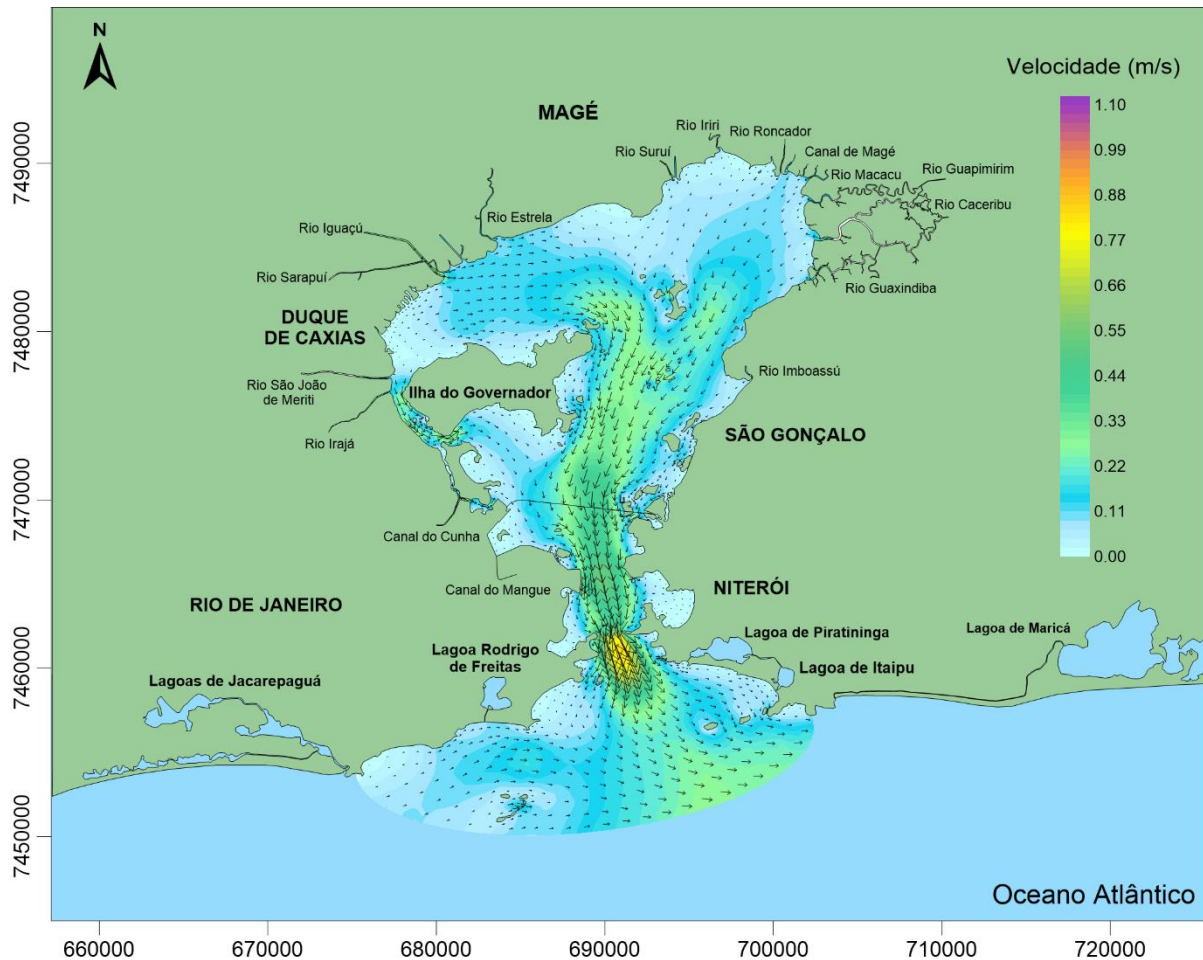


Figura 24 - Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação E3 para o período de inverno. As isolinhas representam a magnitude da velocidade das correntes e o campo de vetores indicam a direção do campo de velocidades.

5.4.2.4 Baixamar na Sizígia – Inverno

Neste item são analisados os resultados do modelo hidrodinâmico para o instante de referente à baixamar na estação E3- Ilha Fiscal identificado no gráfico da figura 17. Observa-se velocidades muito próximas a 0 m/s no interior na Baía com uma velocidade residual de vazante na região do canal principal. As maiores velocidades são observadas na região costeira que possui corrente longitudinal na direção leste.

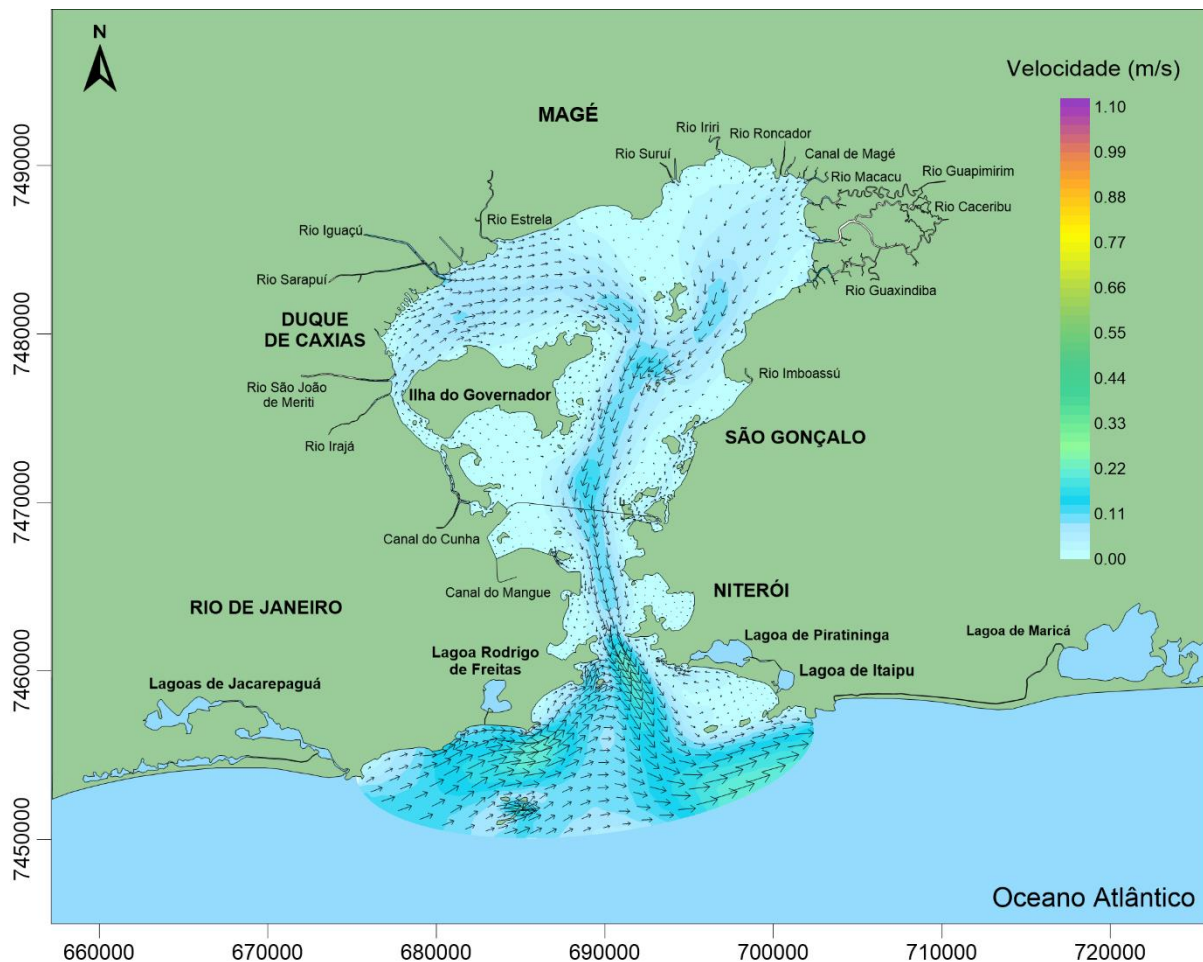


Figura 25 - Padrão de circulação referente a baixamar na estação E3 para o período de inverno. As isolinhas representam a magnitude da velocidade das correntes e o campo de vetores indicam a direção do campo de velocidades

5.5 Modelos Eulerianos

Nesta seção serão mostrados os resultados dos modelos de Taxa de Renovação e Idade da Água, de forma comparável, entre os períodos de verão e inverno para posterior discussão.

Tanto os modelos de Taxa de Renovação quanto os de Idade da Água gravaram resultados de três em três horas, desde o início da simulação, para o período de verão e de inverno. Desse modo, é possível visualizar resultados em cada um desses momentos.

5.5.1 Modelo de Taxa de Renovação

No instante inicial do modelo de Taxa de Renovação, toda água dentro da área de interesse da Baía foi marcada concentração da substância de referência igual a zero, enquanto as águas novas que entram pelos rios e pela fronteira aberta foram marcadas como água nova com concentração 100 conforme a condição inicial mostrada na Figura 26.

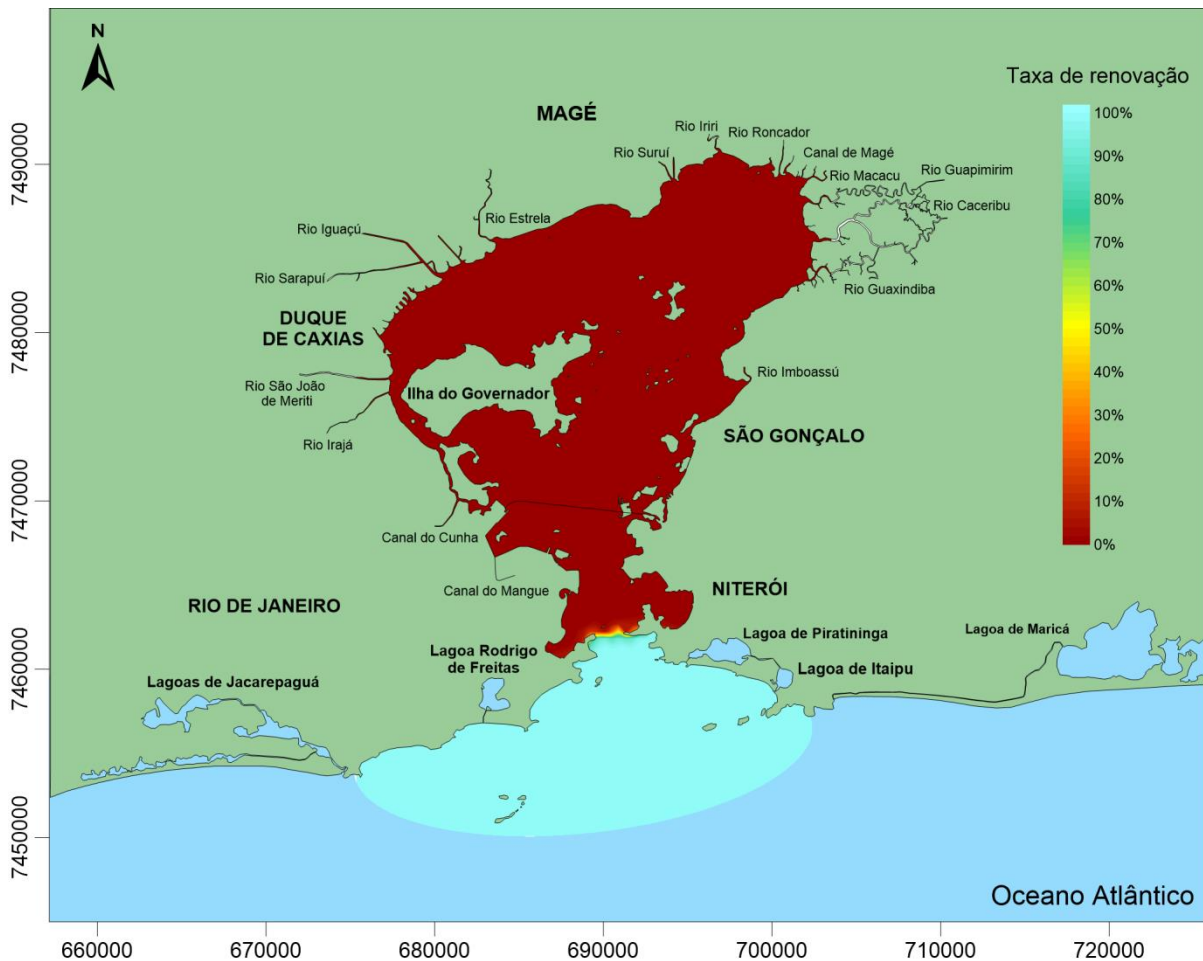


Figura 26 – Condição Inicial utilizada no modelo de Taxa de Renovação das águas da Baía de Guanabara.

A seguir são apresentados os resultados do modelo de Taxa de Renovação nos cenários de verão e inverno para tempo de simulação de 90 dias. Os resultados são apresentados em forma de mapas com isolinhas indicativas da porcentagem de água renovada e também na forma de séries temporais para estações pré-definidas.

Os mapas mostram que ocorre renovação mais rápido nas regiões próximas a entrada da Baía e próximo a embocadura de alguns rios de grande vazão como na porção Leste aos fundos, próximo a embocadura da Bacia Guapi-Macacu, e na porção noroeste ao fundo, próximo a embocadura dos Rios Iguazu e São João de Meriti. A renovação de água nessas regiões já pode ser observada na primeira semana de simulação.

As regiões onde são observadas as menores renovações de água são: região leste da Ilha do Governador, Norte da Baía de Guanabara aos fundos e Canal do Fundão. A região central é a que menos sofre renovação, após um mês de simulação observa-se regiões com renovação abaixo de 10%.

Após 90 dias todo o sistema apresenta renovação maior de 30% no verão e 20% no inverno.

As séries temporais mostram a diferença de sazonalidade dos períodos de verão e inverno. Observa-se maior diferença entre cenários nas regiões mais internas e que sofrem maiores influencias das vazões fluviais, como por exemplo a região Nordeste que apresenta renovação de 75% o verão e 50 % no inverno. A região Noroeste, onde desaguam os rios Iguazu e Sarapuí sofre renovação de 83% no verão e 77% no inverno.

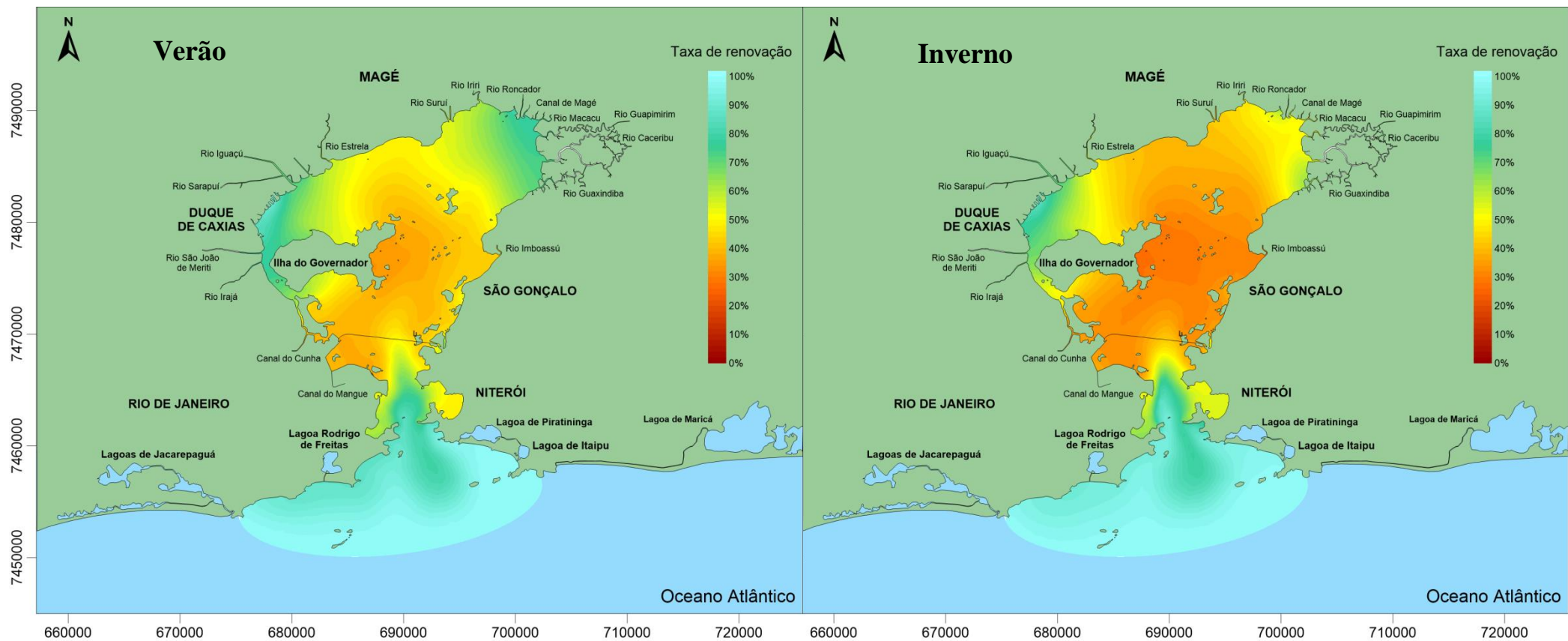


Figura 28- taxa de renovação das águas após 90 dias de simulação para os períodos de verão (esquerda) e inverno (direita).

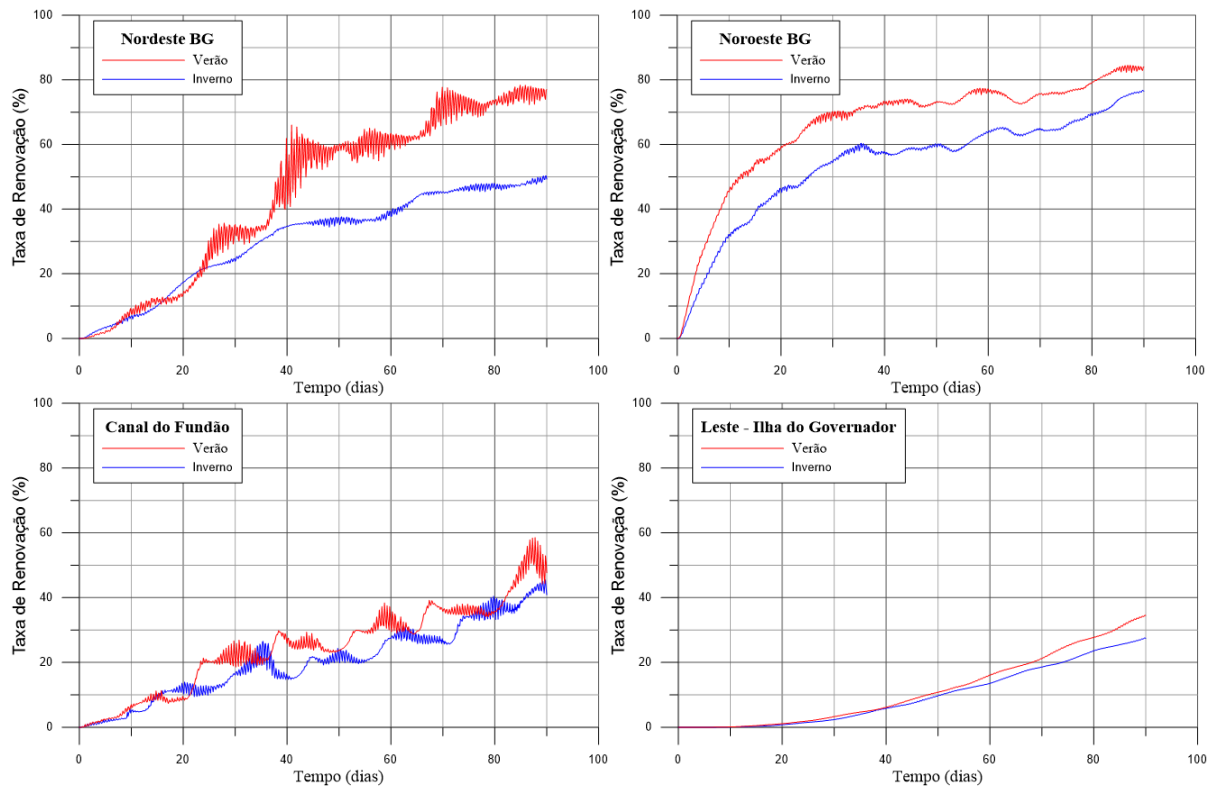


Figura 29 – Séries Temporais de taxa de renovação para os períodos de verão (vermelho) e inverno (azul). Valores apresentados em porcentagem ao longo de 90 dias. A localização dos pontos pode ser observada na Figura 13.

5.5.2 Idade da Água

No instante inicial do modelo de Idade da Água, admite-se para toda a região de interesse uma concentração inicial igual a 1 da substância que sofrerá decaimento, consequentemente a idade da água é igual a 0 em todo o domínio. As águas novas que entram pelos rios afluentes e pela fronteira aberta de mar também possuem concentração igual a 1 com idade igual a 0. A medida que o tempo de simulação passa a concentração da substância decai de acordo com a taxa de decaimento utilizada, correspondente ao tempo de modelagem, sendo igual a 3 meses.

5.5.3 Estabilização da Idade da Água

Visto que a idade da água em determinados locais pode ser maior do que o tempo de modelagem, optou-se, para a obtenção de resultados mais próximos da realidade, rodar o modelo mais de uma vez, utilizando os resultados do anterior como condições iniciais.

Para verificar a dispensabilidade de outra simulação pelo modelo, analisou-se a estabilização da idade da água na região que apresentou os maiores valores na primeira

simulação, referente a estação E5 localizada a Leste da Ilha do Governador, Figura 13. Foi necessário para o período de inverno três ciclos de simulação, enquanto para o verão foram necessários apenas dois. A estabilização da idade da água é observada quando esta oscila em torno de um valor central, como observa-se na Figura 30.

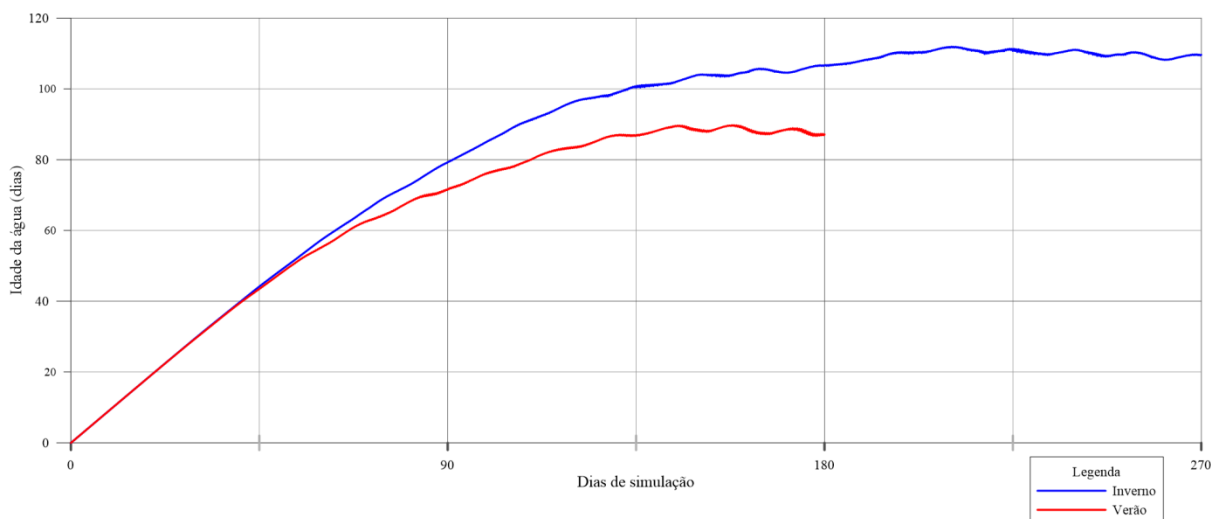


Figura 30 - Série Temporal de Idade da Água para os períodos de verão e inverno, referente à estação E5 localizada a Leste da Ilha do Governador. O período de verão foi rodado por dois ciclos e o de inverno por três.

Os resultados do modelo de Idade da Água podem ser observados nos mapas abaixo para os períodos de verão e inverno. Os mapas da Figura 31 mostram os locais no domínio de interesse cujas águas possuem idade inferiores a uma semana, 15 dias, um mês e dois meses. Observa-se um padrão entre os cenários de verão e inverno, onde as águas mais novas estão próximas as cabeceiras dos rios, no fundo da Baía nas regiões nordeste e noroeste, e na zona costeira próxima ao canal principal. No verão a renovação nessas regiões é mais intensa e pode ser observada a partir de um mês de simulação enquanto no inverno observa-se águas mais novas neste mesmo local a partir de dois meses. Percebe-se a diferença entre a sazonalidade de verão e inverno, as águas na porção central da Baía possuem idade de dois meses, significando que a maior parte da água que se encontrava dentro da Baía de Guanabara após dois meses não terá saído do sistema.

Figura 31- Mapas de Idade da Água para os períodos de verão e inverno, indicativo dos locais onde pode existir água com idade inferior a 1 semana, 15 dias, 1 mês e 2 meses. As isolinhas coloridas correspondem a probabilidade de ocorrência de águas com idade inferior à indicada em cada mapa.

Durante o verão e o inverno a idade da água na região central do sistema é em torno de 110 dias, sendo a região com águas mais velhas ao Leste da Ilha do Governador. Próximo aos rios a idade da água média é em torno de 30 dias no verão e 40 dias no inverno como mostra os mapas da Figura 32.

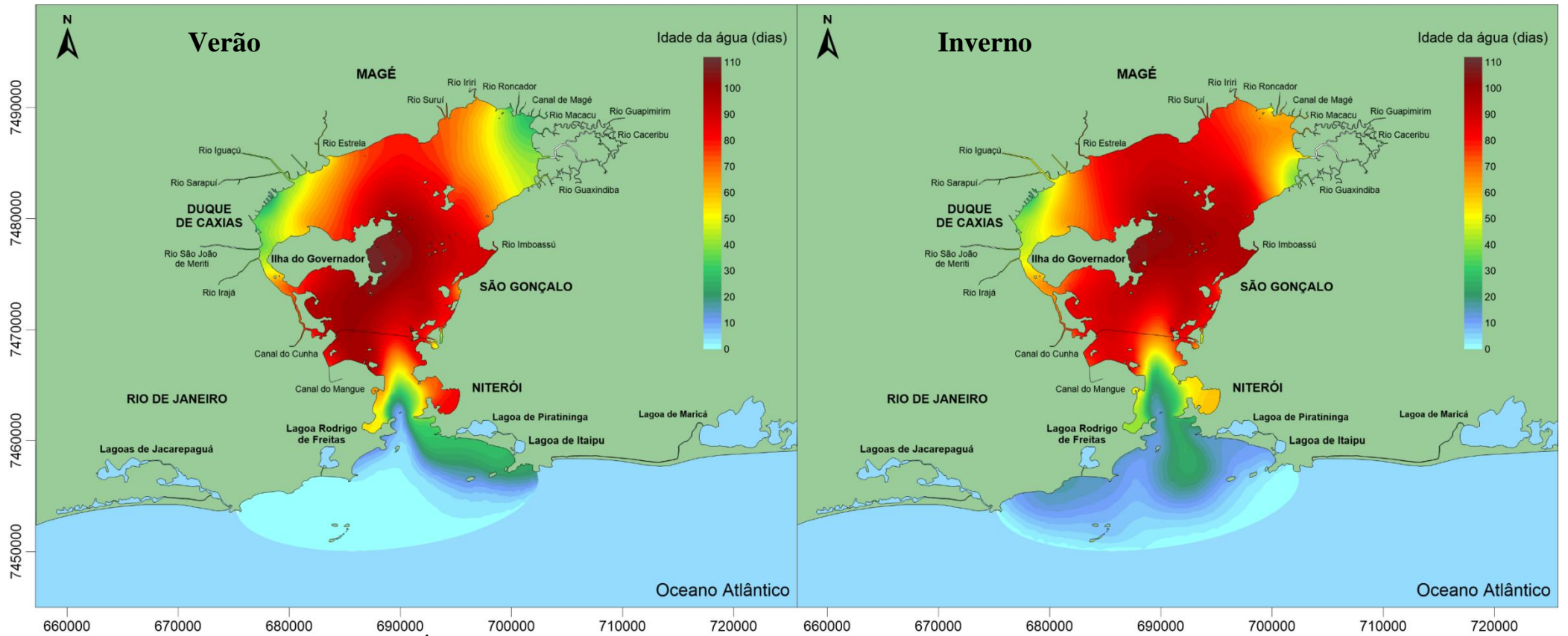


Figura 32 - Idade de Água da Baía de Guanabara para os períodos de verão e inverno, modelo de verão rodado por dois ciclos e modelo de inverno rodado por três ciclos. Verifica-se, principalmente para o cenário de verão, a corrente costeira de oeste para leste.

6. Discussão

Por apresentar uma grande heterogeneidade na circulação hidrodinâmica, é evidente que as regiões do sistema estuarino não demonstram as mesmas taxas de renovação e idades da água. Além disso, a intensidade das descargas fluviais é o fator responsável para que haja uma entrada de água nova na Baía. Por esse motivo, as sazonalidades das descargas pluviais, entre verão e inverno, apresentam grande efeito na renovação já que nos meses de verão ocorrem chuvas mais intensas aumentando a vazão dos rios e conseqüentemente o aporte de água à Baía de Guanabara.

A Figura 28 demonstra isolinhas de taxa de renovação para o período de três meses no inverno e verão, onde é possível verificar a influência dos rios e da ligação com o mar na troca de águas dentro da Baía. A partir desta figura é possível perceber a variação espacial da taxa de renovação. Nota-se que, conforme aproxima-se dos rios e da ligação com o oceano, as taxas de renovação são maiores.

Ao analisar os gráficos da Figura 29 constata-se, mais uma vez, a variação espacial das taxas de renovação, onde os locais mais próximos dos rios e da ligação com o oceano possuem grande renovação em três meses e, os locais mais centrais ou longe de rios relevantes, como a estação da Ilha do governador, apresentam renovação consideravelmente menor.

Outro fato notável nos gráficos da Figura 29, principalmente o da estação “Nordeste BG”, é a grande influência das marés de sizígia na taxa de renovação. No que mostra o gráfico da figura 30, as maiores renovações de água ocorrem durante as sizíguas da maré. Este fenômeno está associado com a maior entrada e saída de água no sistema estuarino causada pelas maiores amplitudes de marés e as maiores velocidades que ocorrem na MME e MMV como observado nos resultados do modelo hidrodinâmico, na Figura 15 - Gráfico referente à elevação do nível d’água e velocidade durante o período de Sizígia no mês de janeiro de 2016 na estação de referência E3, Ilha Fiscal.. Desse modo, é possível classificar a maré presente no sistema estuarino da Baía de Guanabara como mista com tendências estacionárias pois, no momento das estofas de maré (preamar e baixamar), as velocidades são próximas de zero e, durante as meias marés enchentes e meias marés vazantes, são próximas das máximas. Enquanto marés

estacionárias se caracterizam pela reflexão de sua onda dentro do estuário e, desse modo, podem causar aumento da magnitude das amplitudes, as progressivas são definidas pelo oposto e são incapazes de causar tal efeito. A maré na Baía de Guanabara é considerada mista com tendências estacionárias e sua amplitude aumenta à medida que se adentra ao sistema estuarino.

A partir da Figura 32 é possível visualizar a variação espacial da idade da água no interior e exutório do sistema estuarino para o período de verão e o de inverno.

Ao verificar os locais onde é possível haver idades da água inferiores a uma semana, 15 dias, um mês e dos meses, na Figura 31 e a Figura 32, é possível perceber que os locais onde a água possui maior idade são no centro da Baía, afastados dos rios e da ligação com o oceano. Além disso, no verão as idades são, de forma geral, inferiores às do inverno. A partir destas duas observações fica evidente a grande influência, não só da ligação com o mar, mas também dos rios e suas sazonalidades para a renovação das águas deste sistema.

Ainda a partir da Figura 32, principalmente para o caso do verão, é possível verificar a grande influência das correntes costeiras na renovação de água no estuário. A água com maior idade, que sai do estuário quando este está em uma vazante, é transportada lateralmente pela corrente costeira chegando as praias adjacentes, quando o estuário retorna a encher, este recebe águas novas.

Os resultados observados vão de encontro a resultados de estudo de qualidade da água na Baía que mostram que as regiões com pior qualidade da água são as regiões ao fundo da Baía, embora os resultados de taxa de renovação mostrem na porção leste e oeste maior renovação das águas, essa renovação se dá devido às vazões dos Rios, rios estes que aportam à Baía grande carga orgânica proveniente das regiões não esgotadas.

7. Conclusão

O modelo 2DH foi capaz de fornecer resultados comparáveis do transporte de massas para ambos os cenários de modelagem.

A partir dos mapas gerados no modelo hidrodinâmico é possível concluir que a metodologia foi aplicada de forma satisfatória e está de acordo com os fenômenos físicos dominante no sistema estuarino da Baía de Guanabara. Ainda sobre este modelo, conclui-se que:

- A maré amplifica-se no interior do estuário, caracterizando-o como Hipersíncrono;
- A maré é classificada como mista, com tendências à estacionária;
- As velocidades máximas são encontradas no canal principal, nos períodos de MME e MMV e seus valores mais altos são próximos de 1m/s;
- As velocidades mais baixas são encontradas perto das margens e no interior do sistema estuarino, principalmente nas preamares e baixa-mares caracterizando uma maré estacionária.

A partir dos resultados obtidos nos Modelos Eulerianos é facilmente perceptível que a análise de Tempo de Residência não seria capaz de expressar resultados minimamente próximos da realidade, o que está de acordo com o que se espera para um ambiente tão heterogêneo. Sobre os resultados dos Modelos Eulerianos de Idade da Água e Taxa de Renovação conclui-se que:

- O sistema estuarino da Baía de Guanabara é um ambiente extremamente retentor de substâncias sendo, por este motivo, extremamente vulnerável ao despejo contínuo de poluentes;
- São necessários mais que 90 dias para que toda água dentro da Baía de Guanabara se renove;
- Tanto os rios quanto a ligação com o oceano são os principais mecanismos de renovação da água;
- Os locais com águas mais velhas e, conseqüentemente, com menos renovação estão situados próximos ao centro da Baía;
- Durante o verão, por possuir maior descarga fluvial, a renovação se dá de forma mais rápida do que no inverno;

- A corrente costeira longitudinal possui grande influência na renovação das águas, visto que esta é responsável pela maior renovação da praia de São Francisco em Niterói durante o inverno.

8. Considerações Finais

Recomenda-se, para um estudo futuro, a análise por uma perspectiva Lagrangeana do Tempo de Residência. Diferentemente do cálculo do Tempo de Residência frequentemente utilizado, a perspectiva Lagrangeana é capaz de apresentá-lo com uma visão espacial, constatando quanto tempo a água de cada local leva para sair da área de interesse.

Recomenda-se também o acoplamento de modelos de qualidade de água para a análise do efeito do lançamento de esgotos domésticos neste sistema estuarino.

9. Referências Bibliográficas

ABNT- NBR 9649 **Projetos de redes coletoras de esgoto sanitário** ,Rio de Janeiro,1986.

AMADOR, E.,2012, **Bacia da Baía de Guanabara: Características geoambientais, formação e ecossistemas**. Rio de Janeiro, Interciência.

COELHO,V.,2007,**Baía de Guanabara: uma história de agressão ambiental**.1ed.Rio de Janeiro, Casa da Palavra.

AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS-ANA. **Conjuntura dos Recursos hídricos**. 2017,Brasília,DF. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em junho de 2017.

FALKENBERG,A, **Estudo da dispersão, mistura e qualidade da água do complexo Estuarino de Paranaguá com uso de modelagem numérica**. Tese de M.sc, UFPR, Pontal do Sul, PR,Brasil,2009.

FUNDAÇÃO DOS ESTUDOS DO MAR- FEMAR. **Catálogo de estações maregráficas brasileiras**. Rio de Janeiro,2000.

KAUFMANN,C, **Estudo Hidrodinâmico e de Qualidade de Água após Revitalização da Circulação do Canal do Fundão. Baía de Guanabara - RJ**. Tese de M.sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,Brasil,2009.

KJERFVE,et.al, “Oceanographic characteristics of na impacted coastal bay:Baía de Guanabara, Rio de Janeiro,Brazil.”**Pergamon**,v17,n 13,pp 1609-1643,1997.

KJERFVE,et.al,2002.**Princípios de Oceanografia Física de Estuários**,Ed acadêmica,São Paulo,EDUSP.

PRICHARD,D,1955.**Padrões de Circulação Estuarina**,Johns Hopkins University, Chesapeake Intitute.

ROSMAN,P.C.C. **Referência Técnica do SisBAHIA-Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ,2017.

ROVERSI,F, **Estudo Hidrodinâmico e de renovação das águas dos sistema estuarino de Santos**. Tese de M.sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,Brasil,2012.

SAMPAIO,M, **Estudo de circulação Hidrodinâmica 3D e trocas de massas d'água da Baía de Guanabara**. Tese de M.sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,Brasil,2003.

SILVA,F, **Um arcabouço para o desenvolvimento de Sistemas de Apoio à Decisão para Gestão de Recursos Hídricos**. Tese de D.sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,Brasil,2016.