



ANÁLISE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DE ÁGUA
NA BAÍA DE GUANABARA VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Verônica Silveira de Andrade

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: José Paulo Soares de Azevedo
Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

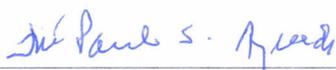
Junho de 2018

ANÁLISE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DE ÁGUA
NA BAÍA DE GUANABARA VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Verônica Silveira de Andrade

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.

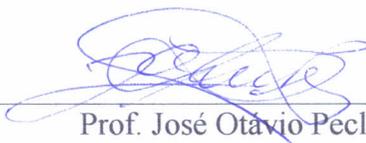
Examinada por:



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



Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.



Prof. José Otávio Pecly, D.Sc.



Prof. Ana Silvia Pereira Santos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2018

Andrade, Verônica Silveira de

Análise de Hidrodinâmica Ambiental e de Qualidade de Água na Baía de Guanabara via Modelagem Computacional / Verônica Silveira de Andrade – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 122 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: José Paulo Soares de Azevedo

Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 117-122.

1. Baía de Guanabara. 2. Modelagem Hidrodinâmica Ambiental. 3. Modelagem de Qualidade da Água. I. Azevedo, José Paulo Soares de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“A persistência é o menor caminho do êxito“

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram e contribuíram, de alguma forma, durante a elaboração desta dissertação.

Em especial, agradeço a Deus, pela vida a mim concedida. Obrigada por ser meu guia, seja qual for meu caminho. Na sua força, eu me sustento, pois sei que tudo é possível para aquele que crê.

Aos meus pais, Maria de Lourdes e Sebastião, meus exemplos de vida. A minhas irmãs Valeriana e Veridiana, pelo companheirismo. Obrigada pelo mais sincero amor e por apoiarem minhas escolhas.

Ao Matheus Ferreira, pela constante companhia e apoio incondicional. Obrigada por ter compartilhado meus sucessos e incertezas durante esta caminhada.

Aos meus orientadores, Paulo Colonna Rosman e José Paulo Soares de Azevedo, por aceitarem me acompanhar ao longo desta empreitada. Agradeço pela paciência, ensinamentos e por confiarem no meu trabalho.

Aos meus amigos da COPPE, por todo companheirismo, momentos de alegria e palavras de conforto. Em especial aos amigos da área de Engenharia Costeira, que tanto contribuíram para melhoria deste trabalho.

À Fernanda Rocha Thomaz, pela paciência e atenção que teve ao me ajudar nas estimativas das vazões.

Ao Flávio José Lyra Silva, por tão gentilmente ceder as bases de dados consistidas da Baía de Guanabara e as rotinas de navegação no QGIS, para colaboração neste trabalho.

À CAPES, pela bolsa concedida durante os dois anos de mestrado.

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

ANÁLISE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DE ÁGUA NA BAÍA DE GUANABARA VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Verônica Silveira de Andrade

Junho/2018

Orientadores: José Paulo Soares de Azevedo

Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Civil

A compreensão dos processos que influenciam a qualidade de água em sistemas estuarinos é fundamental para orientar políticas de gestão ambiental. Esses ambientes, quando em zonas urbanas, podem ser fortemente impactados por ações antrópicas. Nesse sentido, este trabalho explora o uso de modelagem computacional para ampliar o conhecimento sobre o sistema estuarino da Baía de Guanabara (BG). O estudo foi realizado por meio de simulações computacionais de circulação hidrodinâmica, análises de tempos hidráulicos característicos e de qualidade da água com a utilização de modelos do SisBaHiA (www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Os resultados das simulações hidrodinâmicas detalham bem os padrões de circulação na BG, em conformidade com dados conhecidos. Os modelos de Taxas de Renovação e Idade da Água mostram como as trocas de massas de água na BG variam no tempo e no espaço. Estes modelos apontam que as águas permanecem no interior na Baía por um longo período de tempo. Por fim, os Modelos de Qualidade da Água detalharam distribuições espaço temporais de DBO, OD, compostos de fósforo e de nitrogênio, cujo conhecimento restringe-se a dados coletados em tempos irregulares em localidades esparsas. Os resultados modelados foram comparados com limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para classe 2. Nessa análise, a região oeste da BG foi apontada com piores resultados para DBO, OD e Nitrogênio. Nesse último, sugerem-se novos estudos com dados medidos de todos seus compostos inorgânicos. Nas análises de fósforo total, quase toda extensão da BG encontra-se em desacordo com os parâmetros da legislação. Em geral, os resultados refinam e ampliam estudos mais genéricos, como a Pontuação de Saúde Ambiental gerada no Projeto de Recuperação Ambiental (PRA-Baía). Para ampliar a confiabilidade dos modelos, e sua aplicação como ferramenta de gestão, recomenda-se o uso de modelos computacionais de forma integrada ao monitoramento de dados.

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

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL HYDRODYNAMICS AND WATER
QUALITY IN THE GUANABARA BAY VIA COMPUTATIONAL MODELING

Verônica Silveira de Andrade

June/2018

Advisors: José Paulo Soares de Azevedo

Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Civil Engineering

The understanding of the processes that influence the quality of water in estuarine systems is key to guiding environmental management policies. These environments, when in urban areas, can be strongly impacted by anthropic actions. In this sense, this work explores the use of computational modeling to increase knowledge about the estuarine system of Guanabara Bay (BG). The study was carried out through computational simulations of hydrodynamic circulation, analysis of characteristic hydraulic times and water quality with models from SisBaHiA (www.sisbahia.coppe.ufrj.br). The results of the hydrodynamic simulations detail circulation patterns in BG in accordance with known data. The Renewal Rate and Water Age models show how exchanges in BG water mass vary in time and space. These models point out that the waters remain inland on the Bay for a long period of time. Finally, the Water Quality Models detailed spatial time distributions of BOD, OD, phosphorus and nitrogen compounds, whose knowledge is restricted to data collected at irregular times in sparse locations. The results were compared with the limits of CONAMA Resolution n° 357/2005 for class 2. In this analysis, the western region of the BG was indicated with worse results for BOD, OD and nitrogen. It is advised new studies with measured data of all its inorganic compounds of nitrogen. In the analysis of total phosphorus, almost all extension of the BG is in disagreement with the parameters of the legislation. In general, the results refine and broaden more generic studies, such as the Environmental Health Score generated in the Projeto de Recuperação Ambiental (PRA-Bahia). In order to increase the reliability of the models, and their application as a management tool, it is recommended to use computer models in an integrated way to the data monitoring.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 SISTEMAS ESTUARINOS.....	4
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	5
2.2.1 Baía de Guanabara	5
2.2.2 Ações e Programas para Melhoria da Qualidade Ambiental na BG	9
2.3 TEMPOS HIDRÁULICOS CARACTERÍSTICOS	11
2.4 MODELOS COMPUTACIONAIS NO ESTUDO AMBIENTAL	12
2.5 ESTUDOS DE MODELAGEM REALIZADOS DA BAÍA DE GUANABARA	14
2.6 QUALIDADE DE ÁGUA: PARÂMETROS IMPORTANTES E LEGISLAÇÃO	18
2.6.1 Oxigênio Dissolvido (OD)	21
2.6.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	22
2.6.3 Nutrientes	23
2.6.4 Salinidade e Temperatura.....	24
3 METODOLOGIA	25
3.1 MODELO COMPUTACIONAL	25
3.1.1 Modelo Hidrodinâmico	26
3.1.2 Modelo de Transporte Euleriano Advectivo-Difusivo (MTEAD).....	30
3.1.3 Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA).....	32
3.2 MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO.....	33
3.2.1 Domínio de Interesse.....	33
3.2.2 Malha de Discretização	35
3.2.3 Batimetria	36
3.2.4 Tipos de Sedimentos do Fundo	38
3.3 MODELO HIDRODINÂMICO	39
3.3.1 Cenários de Modelagem.....	39
3.3.2 Dados Ambientais	40
3.4 MODELOS DE TEMPOS HIDRÁULICOS CARACTERÍSTICOS	53
3.4.1 Taxa de Renovação	53

3.4.2	Idade da Água.....	54
3.5	MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA	55
3.5.1	Dados Meteorológicos.....	56
3.5.2	Cenários de Modelagem.....	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	ANÁLISES DE PADRÕES DE SALINIDADE	63
4.2	ANÁLISES DOS MODELOS HIDRODINÂMICOS	71
4.2.1	Propagação da Maré	71
4.2.2	Caracterização da Maré	71
4.2.3	Sobre efeitos de Pressão Baroclínica	72
4.2.4	Padrões de Circulação Hidrodinâmica	73
4.2.4.1	Cenário de Inverno	73
4.2.4.2	Cenário de Verão.....	82
4.3	ANÁLISES DOS MODELOS DE TEMPOS CARACTERÍSTICOS	91
4.3.1	Taxa de Renovação	91
4.3.2	Idade da água.....	99
4.4	ANÁLISES DOS MODELOS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	105
4.4.1	DBO e OD	106
4.4.2	Nutrientes	109
5	CONCLUSÕES	114
6	RECOMENDAÇÕES	116
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Dimensões Baía de Guanabara, valores obtidos de medições feitas em imagens de 2017 no Google Earth.	6
Figura 2.2 - Localização da Baía de Guanabara, com destaque para a RHBG e para a área de drenagem da Baía.	7
Figura 2.3 - Limites da RHBG, com destaque para municípios que a integram.	8
Figura 2.4 - Limites da Área de Drenagem da Baía de Guanabara, destaque para municípios que integram a bacia.	9
Figura 2.5 - Evolução da DBO ao longo do tempo, com destaque para DBO ₅ e DBO _{última} . (Fonte: Von Sperling (2005))	23
Figura 3.1 - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, Tela Inicial.	26
Figura 3.2 - Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência e, U _i , é a velocidade promediada na vertical	27
Figura 3.3 - Contornos utilizados para delimitação do domínio de modelagem.....	35
Figura 3.4 - Malha de discretização do domínio da modelagem para a Baía de Guanabara, com as informações resumidas dos dados da malha de discretização em elementos finitos.....	36
Figura 3.5 - Batimetria utilizada pelo modelo no domínio de modelagem, referida ao Nível Médio do Mar, que tem cota 0,7m acima do NR da CN 1512..	37
Figura 3.6 - Caracterização da amplitude da rugosidade de fundo (ϵ) equivalente a granulometria descrita.	39
Figura 3.7 - Comparação entre a série temporal de elevação do nível de água devido à maré astronômica na Ilha Fiscal e resultados obtidos pelo modelo, para um período de 25 dias.	42
Figura 3.8 - Séries temporais de elevação da maré astronômica combinada à maré meteorológica, para inverno e verão.	43
Figura 3.9 - Destaque para pontos onde se tem entrada de vazão no modelo.	45
Figura 3.10 - Estações fluviométricas utilizadas no estudo, e suas respectivas bacias hidrográficas de influência.	47
Figura 3.11 - Localização das 7 estações do ERA-Interim utilizadas para extração de dados de ventos de reanálise.	50
Figura 3.12 - Rosa dos ventos, de inverno e verão, nas estações P2, dentro da BG, e P8, fora da BG. O eixo radial indica a frequência de ocorrência de velocidades e direções; o eixo polar indica a direção do vento e a escala de cor a intensidade da velocidade.	51
Figura 3.13 - Condição inicial fornecida aos modelos de salinidade, para inverno e verão.	53
Figura 3.14 - Condição inicial imposta no modelo de Taxa de Renovação.....	54
Figura 3.15 - Condição inicial imposta para o Modelo de Idade da Água.....	55
Figura 3.16 - SisBaHiA, caminho para MQA utilizado.	56
Figura 3.17 - Estações de medição do Inea usadas para geração de condição de contorno no MQA.	57

Figura 3.18 - Etapas e cálculos efetuados com os grids para obter o valor percentual que é ilustrado nos resultados.	60
Figura 4.1 - Mapa de estações de controle para gravação e exibição de resultados temporais dos modelos, com informações gravadas a cada trinta minutos.	61
Figura 4.2 - Ciclos de maré escolhidos para representar o padrão de distribuição de correntes na Baía no inverno, em instantes de PM, MMV, BM, MME em marés de sizígia e de quadratura. 62	
Figura 4.3 - Ciclos de maré escolhidos para representar padrões de distribuição de correntes na Baía no verão, em instantes de PM, MMV, BM, MME em marés de sizígia e de quadratura. ..	63
Figura 4.4 - Setores definidos por Santos (2015), pontos representam os locais de medição. (Adaptado de Santos (2015)).....	65
Figura 4.5 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de sizígia no inverno, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Note que para as mesmas condições fluviais (inverno), não há uma variação significativa da salinidade dentro da BG durante o ciclo de maré. A salinidade também não varia muito em comparação com a quadratura (Figura 4.6).	67
Figura 4.6 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de quadratura no inverno, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Nessa ilustração também se nota que, para as mesmas condições fluviais (inverno), não há uma variação significativa da salinidade dentro da BG, e também em comparação com a sizígia (Figura 4.5).....	68
Figura 4.7 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de sizígia no verão, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Durante as condições fluviais de verão, também não houve uma variação significativa da salinidade ao longo de um ciclo de maré, e em comparação com a quadratura (Figura 4.8). No entanto, perceba que a salinidade no verão foi um pouco menor que no inverno (Figura 4.5).....	69
Figura 4.8 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de quadratura no verão, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Nessa ilustração também se nota que, para as mesmas condições fluviais (verão), não há uma variação significativa da salinidade dentro da BG, e também em comparação com a sizígia (Figura 4.7).	70
Figura 4.9 - Séries temporais de elevação do nível d'água nas estações de controle Ponto Externo à Baía, Ponte Rio-Niterói e Baía Nordeste, para um ciclo de maré nas primeiras 25 horas de simulação.....	71
Figura 4.10 - Tendência à maré estacionária na estação Ponte Rio-Niterói. Séries temporais de elevação e de velocidade de correntes para uma maré de sizígia em dezembro de 2016, na estação Ponte Rio-Niterói.	72
Figura 4.11 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Esse instante de maré apresenta baixas vazões dentro da Baía, pois se trata de um momento de inversão de correntes, no qual é interessante notar a formação de vórtices dentro da Baía. Nota-se ainda que, dentro da BG, esse instante possui correntes similares ao mesmo instante da quadratura (Figura 4.15).	74
Figura 4.12 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Nesse instante, pode-se observar o momento de maiores velocidades na BG durante a vazante da maré. Comparando com a MMV de quadratura (Figura 4.16), nota-se que na sizígia as intensidades das correntes são muito maiores.	75

Figura 4.13 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Assim como a PM, a BM também é um instante de inversão de correntes, logo, e vê-se velocidades baixas na BG, e similares ao que se vê no mesmo instante na quadratura (Figura 4.17).....	76
Figura 4.14 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Na enchente, momento de entrada de maré na BG, a velocidade assume seus maiores valores. Aqui também se observa velocidades bem mais elevadas que na MME de quadratura (Figura 4.18).	77
Figura 4.15 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Comparando com a PM de sizígia (Figura 4.11), nota-se que não há muita diferença nas magnitudes das correntes dentro da BG.....	78
Figura 4.16 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Repare, que quando comparado com o mesmo instante em uma sizígia (Figura 4.12), a quadratura apresenta menores intensidades de correntes.....	79
Figura 4.17 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Assim como a PM, a BM também é um instante de inversão de correntes e apresenta velocidades baixas dentro da BG, sendo similar na quadratura e sizígia (Figura 4.13).....	80
Figura 4.18 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. O instante de MME de quadratura possui velocidades mais baixas se comparado com o mesmo instante na sizígia (Figura 4.14).	81
Figura 4.19 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Note as baixas velocidades devido a inversão de correntes, e similaridade com o mesmo instante em uma quadratura (Figura 4.23).	83
Figura 4.20 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Note que na sizígia, tem-se maiores correntes que o mesmo instante na quadratura (Figura 4.24).	84
Figura 4.21 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Aqui também se nota correntes similares a PM de quadratura (Figura 4.23).	85
Figura 4.22 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Comparando com a MME de quadratura (Figura 4.26), nota-se aqui intensidades de correntes mais elevadas.....	86
Figura 4.23 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Intensidades de correntes nesse instante são similares ao mesmo instante na maré de sizígia (Figura 4.19).	87
Figura 4.24 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, verão de 2016/2017. Percebe-se nitidamente menores intensidades aqui, quando comparada com a MMV de sizígia (Figura 4.20).	88
Figura 4.25 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Assim como a PM, a BM também é um instante de inversão de correntes e apresenta velocidades baixas dentro da BG, sendo similar na quadratura e sizígia (Figura 4.21).....	89

Figura 4.26 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, verão de 2016/2017. O instante de MME de quadratura possui velocidades mais baixas se comparado com o mesmo instante na sizígia (Figura 4.22).....	90
Figura 4.27 - Taxa de Renovação após 7 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Enquanto no inverno não se observa quase nenhuma renovação no interior da BG, no verão já é visível a renovação próximo da foz dos rios de maior vazão, Iguazu Sarapuí e Guapi-Macacu.	92
Figura 4.28 - Taxa de Renovação após 15 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Após 15 dias de simulação, no inverno começa-se a notar o crescimento da Taxa de Renovação no fundo da Baía. Por outro lado, observa-se na região Sul que no inverno a renovação é maior, provavelmente devido a correntes de frente fria mais comuns nessa estação do ano.	93
Figura 4.29 - Taxa de Renovação após 30 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Após 30 dias de simulação, no inverno, apenas as áreas próximas das fozes dos rios Iguazu-Sarapuí tiveram Taxas de Renovação superior à 20%. Por outro lado, observa-se na região Sul que no inverno a renovação é um maior.	93
Figura 4.30 - Taxa de Renovação após 45 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Nota-se aqui que no verão uma das últimas regiões a ter suas águas mais renovadas foi a região leste à Ilha do Governador. No inverno, essa região ainda apresenta valores de renovação abaixo de 10%.	94
Figura 4.31 - Taxa de Renovação após 60 dias, para inverno, à esquerda e verão, à direita. A massa de água no interior da BG, predominantemente pelos rios, parece exercer maior influência sobre as trocas de água nas proximidades da Ilha Fiscal.	94
Figura 4.32 - Taxa de Renovação após 75 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Após 75 dias de simulação, a região central no inverno ainda apresenta Taxas de Renovação em torno de 20%, enquanto no verão os valores variam na faixa de 60%.	95
Figura 4.33 - Taxa de Renovação após 90 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. No final da simulação no inverno há variação na Taxa de Renovação de 20 a 80%, no verão essa variação é de 40 a 98%.....	95
Figura 4.34 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Baía Noroeste.	96
Figura 4.35 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Baía Nordeste. As linhas em destaque representam valores médios por ciclo de maré.....	96
Figura 4.36 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Baía Norte.	97
Figura 4.37 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação IG Leste. ..	97
Figura 4.38 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Ponte do Saber.	98
Figura 4.39 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Boca da Barra.	99
Figura 4.40 - Idade da Água ao final das simulações com valores estabilizados, para inverno, à esquerda, e verão, à direita.	100
Figura 4.41 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação Baía Noroeste. As linhas em destaque representam valores médios por ciclo de maré.	101
Figura 4.42 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação Baía Nordeste.	101
Figura 4.43 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação Baía Norte.....	102

Figura 4.44 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação IG Leste.	102
Figura 4.45 - Séries temporais Idade da Água, inverno e verão, na estação Ponte do Saber. ...	103
Figura 4.46 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água inferior a 7 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Pode-se perceber que as regiões de rápida renovação e menor idade estão próximas das fronteiras.	103
Figura 4.47 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água inferior a 15 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Aqui pode-se ver que apenas no verão, e próximo dos rios de maior vazão, existem algum percentual de idades inferiores a 15 dias. Na região Sul, o maior percentual de ocorrência de idades menores que 15 dias está próximo do limite da BG.	104
Figura 4.48 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água inferior a 30 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Observa-se nesta figura que no inverno a grande maioria da extensão da BG apresenta idade de águas superior a 30 dias.	104
Figura 4.49 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água superior a 60 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Nessa figura percebe-se que em geral, no interior da BG as águas no verão possuem idades inferiores à 60 dias. No inverno, só se observa águas mais jovens que 60 dias próximo da foz dos rios de maior vazão, e na região da embocadura, influenciada por correntes costeiras.	105
Figura 4.50 - Quantificação, em percentual, de quanto a concentração de DBO ultrapassa o valor de 5mg/L O ₂ , estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005. Exemplo, um valor de 80% indica que tal local está 80% acima do valor máximo requerido na Resolução.	107
Figura 4.51 - Percentual quanto a concentração de OD está abaixo do limite estabelecido na CONAMA nº 357/2005. Exemplo, um valor de 20% indica que tal local está 20% abaixo do valor mínimo requerido na Resolução, que é 5mg/L.	108
Figura 4.52 - Pontuação de saúde ambiental da Baía de Guanabara, para os indicadores DBO e OD, segundo estudo realizado por KCI Technologies (2015). Imagem adaptada de https://ecoreportcard.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara/saude-da-baia/ . Pontos distribuídos na imagem indicam a localização das estações do Inea adotadas no estudo.	109
Figura 4.53 - Percentual quanto a concentração de Nitrato está acima do valor de 0,7mg/L N, estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005.	110
Figura 4.54 - Percentual de quanto a concentração de Nitrogênio Inorgânico está acima do valor de 1,6 mg/L N, estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005.	111
Figura 4.55 - Pontuação de saúde ambiental da Baía de Guanabara, para os indicadores Nitrogênio Inorgânico, segundo estudo realizado por KCI Technologies (2015). Imagem adaptada de https://ecoreportcard.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara/saude-da-baia/	111
Figura 4.56 - Percentual de quanto a concentração de Fósforo Total está acima do valor de 0,093mg/L P, valor de águas salinas na classe 2, estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005.	112
Figura 4.57 - Pontuação de saúde ambiental da Baía de Guanabara, para os indicadores Fósforo Total, segundo estudo realizado por KCI Technologies (2015). Imagem adaptada de https://ecoreportcard.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara/saude-da-baia/	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Trabalhos de modelagem realizados com a Baía de Guanabara como área de estudo.	14
Tabela 2.2 - Classes da Resolução CONAMA nº 357/2005, segundo uso previsto e grau de salinidade.....	19
Tabela 2.3 - Parâmetros limitantes da qualidade da água requerida em recursos hídricos para classe 2, segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005.....	21
Tabela 3.1 - Constantes harmônicas da FEMAR ajustadas para o contorno aberto, e seus respectivos valores de período, amplitude e fase para a estação Ilha Fiscal – RJ	41
Tabela 3.2 - Equações ajustadas para a região nordeste.....	46
Tabela 3.3 - Bacias representadas por cada estação.....	47
Tabela 3.4 - Vazões obtidas para as estações fluviométricas do INEA (LABH ₂ O, 2016).....	48
Tabela 3.5 - Vazões de inverno e verão por sub-bacias hidrográficas.....	49
Tabela 3.6 - Variáveis consideradas no MQA, com descrição da origem dos dados utilizados.	58
Tabela 3.7 - Valores mediados, de inverno e verão, obtidos através dos dados de medições do Inea, nos anos de 2014 a 2017, para cada fronteira de entrada de rio.....	58
Tabela 4.1 - Salinidade na BG, dados de Bérghamo (2006) e dados modelados, para inverno e verão.....	64
Tabela 4.2 - Dados anuais (01/2013 - 04/2014) por setor mensurados na Baía de Guanabara a partir de amostragens discretas realizadas por Santos (2015).	65

1 INTRODUÇÃO

A Baía de Guanabara (BG), localizada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), possui importante papel na evolução desta área. Sua ocupação teve início na colonização ocorrida no século XVI. No entanto, as alterações territoriais não aconteceram em um processo gradual. As primeiras interferências antrópicas pós descobrimento do Brasil visavam atender aos interesses do sistema colonial português e, após a independência política do país em 1822, aos dos modelos de desenvolvimento agrário-exportador (1822-1930) e urbano industrial (a partir de 1930) (IBG, 2018a).

As mudanças mais drásticas na BG ocorreram com os muitos aterros realizados em sua porção oeste, que alteraram drasticamente sua geometria e provocaram a eliminação de manguezais e praias nos locais aterrados (COELHO, 2007; PSAM, 2014).

Os primeiros relatos acerca da poluição das águas da BG remontam ao século XVII com a caça de baleias, atividade que, segundo Coelho (2007), evidenciou a importância da Baía de Guanabara na vida dos habitantes da cidade do Rio de Janeiro e instigou a criação da primeira medida de proteção da qualidade das águas da Baía, que determinava que tripas e entranhas de baleias abatidas fossem transportadas para fora da barra da Baía, e descartadas em alto-mar.

A poluição relacionada ao esgotamento sanitário ganhou maior destaque na contribuição da poluição das águas da BG devido à precariedade do sistema de coleta, transporte e descarte de esgotos, e ao crescimento populacional na região. Segundo Costa (2015), apesar da ascensão da cidade do Rio de Janeiro entre o fim do século XVIII e início do século XIX, os setores de saneamento básico e abastecimento de água ainda se encontravam precários. Amador (2013), por sua vez, comenta que até meados do século XIX a capacidade de autodepuração da BG não havia sido comprometida. Nessa época, a cidade do Rio de Janeiro possuía cerca de 500 mil habitantes.

O auge do processo de poluição se deu na década de 1950, período que coincide com o processo de desenvolvimento urbano-industrial da RMRJ (COSTA, 2015). Nessa época, a distribuição de infraestrutura de água e esgoto atendia os bairros burgueses, enquanto a população menos favorecida foi compelida às regiões mais afastadas na baixada (AMADOR, 2013).

Atualmente, na Região Hidrográfica da Baía de Guanabara (RHBG), a bacia hidrográfica que drena para a Baía de Guanabara possui cerca de 9 milhões de habitantes, segundo estimativas realizadas com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano de 2017. Essa é uma das razões que tornaram os esgotos domésticos um dos maiores poluidores dos rios que desaguam na Baía de Guanabara.

A média de tratamento de esgotos gerados nos municípios da RHBG não chega a 50%. Esse é um cenário crítico de saneamento, muito semelhante à situação geral do Brasil, onde apenas 45% dos esgotos gerados recebem algum tipo de tratamento (SNIS, 2016).

Em alguns trechos de rios e da BG, as concentrações de oxigênio são muito baixas. Essas regiões perderam sua capacidade de autodepuração devido ao grande aporte de matéria orgânica proveniente dos esgotos (IBG, 2014b).

Ações de restauração da qualidade ambiental da água na Bacia Hidrográfica e da Baía de Guanabara são necessárias e urgentes. No entanto, nem sempre se tem informações bem estruturadas para dar suporte à gestão ambiental de restauração dessas águas.

1.1 Motivação

A compreensão dos processos que influenciam a qualidade de água em sistemas estuarinos é necessária para fundamentar e orientar políticas de gestão ambiental, uma vez que esses ambientes, quando em zonas urbanas, podem ser fortemente impactados por ações antrópicas.

Dessa forma, a necessidade de entender como os processos hidrodinâmicos interferem na qualidade da água da Baía de Guanabara e a possibilidade de explorar uma ferramenta de modelagem computacional para ampliar o conhecimento sobre esse sistema estuarino motivaram a elaboração deste trabalho. Em um cenário de investimentos limitados, conhecer como a circulação hidrodinâmica influencia questões de qualidade da água pode ser de grande utilidade para definição de prioridades na gestão ambiental. Sem conhecimento do meio natural, fica impossível realizar uma gestão eficiente das atividades humanas a fim de minorar ao máximo a degradação do meio ambiente.

Nesse sentido, esta dissertação busca desenvolver um conjunto de modelos para consolidar o entendimento que se tem sobre a dinâmica dos recursos hídricos na Baía de Guanabara, dando-se assim um passo no caminho para impulsionar a mais ampla adoção da modelagem computacional ambiental como ferramenta de apoio à gestão.

1.2 Objetivos

Este trabalho busca fazer simulações de modelagem de circulação hidrodinâmica, renovação das águas e idade das águas, além de simulações de qualidade da água visando detalhar informações sobre regiões com maior grau de poluição na Baía de Guanabara. Os objetivos específicos ao longo da pesquisa englobaram:

- Simular e validar o modelo hidrodinâmico para dois cenários: verão e inverno; sem e com inclusão de gradientes de pressão baroclínica na circulação hidrodinâmica;
- Utilizar modelos de transporte Euleriano em análises de tempos hidráulicos característicos, considerando conceitos de Taxa de Renovação e Idade da Água, focados em discutir trocas de massas de água em corpos hídricos naturais, que variam espacial e temporalmente;
- Simular parâmetros de qualidade da água: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Oxigênio Dissolvido (OD), Compostos de Fósforo e Nitrogênio. Fazer comparações entre os cenários atual, de verão e inverno, com cenários hipotéticos de qualidade da água desejada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresenta-se um referencial teórico, que abrange conceitos fundamentais para entendimento do estudo realizado. São abordados definições e fatores importantes relacionados a sistemas estuarinos, bem como uma descrição da área de estudo com suas principais características. Outros conceitos apresentados são de tempo de residência, taxa de renovação e idade da água, que são essenciais para análises de qualidade da água e, por vezes, podem ser confundidos. Também se discute como os modelos computacionais têm contribuído em estudos ambientais, listando os trabalhos de modelagem ambiental publicados sobre a Baía de Guanabara. Por fim, este capítulo discute os parâmetros de qualidade de água adotados na modelagem desenvolvida, bem como seus valores limitantes segundo a legislação vigente.

2.1 Sistemas Estuarinos

Um estuário pode ser definido de diversas maneiras, dependendo do ponto de vista escolhido. As definições aqui apresentadas foram baseadas nos diversos conceitos elencados por Miranda, Castro & Kjerfve (2002).

Uma das primeiras definições de estuário foi dada por Cameron & Pritchard (1963), que o definiram como um corpo de água costeiro semifechado, com livre conexão com o mar aberto, onde a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. No entanto, a definição mais amplamente adotada hoje é uma adaptação da definição de Pritchard, elaborada por Dyer (1997). Nessa definição, um estuário é um corpo de água costeiro com ligação livre com o mar, dentro do qual ocorre mistura mensurável da água doce da bacia hidrográfica com a água salgada do mar e que se estende para montante nos rios até o limite de influência das marés.

Um sistema estuarino é um ambiente mais complexo, constituído por um conjunto de estuários concentrados em uma determinada região, como uma baía ou laguna, a exemplo da Baía de Guanabara, onde desembocam diversos rios.

Como se percebe através das definições, um estuário ou um sistema estuarino é um ambiente extremamente dinâmico, apresentando constantes mudanças em resposta às forçantes naturais e antrópicas. Esses ambientes são locais de grande valor para crescimento de atividades econômicas, uma vez que são ricos em biodiversidade e habitat natural de

diversos animais. São locais muito usados para instalação de portos, uma vez que constituem uma via de acesso importante ao continente, e suas águas são constantemente renovadas pelas marés.

No entanto, somente na segunda metade do século XIX se reconheceu a importância da influência das atividades antrópicas sobre os estuários, quando houve uma grande expansão das atividades industriais, da agricultura, da construção de barragens para instalação de usinas hidrelétricas e da indústria pesqueira próxima desses corpos hídricos. Como consequência, essas atividades provocaram o crescimento populacional, e a influência do homem sobre esses recursos hídricos colocou em risco sua sustentabilidade.

Como exemplos de sistemas estuarinos impactados por atividades antrópicas, pode-se citar, no Brasil, a Baía de Guanabara e a Lagoa de Araruama, no estado do Rio de Janeiro; a Baía de Todos os Santos, na Bahia; e, no exterior, a Baía de Homebush, em Sydney na Austrália; e a Baía de Chesapeake, nos EUA.

2.2 Caracterização da Área de Estudo

Neste item, buscou-se apresentar características da Baía de Guanabara e da sua Bacia Hidrográfica, bem como um resumo das ações e programas em busca da melhoria da qualidade ambiental das águas desta Baía.

2.2.1 Baía de Guanabara

Localizada no estado do Rio de Janeiro, a Baía de Guanabara possui cerca de 450km² de superfície e 149km de perímetro, considerando que seu limite sul é demarcado por uma linha imaginária entre as pontas do Forte de Copacabana e Itaipu. A Baía possui um estrangulamento com largura de 1600m na região conhecida como Boca da Barra. Suas dimensões englobam uma largura máxima de 28km entre a foz dos rios São João de Meriti e Guapi-Macacu, e uma distância de cerca de 31km na direção Norte-Sul. Essas dimensões podem ser visualizadas na Figura 2.1.

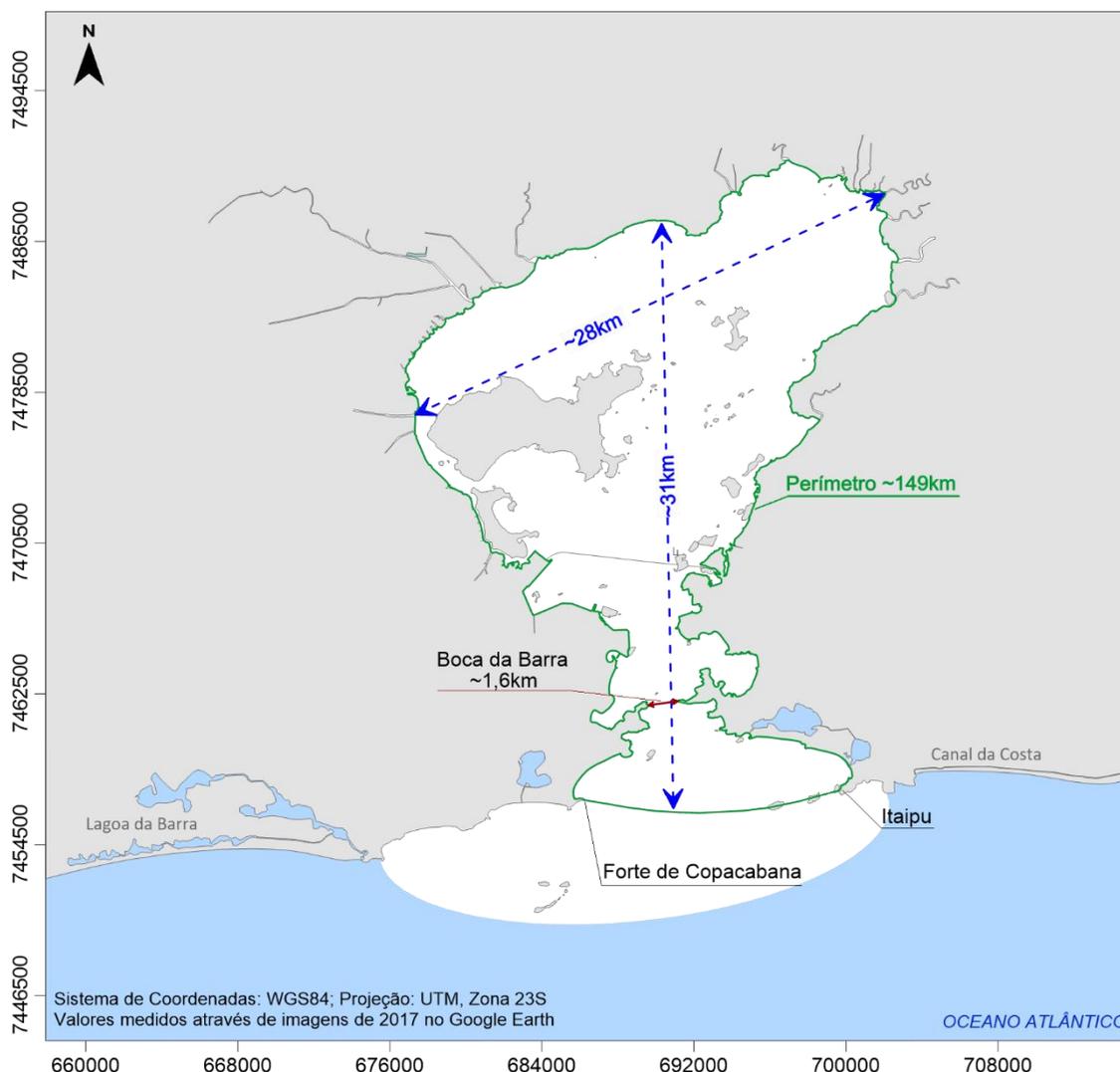


Figura 2.1 - Dimensões Baía de Guanabara, valores obtidos de medições feitas em imagens de 2017 no Google Earth.

O clima da região se caracteriza como quente e úmido, com inverno tipicamente seco e verão chuvoso. A temperatura média anual é de 22°C, com variação máxima de 30 a 32°C no verão. As chuvas são da ordem de 1200 a 1800mm/ano (BÉRGAMO, 2006).

Conforme modelagem digital do terreno apresentada na seção 3.2, as profundidades na BG variam de poucos metros na região mais ao norte da Baía, até mais de 50m na região do canal central próximo da embocadura. Considerando sua profundidade, o canal de entrada da BG se estende até próximo das ilhas do Governador e de Paquetá, com profundidades inferiores a 20m. O restante da BG apresenta pequenas profundidades, inferiores a 10m; incluindo ainda regiões que ficam secas durante marés baixas, que são áreas de mangues ou próximas da boca de rios.

A composição do sedimento de fundo da BG é caracterizada por Amador (1997) como originária de dois períodos distintos: um representado pela formação geológica natural da Baía e outro pelo período de ocupação da bacia.

A bacia hidrográfica que drena para a Baía, ilustrada na Figura 2.2, abrange uma área de aproximadamente 4000km², com topografia diversificada que compreende montanhas, áreas planas de baixada e restingas, mangues e praias. Sua atual divisão compreende 25 sub-bacias, que ao todo somam cerca de 50 rios e riachos que desaguam na BG. (COELHO, 2007; PSAM, 2014).

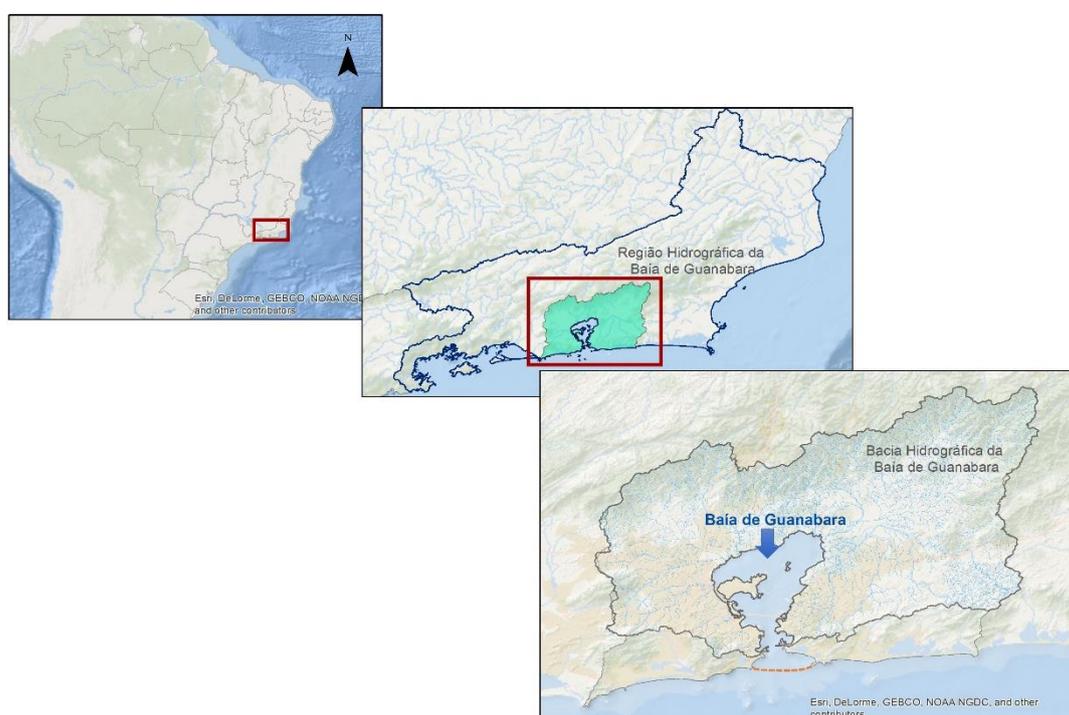


Figura 2.2 - Localização da Baía de Guanabara, com destaque para a RHBG e para a área de drenagem da Baía.

As bacias fluviais da RHBG vêm sendo modificadas desde o início da colonização. Suas intervenções mais drásticas ocorreram em meados do século XX, quando os rios das pequenas bacias urbanas foram canalizados e os grandes rios da baixada dragados. Canais de maré, originalmente meândricos, foram substituídos por canais retilíneos. Os únicos trechos de rios cujas formas foram conservadas são do Guapi-Macacu, Guaraí, Caceribu e Guaxindiba, com seus amplos canais de maré, associados a manguezais, onde foi estabelecida a APA Guapimirim em 1978 (AMADOR, 2013).

De acordo com a Resolução nº 107/2013 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Rio de Janeiro (CERHI-RJ), esta Região Hidrográfica engloba um total de 17 municípios,

11 integralmente inseridos na sua área: Niterói, São Gonçalo, Itaboraí, Tanguá, Guapimirim, Magé, Duque de Caxias, Belford Roxo, Mesquita, São João de Meriti, Nilópolis; e 6 parcialmente: Maricá, Rio Bonito, Cachoeira de Macacu, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro e Petrópolis. A Figura 2.3 ilustra os limites da RHBG e os municípios citados.

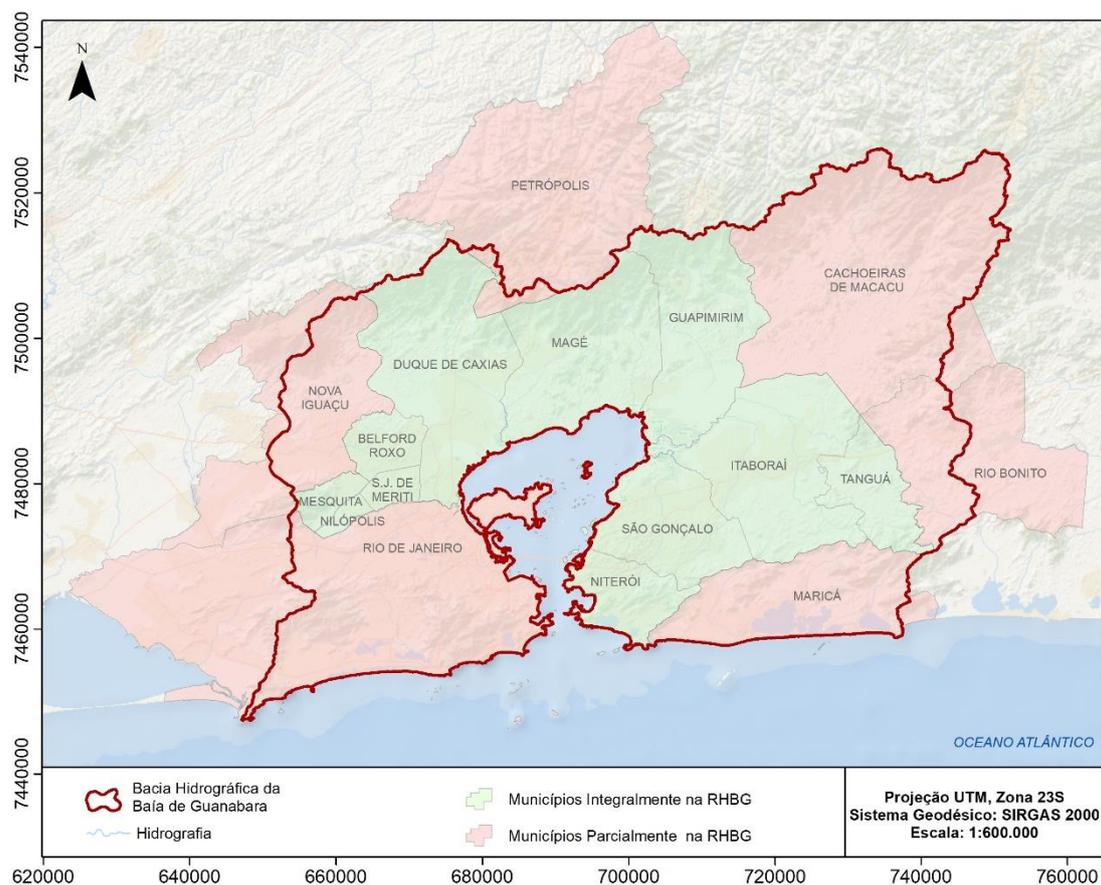


Figura 2.3 - Limites da RHBG, com destaque para municípios que a integram.

Os municípios acima destacados estão inseridos na área de atuação do Comitê da Bacia Hidrográfica da Baía de Guanabara (CBH-BG), com exceção de Petrópolis, que possui menor participação na bacia, de apenas 5%. Maricá está fora dos limites da área de drenagem da BG, como mostra a Figura 2.4.

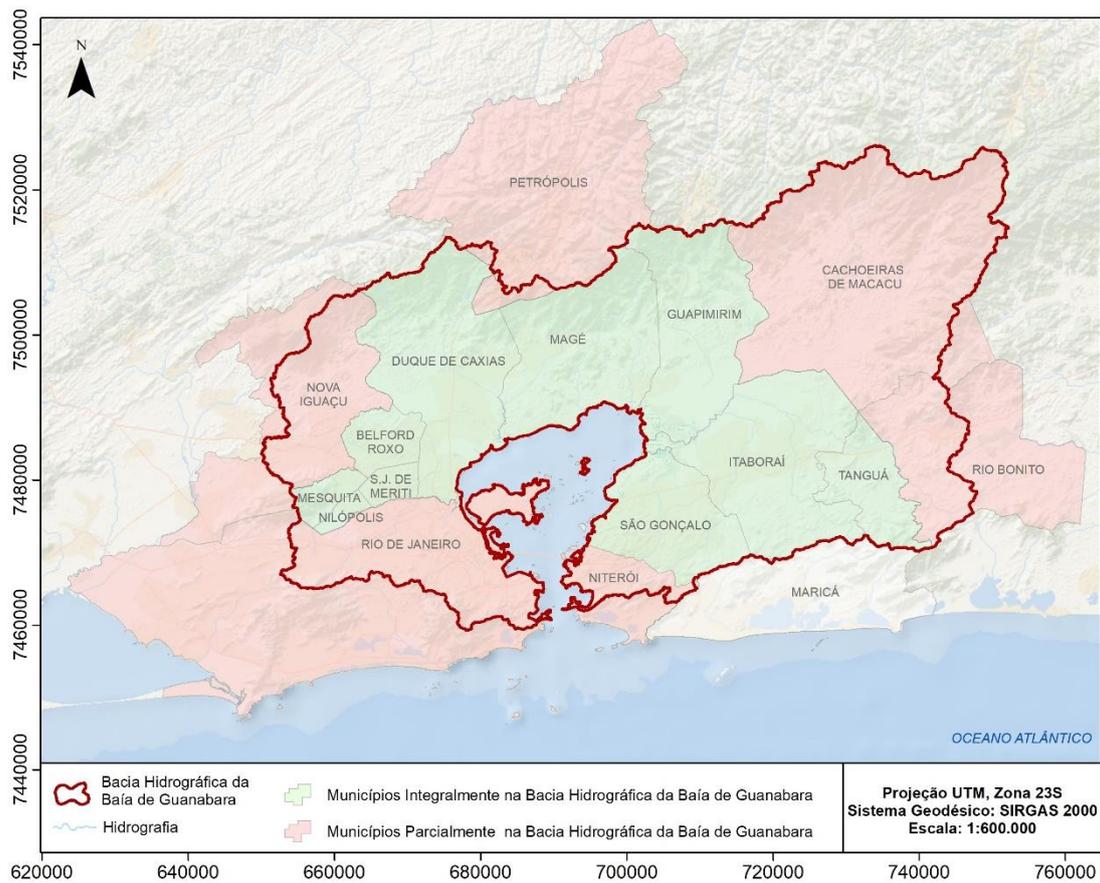


Figura 2.4 - Limites da Área de Drenagem da Baía de Guanabara, destaque para municípios que integram a bacia.

2.2.2 Ações e Programas para Melhoria da Qualidade Ambiental na BG

Em busca de melhorar a qualidade das águas da Baía de Guanabara, é preciso expandir o olhar para os problemas enfrentados na bacia hidrográfica na qual ela se insere. Nesse sentido, foi criado na década de 1990 o Programa de Despoluição da Baía de Guanabara (PDBG), com o intuito de melhorar as condições sanitárias e ambientais da região do entorno da Baía, recuperando os ecossistemas, e, gradativamente, a qualidade da água da BG. Esse programa foi lançado em 1994, com financiamento do *Japan Bank for International Cooperation* (JBIC), do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e do Governo do Estado do Rio de Janeiro (VIEIRA, 2009).

Dos anos 1992 a 1994, foram realizados extensivos estudos na Baía de Guanabara, através da cooperação entre a *Japanese International Cooperation Agency* (JICA) e o Governo Brasileiro. Tal estudo visava a formulação do plano de controle e recuperação da Baía, tendo seu relatório final sido apresentado em 1994 (JICA, 1994).

No entanto, as metas estabelecidas no PDBG não foram cumpridas, e a Baía de Guanabara continua até hoje com altos índices de poluição. Suas águas recebem elevado aporte de esgoto e resíduos sólidos diariamente, causando grande degradação.

Através do Decreto nº 42.930/2011, o Governo do Estado do Rio de Janeiro instituiu o Pacto pelo Saneamento, por meio da ação integrada entre o Governo Estadual e os Municípios, sob a coordenação da Secretaria de Estado do Ambiente (SEA), com a participação da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) e dos Comitês de Bacias Hidrográficas. Esse Pacto objetiva a universalização do acesso a sistemas de saneamento básico no estado, a fim de minimizar os impactos negativos de sua ausência sobre a saúde da população, o meio ambiente e as atividades econômicas da região (RIO DE JANEIRO, 2011). Ao Instituto Estadual do Ambiente (Inea) ficou delegado o papel de órgão normativo de licenciamento ambiental e fiscalizador dos sistemas de saneamento básico objeto do Pacto.

O PSAM foi criado em 2012 através de um contrato de financiamento entre o Governo do Estado do Rio de Janeiro e o BID, sob coordenação da SEA (PSAM, 2014). Esse Programa visa colaborar para a reversão da degradação ambiental da BG através de obras de saneamento básico em municípios no entorno da Baía. Sua estrutura contempla três componentes: Componente 1 (Implantação de sistemas de esgotamento sanitário); Componente 2 (Fortalecimento institucional do Inea, CEDAE e Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro (AGENERSA)); e Componente 3 (Promoção das Políticas Públicas Municipais de Saneamento e Sustentabilidade Fiscal).

Nas ações mais recentes rumo à melhoria da qualidade das águas da BG está o Projeto de Cooperação Técnica entre o Estado do Rio de Janeiro, a KCI Technologies Inc. (KCI) e o Centro para Ciências Ambientais da Universidade de Maryland (UMCES).

Essa cooperação promoveu a criação do PRA-Baía (Plano de Recuperação Ambiental), que prevê a revitalização da Baía. Nesse contexto, a UMCES desenvolveu uma plataforma digital on-line (<https://ecoreportcard.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara/>), em que pode-se encontrar o Boletim de Saúde Ambiental da Baía de Guanabara desenvolvido por meio do Projeto de Cooperação (KCI, 2016). Também foi desenvolvida, em paralelo, pela Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS), uma proposta de modelo de governança para a Baía de Guanabara. Nesse modelo de governança, foi proposta a criação de uma entidade de governança da BG, denominada Centro

Integrado de Gestão da Baía de Guanabara (CIG-BG), que terá a responsabilidade de coordenar os esforços de recuperação, além de articular os atores sociais e partes interessadas, visando a revitalização do ecossistema desse sistema estuarino.

2.3 Tempos Hidráulicos Característicos

Para estudos de sistemas estuarinos, é essencial conhecer os tempos hidráulicos característicos das águas, que têm grande importância no controle de processos biogeoquímicos, biológicos e na vulnerabilidade do sistema à poluição. Usualmente, são encontrados estudos de estuários e reservatórios, que adotam Tempo de Residência (TR) para caracterizar o tempo requerido para a renovação das águas. Esse parâmetro é determinado pela razão de determinado volume (V) com uma vazão (Q), descrita na Equação (2.1), que também pode ser encontrado na literatura com as nomenclaturas: Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), definido na NBR 12209/2011 e utilizado na área de engenharia sanitária para dimensionamento de tanques e reatores; e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) (TUNDISI & TUNDISI, 2016).

$$T = \frac{V}{Q} \quad (2.1)$$

A aplicação dessa razão para estudo da renovação das águas em corpos d'água naturais pode gerar resultados inconsistentes, uma vez que um corpo hídrico natural tem geometria e hidrodinâmica mais complexas que um reator. A aplicabilidade do tempo de residência genérico faz sentido, por praticidade, para uma análise inicial em corpos de água relativamente homogêneos e bem misturados. Em estuários, como já citado, diversos fatores estão presentes aumentando a complexidade do sistema. Desta forma, esse tempo não representa valores nem próximos da realidade, como corroborado por Souza (2017), que também destaca que a renovação das águas nesses sistemas ocorre com variações espaciais e temporais. Tais variabilidades dependem fortemente da geometria do corpo hídrico e circulação hidrodinâmica.

Nesse sentido, a partir da modelagem computacional, surgem os conceitos de Taxa de Renovação e Idade da Água, que juntos descrevem, de forma mais coerente, e em mais detalhes, a renovação das águas em sistemas estuarinos. Rosman (2018) discute em detalhes esses conceitos.

A Taxa de Renovação é definida como uma porcentagem de mistura entre águas internas e externas ao sistema. Essa taxa representa bem a variação temporal e espacial da renovação das águas, que através de modelagem computacional, leva em consideração diversos fatores que interferem na circulação hidrodinâmica.

A Idade da Água também é um parâmetro importante na indicação da relevância de processos cinéticos no corpo d'água, contabilizando quanto tempo determinada parcela de água permanece circulando dentro do domínio de interesse. Esse parâmetro é o que, conceitualmente, aproxima-se da definição de tempo de residência. No entanto, apresenta uma distribuição temporal e espacial, uma vez que as idades são calculadas via modelagem computacional.

Os parâmetros de Taxa de Renovação e Idade da Água são calculados através de modelos de transporte Euleriano, sendo, dessa forma, mais apropriados para corpos de água heterogêneos e variados. Esses modelos permitem estimativas mais detalhadas de cada região do domínio de estudo, podendo contribuir para formação de um melhor embasamento para se inferir, localmente, se os processos cinéticos de eutrofização serão relevantes, ou não, para qualidade das águas.

Cabe destacar que Taxa de Renovação e Idade da Água são análises que se complementam. Quanto maior a Taxa de Renovação menor será a Idade da Água. A utilização de um ou de outro, ou ambos, depende do objetivo do estudo a ser desenvolvido. Quando o objetivo é analisar a renovação de água, computa-se diretamente a evolução temporal das Taxas de Renovação em diferentes pontos do domínio, que é fornecida em valores percentuais. Quando o objetivo é analisar quanto tempo a água fica em diferentes setores, deve-se computar o parâmetro Idade da Água em diferentes pontos, ao longo do tempo (ROSMAN *et al.*, 2016).

2.4 Modelos Computacionais no Estudo Ambiental

Corpos d'água naturais, em sua grande maioria, apresentam certa complexidade. Logo, para estudá-los, faz-se necessária a aplicação de modelos computacionais, que são ferramentas integradoras capazes de permitir uma visão dinâmica de processos em sistemas ambientais complexos.

Em estudos e projetos envolvendo corpos de água naturais, bem como em aplicações visando à gestão e ao gerenciamento ambiental, a utilização de modelos tem se tornado

cada vez mais presente. Kourafalou (2015) destaca esta emergência de modelos regionais e globais, que permitem o aumento da qualidade de previsões costeiras, capazes de fornecer apoio à gestão de necessidades sociais e econômicas. Quando os modelos computacionais são validados, ou seja, verificados com dados de campo e analisados por especialistas, eles se tornam ferramentas indispensáveis para dar suporte à gestão e ao gerenciamento de sistemas ambientais.

Em análises de diagnósticos, modelos permitem a otimização de custos de monitoramento e medição através da integração de informações espacialmente dispersas, que geralmente são obtidas pontualmente em estações de medição. Também permitem ampliar o conhecimento para regiões onde não existem dados medidos e, assim, contribuir na compreensão de processos dinâmicos, além de auxiliar na interpretação de medições realizadas em estações fixas. Destaca-se que apenas modelos baseados em princípios de conservação podem, de maneira consistente, interpolar e extrapolar medições, viabilizando um conhecimento mais amplo da região de interesse, minimizando e otimizando o monitoramento de variáveis ambientais (ROSMAN *et al.*, 2016).

Em análises de prognóstico, os modelos computacionais também podem fornecer grande contribuição. Com eles, é possível simular cenários para estudos e projetos, mapear áreas de risco e determinar prováveis destinos de contaminantes. Modelos também podem ser aplicados a Planos de Emergência, por exemplo, na definição de estratégias de ações em casos de derrames de contaminantes, além de fundamentar a elaboração de planos de mitigação e prever evolução de eventos em tempo real. Lima (2006) destaca a importância da modelagem de qualidade da água como instrumento de apoio ao desenvolvimento de infraestruturas de esgotamento sanitário e à definição de projetos de saneamento prioritários para atendimento a metas progressivas de qualidade de água.

Entretanto, apesar de tantas funcionalidades e contribuições, é importante ressaltar que os modelos são ferramentas, e seu uso de modo inadequado pode levar a resultados errôneos. Portanto, é fundamental que os usuários desses modelos compreendam sua concepção e tenham um embasamento teórico para definir condições de contorno e iniciais coerentes, além de analisar os resultados.

2.5 Estudos de Modelagem Realizados da Baía de Guanabara

A Baía de Guanabara tem sido foco de estudo de diversos trabalhos nas últimas décadas. A Tabela 2.1 exibe uma retrospectiva dos trabalhos de modelagem ambiental realizados na BG ao longo das últimas décadas. O presente estudo pretende contribuir para ampliar, ainda mais, o conhecimento acerca desse sistema estuarino tão importante. Como diferencial, este trabalho trata da modelagem hidrodinâmica na BG com ação do gradiente baroclínico, gerado pelas diferenças de salinidade no domínio. Além disso, inclui análises de Taxas de Renovação e Idade da Água, que computam características importantes sobre as trocas de massas de água no sistema. Por fim, o trabalho também fornece uma análise dos principais parâmetros qualidade da água, com discussões sobre influências da hidrodinâmica e comparações com limites estabelecidos na legislação. Com isso, pretende-se detalhar informações sobre áreas mais críticas com relação à poluição na BG.

Tabela 2.1 - Trabalhos de modelagem realizados com a Baía de Guanabara como área de estudo.

Referência	Características do Trabalho	Objetivo (s)	Principais resultados
(PONTE; PORTO, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA) - Modelo hidrodinâmico e circulação promediado na vertical (2DH); - Análises de Taxa de Renovação e Idade da Água no Modelo de Transporte Euleriano; - Simulação de cenários de verão (Dez/2015 e Jan, Fev/2016) e inverno (Jun, Jul, Ago /2016) 	Estudar a Taxa de Renovação e a Idade da Água do sistema estuarino da Baía de Guanabara	<ul style="list-style-type: none"> - Após 90 dias, a água da BG não se encontra totalmente renovada; - Existem massas de água com Idade de até 110 dias, à leste da Ilha do Governador; - Diferenças mais relevantes na região ao fundo da baía devido a sazonalidade das vazões fluviais; - Influência de correntes costeiras na renovação das águas na região sul da BG.
(PEREIRA, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH; - Análises de dispersão de coliformes com modelo de transporte Lagrangeano; - Período analisado foi julho de 2015. 	Estudar o impacto da descarga de efluentes sanitários dos rios sobre a qualidade da água na Baía de Guanabara através de modelagem computacional.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulações dos padrões de corrente no interior da baía de foram satisfatórias; - Avaliação da dispersão de coliformes demonstraram que áreas balneares e de preservação ambiental estão sendo degradadas pelos efluentes que chegam à BG.

Referência	Características do Trabalho	Objetivo (s)	Principais resultados
(FEITOSA, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelo de campo próximo NRFIELD - Uso de metodologia computacional probabilística em conjunto; - Modelagem hidrodinâmica; - Modelagem de transporte lagrangeano e decaimento bacteriano. 	<p>Avaliar a probabilidade de condições impróprias de balneabilidade em áreas costeiras adjacentes aos emissários submarinos de esgotos de Ipanema, Barra da Tijuca e Icaraí.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - As concentrações de coliformes fecais são influenciadas pela radiação solar; - Os emissários estudados não comprometem a balneabilidade na região costeira; - A poluição detectada nas praias é indicativa da contaminação pelos sistemas lagunares, rios e canais que possuem qualidade da água degradada.
(ANDRIONI, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Princeton Ocean Model</i> (POM) - Estudo de variações no nível do mar, e as velocidades horizontais em cenários de eventos extremos, como tsunamis; - Modelo hidrodinâmico de diferenças finitas, configurado em modo barotrópico e calibrado com dados de nível do mar (2010) 	<p>Avaliar a resposta do nível do mar na Baía de Guanabara (BG) a forçantes extremos, em comparação com variações astronômicas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de estudar eventos extremos, quando esses interagem com a hidrodinâmica local podem responder por variações de nível da ordem metros e de velocidades quase o dobro das esperadas; - O estudo desses fenômenos, mesmo que de maneira qualitativa, constitui uma ferramenta capaz de ajudar na tomada de decisões.
(MOTTA & FARIA, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelagem hidrodinâmica 3D; - Modelagem de transporte lagrangeano de coliformes; - Quatro cenários representativos de verão e inverno, com vazões atuais e finais de projeto para o lançamento dos emissários. 	<p>Analisar a influência dos emissários submarinos Icaraí, Ipanema e Barra da Tijuca na balneabilidade das praias.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Foi verificado que os emissários não são responsáveis por alterações nas condições de balneabilidade das praias, as fontes pontuais costeiras, por sua vez, exercem grande influência.
(MACHADO & SILVA, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelagem hidrodinâmica 3D; - Estudo de trocas de massa d'água da BG com o mar no Modelo de Transporte Euleriano; - Derramamento de óleo no interior da BG e contribuições de coliformes a partir dos rios afluentes à Baía com o Modelo de Transporte Lagrangeano; - Dois cenários de ventos: usuais e típicos de frente fria. Ambos com influência de maré. 	<p>Avaliar a influência das águas da Baía de Guanabara na qualidade da água das praias oceânicas adjacentes à sua embocadura.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Verificou-se que a BG não possui papel determinante na qualidade da água das praias oceânicas adjacentes à sua embocadura; - A interação entre as águas das praias e da BG não é muito grande associado ao decaimento natural das substâncias analisadas; - Devido a tendência de movimentos mais acentuados no sentido norte da BG, em derramamentos de óleo, mesmo próximo da embocadura, pequenas concentrações são transportadas para fora da BG.

Referência	Características do Trabalho	Objetivo (s)	Principais resultados
(OLIVEIRA, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> - Delft 3D - Simulação de inverno (02 a 17 de julho de 2000) e verão (25 de janeiro a 13 de fevereiro de 2001) - Adoção de índice <i>Skill</i> para comparação quantitativa de dados simulados com dados medidos 	Estudar as características hidrodinâmicas da Baía de Guanabara (RJ, Brasil) nas estações de inverno e verão austral.	<ul style="list-style-type: none"> - O modelo conseguiu reproduzir nas simulações o padrão de correntes observados experimentalmente na região e a oscilação prevista; - As salinidades simuladas não tiveram concordância com as amostradas, pois foram utilizados valores inicial e de contorno constantes ao longo da grade, e o tempo de simulações não foi suficiente para estabilizar a salinidade em todo o domínio. - O índice matemático <i>Skill</i> utilizado para comparar os dados amostrados in situ com os dados simulados, mostrou ser um bom parâmetro de avaliação quantitativa dos resultados.
(KAUFMANN, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelo hidrodinâmico 2DH; - Modelo de transporte lagrangeano e de qualidade da água com ciclos de OD e DBO; - Três cenários: atual (2009), projetado com dragagem, projetado com dragagem e cinturão de contenção de efluentes no Canal do Fundão. 	Estudar os efeitos na circulação hidrodinâmica e qualidade de água no Canal do Fundão após o projeto de revitalização previsto.	- Foi possível atestar a eficiência da obra quanto aos aspectos de melhoria da circulação hidrodinâmica, eliminação da tendência de assoreamento do Canal e redução do grau de poluição no canal e regiões adjacentes.
(MALTA, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelo hidrodinâmico 2DH e 3D; - Análise das séries temporais das correntes de maré. 	Estudar as correntes de maré atuantes no Complexo Estuarino da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro	<ul style="list-style-type: none"> - Padrões de circulação hidrodinâmica foram bem caracterizados; - Resultados obtidos não foram satisfatórios, devido a erros na calibração do modelo e qualidade dos dados medidos utilizados; - A metodologia apresentada é adequada, mas precisa de melhorias; - A aplicação dos modelos 2DH e 3D permitiu diversas análises comparativas.

Referência	Características do Trabalho	Objetivo (s)	Principais resultados
(SAMPAIO, 2003)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelagem computacional com modelo hidrodinâmico 2DH e 3D; - Modelo de transporte lagrangeano. 	<p>Estudar a circulação hidrodinâmica 3D e troca de massas d'água do sistema estuarino Baía de Guanabara – RJ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Padrões de circulação hidrodinâmica e trocas de massas d'água na Baía de Guanabara foram bem caracterizadas através dos modelos implementados; - Analisando-se apenas resultados promediados na vertical (2DH) torna-se difícil destacar a influência dos ventos, usual ou de frente fria; - A atuação do vento é mais sensível nos locais mais rasos; - Ocorrência de ventos locais, usuais ou de frente fria, não altera significativamente a elevação dos níveis d'água em comparação com situação de calma-ria; - Nítida a dominância das correntes paralelas à costa fora da BG na trajetória de partículas.
(XAVIER, 1996)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA - Modelo hidrodinâmico 2DH; - Modelo lagrangeano de transporte de partículas, sob diferentes condições meteoceanográficas; - Simulações de hidrodinâmica não consideraram o efeito do vento. 	<p>Verificar qualitativamente como o poluente se desloca nesta região da Baía, e quando esse recircula através do canal de tomada d'água da refinaria.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - O modelo reproduz de forma satisfatória os principais mecanismos da circulação dentro da BG; - Observado o aspecto estagnante das águas do fundo da Baía, onde as velocidades são extremamente baixas tanto em situações de sizígia como de quadratura.
(CUNHA, 1996)	<ul style="list-style-type: none"> - Modelos Auto Regressivos Média Móvel (ARMA) - Modelagem estocástica às variáveis hidrológicas. 	<p>Avaliar a dependência entre os processos estocásticos de precipitação média diária e níveis médios diários, a partir de dados da estação da Ilha Fiscal na BG, RJ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Nas análises sob diferentes hipóteses de ocorrência, dependente e independente, os valores máximos anuais indicam que a sazonalidade é um fator importante e deve ser considerado; - Para um mesmo tempo de recorrência, a hipótese de independência pode aumentar os valores de precipitação e nível médio diário do mar em taxas superiores a 100%, o que pode superdimensionar o porte de obras de engenharia;

Referência	Características do Trabalho	Objetivo (s)	Principais resultados
(SANTOS, 1995)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA, pré-interface - Desenvolvimento de um modelo de trajetória de partículas em corpos de água rasos; - Modelo bidimensional promediado na coluna d'água; - Campo de velocidades usado como dado entrada foi obtido de modelo hidrodinâmico; - O estudo foca no campo afastado do ponto de lançamento. 	<p>Simular o caminhar de contaminantes em um corpo d'água, lançados por um emissário subaquático.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - O modelo de trajetória constitui importante ferramenta para o projeto de um emissário subaquático de poluentes em um corpo de água raso; - O esgoto não pode ser usado como traçador, pois seu tempo de vida é curto e devido à presença de grande quantidade de esgoto na água de outras fontes pontuais e difusas.
(VILELA, 1992)	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA, pré-interface - Técnica numérica de elementos finitos, aliada a um método em diferenças finitas; - Modelo bidimensional promediado na coluna d'água; - Aplicação com diferentes situações: circulação induzida pela maré, por maré e vento simultaneamente; - Período de simulação de quatro dias; - Calculado o transporte de partículas no interior do estuário para cada situação simulada. 	<p>Utilizar um modelo numérico de circulação em corpos d'água rasos para a investigação dos efeitos do vento na hidrodinâmica da Baía de Guanabara-R.J.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Na primeira etapa dos trabalhos o modelo de circulação a ser utilizado não era estável na BG, a malha tinha apenas elementos triangulares; - Com modificações e a malha com elementos quadriláteros irregulares a simulação teve bons resultados; - É importante a inclusão de ventos nas equações para o cálculo do escoamento na Baía, principalmente quando o interesse é ver o destino de poluentes.

2.6 Qualidade de Água: parâmetros importantes e legislação

A qualidade das águas resulta de fenômenos naturais e da influência antrópica. Logo, o uso de ocupação de uma bacia hidrográfica impacta a qualidade dos recursos hídricos, dependendo das atividades nela desenvolvidas. Von Sperling (2005) destaca que o controle da qualidade da água depende de um planejamento global na bacia hidrográfica. Nesse sentido, o conhecimento da qualidade existente no ambiente e da determinação da qualidade desejável aos usos previstos para o corpo hídrico são de suma importância.

As características que determinam a qualidade das águas podem ser de origem física, química ou biológica, sendo traduzidas na forma de parâmetros de qualidade. Os parâmetros físicos incluem cor, turbidez, temperatura, sabor e odor e temperatura. Os parâmetros

químicos englobam pH (potencial hidrogeniônico), alcalinidade, acidez, dureza, ferro e manganês, cloretos, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido (OD), matéria orgânica, micropoluentes inorgânicos e orgânicos. Por fim, os parâmetros biológicos tratam de microorganismos presentes na água, como bactérias, algas, fungos, protozoários, vírus e helmintos.

Para regular a qualidade da água através desses parâmetros, existem legislações específicas que definem os valores aceitáveis. As Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005 e 430/2011 dispõem sobre padrões a serem mantidos nos corpos de água, e lançamentos de efluentes, respectivamente. A Resolução CONAMA nº 357/2005 classifica as águas quanto a salinidade e quanto aos seus padrões de qualidade da água. Nela estão definidos três tipos de águas: doces, salobras e salinas. Águas doces são aquelas com concentração de sais inferior a 0,5‰, águas salobras possuem salinidade entre 0,5 e 30‰, e águas salinas acima de 30‰. Quanto aos padrões de qualidade da água, as águas podem ser enquadradas em: classe especial 1, 2 e 3. Águas doces podem ainda ter uma quarta classe. Tais classes são definidas de acordo com o uso previsto, cada uma com limites específicos para cada parâmetro de controle, como detalhado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classes da Resolução CONAMA nº 357/2005, segundo uso previsto e grau de salinidade

Classes	Destinação Uso da Água		
	Água Doce	Água Salobra	Água Salina
Classe Especial	<ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, com desinfecção; - Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; - Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral. 	<ul style="list-style-type: none"> - Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; - Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; b) Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.

Classes	Destinação Uso da Água		
	Água Doce	Água Salobra	Água Salina
Classe 1	<ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado - Proteção das comunidades aquáticas - Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CO-NAMA no 274, de 2000; - Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; - Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Recreação de contato primário, conforme Resolução CO-NAMA no 274, de 2000; - Proteção das comunidades aquáticas; - Aquicultura e a atividade de pesca; - Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; e - Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e a irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000; - Proteção das comunidades aquáticas; - Aquicultura e a atividade de pesca.
Classe 2	<ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional - Proteção das comunidades aquáticas; - Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CO-NAMA no 274, de 2000; - Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; - Aquicultura e a atividade de pesca. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pesca amadora; - Recreação de contato secundário. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pesca amadora; e - Recreação de contato secundário.
Classe 3	<ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; - Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; - Pesca amadora; - Recreação de contato secundário; e - Dessedentação de animais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Navegação; - Harmonia paisagística. 	<ul style="list-style-type: none"> - Navegação; e - Harmonia paisagística
Classe 4	<ul style="list-style-type: none"> - Navegação; e - Harmonia paisagística. 	-	-

Nesta dissertação, adotaram-se nas análises de qualidade da água, valores referentes à classe 2 nas comparações com os resultados dos modelos. Essa classe foi escolhida, atendendo-se ao elevado estado de degradação que os rios e Baía de Guanabara se encontram. Assim, optou-se por comparar seu estado atual com o que poderia ser um estágio intermediário, de metas progressivas de melhoria da qualidade da água. Apesar de serem considerados nos modelos trechos de rios de água doce e águas salinas, adotaram-se nas análises os valores referentes às águas salinas, visto que, dentre os tipos de águas, possuem valores mais restritivos. Os valores limites definidos na Resolução, utilizados neste trabalho, estão listados na Tabela 2.3, e são descritos a seguir, de forma detalhada. Também são apresentadas descrições de salinidade e temperatura, pois ambas têm influência na modelagem de qualidade da água.

Tabela 2.3 - Parâmetros limitantes da qualidade da água requerida em recursos hídricos para classe 2, segundo a Resolução CONAMA n° 357/2005.

Parâmetros	Classe 2		
	Água Doce	Água Salobra	Água Salina
DBO (mg/L O ₂)	5	5	5
OD (mg/L O ₂)	5	4	5
Fósforo Total (mg/L PT)	0,1	0,186	0,093
Nitrato (mg/L N)	10,0	0,7	0,7
Nitrito (mg/L N)	1,0	0,2	0,2
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	3,7 se pH ≤ 7,5 2,0 se 7,5 < pH ≤ 8 1,0 se 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 se pH > 8	0,7	0,7

2.6.1 Oxigênio Dissolvido (OD)

O Oxigênio Dissolvido é essencial à vida de organismos aeróbios presentes nos corpos de água. Sua concentração nas águas varia, naturalmente, de acordo com a temperatura, salinidade, turbulência, altitude (pressão atmosférica), profundidade da coluna d'água e atividade fotossintética de algas e plantas (JORDÃO e PESSÔA, 2017; SACHETTO, 2012). Usualmente, esse parâmetro é apresentado como uma concentração em mg/L.

A introdução de matéria orgânica no meio provoca o consumo de OD pelos micro-organismos decompositores que irão consumi-la. Em um recurso hídrico preservado, existe uma capacidade natural de restauração de OD após eventuais perdas. Este fenômeno, que restabelece o equilíbrio no meio aquático, é denominado autodepuração. Como destacado

por Valente et al (1997), quando a carga dos esgotos lançados excede a capacidade de autodepuração do corpo de água, as concentrações de oxigênio podem ir a zero, o que provoca problemas estéticos e liberação de odor. Além disso, peixes tem sua sobrevivência comprometida, e podem morrer por asfixia. Segundo Francis-Floyd & Riggs (2017), peixes de água quente geralmente requerem concentrações de OD de no mínimo 5 mg/L, podendo suportar breves períodos de redução de OD. No entanto, se os níveis caírem para valores inferiores a 2mg/L, eles nem sempre serão capazes de se recuperar. Os autores destacam que quando as concentrações caem para abaixo de 1 mg/L, os peixes começam a morrer.

2.6.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A DBO representa uma medida indireta da matéria orgânica dissolvida na água, sendo definida como a demanda de oxigênio utilizada por micro-organismos aeróbios para estabilização dessa matéria orgânica após um tempo específico. Está diretamente relacionada à concentração de OD, também sendo representada em mg/L.

Usualmente, adota-se a DBO após 5 dias em uma temperatura padrão de 20°C para análises de laboratório e comparação. Esse tempo é adotado pois ao quinto dia de ensaio, apesar da estabilização da matéria orgânica não estar concluída, as taxas após o quinto dia são mais lentas. No teste, coletam-se as amostras. Ato contínuo, mede-se a concentração de OD. Posteriormente, a amostra segue para uma incubadora onde fica por cinco dias a uma temperatura controlada de 20°C. No quinto dia, a amostra tem a concentração de OD medida. A diferença entre os valores obtidos caracteriza a DBO_{5,20}. Von Sperling (2005) destaca que se deve inibir a nitrificação na amostra para não ter consumos de oxigênio e, assim, não interferir nos resultados.

Após os 5 primeiros dias, a estabilização pode seguir ainda por dias ou até semanas, quando as concentrações de OD podem ser consideradas desprezíveis. Nesse sentido, a Demanda Bioquímica Última (DBO_{última}) caracteriza o consumo exercido até esse tempo, a partir do qual o consumo de OD é desprezível. Em laboratório, determina-se o valor de DBO_{última} no vigésimo dia de análise. (VON SPERLING, 2005).

A Figura 2.5 ilustra a evolução da DBO ao longo do tempo, destacando a DBO₅ e a DBO_{última}.

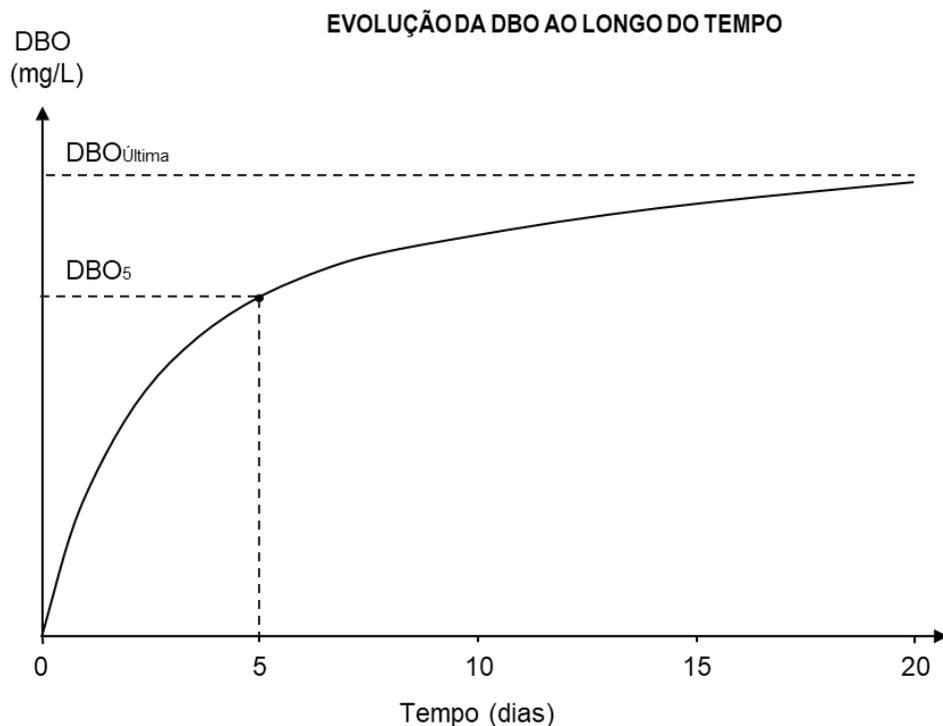


Figura 2.5 - Evolução da DBO ao longo do tempo, com destaque para DBO₅ e DBO_{última}. (Fonte: Von Sperling (2005))

Geralmente, a matéria orgânica de origem antrópica é introduzida no meio aquático por despejos de esgotos domésticos e industriais. Se houver muito despejo de efluentes, provocando um aumento da DBO, grande o suficiente, o oxigênio dissolvido disponível na água pode ser totalmente consumido na decomposição, provocando a morte dos micro-organismos aeróbios. Esse parâmetro é utilizado com frequência na caracterização de esgotos e dimensionamento de estações de tratamento de esgoto, e também na definição do grau de poluição em corpos de água.

2.6.3 Nutrientes

De acordo com Jordão e Pessoa (2017), nitrogênio e fósforo possuem atuação limitante no crescimento biológico, principalmente em estuários. Quando em altas concentrações, podem provocar eutrofização.

O nitrogênio pode ser encontrado, em ecossistemas aquáticos, em diferentes maneiras: como nitrogênio orgânico, dissolvido ou em suspensão, e na forma inorgânica, como amônia livre (NH₃) ou ionizada (NH₄⁺), nitrito (NO₂⁻) e nitrato (NO₃⁻) e nitrogênio molecular (N₂). O nitrogênio está normalmente presente nas águas, pois faz parte de compostos biológicos e proteínas, além de ser produzido no processo de decomposição celular de micro-organismos. Através da identificação do tipo de composto de nitrogênio presente

na água, pode-se verificar o tempo da poluição. Concentrações mais altas da forma orgânica e de amônia indicam poluição mais recente, enquanto que a presença de maiores concentrações de nitrato indica poluição mais remota. Isto porque o nitrogênio orgânico presente no esgoto é primeiramente convertido em amônia, que, por sua vez, sofre oxidação, na presença de oxigênio, e é convertida em nitrito, e por fim em nitrato (JORDÃO e PESSÔA, 2017).

O fósforo, por seu turno, pode estar presente em corpos hídricos nas formas de ortofosfatos, polifosfato e fósforo orgânico. Esse nutriente se origina no meio aquático naturalmente com a dissolução de compostos do solo, decomposição de matéria orgânica e está presente na composição celular de micro-organismos (VON SPERLING, 2005).

As principais fontes antrópicas de nitrogênio e fósforo nos corpos de água naturais, segundo Von Sperling (2005) são: lançamentos de efluentes doméstico e industriais, excrementos de animais e fertilizantes. Fósforo ainda pode ser introduzido no meio devido à presença de detergentes.

2.6.4 Salinidade e Temperatura

Temperatura e Salinidade são parâmetros de grande importância na análise de qualidade da água, pois podem influenciar em reações e variam de acordo com as características do corpo de água.

A presença de sais em um ambiente aquático pode advir de dissolução de minerais ou intrusão de águas salinas, como ocorre em estuários, onde há mistura de água doce do rio com a salgada do mar. Ademais, os sais podem ser introduzidos através de lançamentos de despejos de efluentes. Como mencionado no início da seção 2.6, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, as águas podem ser classificadas, conforme sua concentração de sal, em doces (menor que 0,5‰), salobras (entre 0,5 e 30‰) ou salinas (maior que 30‰).

A temperatura de corpos de água é influenciada pela localização dos mesmos, diferenças sazonais de acordo com o clima da região, além da circulação hidrodinâmica e profundidade do corpo hídrico. Variações na temperatura afetam a solubilidade de OD nos corpos de água, taxas de reações físicas, biológicas e químicas (JORDÃO e PESSÔA, 2017; VON SPERLING, 2005). Na BG, a temperatura varia de cerca de 20 a 27°C (BÉRGAMO, 2006).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia utilizada em cada etapa da pesquisa, destacando os modelos empregados, a origem dos dados ambientais utilizados e como eles foram trabalhados para inserção nos modelos, e a descrição dos cenários de modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água.

3.1 Modelo Computacional

As simulações computacionais foram realizadas no Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA), um sistema profissional de modelos computacionais registrado em nome da Fundação COPPETEC, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisas do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ).

O SisBaHiA, cuja tela inicial está ilustrada na Figura 3.1, foi desenvolvido para realização de projetos, estudos e gestão ambiental de recursos hídricos. Os modelos nele implementados podem ser utilizados para previsão do escoamento das águas e do transporte de grandezas escalares de interesse. Esse sistema pode ser aplicado em simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, canais, reservatórios, lagos ou lagoas, visando à compreensão da dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais (ROSMAN, 2018).

Neste estudo, os seguintes módulos do SisBaHiA foram utilizados: Modelo Hidrodinâmico, Modelo Euleriano, Modelo de Qualidade da Água com Sal e modelo de Qualidade da Água com parâmetros de DBO, OD, Compostos de Nitrogênio, Compostos de Fósforo e Temperatura.

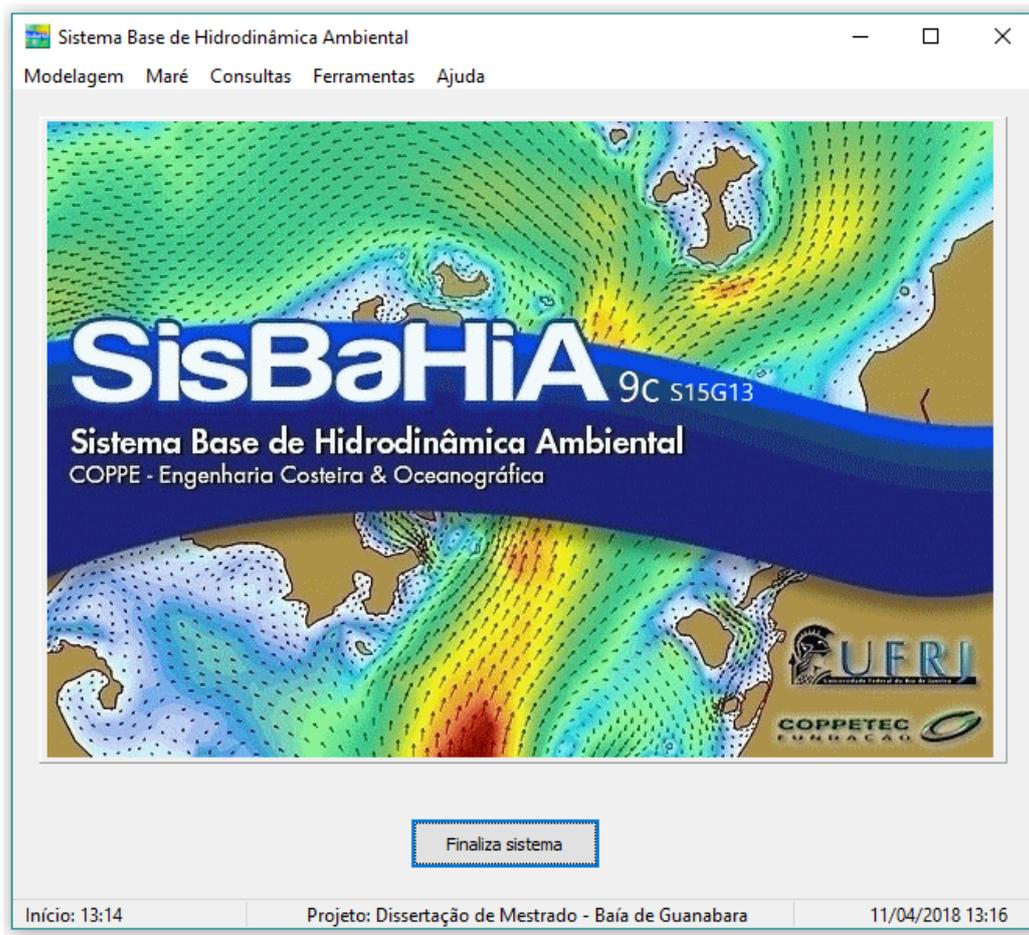


Figura 3.1 - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, Tela Inicial.

3.1.1 Modelo Hidrodinâmico

O SisBaHiA possui modelos hidrodinâmicos planejados para representar escoamentos em corpos de água com geometria complexa, usualmente presente em corpos de água naturais. A discretização espacial utiliza elementos finitos quadrangulares biquadráticos e/ou triangulares quadráticos, possibilitando boa representação de contornos de corpos de água naturais, considerando as limitações de processamento computacional.

Escoamentos com escalas de movimentos horizontais, ao menos 20 vezes maiores do que a profundidade, podem ser considerados como escoamentos de águas rasas. Logo, o campo de pressões pode ser tido como quase hidrostático. A Baía de Guanabara se enquadra nesse caso. Além disso, como tende a ser verticalmente homogênea, justifica-se a aplicação de modelo hidrodinâmico promediado na vertical, isto é, bidimensional na horizontal, também conhecido como modelo 2DH.

Nesses casos, as equações diferenciais governantes do movimento, denominadas equações de águas rasas, são deduzidas a partir das equações gerais de escoamentos em regime turbulento, conhecidas como equações de Navier-Stokes, as quais expressam os princípios de conservação de massa e de balanço de quantidade de movimento via segunda Lei de Newton. Deduções numéricas e analíticas das equações podem ser encontradas em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>, no item Referência Técnica.

No modelo 2DH, a cada intervalo de tempo, são calculadas as componentes das velocidades médias na vertical, $U(x, y, t)$ na direção x , e $V(x, y, t)$ na direção y . A altura instantânea da coluna de água, H , é dada pela diferença entre a cota da superfície livre, $z = \zeta(x, y, t)$, e a cota da superfície do fundo, $z = -h(x, y, t)$. Portanto, tem-se a equação (3.1).

$$H(x, y, t) = \zeta(x, y, t) + h(x, y, t) \quad (3.1)$$

Na Figura 3.2, as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$ e $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$ utilizando o índice $i = 1, 2$.

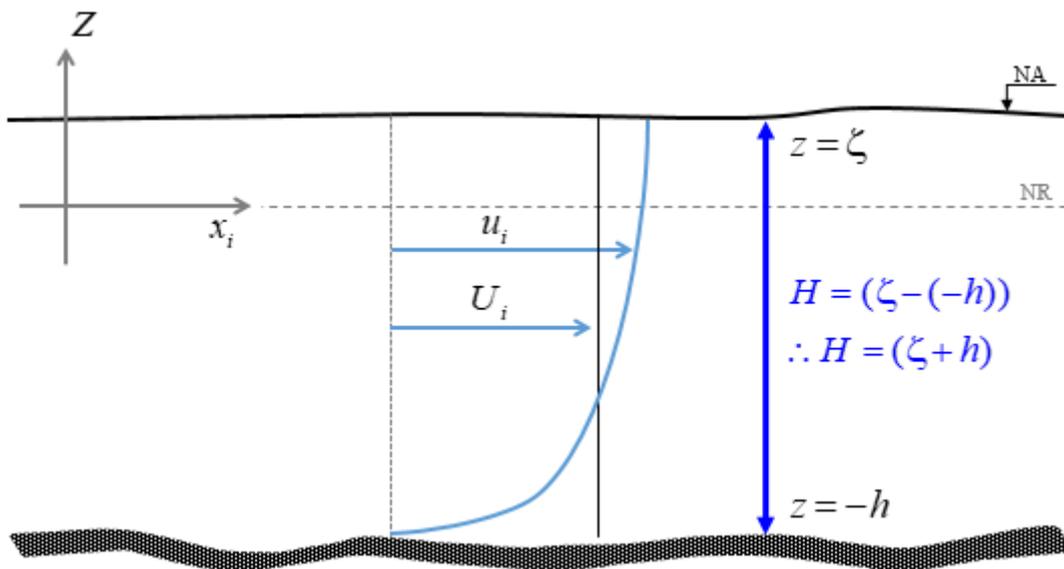


Figura 3.2 - Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência e, U_i , é a velocidade promediada na vertical

Note que a variação da cota batimétrica h com tempo só ocorre na modelagem acoplada com processos sedimentológicos e evolução morfológica de batimetria.

Para determinar essas incógnitas, são necessárias três equações: equação da continuidade integrada na vertical (3.2), em que se considera batimetria fixa durante o período de simulação, e equações de quantidade de movimento integradas na vertical, nas direções x (3.3) e y (3.4).

- Equação da continuidade do volume, ou imposição da condição de incompressibilidade da água, em um modelo 2DH:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q = 0 \quad (3.2)$$

Onde:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{Variação da coluna d'água no tempo.}$$

$$\frac{\partial UH}{\partial x} = \text{Variação da vazão através da coluna d'água na direção } x.$$

$$\frac{\partial VH}{\partial y} = \text{Variação da vazão através da coluna d'água na direção } y.$$

$$\sum q = q_p + q_e + q_{la} + q_{le} = \text{Representa os fluxos de precipitação } (q_p), \text{ evaporação } (q_e), \text{ infiltração afluente } (q_{la}) \text{ e efluente } (q_{le}), \text{ por unidade de área.}$$

- Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial \left(\frac{\hat{\rho}}{\rho_o} \right)}{\partial x} \\ & + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial [H \hat{\tau}_{xx}]}{\partial x} + \frac{\partial [H \hat{\tau}_{xy}]}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ & - 2\Phi \sin \theta V - \frac{U}{H} \sum q \end{aligned} \quad (3.3)$$

- Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial \left(\frac{\hat{\rho}}{\rho_o} \right)}{\partial y} \\
& + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial [H \hat{\tau}_{xy}]}{\partial x} + \frac{\partial [H \hat{\tau}_{yy}]}{\partial y} \right) \\
& + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \\
& + 2\Phi \sin \theta U - \frac{V}{H} \sum q
\end{aligned} \tag{3.4}$$

A seguir estão explicados os termos para a direção x . Na direção y é semelhante.

$\frac{\partial U}{\partial t}$	=	Aceleração local do escoamento 2DH, em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$	=	Aceleração advectiva do escoamento 2DH, em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero. Representa a força por unidade de massa gerada pelo gradiente de pressão barotrópica, i.e., variação da pressão hidrostática na direção x , devido à declividade da superfície livre na direção x . Esse termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo, como indicado pelo sinal negativo.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	=	Representa a força por unidade de massa gerada pelo gradiente de pressão baroclínica, i.e., variação da pressão hidrostática na direção x , devido às diferenças de densidade da água na direção x , $\hat{\rho}/\rho_o$. Esse termo força escoamentos de lugares onde a densidade da coluna de água é maior para lugares onde a densidade é menor, como indicado pelo sinal negativo.
$-g \frac{H}{2} \frac{\partial \left(\frac{\hat{\rho}}{\rho_o} \right)}{\partial x}$	=	Resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, ou seja, em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x , por unidade de massa.
$+\frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial [H \hat{\tau}_{xx}]}{\partial x} + \frac{\partial [H \hat{\tau}_{xy}]}{\partial y} \right)$	=	Efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. Tais termos só tem efeito relevante quando as ondas estão em águas relativamente rasas.
$-\frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$	=	Tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.
$\frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S)$	=	

$\frac{1}{\rho_o H}(-\tau_x^B) =$ Tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$\frac{1}{\rho_o H}(-\tau_x^E) =$ Tensão de atrito devido a efeito de estruturas inseridas no campo de escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$-2\Phi \text{sen } \theta V =$ Aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, e pouco relevante em corpos d'água como a Baía de Guanabara.

$-\frac{U}{H} \sum q =$ Efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação (q_P) evaporação (q_E), infiltração afluenta (q_{Ia}) e efluente (q_{Ie}).

3.1.2 Modelo de Transporte Euleriano Advectivo-Difusivo (MTEAD)

O modelo de transporte Euleriano realiza a simulação do transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas de produção ou consumo de substâncias presentes no escoamento. O modelo utiliza princípios de filtragem adotados para derivação da equação governante (3.5).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = & -\frac{C}{H}(q_P - q_E) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H} q_{Ia} + \sum R \\ & + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \left[D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + H \left[D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right) \\ & + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \left[D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + H \left[D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Onde:

$C =$ Concentração da substância de interesse.

$q_P, q_E, q_{Ia} =$ Valores dados de vazões de precipitação, evaporação e infiltração, respectivamente, por unidade de área, e.g. [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$].

$D_{ij} =$ Termo que representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal.

$\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k =$ Escalas de largura de filtragem local na dimensão x_k e α_k são parâmetros e calibração. O valor de α_k calibra a quantidade de dispersão e difusão fornecida pelos termos de filtragem.

Quando o constituinte tem comportamento ativo, ou seja, gera gradientes de pressão que influem de modo relevante no movimento das águas, a exemplo da salinidade, o transporte do constituinte pode ser acoplado à modelagem hidrodinâmica. Quando o comportamento do constituinte é passivo, isto é, não interfere de forma significativa na hidrodinâmica, a solução do problema de transporte pode ser desacoplada do modelo hidrodinâmico.

Dentre importantes aplicações do MTEAD, com reações cinéticas, estão a avaliação de Taxa de Renovação e Idade da Água, que representam metodologias de análise de tempos hidráulicos característicos mais apropriados para análises de corpos de água heterogêneos.

▪ **Taxa de Renovação de Água**

O modelo de Taxa de Renovação considera uma substância de referência passiva, i.e., a variação de sua concentração não interfere na circulação hidrodinâmica, e conservativa, que não possui reações cinéticas de produção ou consumo, nem velocidade de sedimentação e ressuspensão. Nessa modelagem, toda água do domínio de interesse recebe índice de renovação inicial igual a 0%, isto é, a substância recebe concentração igual a zero. As águas que entram no domínio de modelagem, seja pelos rios existentes ou pelo mar, devem receber valor de referência 100% em sua condição de contorno. O valor de concentração 0%, definido para as águas dentro do domínio, indicam zero renovado, e o valor de 100%, definido fora do domínio, indica água completamente nova.

Deste modo, no decorrer da simulação, as águas com diferentes concentrações se misturam devido a circulação hidrodinâmica. Águas com índice 0% se mesclam com as águas com índice 100% na medida que ocorre a renovação. Por exemplo, se em um determinado ponto da área de estudo, ao fim da simulação, houver uma taxa de renovação de 70%, isto indica que neste local 70% da água presente naquele instante resulta de águas que entraram no domínio de modelagem após o início da simulação, enquanto 30% já se encontravam dentro do sistema no início da simulação.

Cada ponto do domínio pode apresentar uma Taxa de Renovação diferente, uma vez que a mesma depende da magnitude de correntes e da turbulência em cada local. Além disso, essa Taxa varia no tempo. Assim, caso seja efetuada uma simulação por um período suficientemente longo, a Taxa de Renovação tende a 100% em todo o domínio.

▪ Idade da Água

Outra análise importante para estudos ambientais é o modelo de Idade da Água, que re-trata o tempo que uma parcela de água permanece dentro do domínio de modelagem. Para computar esse valor, o modelo considera uma substância passiva e que possui apenas reação cinética de decaimento de primeira ordem com uma taxa k constante, maior que zero. Outros efeitos de perdas ou ganhos de massa não devem existir.

Como ilustração de cálculo, considere um volume bem misturado com concentração inicial. Como a cinética de decaimento é de primeira ordem, a variação no tempo da concentração da substância marcadora de idade é obtida segundo a equação (3.6).

$$\frac{dC}{dt} = -k C \therefore C(t) = C_0 e^{-kt} \therefore t = \frac{-\ln(C/C_0)}{k} \quad (3.6)$$

Onde C_0 é a concentração inicial, $C(t)$ é uma concentração registrada posteriormente, k é a constante de decaimento e t é o tempo de decaimento decorrido. Para facilitar a interpretação da constante de decaimento k , definida como inverso de tempo, adota-se tempos equivalentes, por exemplo: T_{90} , que representa o tempo requerido para o decaimento de 90% da concentração, desta forma $C/C_0 = 0,1$, e $k = -\ln(0,1)/T_{90}$.

Na concepção do modelo, a concentração inicial adotada é igual a 1 para todo o domínio de modelagem. Seguindo a equação (3.6), o tempo ficaria $t = -\ln(1)/k = 0$, ou seja, idade zero. E todas as entradas de águas, como seções de rios e fronteira com o mar, recebem também valor 1, indicando que chegam no domínio com idade zero.

Em um corpo de água natural, como a Baía de Guanabara, pode haver diferentes entradas de águas com idade zero e saída de águas com algum decaimento. Logo, percebe-se que a Idade da Água varia em função do espaço e do tempo, podendo ter concentrações variadas em diferentes pontos do domínio. No entanto, seu valor tende à estabilidade em cada local, após um tempo de simulação suficiente.

3.1.3 Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA)

O MQA do SisBaHiA é composto por um conjunto de modelos de transporte Euleriano, nos quais a base numérica é a mesma do MTEAD integrado na vertical, descrito no item

3.1.2. O MQA considera o ciclo do oxigênio, do nitrogênio e do fósforo, além de biomassa de fitoplâncton e zooplâncton. A modelagem pode ser realizada com até 11 parâmetros de qualidade da água: Salinidade, Temperatura, DBO (mg/L O₂), OD (mg/L O₂), Amônia ((mg/L NA), Nitrato (mg/L NI), Nitrogênio Orgânico (mg/L NO), Fósforo Inorgânico (mg/L P), Fósforo Orgânico (mg/L PO), Clorofila (µg/L Chla) a e Zooplâncton (µg/L Z). Além destes 11 constituintes, o modelo permite ao usuário produzir saídas das análises de parâmetros grupados, como Nitrogênio Total (Amônia + Nitrato + Nitrogênio Orgânico), Nitrogênio Kjeldahl (Amônia + Nitrato) e Fósforo Total (Fósforo Inorgânico + Fósforo Orgânico).

Os mecanismos de transporte advectivo são dominantes no transporte de uma dada substância em um corpo de água, o que sugere uma grande dependência entre as simulações hidrodinâmica e de transporte. Os processos difusivos são modelados seguindo técnicas de filtragem no MQA disponível no SisBaHiA (Rosman, 2018).

Nesse modelo, cabe destacar que uma substância pode ser considerada como ativa, quando o gradiente desta substância gera forças relevantes para o movimento das águas, e passiva, quando as forças geradas não influenciam na circulação hidrodinâmica. Salinidade e temperatura podem ter comportamento ativo ou passivo. A critério do modelador, esses parâmetros podem ser acoplados ao modelo hidrodinâmico para ter comportamento ativo, ou pode-se simular a hidrodinâmica separadamente e depois simular o transporte de forma passiva. Os demais parâmetros são constituintes passivos.

3.2 Modelagem Digital do Terreno

A etapa de modelagem digital do terreno, no processo de modelagem ambiental aqui adotado, engloba a definição da área de estudo que será modelada, a construção da malha de discretização, e inserção de dados de batimetria e rugosidade do fundo na malha. Essa etapa é essencial ao processo de modelagem.

3.2.1 Domínio de Interesse

A definição do domínio de modelagem compreende a etapa inicial de construção do modelo. Em geral, os contornos fechados, i.e., com controle de fluxo, são associados a fronteiras terrestres e incluem o litoral continental e de ilhas, além de margens e seções trans-

versais de montante de rios. Os contornos abertos têm fluxo livre, mas níveis especificados, e geralmente delimitam o encontro da massa de água modelada com a massa de água exterior.

A geometria da área de estudo foi digitalizada a partir de imagens de satélite no Google Earth Pro datadas de 2017. Nas fronteiras de terra, tentou-se estender o domínio de modelagem para incluir considerável extensão dos rios que desaguam na Baía de Guanabara. No entanto, existem limitações técnicas na modelagem hidrodinâmica com um modelo 2DH neste caso, uma vez que se tem elementos pequenos, nos rios, juntamente com elementos de maior extensão na baía. Essa diferença de escalas pode gerar demanda maior de processamento computacional, e, ainda, possíveis erros numéricos.

A Figura 3.3 exibe o mapa base da área de estudos gerado, onde o domínio de modelagem é ilustrado em branco, o contorno de mar em azul e o contorno de terra em cinza. Também é destacado, em linha pontilhada, o limite considerado como Baía de Guanabara, que se estende da ponta do Forte de Copacabana até a ponta de Itaipu, passando pelas Ilhas do Pai, da Mãe e da Menina. Este limite também é considerado por Amador (1997).

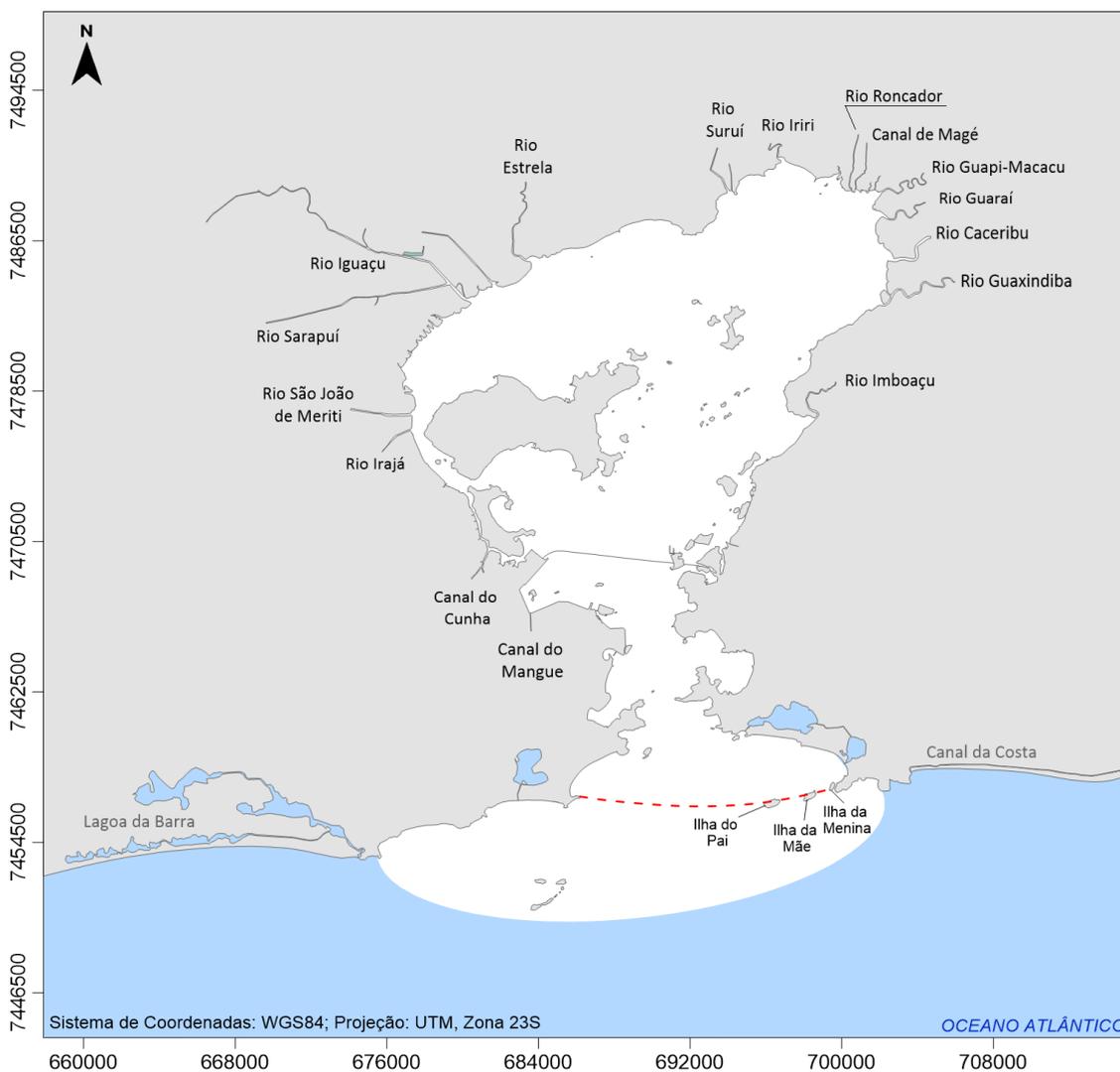


Figura 3.3 - Contornos utilizados para delimitação do domínio de modelagem

3.2.2 Malha de Discretização

A partir do mapa base, utilizou-se o SisBaHiA para confeccionar a malha de elementos finitos quadrangulares biquadráticos sobre a área de estudo. A discretização espacial, representada na Figura 3.4, utiliza 2284 elementos finitos, sendo 2190 quadrangulares biquadráticos e 101 triangulares quadráticos, possibilitando uma representação detalhada dos principais contornos de corpos de água naturais. No total, há 10526 pontos de cálculo.

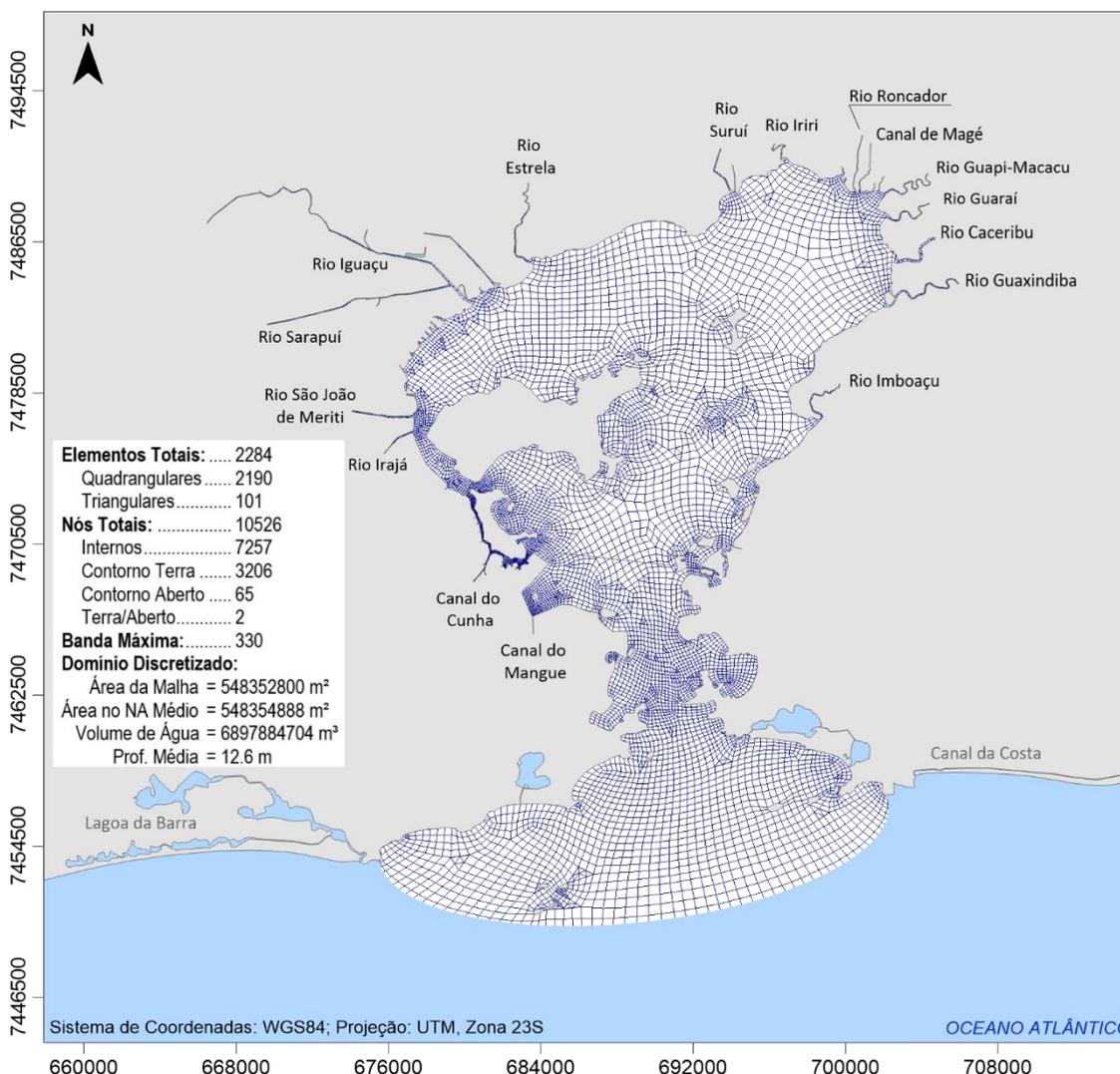


Figura 3.4 - Malha de discretização do domínio da modelagem para a Baía de Guanabara, com as informações resumidas dos dados da malha de discretização em elementos finitos.

3.2.3 Batimetria

Dados de batimetria para o modelo foram extraídos de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), disponíveis na página <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>. Foram utilizadas as cartas náuticas (CN): 1501 - Baía de Guanabara, 1511 - Barra do Rio de Janeiro, 1512 - Porto do Rio de Janeiro, 1513 - Terminais da Baía de Guanabara, 1515 - Baía de Guanabara - Ilha do Mocanguê e Proximidades e 1531 - Baía de Guanabara - Ilha do Boqueirão e Adjacências.

Dados de batimetria nos rios considerados no domínio de modelagem, no entanto, são escassos ou inexistentes. Devido a isso, adotaram-se estimativas para as batimetrias nos

rios. Os dados batimétricos para o Canal do Mangue, Rio Iguaçú, Rio Sarapuí e Rio Estrela são estimativas realizadas em projetos diversos do Laboratório de Hidráulica Computacional do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Para os demais rios, adotaram-se estimativas de profundidade segundo relações de largura-profundidade obtidas por Metha & Oszoy (1978) em vários canais estuarinos estáveis. Os rios que receberam tais estimativas foram Rio Acari, Rio São João de Rio Meriti, Rio Iriri, Rio Roncador, Rio Guapi-Macacu, Rio Guarai, Rio Caceribu, Rio Guaxindiba e Rio Imboaçú. Para o Canal do Cunha, obtiveram-se dados de batimetria da empresa Interdraga (KAUFMANN, 2009).

Todos os dados de batimetria foram compatibilizados com o NR - Nível de Redução adotado pela DHN na CN 1512. A batimetria apresentada na Figura 3.5 está referida ao Nível Médio do Mar, que tem cota 0,7m acima do NR da CN 1512.

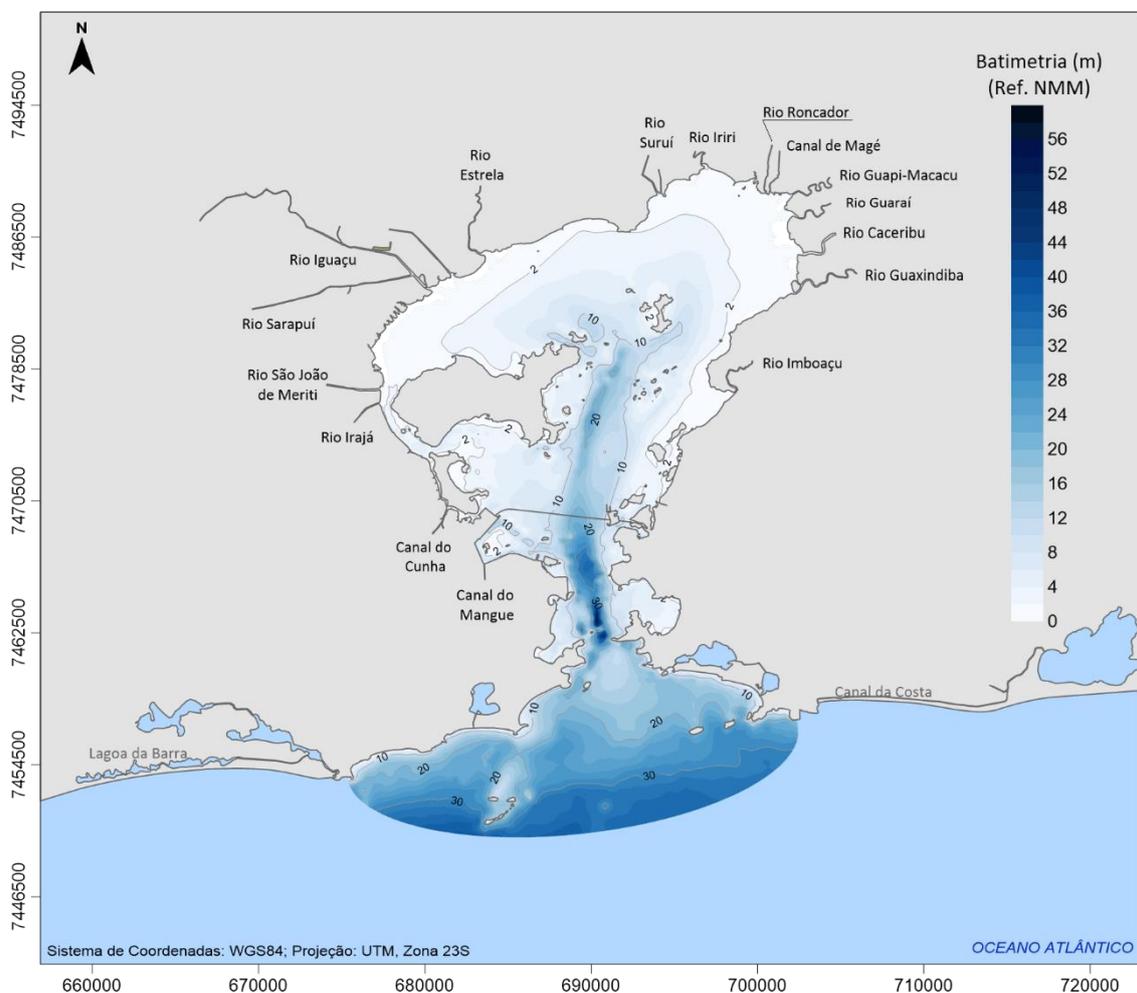


Figura 3.5 - Batimetria utilizada pelo modelo no domínio de modelagem, referida ao Nível Médio do Mar, que tem cota 0,7m acima do NR da CN 1512..

3.2.4 Tipos de Sedimentos do Fundo

O modelo hidrodinâmico calcula a tensão de atrito no fundo por meio do coeficiente de Chézy. Para definição deste coeficiente, é necessário prescrever um valor de rugosidade para a superfície de fundo (ϵ) em cada nó da malha de discretização. Essa rugosidade varia de acordo com o tipo de material do leito.

A distribuição de sedimentos de fundo adotada segue dados levantados no período de 1985 a 1996. Essa distribuição foi inicialmente apresentada por Amador em 1992, e atualizada em 1996 por Quaresma & Dias, a partir de novas medições realizadas pela DHN e pelo Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal Fluminense (LAGE-MAR-UFF), (AMADOR, 1997). Identificou-se que a região norte da Baía é composta, em sua maioria, por argilas e siltes, enquanto a embocadura apresenta maior porção de areias.

Por fim, valores de amplitude da rugosidade equivalente de fundo para cada classe de sedimentos foram definidas conforme sugerido em Rosman (2018). Também foram considerados trabalhos de modelagem anteriores na Baía de Guanabara, como (PORTO & PONTE, 2018), (PEREIRA, 2017), (ANDRIONI, 2013), (KAUFMANN, 2009) e (SAMPALIO, 2003). A Figura 3.6 mostra a interpolação resultante dos dados de rugosidade no domínio de modelagem.

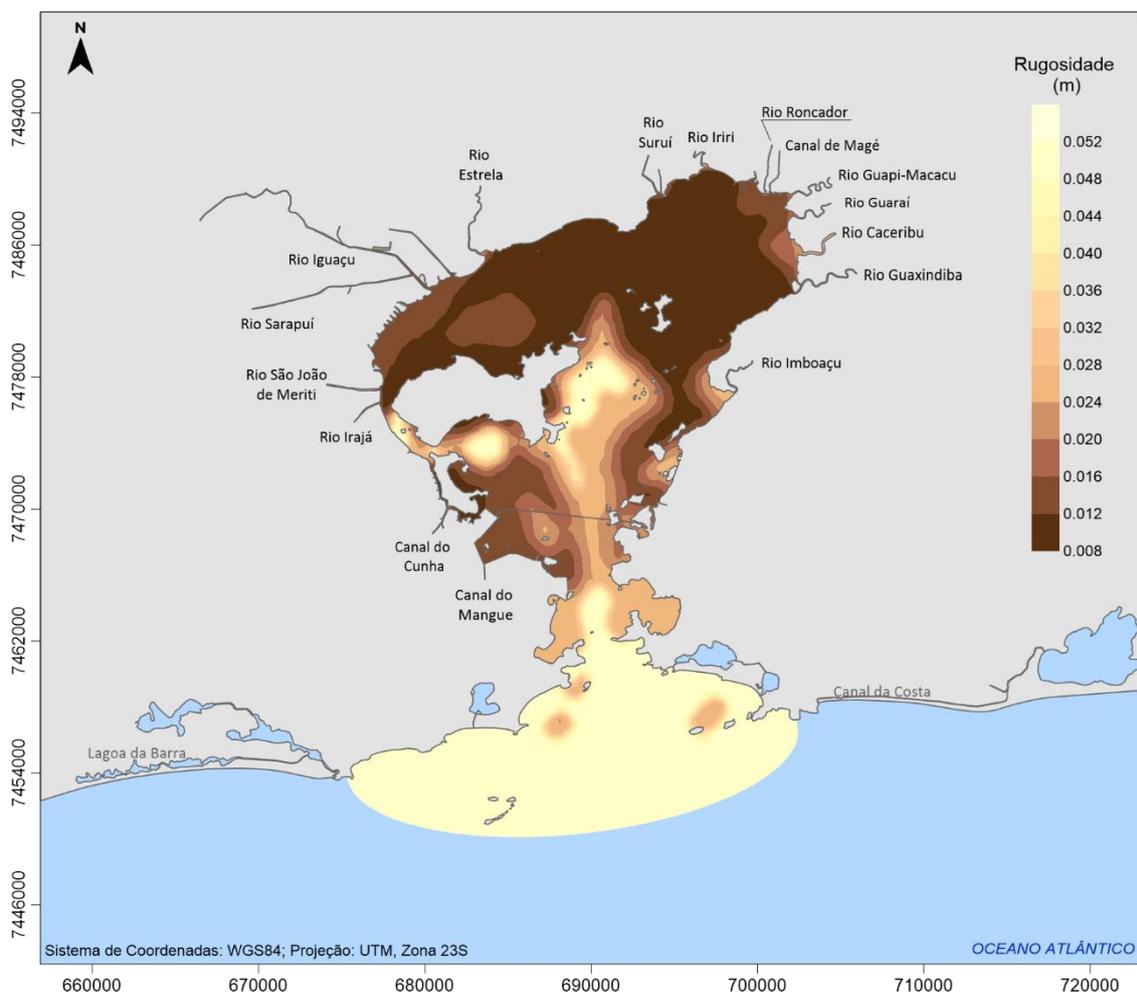


Figura 3.6 - Caracterização da amplitude da rugosidade de fundo (ϵ) equivalente a granulometria descrita.

3.3 Modelo hidrodinâmico

Esta seção apresenta os cenários de modelagem considerados nas simulações e as forçantes ambientais adotadas nas condições de contorno. São apresentadas as origens de todos os dados usados, e as considerações aplicadas em cada etapa da modelagem.

3.3.1 Cenários de Modelagem

Com o objetivo de simular padrões de circulação e sua variação sazonal, adotaram-se dois cenários na modelagem hidrodinâmica, um representativo de inverno (estação seca) e outro de verão (estação chuvosa):

- Inverno de 2016: de 20/06/2016 a 22/09/2016
- Verão de 2016/2017: de 21/12/16 a 20/03/2017

Os cenários consideraram as datas de início e fim da estação no ano analisado, do solstício de verão até o equinócio de outono para o verão, e do solstício de inverno até o equinócio de primavera para o inverno.

3.3.2 Dados Ambientais

Os modelos reúnem, para os períodos simulados, os seguintes forçantes: níveis de marés, correntes costeiras, ventos e vazões, que estão detalhados a seguir.

- **Maré**

A Baía de Guanabara, por ser um ambiente estuarino, possui grande influência das marés. As marés astronômicas são variações no nível do mar induzidas pela atração de corpos celestes, principalmente pela Lua e pelo Sol. Um ciclo da maré corresponde a um período de uma onda, ou seja, o tempo entre duas cristas ou entre instantes de maior amplitude. No ciclo de marés, este instante é definido como preamar, e os instantes de menor amplitude, ou cavas da onda, são denominados baixa-mar. Os ciclos de maré incluem fases de enchente e vazante, definidos de forma simplificada, respectivamente, como tempos em que ocorre entrada e saída da água do estuário. Variações na amplitude das marés também são observadas. Marés com maior variação de amplitude são observadas durante as fases de lua nova e lua cheia. Essas são denominadas marés de sizígia. E marés de menor amplitude são observadas durante as luas crescente e minguante, as chamadas marés de quadratura. As marés meteorológicas, por sua vez, caracterizam sobre-elevações do nível do mar devido à efeitos meteorológicos, como ventos, pressão atmosférica e passagem de frentes frias.

Nesse sentido, como condição de contorno para a fronteira aberta do domínio foi prescrita uma série temporal de elevações da superfície livre. Estes valores correspondem a níveis de maré nas proximidades da fronteira aberta, obtidos através de constantes harmônicas e dados de elevação devido a condições meteorológicas.

A série de maré astronômica foi obtida a partir das constantes harmônicas da estação do Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal) - RJ, disponíveis no site da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) e acessado em junho de 2017. Estas constantes foram calibradas para a fronteira aberta. A calibração se faz necessária pois os dados das constantes se referem à estação da Ilha Fiscal. No entanto, essa condição de contorno deve ser inserida na fronteira aberta do modelo. Na Tabela 3.1 estão listadas as constantes calibradas, utilizadas

para gerar a previsão de maré astronômica dos cenários modelados, em um ponto central da fronteira aberta.

Tabela 3.1 - Constantes harmônicas da FEMAR ajustadas para o contorno aberto, e seus respectivos valores de período, amplitude e fase para a estação Ilha Fiscal – RJ

Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)
Sa	31556955,92	0,0270	21,00
Ssa	15778463,36	0,0150	320,00
Mm	2380713,36	0,0180	96,00
Mf	1180292,34	0,0230	126,00
MSf	1275721,42	0,0310	162,00
Q1	96726,08	0,0252	108,00
O1	92949,63	0,0893	102,00
M1	89399,69	0,0068	87,00
P1	86637,20	0,0204	136,00
K1	86164,09	0,0602	142,00
J1	83154,51	0,0068	42,00
OO1	80301,87	0,0039	272,00
MNS2	47258,16	0,0061	115,38
2N2	46459,35	0,0088	226,38
MU2	46338,33	0,0096	146,38
N2	45570,05	0,0228	164,38
NU2	45453,62	0,0132	153,38
M2	44714,16	0,2789	83,38
L2	43889,83	0,0123	36,38
T2	43259,22	0,0079	109,38
S2	43200,00	0,1570	78,38
K2	43082,04	0,0500	8,38
MO3	30190,69	0,0019	305,00
M3	29809,44	0,0044	186,00
MK3	29437,70	0,0025	101,00
MN4	22569,03	0,0131	159,35
M4	22357,08	0,0316	31,35
SN4	22176,69	0,0026	139,35
MS4	21972,02	0,0204	121,35

Na Figura 3.7, pode-se observar a maré produzida na Ilha Fiscal pelas constantes harmônicas ajustadas na fronteira aberta. Obteve-se boa coerência entre valores de maré previstos pelo modelo com as constantes calibradas, e os valores gerados pelas constantes harmônicas originais na estação maregráfica da Ilha Fiscal.

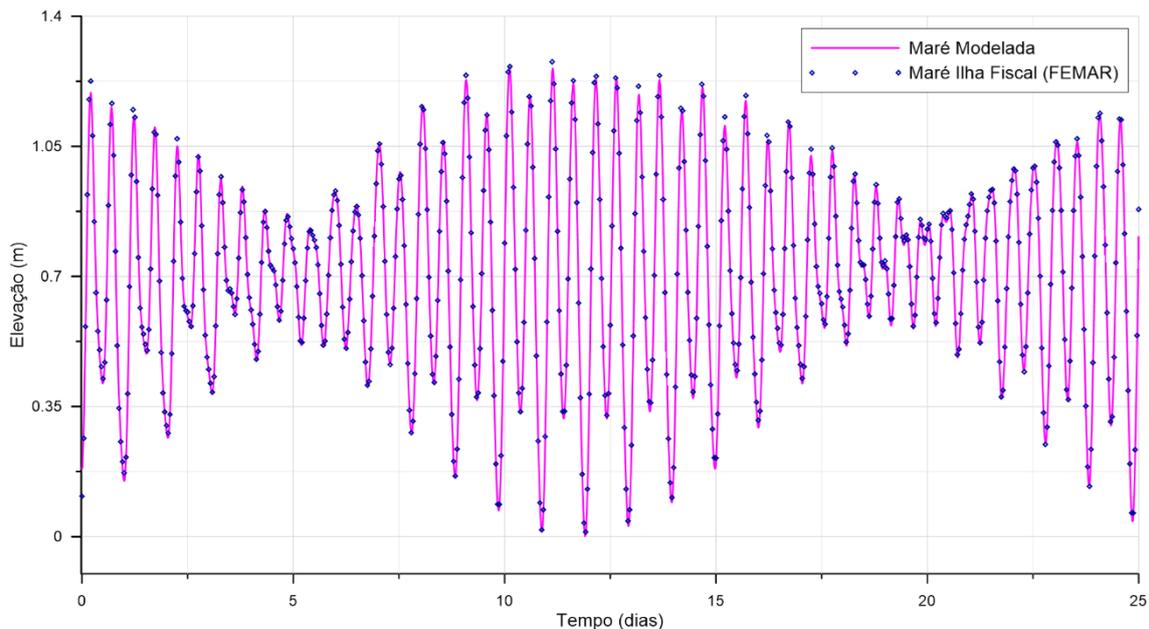


Figura 3.7 - Comparação entre a série temporal de elevação do nível de água devido à maré astronômica na Ilha Fiscal e resultados obtidos pelo modelo, para um período de 25 dias.

Também se incluiu a série de maré meteorológica extraída de dados médios diários de elevação do mar computados pelo *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM). Daher *et al* (2016), em estudo na costa do Rio de Janeiro, mostra que os valores do modelo HYCOM representam adequadamente os dados de nível médio diário obtidos de medições, validando sua utilização para condições de contorno de modelos regionais. Os dados foram baixados através da ferramenta “*Extraí Informações do HYCOM*” no SisBaHiA, para um ponto localizado na região central da fronteira aberta, com coordenadas 43,12 Oeste (O) e 23,04 Sul (S).

As condições de elevação inseridas na fronteira aberta do modelo foram calculadas através da soma das séries de maré astronômica e de maré meteorológica. A Figura 3.8 apresenta os condicionantes para todo o período de simulação, para inverno e verão.

Vale a pena citar que outra fonte de dados de elevação do nível no mar é o *Global Sea Level Observing System* (GLOSS), cujos dados podem ser baixados na página <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>, do *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL), órgão responsável pela coleta, publicação, análises e interpretação de dados de elevação do mar das estações da rede global de medição de maré. Para a Ilha Fiscal, no Rio de Janeiro, estação dentro do domínio de modelagem aqui estudado, existem dados de 03/02/1963 até 31/12/2013. Neste trabalho, optou-se por adotar dados do HYCOM, pois os dados medidos pelo GLOSS não contemplam o período analisado nos cenários de

modelagem, descritos no item 3.3.1. Além disso, como explicado anteriormente, estudos realizados por Daher *et al* (2016), na costa do Rio de Janeiro, corroboram que os valores do modelo HYCOM representam adequadamente os dados de nível médio diário obtidos de medições.

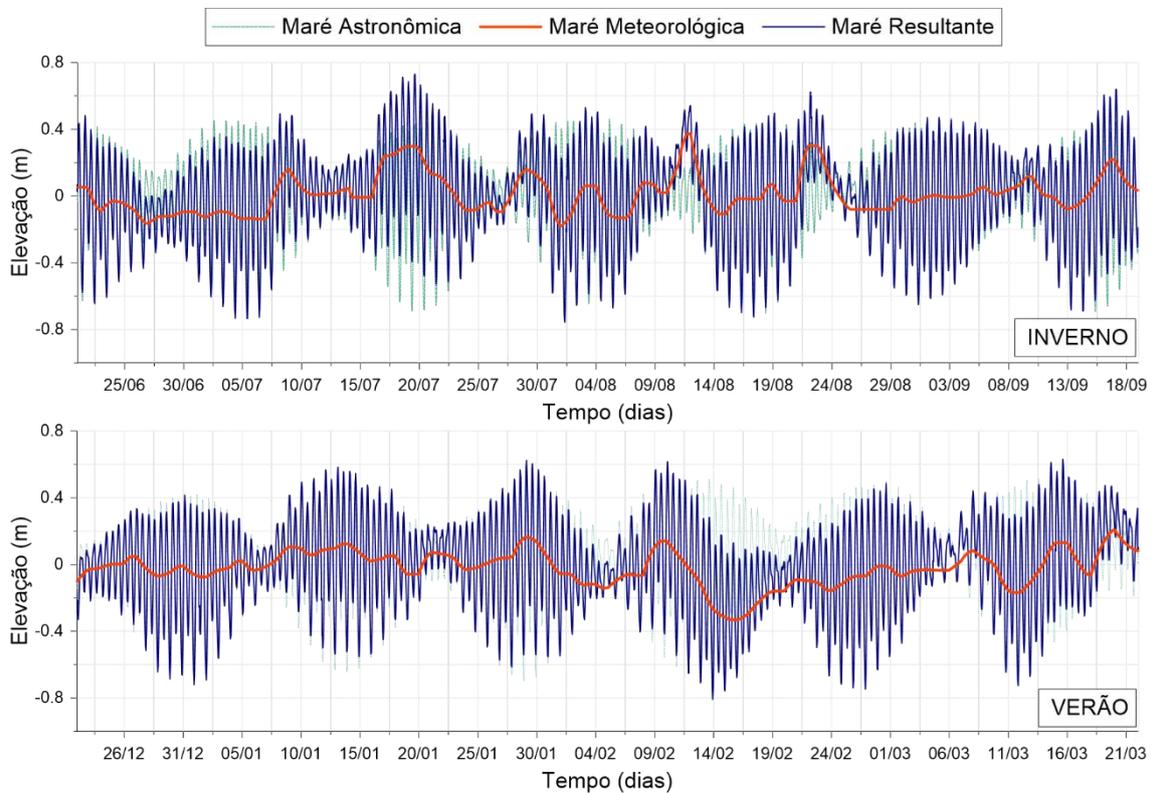


Figura 3.8 - Séries temporais de elevação da maré astronômica combinada à maré meteorológica, para inverno e verão.

Séries de elevações foram inseridas na fronteira aberta, com defasagem entre cada nó da fronteira, considerando as distâncias e profundidades de oeste para leste.

- **Correntes Costeiras**

No litoral sul do estado do Rio de Janeiro, a plataforma continental segue aproximadamente a direção Leste (E) – Oeste (O), fazendo com que o movimento das correntes litorâneas tenda a seguir essa direção, paralela à costa. O sentido das correntes varia de acordo com a influência de fatores como propagação de ondas de plataforma, ventos e sistemas frontais (MELO FILHO, 2017).

Para representar este padrão de correntes, prescreveu-se uma série de Nível Médio Diferencial (NMD) como condição de contorno adicional ao longo de nós da fronteira aberta. A série temporal geradora de NMD foi a série de velocidades médias diárias na direção

E-O, extraídas de dados do HYCOM, em um ponto próximo do meio da fronteira aberta, a uma profundidade de 10m da superfície. Estes dados foram extraídos do HYCOM através da ferramenta “*Extrai Informações do HYCOM*” no SisBaHiA.

Os valores de correntes médias diárias geradas pela série de NMD foram calibrados para corresponder a valores típicos medidos na região. Esses valores foram obtidos em campanhas de medições oceanográficas no litoral do Rio de Janeiro realizadas pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ, no período de 29 de novembro de 1996 a 15 de janeiro de 1998 (CARVALHO, 2003), realizadas para subsidiar estudos de dispersão no Emissário Submarino de Esgotos de Ipanema (ESEI).

▪ **Vazões Fluviais**

Um fator importante no estudo da hidrodinâmica da Baía de Guanabara é o aporte de água doce, que esse sistema estuarino recebe das vazões dos rios que nela desaguam. Na busca por dados de vazão na área de estudo, constatou-se que, apesar de sua importância na gestão na Bacia Hidrográfica da Baía de Guanabara e na própria Baía, existe um elevado déficit de medições *in situ* de descarga líquida dos rios. As estações de medições existentes apresentam base de dados com lacunas, decorrentes de diversos problemas de operação e armazenamento das informações, o que torna tais dados pouco confiáveis sem uma análise mais aprofundada.

Nesse sentido, as vazões aqui utilizadas foram obtidas de estudos de regionalização de vazões realizados para as bacias afluentes à Baía de Guanabara, tendo como base dados consistidos de séries históricas de nível d’água e medições de descarga de estações fluviométricas na bacia.

Foram inseridas no modelo as vazões dos rios de maior contribuição, sendo os limites da malha onde existem entradas de vazão apontadas na Figura 3.9. Para o período de inverno, cujas vazões são típicas de estação seca, considerou-se a vazão com permanência em 95% do tempo ($Q_{95\%}$) como representativo de todo o período. Para o verão, estação chuvosa, foram considerados valores médios mensais dos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março.

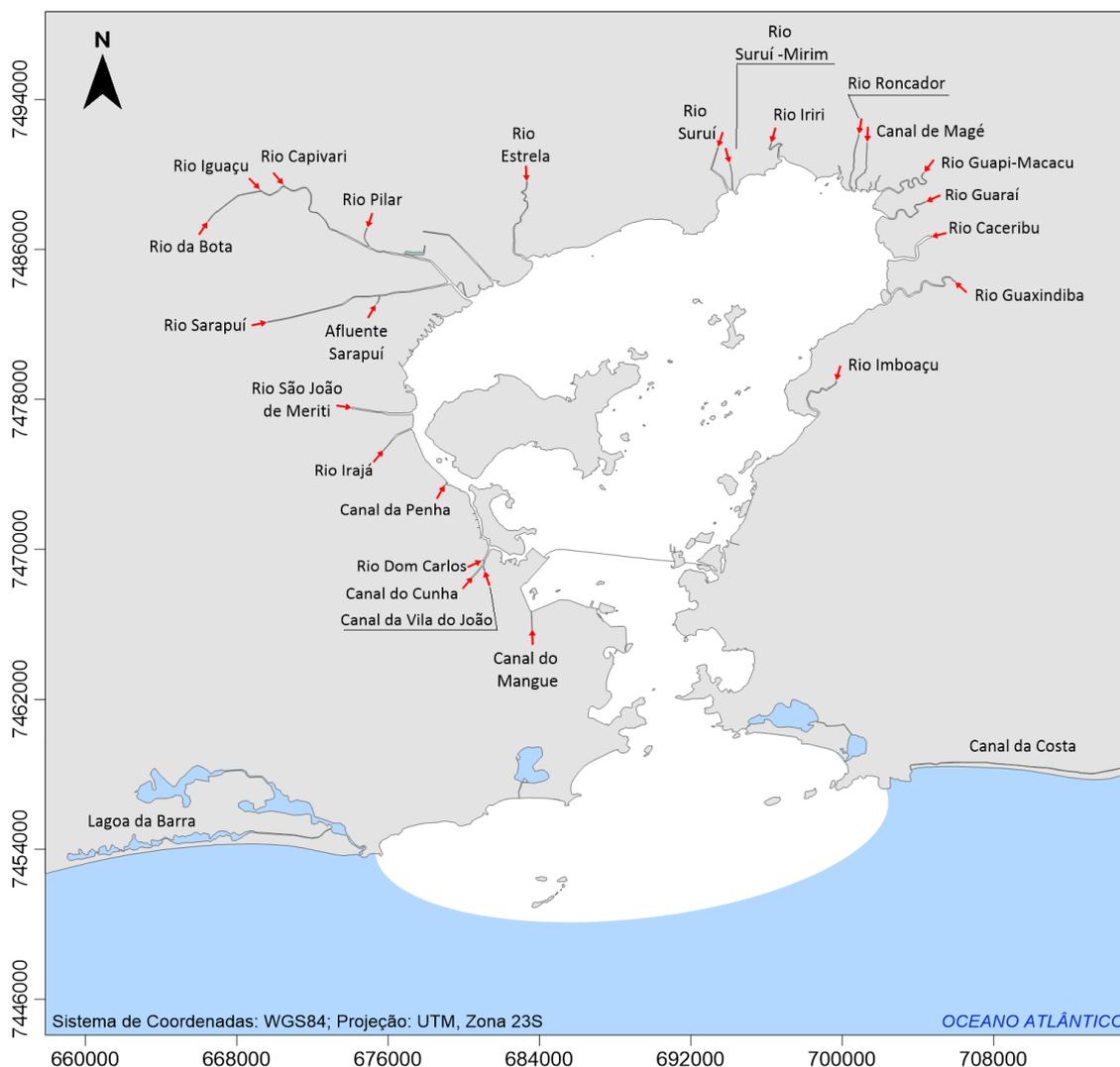


Figura 3.9 - Destaque para pontos onde se tem entrada de vazão no modelo.

Para a região Nordeste da bacia, foi utilizada a equação de regionalização da $Q_{95\%}$ obtida no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro – PERHI-RJ, publicado em 2014 (PERHI-RJ, 2014). Destacando que quando se diz região Nordeste, refere-se às sub-bacias dos rios Suruí, Iriiri, Santo Aleixo, Guapi-Macacu, Guaraí, Rio Caceribu e Canal de Magé.

No estudo realizado pelo PERHI-RJ (2014), foram utilizados os postos fluviométricos de Cachoeira de Macacu, Duas Barras, Japuíba e Quizanga do Inea, Parque Ribeira, Quizanga e Orindi pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA). A equação de regionalização da $Q_{95\%}$ foi determinada com os dados de vazões dessas estações, que, por sua vez, foram obtidas a partir da curva-chave ajustada e da série consistida de níveis d'água médios diários.

Para calcular as vazões de verão dessa região, por meio de ajuste de equações de regionalização das vazões mensais dos meses de cheia, utilizaram-se os mesmos dados dos postos fluviométricos consistidos e gerados pelo PERH-RJ (2014). Todas as equações utilizadas estão listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Equações ajustadas para a região nordeste.

Equações ajustadas	Fator de ajuste (R²)	Fonte
$Q_{95\%} = 0,0334 \text{ Área}^{0,7969}$	0,9076	(PERH-RJ, 2014)
$Q_{\text{Méd,Dez}} = 0,334 \text{ Área}^{0,6817}$	0,9370	Gerada a partir dos dados do PERHI
$Q_{\text{Méd,Jan}} = 0,233 \text{ Área}^{0,7684}$	0,9485	Gerada a partir dos dados do PERHI
$Q_{\text{Méd,Fev}} = 0,231 \text{ Área}^{0,7384}$	0,9432	Gerada a partir dos dados do PERHI
$Q_{\text{Méd,Mar}} = 0,247 \text{ Área}^{0,7065}$	0,8866	Gerada a partir dos dados do PERHI

Nas demais sub-bacias, incluindo Canal do Mangue, Canal do Cunha, Canal da Penha, Rio Irajá, Rio São João de Meriti, Rio Sarapuí, Rio Iguaçu, Rio Estrela, as vazões dos períodos de seca e de cheia foram obtidas do estudo desenvolvido por LABH₂O (2016) para as bacias afluentes à Baía de Guanabara.

Nesse estudo, foram selecionados quatro postos fluviométricos com dados suficientes para análise de consistência e determinação das séries de vazão: Columbandê, CIEP 100, Clube Catavento e Quartel PE. Para esses postos, as séries de nível d'água e medições de descarga foram consistidas, as curvas-chave definidas e as séries de vazões diárias geradas. As regiões adotadas neste estudo, bem como os postos fluviométricos cujos dados foram utilizados, estão ilustrados na Figura 3.10.

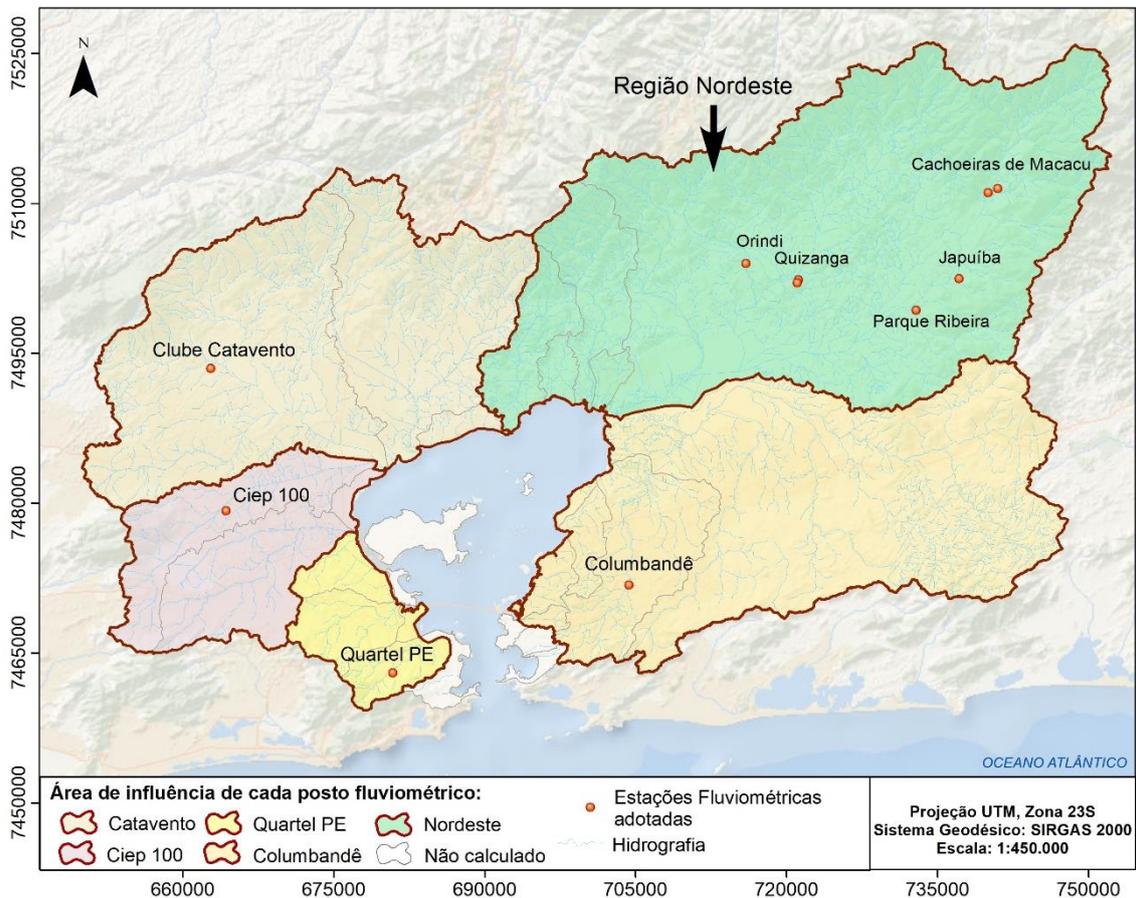


Figura 3.10 - Estações fluviométricas utilizadas no estudo, e suas respectivas bacias hidrográficas de influência.

A $Q_{95\%}$ foi obtida por LABH₂O (2016), a partir da curva de permanência das séries de vazões diárias dos postos analisados. Para os meses de verão, a metodologia utilizada foi semelhante, destacando que foram analisadas as séries de vazão dos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, e obtido um valor médio mensal de cada um desses meses.

De posse da vazão e área de drenagem de cada posto de medição, calculou-se a vazão das sub-bacias de interesse através de correlação de áreas de drenagem. Cada sub-bacia foi associada a um posto, de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Bacias representadas por cada estação.

Estação	Bacias Representadas
Quartel PE	Canal do Mangue, Canal do Cunha, Rio Irajá
Colubandê	Rio Imboaçú, Rio Guaxindiba
Ciep 100	Rio São João de Meriti, Rio Sarapuí
Catavento	Rio Iguaçú, Rio Inhomirim-Estrela

As áreas de drenagem de cada posto de medição, e suas respectivas vazões, estão listadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Vazões obtidas para as estações fluviométricas do INEA (LABH₂O, 2016)

Estação	Área (km ²)	Vazões (m ³ /s)				
		Q _{95%}	Q méd,dez	Q méd,jan	Q méd,fev	Q méd,mar
Quartel PE	13,52	0,52	1,07	1,08	1,00	1,11
Colubandê	63,5	0,39	2,41	3,34	3,04	3,30
Ciep 100	86,5	2,30	4,30	4,71	3,91	4,45
Catavento	85,4	0,58	4,40	3,17	2,66	2,05

Como descrito acima, todas as vazões calculadas dependem das áreas das sub-bacias. Para isso, adotou-se metodologia desenvolvida por Silva (2016), que criou um complemento que é utilizado no Quantum GIS, a fim de facilitar a incorporação de informações ligadas à rede hidrográfica e às áreas de drenagem. As rotinas de navegação deste complemento trabalham sobre uma base de dados de trechos e áreas de contribuição direta pré-processadas e consistidas. Isso permite a navegação na rede, com extração de características a montante e a jusante de qualquer ponto.

Dessa forma, foi possível determinar a área de drenagem a montante dos pontos de interesse. Silva (2016) desenvolveu a metodologia citada usando a bacia do rio Piabanha como base, e já realizou o processamento da rede de drenagem da região da Baía de Guanabara, cedendo as camadas vetoriais, em arquivos *shapefile*, verificadas para a elaboração do presente trabalho.

As vazões, para verão e inverno, obtidas e aplicadas ao modelo estão listadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Vazões de inverno e verão por sub-bacias hidrográficas.

Sub-bacias	Área de Drenagem (km ²)	Inverno	Verão			
		Q _{95%} (m ³ /s)	Q _{Méd,Dez} (m ³ /s)	Q _{Méd,Jan} (m ³ /s)	Q _{Méd,Fev} (m ³ /s)	Q _{Méd,Mar} (m ³ /s)
Canal do Mangue	44,83	1,72	3,55	3,59	3,33	3,67
Canal do Cunha	62,20	2,25	4,62	4,68	4,33	4,78
Canal da Vila do João	2,03	0,08	0,16	0,16	0,15	0,17
Rio Dom Carlo	1,78	0,07	0,14	0,14	0,13	0,15
Rio Irajá	17,47	0,67	1,38	1,40	1,30	1,43
Canal da Penha	12,99	0,50	1,03	1,04	0,96	1,06
Rio São João de Meriti	167,20	4,45	8,30	9,10	7,55	8,60
Rio Sarapuí	123,38	4,13	7,91	8,57	7,12	8,05
Canal (no Rio Sarapuí)	7,53	0,20	0,37	0,41	0,34	0,39
Rio da Bota	119,00	0,96	7,31	5,28	4,42	3,41
Rio Iguaçu	256,44	1,74	5,16	3,73	3,12	2,42
Rio Capivari	100,22	0,68	13,20	9,53	7,99	6,16
Rio Pilar	29,70	0,42	3,20	2,31	1,94	1,50
Rio Estrela	327,24	2,22	16,85	12,16	10,19	7,87
Rio Suruí	79,62	1,23	8,02	7,68	6,83	6,49
Rio Suruí Mirim	4,99	0,12	1,00	0,80	0,76	0,77
Rio Iriri	19,67	0,42	3,28	2,74	2,55	2,55
Rio Roncador ou Santo Aleixo	115,43	1,57	9,58	9,66	8,43	7,87
Canal de Magé	16,47	0,37	2,96	2,43	2,28	2,29
Rio Guapi-Macacu	1264,01	10,04	44,91	57,28	46,10	39,46
Rio Guaraí	17,49	0,38	3,00	2,49	2,32	2,33
Rio Caceribu	796,73	7,00	33,24	40,52	33,12	28,83
Rio Guaxindiba	176,11	1,08	6,69	9,27	8,42	9,16
Rio Imboaçú	30,58	0,19	1,16	1,61	1,46	1,59
Total	3793,13	42,49	187,04	196,59	165,14	151,00

▪ Ventos

A variável vento pode apresentar significativa influência na circulação hidrodinâmica do corpo hídrico, dependendo das características do mesmo. No modelo, a tensão de atrito do vento na superfície livre da água é calculada a partir de dados de direção e intensidade dos ventos.

Nesse sentido, em todas as simulações computacionais deste trabalho foi considerado vento variável no tempo e variado no espaço. Os dados foram obtidos do modelo de reanálise ERA-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* –

ECMWF, disponibilizados em <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>.

O intervalo mínimo entre dados disponível é de seis horas, sendo este o intervalo de dados introduzido nos modelos, que internamente interpolam quadraticamente para o passo de tempo. Os dados de vento foram espacialmente distribuídos pelos nós dos elementos no domínio a partir de dados das sete estações do ERA-Interim indicadas na Figura 3.11.

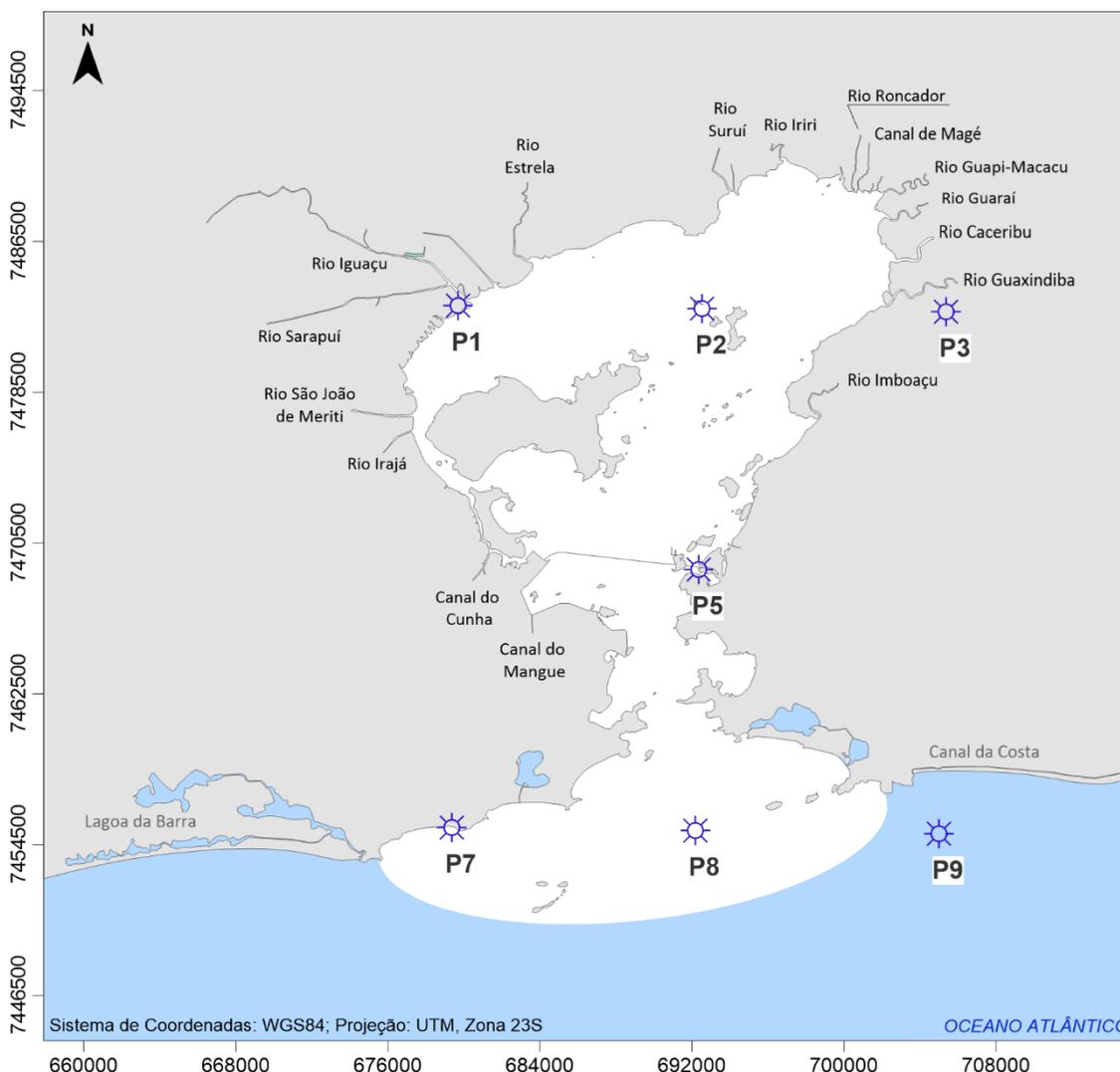


Figura 3.11 - Localização das 7 estações do ERA-Interim utilizadas para extração de dados de ventos de reanálise.

Na Figura 3.12, estão ilustradas rosas dos ventos referentes às estações P2, dentro da Baía, e P8, localizada na região externa à Baía, para os períodos de inverno e verão utilizados nas modelagens deste trabalho. Observa-se que o vento reinante na estação P2 durante o inverno, ou seja, o vento de maior frequência, é um vento de Sul Sudoeste (SSW), com cerca de 12% de frequência e picos de até 9m/s no quadrante Sul-Oeste, seguido de um

vento de Norte com 10% de frequência. No verão, a estação P2 registrou vento reinante na direção norte-nordeste (NNE), com frequência de cerca de 15%, seguido de ventos do quadrante norte-leste. As intensidades observadas foram mais baixas, chegando até 6m/s. Na estação P8, foram observadas velocidades mais intensas. O vento reinante no verão NNE, seguido de um vento de Sudeste (SW), ambos com frequência próxima de 12%. No quadrante sul-oeste, foram observados ventos superiores a 9m/s. No verão, esta estação registrou vento reinante na direção Nordeste (NE), com frequência de cerca de 16% e intensidade de 6m/s. No quadrante norte-leste também foram detectadas intensidades de ventos superiores a 9m/s com menor frequência.

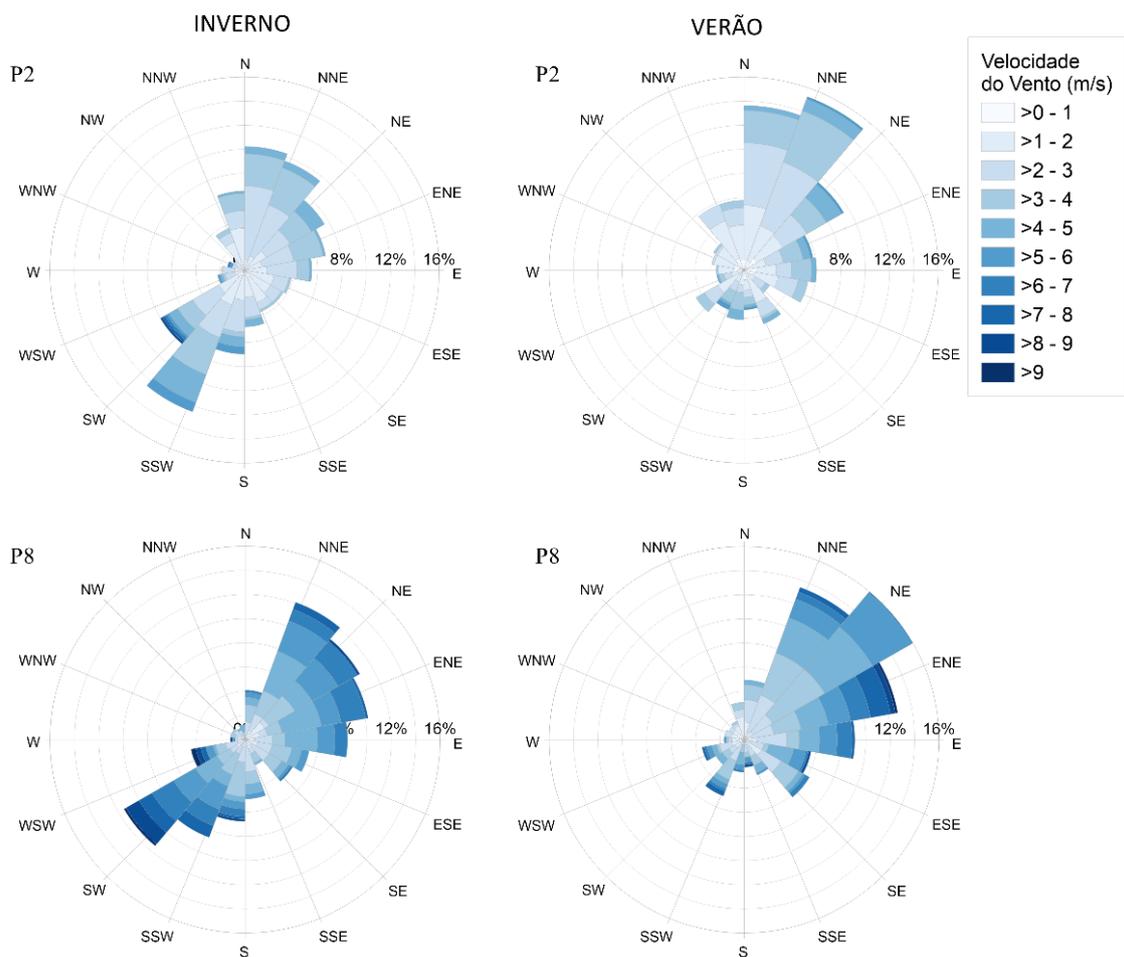


Figura 3.12 - Rosa dos ventos, de inverno e verão, nas estações P2, dentro da BG, e P8, fora da BG. O eixo radial indica a frequência de ocorrência de velocidades e direções; o eixo polar indica a direção do vento e a escala de cor a intensidade da velocidade.

▪ **Gradiente de Pressão Baroclínico**

O efeito baroclínico do gradiente de pressão, devido à variação horizontal de densidade da água, foi computado na modelagem hidrodinâmica através do termo $(\hat{\rho}/\rho_0)$, que aparece nas equações da seção 3.1. Esse gradiente é gerado por padrões de distribuição de salinidade média na coluna d'água.

De maneira semelhante ao trabalho de Roversi (2012), buscou-se chegar a valores médios de salinidade, próximos aos encontrados na região, mas não atingindo uma calibração efetiva do transporte de sal devido a fatores, como:

- Não existência de séries temporais de salinidade medidas simultaneamente às demais forçantes do modelo hidrodinâmico;
- Adoção de uma vazão mínima ($Q_{95\%}$) para todo o período de inverno, e de vazões médias mensais para os meses de verão. Todos os valores são frutos de estimativas;
- Afluência de água doce foi representada de forma simplificada. Foram apenas consideradas a contribuição das bacias hidrográficas de maior aporte de água, que foram inseridas no modelo pontualmente. Contribuições de canais menores foram desprezadas;
- Também se destaca a incerteza na vazão efetiva de água doce que chega a esse sistema estuarino, devido à existência de captações e lançamentos ao longo dos rios e na Baía.

No desenvolvimento do modelo, foram realizadas diversas simulações iniciais de ajustes e geração de condição inicial de salinidade. O modelo hidrodinâmico foi rodado, inicialmente, sem computar os gradientes de pressão baroclínicos. Rodou-se então um modelo de transporte de salinidade, utilizando os resultados da hidrodinâmica gerados. Essa simulação, desacoplada de transporte de salinidade, visou a geração de condição inicial de salinidade a ser utilizada no modelo seguinte. Essa etapa possui grande importância, pois se o modelo fosse iniciado com uma condição inicial genérica para todo o domínio, grande parte do período simulado seria para estabilização das concentrações de sal. Iniciar a simulação com valores já coerentes, embasados em dados medidos, em todo o domínio aumenta a qualidade dos resultados. As distribuições de salinidade para condição inicial basearam-se nos trabalhos de Bérghamo (2006) e Santos (2015).

Em seguida, rodou-se o modelo de transporte de salinidade acoplado ao modelo hidrodinâmico para geração dos gradientes de densidade. Conceitualmente, gradientes de densidade em estuários como a BG, dependem fundamentalmente da variação de salinidade, pois as pequenas variações de temperatura geram alterações cerca de 50 vezes menores que as causadas por variação de salinidade. Por esta razão, a temperatura não foi considerada como constituinte ativo.

As condições iniciais de salinidade adotadas nos modelos estão representadas na Figura 3.13, para os períodos de inverno e verão.

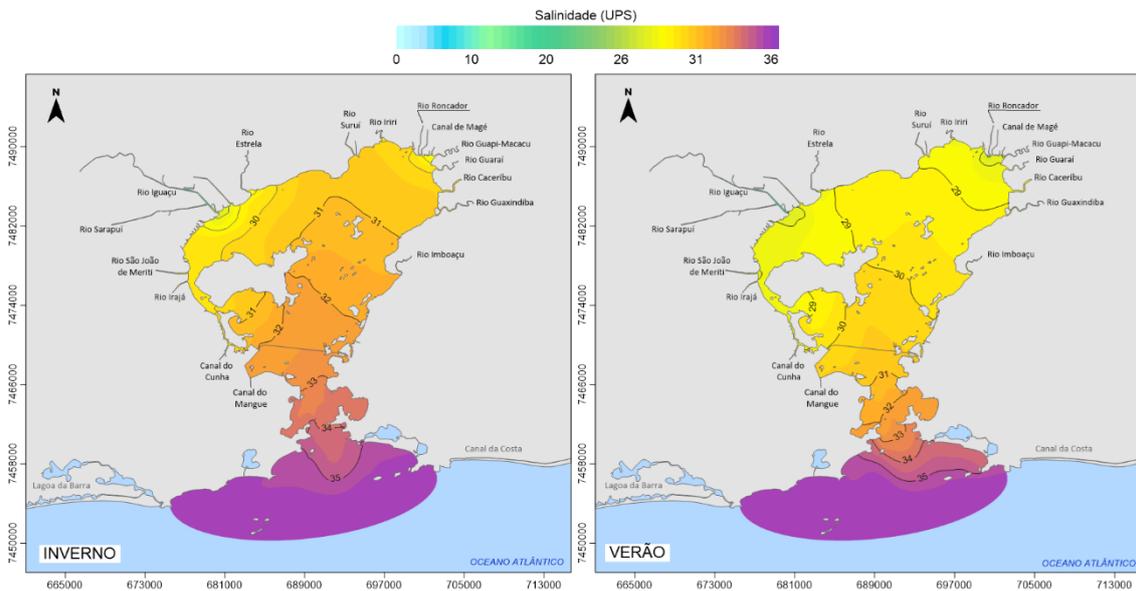


Figura 3.13 - Condição inicial fornecida aos modelos de salinidade, para inverno e verão.

3.4 Modelos de Tempos Hidráulicos Característicos

Nesta seção, estão descritos como foram elaborados os modelos de caracterização dos tempos característicos: Taxa de Renovação e Idade da Água.

3.4.1 Taxa de Renovação

Os cálculos de Taxa de Renovação foram realizados utilizando o Modelo de Transporte Euleriano do SisBaHiA. Para esse modelo, definiu-se o valor zero para todos os nós dentro da Baía de Guanabara. Fora do domínio, nos contornos com vazões fluviais e de mar receberam o valor 100. Assim, a taxa de renovação é calculada diretamente a partir das interações dessas condições iniciais durante o tempo de simulação, sendo dada em porcentagem, de 0 a 100%.

A Figura 3.14 ilustra a condição inicial adotada para os cenários de verão e inverno. Esses cenários foram simulados por 90 dias.

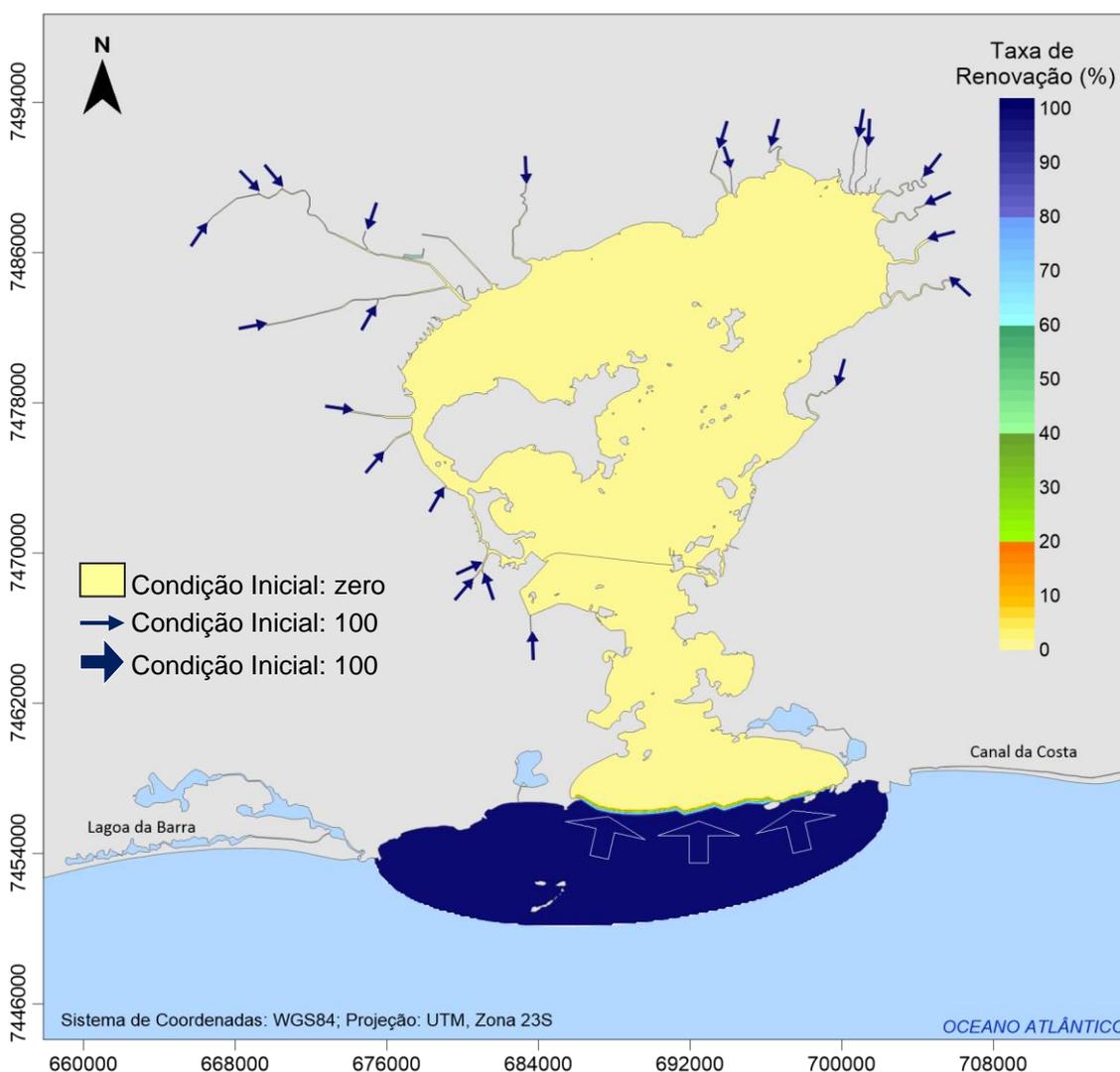


Figura 3.14 - Condição inicial imposta no modelo de Taxa de Renovação.

Acentua-se que o termo água nova aqui utilizado refere-se à água que está inicialmente fora do sistema, e está entrando no domínio de modelagem. A qualidade desta água que adentra o estuário não é discutida na análise de Taxa de Renovação. No entanto, é importante para análise conjunta com modelos de qualidade de água.

3.4.2 Idade da Água

Os cálculos de Idade da Água também foram realizados utilizando o Modelo de Transporte Euleriano do SisBaHiA. Como descrito no item 3.1.2, a contabilização da idade da água se dá por decaimento de primeira ordem de uma substância passiva presente no do-

mínio. Dessa forma, para estimar o tempo de decaimento, ou seja, a idade da água, definiu-se uma concentração 1 como valor inicial em todo o domínio de modelagem, que indica idade zero. Assim, a idade da água inicial é zero e, à medida que as águas externas e internas ao domínio se misturam, esta idade sobe e a concentração decai. A condição inicial, aplicada para ambos os cenários de modelagem, está ilustrada na Figura 3.15.

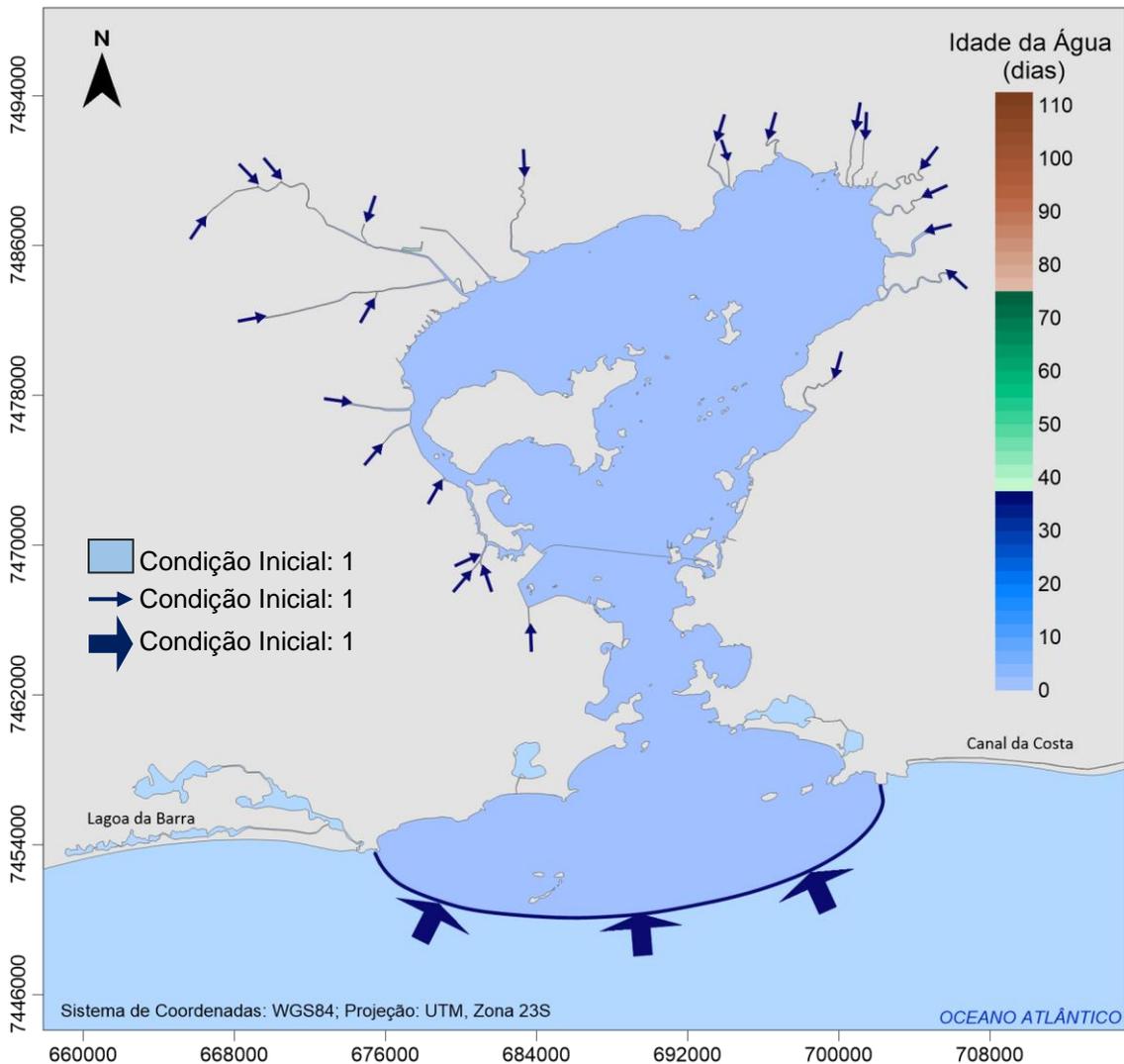


Figura 3.15 - Condição inicial imposta para o Modelo de Idade da Água.

3.5 Modelo de Qualidade da Água

Para as modelagens de qualidade da água neste trabalho, utilizou-se o módulo “Todos Acima” do MQA do SisBaHiA, cuja localização no sistema está ilustrada na Figura 3.16.

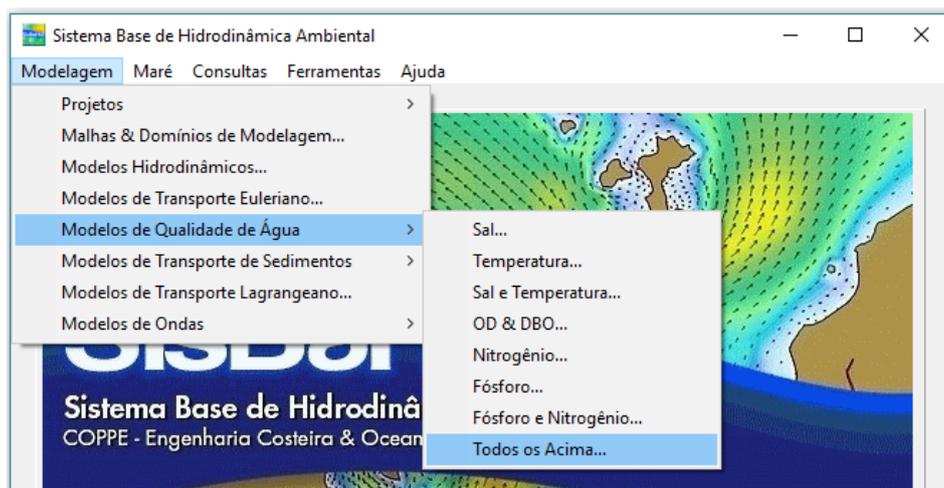


Figura 3.16 - SisBaHiA, caminho para MQA utilizado.

3.5.1 Dados Meteorológicos

No MQA do SisBaHiA, deve-se definir parâmetros meteorológicos de radiação solar, temperatura e humidade do ar. Esses dados podem ser inseridos na forma de séries temporais de dados medidos. Neste trabalho, utilizaram-se dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a estação automática Rio de Janeiro - Forte de Copacabana, os quais foram obtidos através de solicitação no canal Fale Conosco no site (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/contato>).

As séries de dados obtidas, com informações de radiação solar (watt/m^2), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade (%), abrangem os mesmos períodos adotados nos modelos hidrodinâmicos:

- Inverno de 2016: de 20/06/2016 a 22/09/2016;
- Verão de 2016/2017: de 21/12/16 a 20/03/2017.

3.5.2 Cenários de Modelagem

Em um cenário desejável de aplicação de Modelos de Qualidade da Água (MQA), dados medidos em estações de monitoramento seriam aplicados no condicionamento e na calibração dos modelos. Idealmente, na etapa de condicionamento, haveriam dados medidos nas seções dos rios, próximo do limite do contorno de modelagem. Enquanto na etapa de calibração e validação, os resultados dos modelos seriam comparados com dados de medição no interior do domínio de modelagem.

No entanto, não se conseguiu uma série de dados contínua e longa da Baía de Guanabara. As estações existentes são monitoradas pelo Inea, que disponibiliza um boletim anual das

estações localizadas nos Rios da bacia Hidrográfica da BG em seu site, no endereço: <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Qualidadedaagua/aguasInteriores/Qualificaodeguas/RHV-BaiadeGuanabara1/index.htm&lang=#/ConsultaosDados>. Também existem estações no espelho d'água da BG. No entanto, esses dados não se encontram disponíveis no site, e não se conseguiu acesso a eles. Portanto, para geração de condições de contorno, foram utilizados dados das estações da bacia hidrográfica da BG, ilustradas na Figura 3.17, que se localizam mais próximas das fronteiras do modelo.

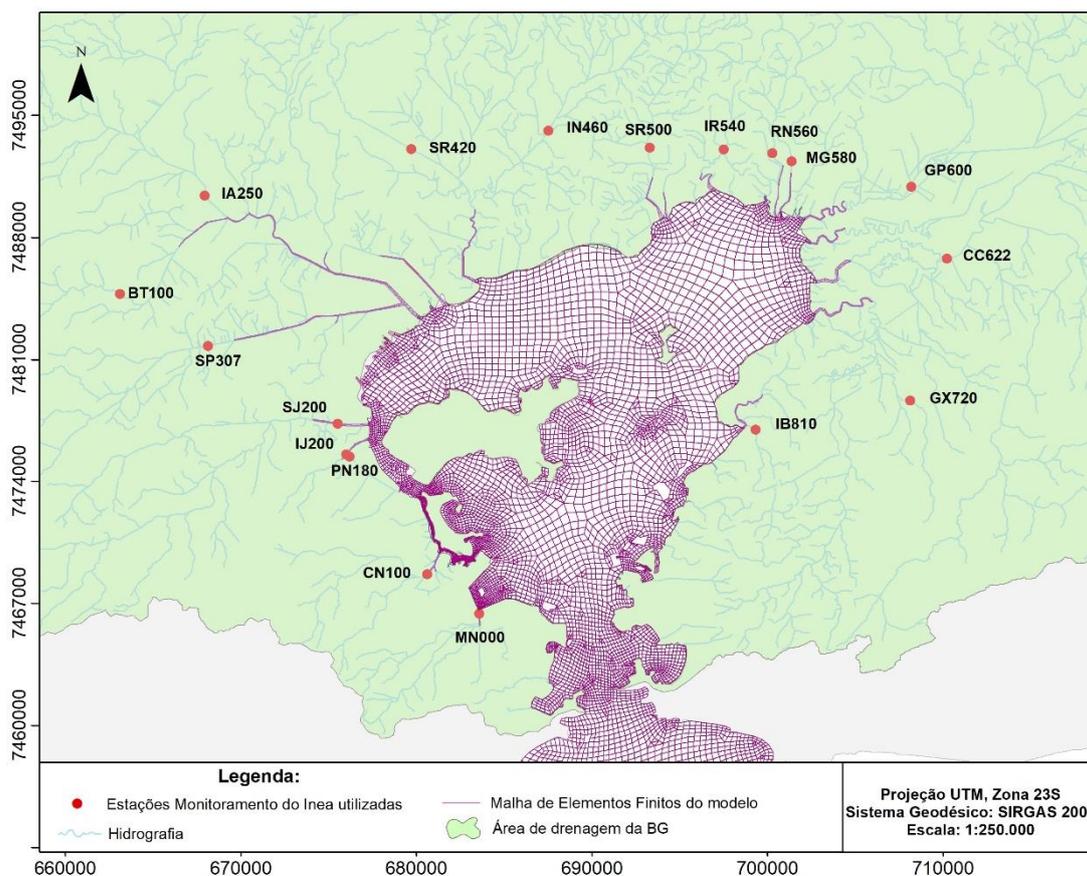


Figura 3.17 - Estações de medição do Inea usadas para geração de condição de contorno no MQA.

Foram utilizados dados referentes aos anos de 2014, 2015, 2016 e 2017. Como os dados são poucos e sem periodicidade entre as medições, para cada parâmetro medido foi calculada uma mediana para os meses de inverno e verão de todos os anos considerados. Obteve-se, assim, um valor representativo de cada cenário. Nem todos os parâmetros necessários ao modelo são monitorados, ou estão disponíveis. Nesses casos, fez-se inferência de parâmetros baseando-se nos valores medidos, presumindo que a qualidade de água a montante dos pontos de monitoramento seja um pouco melhor que a mais a jusante. A

Tabela 3.6 mostra os parâmetros considerados, bem como as unidades adotadas no modelo e como os mesmos foram obtidos. A Tabela 3.7 exhibe a lista dos dados medianos obtidos para geração de condição de contorno das entradas de vazões fluviais.

Tabela 3.6 - Variáveis consideradas no MQA, com descrição da origem dos dados utilizados.

Parâmetro	Unidade	Observação (Quando diferentes nos cenários: Atual/Desejado)
Salinidade	‰	Salinidade acoplada ao modelo hidrodinâmico
Temperatura	°C	Mediana dos dados do Inea
OD	mg/L O ₂	Mediana dos dados do Inea / Valor limite CONAMA
DBO	mg/L O ₂	Mediana dos dados do Inea / Valor limite CONAMA
Amônia	mg/L NA	Inferida 2xNitrato em rios com DBO maior que 10mg/L; e como 30% do Nitrogênio Total nos demais / Valor limite CONAMA
Nitrato	mg/L NI	Mediana dos dados do Inea / Valor limite CONAMA
Nitrogênio Orgânico	mg/L NO	Inferido como 0 em rios com DBO maior que 10mg/L; e como 20% do Nitrogênio Total nos demais
Fósforo Inorgânico	mg/L P	Inferido como 60% do Fósforo Total
Fósforo Orgânico	mg/L PO	Inferido como 40% do Fósforo Total

OBS.: Detinha-se apenas da concentração de nitrato nos dados medidos, logo os outros compostos de Nitrogênio tiveram as concentrações estimadas, não se encontrou valores mais indicativos na literatura de concentrações possíveis, logo adotaram-se os valores listados nesta tabela.

Valores limites da CONAMA 357/2005 na Tabela 2.3

Tabela 3.7 - Valores mediados, de inverno e verão, obtidos através dos dados de medições do Inea, nos anos de 2014 a 2017, para cada fronteira de entrada de rio.

Rio	Inverno					Verão				
	DBO (mg/L)	PT (mg/L)	Nitrato (mg/L)	OD (mg/L)	Temp. água (°C)	DBO (mg/L)	PT (mg/L)	Nitrato (mg/L)	OD (mg/L)	Temp. água (°C)
Canal do Mangue	28,0	1,29	0,32	1,30	22,0	32,0	1,27	0,03	0,00	25,5
Canal do Cunha	32,0	1,33	0,10	0,80	22,5	32,0	1,47	0,01	0,00	25,0
Rio da Vila do Joao	32,0	1,33	0,10	0,80	22,5	32,0	1,47	0,01	0,00	25,0
Canal Dom Carlo	32,0	1,33	0,10	0,80	22,5	32,0	1,47	0,01	0,00	25,0
Canal da Penha	40,0	1,23	0,01	0,00	22,5	32,0	1,14	0,01	0,00	26,5
Rio Irajá	30,0	1,43	0,12	0,00	22,5	40,0	1,25	0,03	1,50	26,5
Rio São João de Meriti	38,0	2,02	0,02	0,40	20,5	28,0	1,80	0,01	0,00	26,0
Rio Sarapuí	30,0	2,17	0,10	0,60	21,5	32,0	2,01	0,01	0,00	27,0
Canal Sarapuí	30,0	2,43	0,10	0,60	21,5	42,0	2,03	0,04	0,00	26,0
Rio Bota	15,0	2,03	0,10	0,75	21,5	18,0	2,48	0,07	2,00	25,5
Rio Iguaçu	9,0	0,44	1,40	5,60	21,0	9,0	1,49	3,07	3,50	24,0
Capivari	9,0	0,44	1,40	5,60	21,0	9,0	1,49	3,07	3,50	24,0
Pilar	15,0	2,03	0,10	0,75	21,5	18,0	2,48	0,07	2,00	25,5
Estrela	8,8	0,35	0,46	4,10	19,1	6,3	1,49	0,49	3,58	23,3
Rio Surui	2,6	0,13	0,66	6,72	20,5	3,2	0,15	0,30	2,88	25,0
Rio Surui Mirim	2,6	0,13	0,66	6,72	20,5	3,2	0,15	0,30	2,88	25,0
Rio Iriri	2,1	0,18	0,44	9,36	20,5	5,6	0,33	0,04	2,60	25,0
Rio Roncador	2,7	0,19	1,50	7,30	21,5	2,4	0,06	0,33	6,80	25,0
Rio Magé	20,0	2,79	0,02	1,20	22,5	42,0	1,77	0,04	0,00	27,0
Rio Guapi-Macacu	1,0	0,16	0,18	6,30	22,0	5,0	0,13	0,17	5,40	27,0
Rio Guaraí	1,0	0,16	0,18	6,30	22,0	5,0	0,13	0,17	5,40	27,0
Rio Caceribu	1,7	0,37	0,15	4,20	21,0	5,5	0,30	0,77	3,15	26,5
Rio Guaxindiba	14,5	2,85	0,04	1,05	20,0	7,0	2,17	0,02	0,30	24,5
Rio Imboáçu	30,0	2,30	0,02	0,00	21,5	22,0	1,90	0,02	0,00	26,0

PT = Fósforo Total

Uma vez que não houve dados necessários para calibração das concentrações, as análises realizadas neste trabalho buscaram uma visão comparativa entre resultados de cenários distintos modelados, para detalhamento de regiões com maior degradação ambiental no espelho d'água da BG. A comparação da qualidade das águas foi realizada com parâmetros estabelecidos na classe 2, considerando DBO, OD, além de compostos de Fósforo e Nitrogênio. Esses parâmetros foram escolhidos pois tem valores limites prescritos na Resolução CONAMA nº 357/2005 e nos dados do Inea utilizados na geração de condições de contorno. Além disso, estão incluídos nas equações do modelo de transporte empregado.

Adotaram-se cenários hidrodinâmicos de inverno e verão, e cenários de qualidade da água, um, denominado atual, considerando condições de contorno segundo dados do Inea, e outro, chamado de desejado, considerando nas condições de contorno os parâmetros limites disponíveis na Resolução CONAMA nº 357/2005 para Classe 2, de águas salinas. Ao todo, foram rodados quatro modelos de qualidade da água: verão-atual, verão-desejado, inverno-atual e inverno-desejado.

De posse dos modelos rodados, escolheu-se um instante, em um nível de maré mediano, para cada cenário hidrodinâmico, para extração de resultados na forma de grid. Então, foram gerados grids para os parâmetros analisados, neste mesmo instante, com espaçamento igual entre as grades, mesmo tipo de interpolação, foi utilizada triangulação linear. Os grids foram gerados através da ferramenta de extração de resultados no próprio Sis-BaHiA.

Em seguida, no software Surfer 14, utilizou-se a ferramenta *Math*, que permite efetuar cálculos com grids. A Figura 3.18 ilustra, de forma esquemática, os cálculos realizados com os grids para obtenção dos resultados. Primeiramente, fez-se uma subtração entre os grids atual e desejado. No fim, obteve-se um percentual indicando quanto cada parâmetro esteve acima, ou abaixo no caso de OD, do valor estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salinas. Adotaram-se valores de águas salinas, pois a maioria da extensão da BG contém águas salinas, e esse tipo de água possui valores mais restritivos na legislação vigente. Se os parâmetros nessa classe forem atendidos, os mesmos logicamente atendem também os limites definidos para águas salobras e doces.

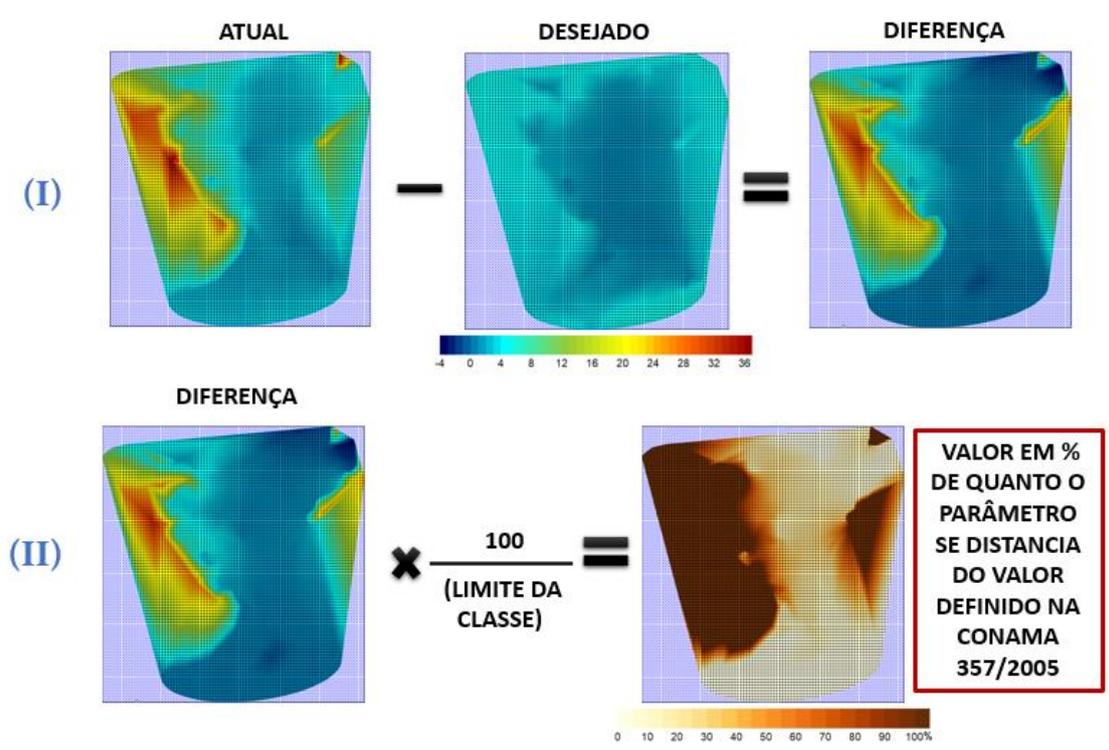


Figura 3.18 - Etapas e cálculos efetuados com os grids para obter o valor percentual que é ilustrado nos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações computacionais. Primeiramente, são apresentadas características da distribuição de salinidade, da circulação hidrodinâmica na Baía de Guanabara, incluindo padrões de circulação. Em seguida, Taxas de Renovação e Idade da Água, e, por fim, análises de Qualidade da Água. Nas análises dos resultados, referenciam-se as estações de controle ilustradas na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Mapa de estações de controle para gravação e exibição de resultados temporais dos modelos, com informações gravadas a cada trinta minutos.

Para ilustrar instantes de maré nas análises, de salinidade e hidrodinâmica, adotaram-se os ciclos de maré destacados na Figura 4.2 para o cenário de inverno. Um ciclo de quadratura, cujas alturas de maré são menores, e um ciclo de sizígia, no qual as alturas de

maré são mais elevadas. Em cada ciclo, foram destacados instantes de preamar (PM), baixa-mar (BM), meia maré vazante (MMV) e meia maré enchente (MME). A série de elevação refere-se à estação Ponte Rio-Niterói.

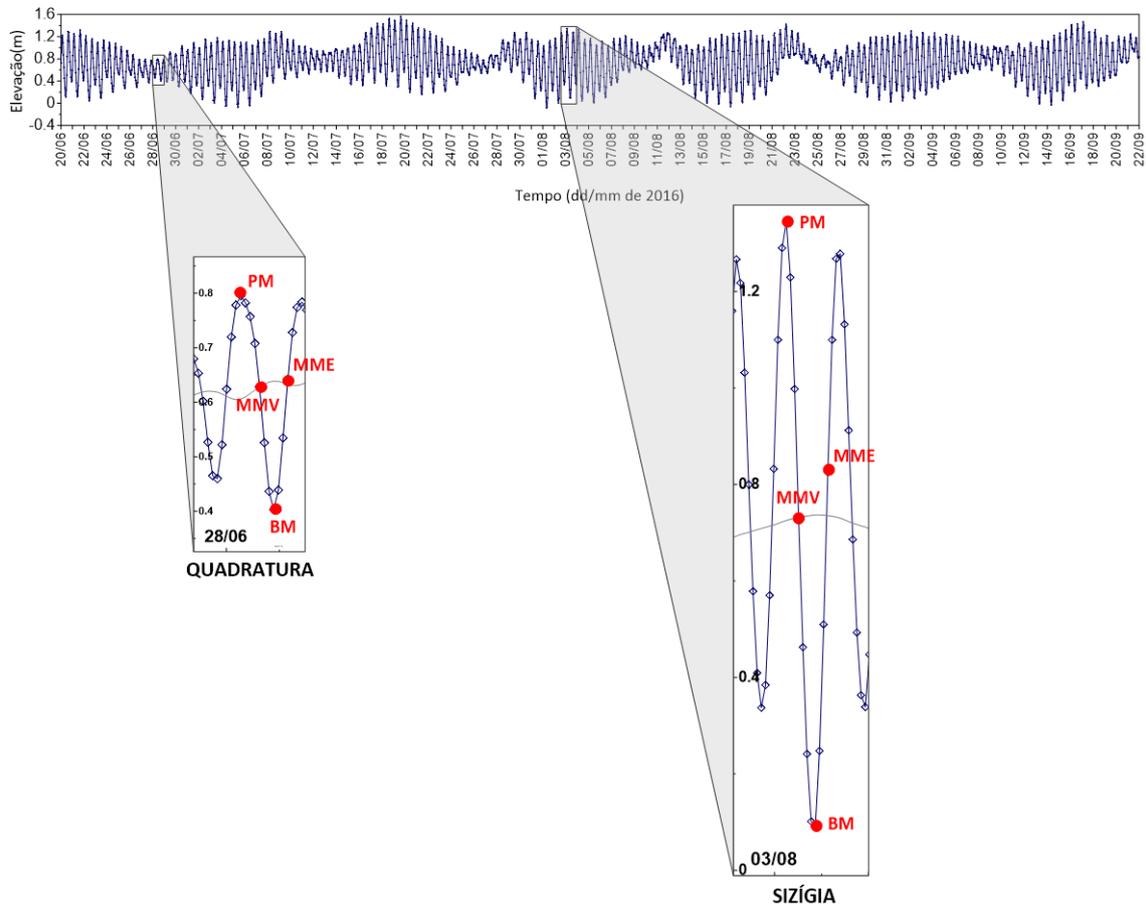


Figura 4.2 - Ciclos de maré escolhidos para representar o padrão de distribuição de correntes na Baía no inverno, em instantes de PM, MMV, BM, MME em marés de sizígia e de quadratura.

A Figura 4.3 ilustra os ciclos de maré escolhidos para representação do cenário de verão. Analogamente, nela estão destacados um ciclo de maré de quadratura e um ciclo de sizígia, com destaque para instantes de PM, MMV, BM e MME.

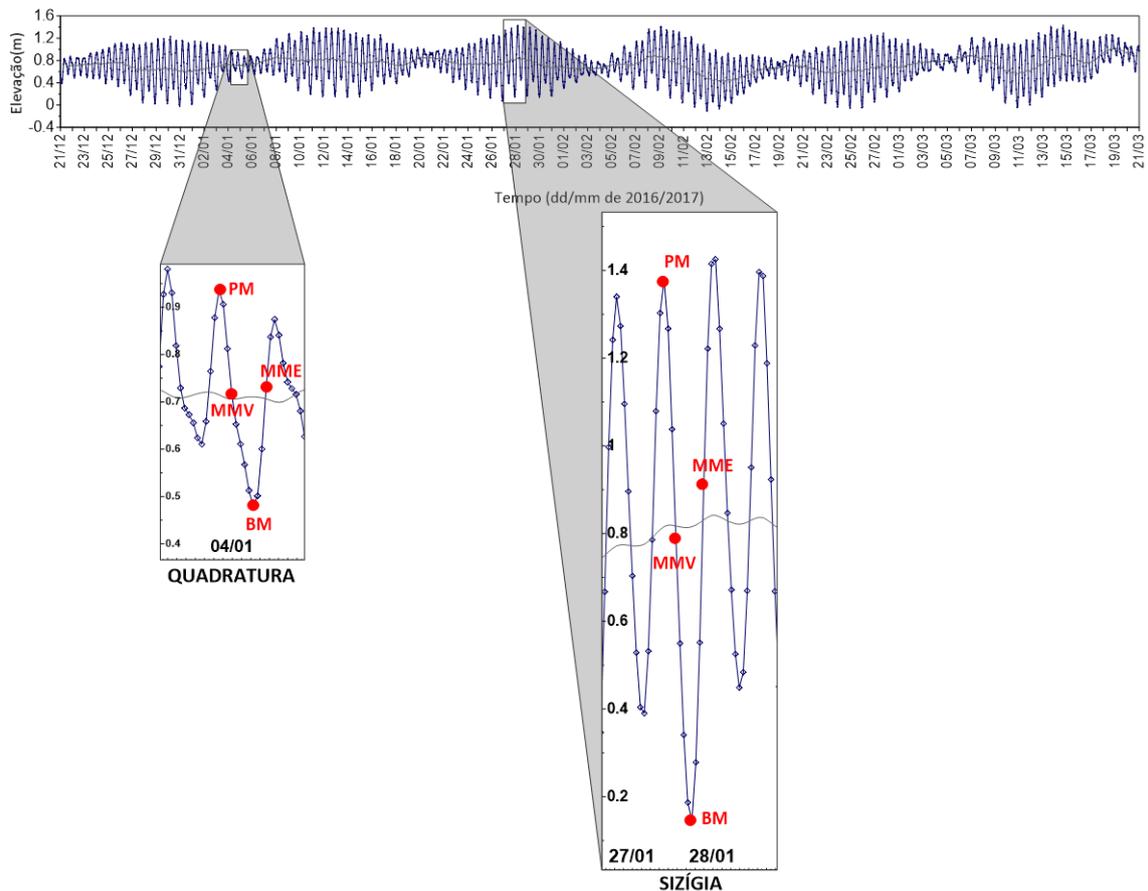


Figura 4.3 - Ciclos de maré escolhidos para representar padrões de distribuição de correntes na Baía no verão, em instantes de PM, MMV, BM, MME em marés de sizígia e de quadratura.

4.1 Análises de Padrões de Salinidade

Padrões de distribuição espacial de salinidade na Baía de Guanabara são influenciados pela água salina que recebe do mar, com salinidade 36 e massa específica de cerca de 1025 kg/m^3 , e pela água doce dos rios, com salinidade próxima de 0 e massa específica de cerca de 998 kg/m^3 . A combinação dessas águas com diferentes densidades gera um gradiente de pressão baroclínico, devido à redução da concentração de salinidade à medida que se entra na Baía. Trabalhos como os de Bérghamo (2006), Guimarães *et al.* (2011) e Santos (2015) registraram tais padrões por meio de dados no campo.

Bérghamo (2006) mediu o parâmetro salinidade, em diferentes profundidades, em estações fixas dentro da BG, correspondentes às estações Boca da Barra, IG Sul, IG Sudeste e Paquetá Sudoeste que estão ilustradas na Figura 4.1. As faixas de salinidades encontradas pelo autor estão listadas na Tabela 4.1, bem como a média na coluna d'água calculada a partir destas faixas e os valores encontrados no modelo. As faixas de variação de salinidade aqui listadas se referem à variação de salinidade da superfície ao fundo, sendo as

salinidades mais altas observadas em maiores profundidades e as mais baixas, próximas à superfície. Vale lembrar que, no presente trabalho, foram calculados valores promediados na vertical, e a comparação de resultados aqui efetuada foi visou obter, de forma aproximada, com valores médios na coluna d'água.

Tabela 4.1 - Salinidade na BG, dados de Bérghamo (2006) e dados modelados, para inverno e verão.

Faixas de salinidade na coluna d'água (BÉRGAMO, 2006)				
Estações	Inverno		Verão	
	Sizígia	Quadratura	Sizígia	Quadratura
Boca da Barra	34,6 - 35,5	34,8 - 35,8	33,0 - 35,5	33,0 - 35,5
IG Sul	32,5 - 35,0	30,0 - 35,0	29,0 - 33,0	31,1 - 34,3
IG Sudeste	33,7 - 34,7	33,0 - 35,0	30,0 - 34,0	31,0 - 34,5
Paquetá Sudoeste	-	32,0 - 35,0	27,5 - 33,5	26,0 - 33,0
Salinidade médias (adaptado de Bérghamo (2006))				
Estações	Inverno		Verão	
	Sizígia	Quadratura	Sizígia	Quadratura
Boca da Barra	35,0	35,3	34,2	34,2
IG Sul	33,8	32,5	31,0	32,7
IG Sudeste	34,2	34,0	32,0	32,8
Paquetá Sudoeste	-	33,5	30,5	29,5
Faixa de variação dos valores de salinidade promediados na vertical calculados pelo modelo				
Estações	Inverno		Verão	
	Sizígia	Quadratura	Sizígia	Quadratura
Boca da Barra	32,8 - 34,7	33,6 - 34,5	31,1 - 33,9	31,9 - 33,3
IG Sul	30,3 - 31,4	30,9 - 31,3	29,1 - 29,7	29,3 - 29,6
IG Sudeste	31,7 - 32,1	32,0 - 32,3	29,8 - 30,3	30,1 - 30,2
Paquetá Sudoeste	31,0 - 31,4	31,2 - 31,3	29,1 - 29,5	29,3 - 29,4

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.1, percebe-se que o resultado da modelagem de salinidade apresentou valores próximos à média dos valores observados por Bérghamo (2006). Os valores médios encontrados por Santos (2015), com seus respectivos desvios padrão, estão listados na Tabela 4.2, bem como as faixas de variação da salinidade nas regiões onde esse autor realizou medições. Essas regiões estão ilustradas na Figura 4.4. Obtiveram-se dados no modelo, que se encontram dentro das faixas de variação dos dados. Sublinha-se que o período de medições realizadas pelos autores e o período considerado no modelo são diferentes. Logo, variações nos padrões de chuvas entre o período de medições e o período modelado podem ser citados para justificar maiores diferenças de salinidade.

Tabela 4.2 - Dados anuais (01/2013 - 04/2014) por setor mensurados na Baía de Guanabara a partir de amostragens discretas realizadas por Santos (2015).

Setores	Dados Medidos (Média ± Desvio Padrão)		Valores de salinidade promediados na vertical calculados pelo modelo	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão
1	32,27 ± 2,22	32,54 ± 1,75	33,3 - 35,1	31,2 - 33,4
2	30,74 ± 1,71	28,37 ± 3,65	31,2 - 32,4	29,6 - 30,2
3	29,92 ± 3,27	29,4 ± 3,03	31,1 - 32,3	29,8 - 30,6
4	26,90 ± 5,39	26,27 ± 3,15	29,5 - 30,2	28,6 - 29,2
5	27,31 ± 4,73	27,24 ± 3,26	29,5 - 30,0	28,7 - 29,1

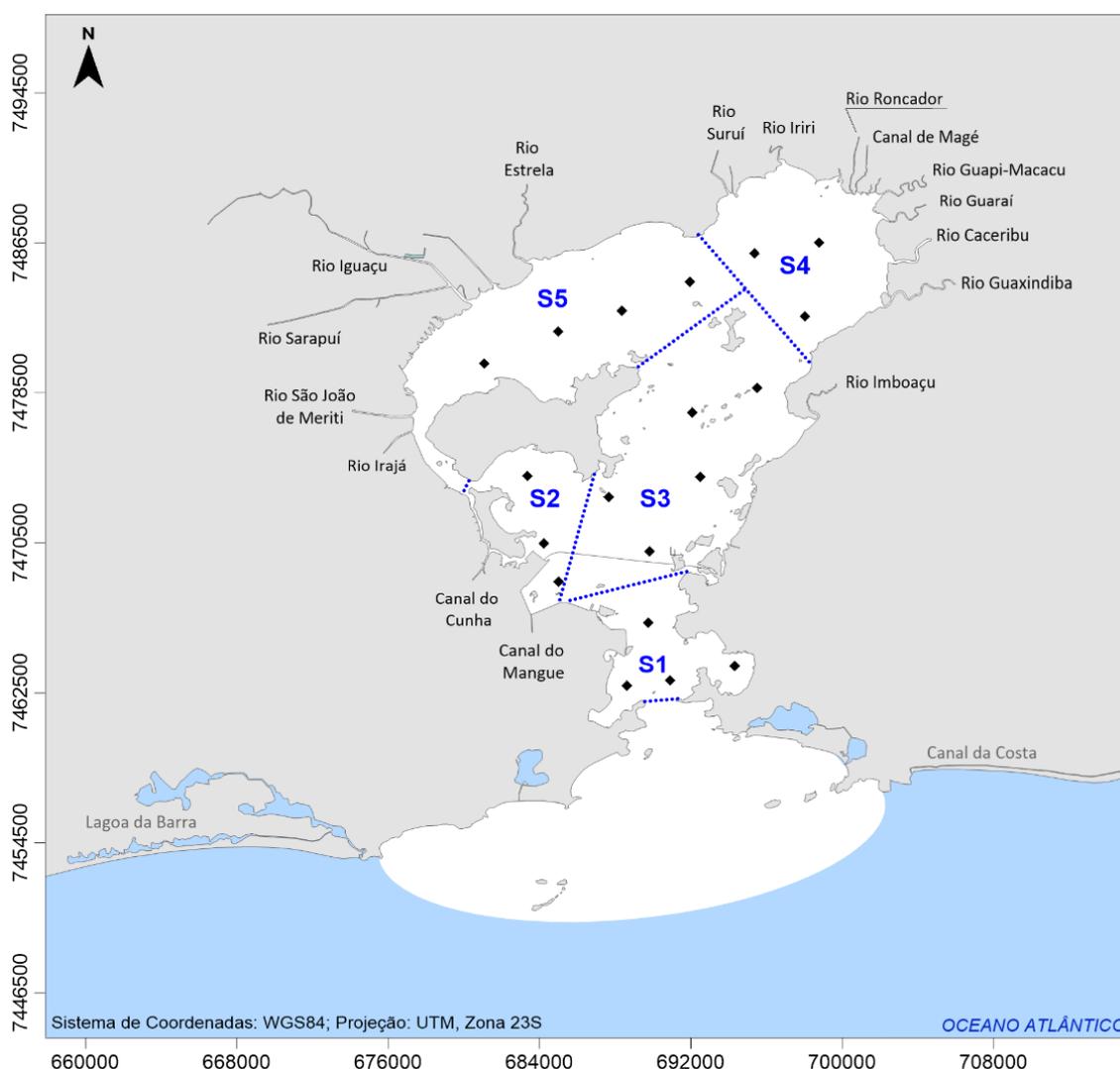


Figura 4.4 - Setores definidos por Santos (2015), pontos representam os locais de medição. (Adaptado de Santos (2015)).

Em uma análise geral da variabilidade de salinidade com a maré nas modelagens computacionais, não se observaram diferenças significativas entre sizígias e quadraturas para as mesmas condições fluviais. Tal comportamento é justificado pelo longo tempo de renovação das águas na Baía de Guanabara, que será discutido na seção 4.3. Os intervalos de

sizígias e quadraturas variam em torno de 7 dias, nesse período o que se percebe é uma pequena oscilação na salinidade com as enchentes e vazantes da maré. Esse tempo é insuficiente para que se note diferenças significativas na concentração de salinidade geral da Baía. Em ambas as estações modeladas, inverno e verão, obtiveram-se padrões de distribuição semelhantes entre sizígia e quadratura. Mapas de isolinhas, representando os instantes de PM, MMV, BM e MME de ciclos de maré de sizígia e quadratura, estão ilustrados na Figura 4.5 e na Figura 4.6, para o inverno, e na Figura 4.7 e na Figura 4.8, para o verão.

Contrastando os resultados para inverno e verão, percebe-se a influência da vazão fluvial afluyente na salinidade. No verão, são encontrados menores valores de salinidade no interior da Baía. O que é coerente, devido à maior vazão de água doce nesse período. Nesse estudo, com base em dados históricos, considerou-se um aporte total médio de água doce na BG de $42,5\text{m}^3/\text{s}$ no inverno e de $175\text{m}^3/\text{s}$ no verão. Portanto, no verão a vazão fluvial afluyente à Baía é cerca de 4 vezes maior que no inverno. Logo, o gradiente de densidade é maior nesse período do ano.

A salinidade atinge os seus maiores valores no canal principal da Baía, próximo à Boca da Barra. Os menores valores, como esperado, são encontrados nas proximidades das embocaduras dos rios de maior vazão, como: Iguaçu-Sarapuí, Guapi-Macacu e Caceribu.

Outro fator que pode influenciar na variabilidade de salinidade entre as estações do ano estudadas é o padrão de chuvas. Tipicamente, a região apresenta invernos mais secos e verões mais chuvosos. No entanto, essa variável não foi diretamente considerada na modelagem.

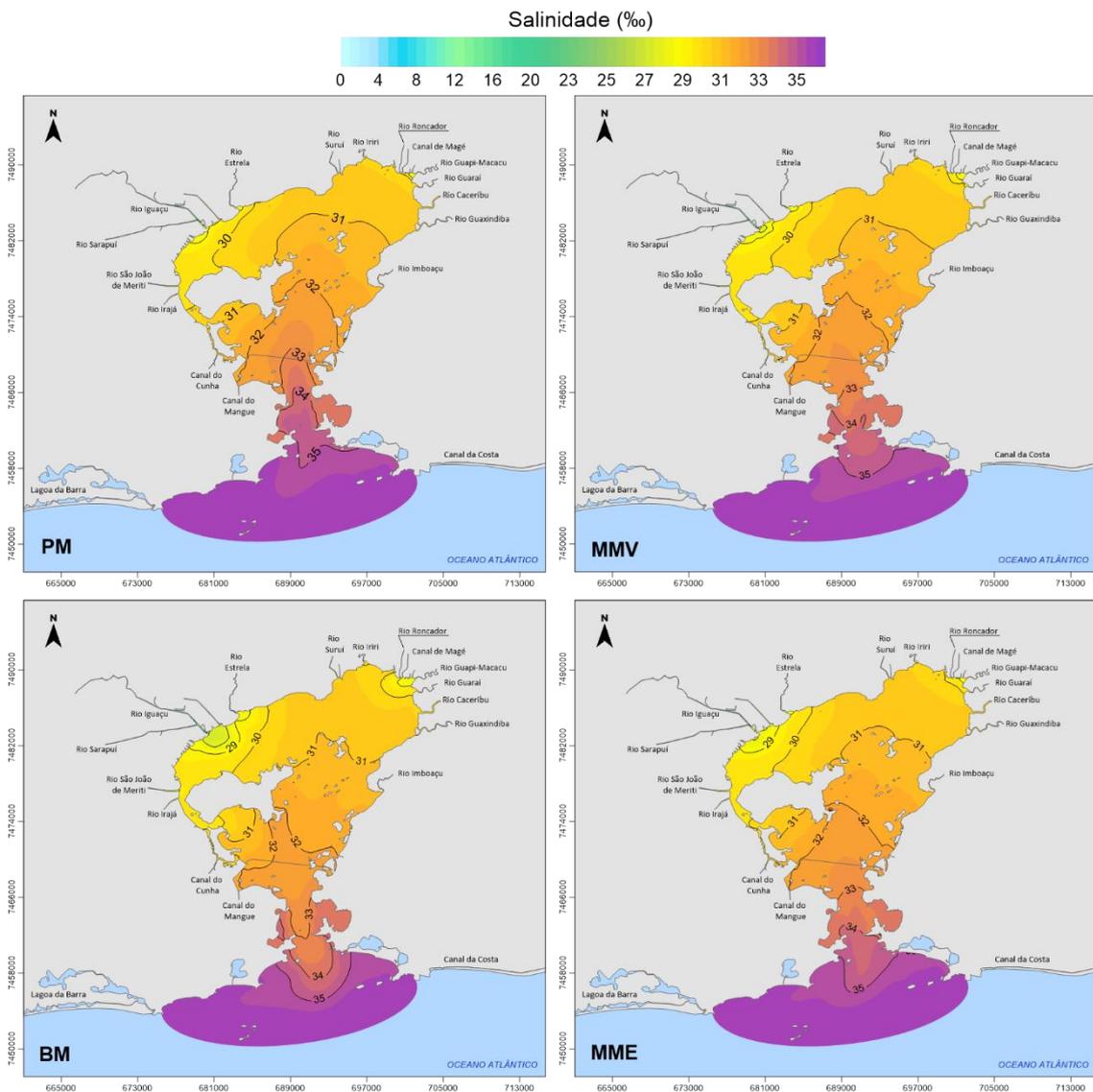


Figura 4.5 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de sizígia no inverno, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Note que para as mesmas condições fluviais (inverno), não há uma variação significativa da salinidade dentro da BG durante o ciclo de maré. A salinidade também não varia muito em comparação com a quadratura (Figura 4.6).

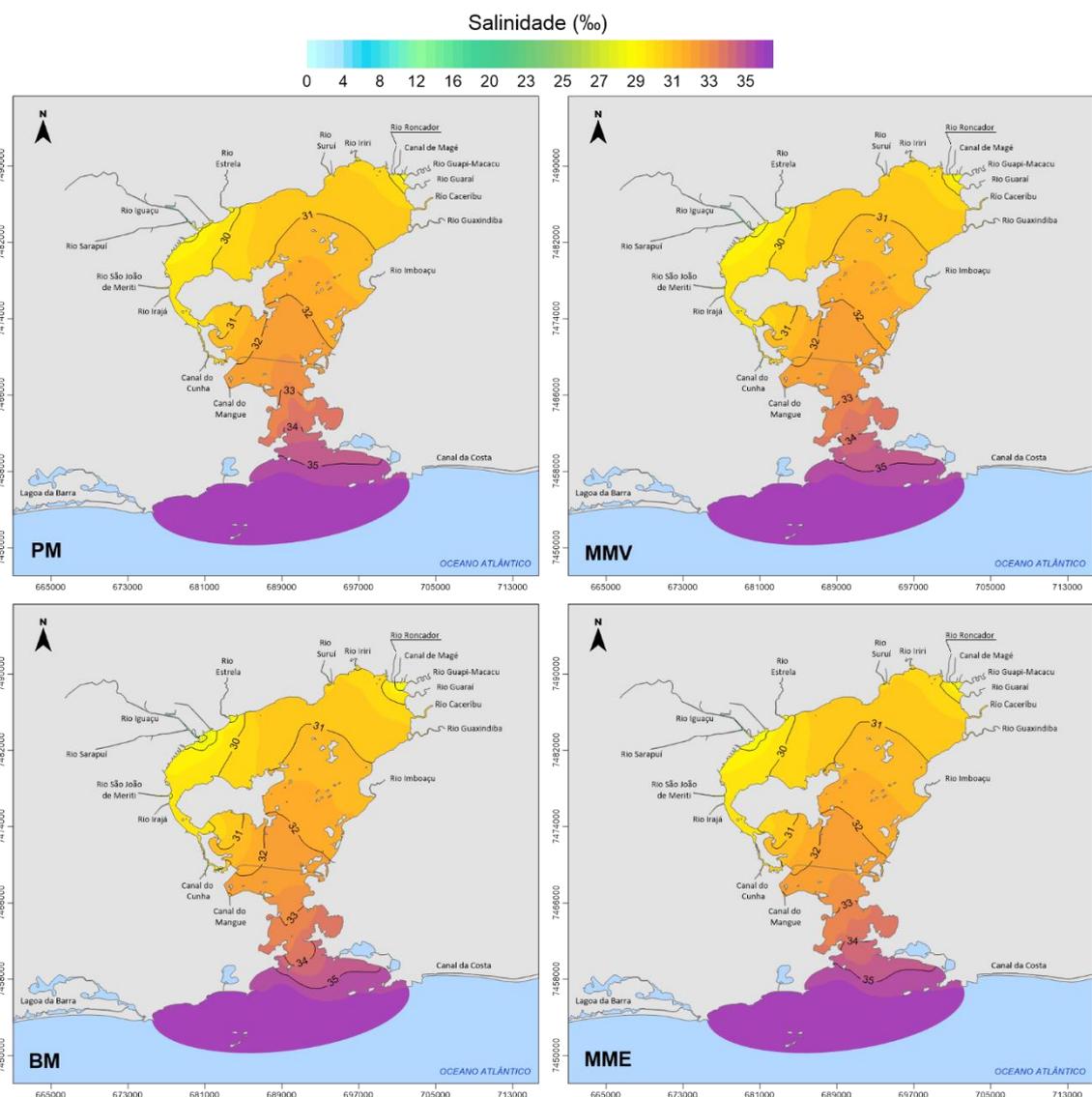


Figura 4.6 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de quadratura no inverno, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Nessa ilustração também se nota que, para as mesmas condições fluviais (inverno), não há uma variação significativa da salinidade dentro da BG, e também em comparação com a sizígia (Figura 4.5).

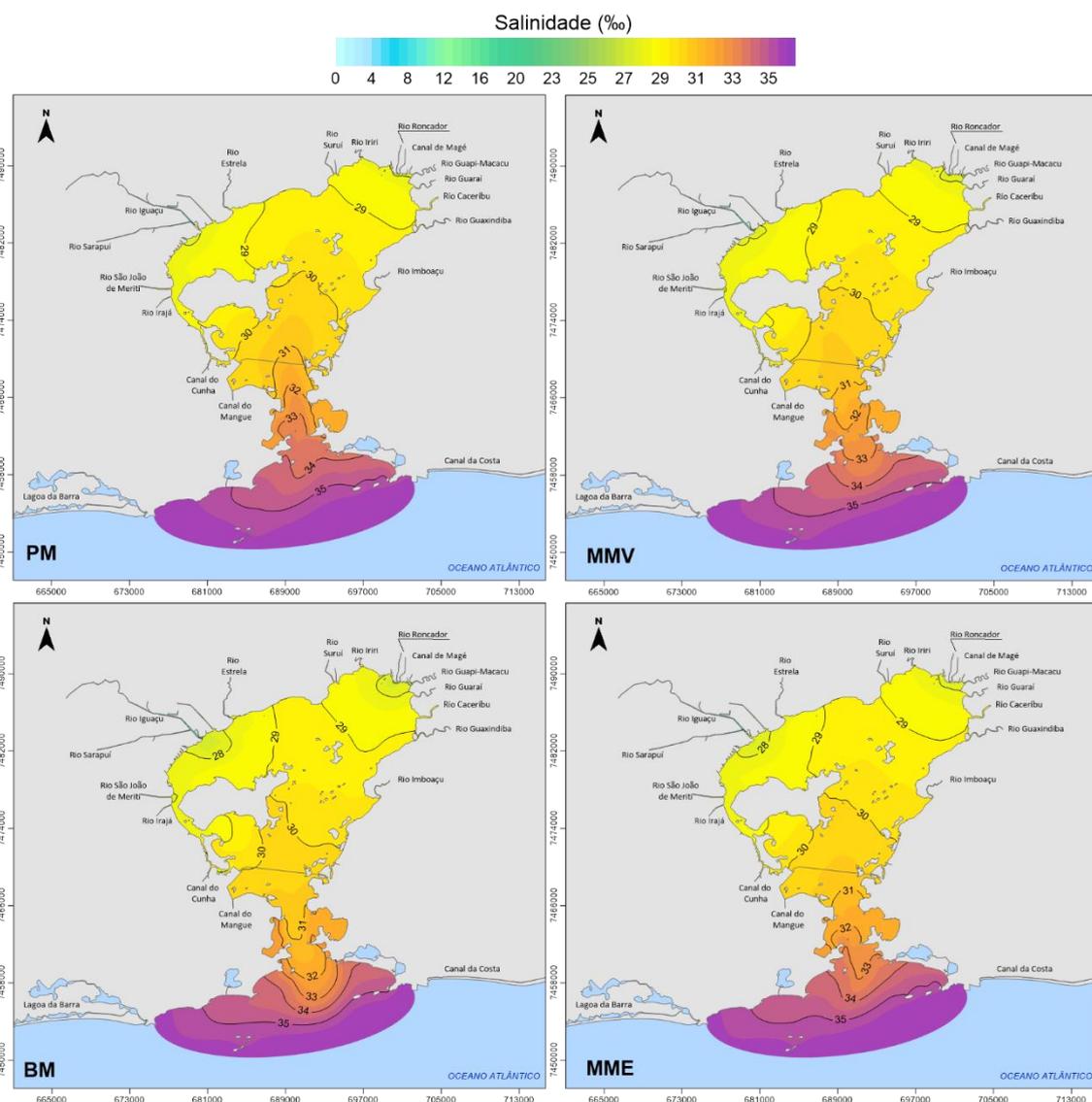


Figura 4.7 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de sizígia no verão, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Durante as condições fluviais de verão, também não houve uma variação significativa da salinidade ao longo de um ciclo de maré, e em comparação com a quadratura (Figura 4.8). No entanto, percebe-se que a salinidade no verão foi um pouco menor que no inverno (Figura 4.5).

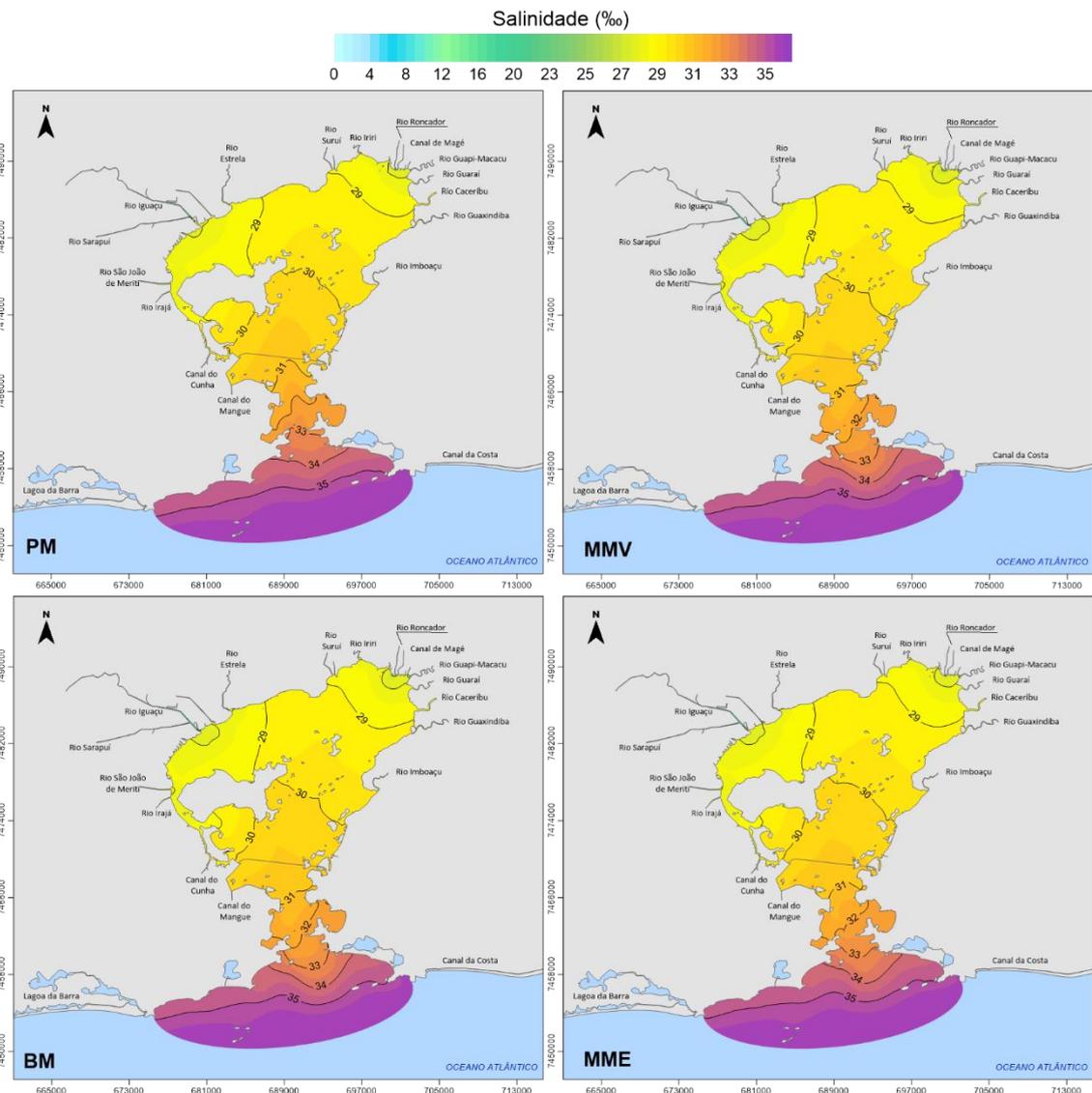


Figura 4.8 - Isolinhas de salinidade na Baía de Guanabara em um ciclo de maré de quadratura no verão, para os instantes de PM, MMV, BM e MME. Nessa ilustração também se nota que, para as mesmas condições fluviais (verão), não há uma variação significativa da salinidade dentro da BG, e também em comparação com a sizígia (Figura 4.7).

4.2 Análises dos Modelos Hidrodinâmicos

Para gerar condições iniciais mais razoáveis para a modelagem hidrodinâmica, os 20 dias que antecedem os períodos examinados foram computados na simulação. Para o verão, a simulação se iniciou em 01/12/2016, sendo o período analisado de 21/12/2016 até 23/03/2017. Para o inverno, a simulação se iniciou em 01/06/2016, sendo o período analisado do dia 20/06/2016 ao dia 22/09/2016.

4.2.1 Propagação da Maré

Ao se contrastar os resultados de elevação da superfície livre da água em torno do nível médio da água, nas estações Ponto Externo à Baía, Ponte Rio-Niterói e Baía Nordeste, percebe-se uma das características da hidrodinâmica da Baía de Guanabara, que é a ampliação das alturas de maré, acompanhada de uma defasagem à medida que a maré se propaga para o interior da Baía. A Figura 4.9 ilustra essa característica. Nesse contexto, devido à elevação da maré a medida que entra na baía, pode-se dizer que a BG é um sistema estuarino hipersíncrono (DYER, 1997).

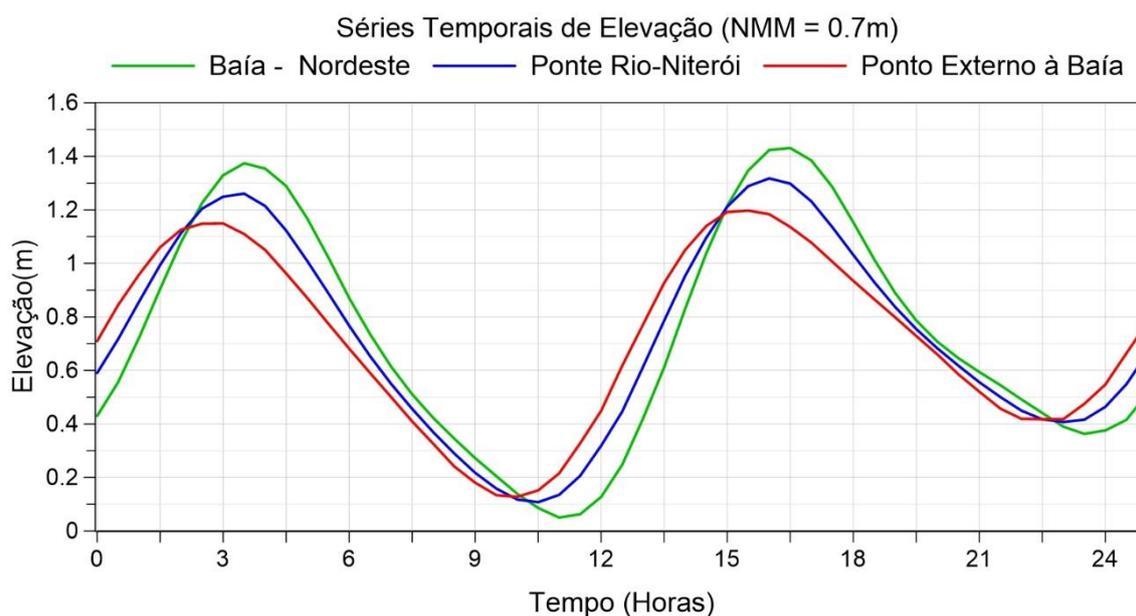


Figura 4.9 - Séries temporais de elevação do nível d'água nas estações de controle Ponto Externo à Baía, Ponte Rio-Niterói e Baía Nordeste, para um ciclo de maré nas primeiras 25 horas de simulação.

4.2.2 Caracterização da Maré

A onda de maré na Baía de Guanabara tende a ser do tipo estacionária. Portanto, em instantes de PM e BM, as velocidades de correntes propendem aos seus menores valores,

próximos de zero. E, em momentos de MMV e MME, as magnitudes das correntes chegam aos valores mais elevados. Esses instantes estão destacados com linhas tracejadas na Figura 4.10, que mostra valores na estação Ponte Rio-Niterói.

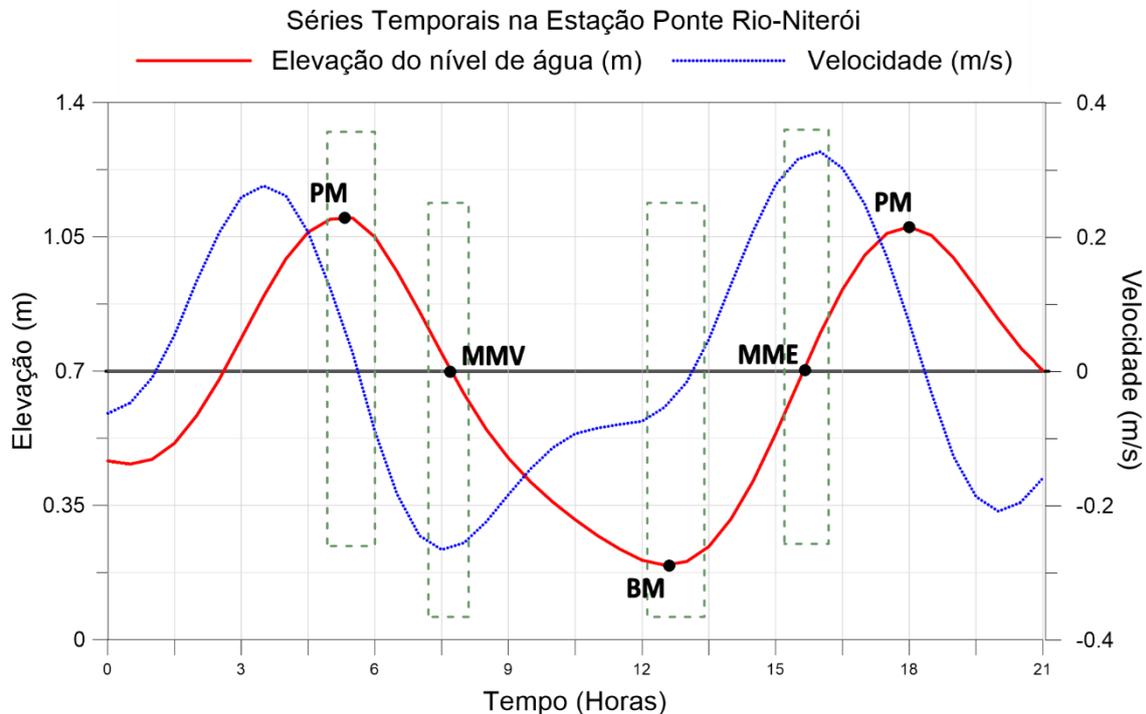


Figura 4.10 - Tendência à maré estacionária na estação Ponte Rio-Niterói. Séries temporais de elevação e de velocidade de correntes para uma maré de sizígia em dezembro de 2016, na estação Ponte Rio-Niterói.

4.2.3 Sobre efeitos de Pressão Baroclínica

O modelo hidrodinâmico final, apresentado nesta dissertação, foi implementado com o modelo de transporte de salinidade acoplado de modo a incluir gradientes de pressão baroclínica na circulação hidrodinâmica. A variação espacial da salinidade gera gradientes de pressão por diferença de densidade da água, ou forçantes baroclínicos.

Para ambos os cenários, inverno e verão, verificou-se, através da comparação dos modelos hidrodinâmicos rodados sem o gradiente e com ele, que, no modelo sem gradiente de pressão baroclínico, níveis médios de água ficaram subestimados na ordem de alguns centímetros. A diferença chega a 5 centímetros na região Noroeste da BG, no verão, e a cerca de 3.8 centímetros no inverno. Os menores valores são encontrados na Boca da Barra, região mais próxima do mar.

Constatou-se, ainda, que a inclusão de gradientes de pressão baroclínico influencia de modo moderadamente relevante nos níveis de água na BG, porém, de modo irrelevante

nos padrões de circulação hidrodinâmica promediados na vertical. Esse parâmetro tem grande influência no transporte de substâncias em análises de qualidade de água.

4.2.4 Padrões de Circulação Hidrodinâmica

Através dos modelos gerados, percebe-se que a variação de maré no interior da Baía de Guanabara, com enchentes e vazantes, relaciona-se mais fortemente com a maré astronômica. Por sua vez, as correntes costeiras possuem uma vinculação muito forte com os efeitos de maré meteorológica, devido a ondas de plataforma ou eventos meteorológicos, como chegadas de frentes frias.

Com o intuito de analisar os padrões de circulação hidrodinâmica na BG, foram adotados ciclos de sizígia e quadratura, destacando os instantes de maré de PM, MMV, BM e MME, definidos no início do presente capítulo. Nos mapas, a relação entre intensidade da corrente e altura da maré fica clara. Quando se tem marés de sizígia, as quais possuem altura de onda maiores, as velocidades de correntes são mais intensas. Em marés de quadratura, com ondas menores, a tendência é se ter correntes mais fracas. Essas diferenças entre sizíguas e quadraturas são análogas no inverno e no verão. Trata-se de uma característica da maré.

Não se notaram diferenças significativas nos padrões de correntes entre verão e inverno, o que ilustra que a sazonalidade não interfere nos padrões de circulação hidrodinâmica.

4.2.4.1 Cenário de Inverno

Como já discutido, devido à maré dentro da Baía tender a ser estacionária, os momentos de MMV e MME apresentam as maiores velocidades, enquanto momentos de PM e BM apresentam valores próximos de zero. As velocidades observadas na estação Boca da Barra, localizada na seção mais estreita da embocadura, durante momentos de enchente e vazante, aproximaram-se de valores entre 0,2 e 0,5m/s, na maré de quadratura, e entre 0,6 e 1,2m/s na maré de sizígia. Estes valores estão próximos das velocidades encontradas por Bérghamo (2006), que variam de 0,3 a 0,5m/s na quadratura, e de 0,6 a 0,8m/s na sizígia. Para representar a circulação dentro da Baía, adotaram-se os instantes de PM, MMV, BM e MME, na estação Ponte Rio-Niterói. Isolinhas de velocidade foram usadas para retratar as velocidades das correntes. Da Figura 4.11 a Figura 4.14, estão ilustrados padrões de circulação para uma maré de sizígia. Da Figura 4.15 até a Figura 4.18, estão representados os mesmos instantes para uma maré de quadratura.

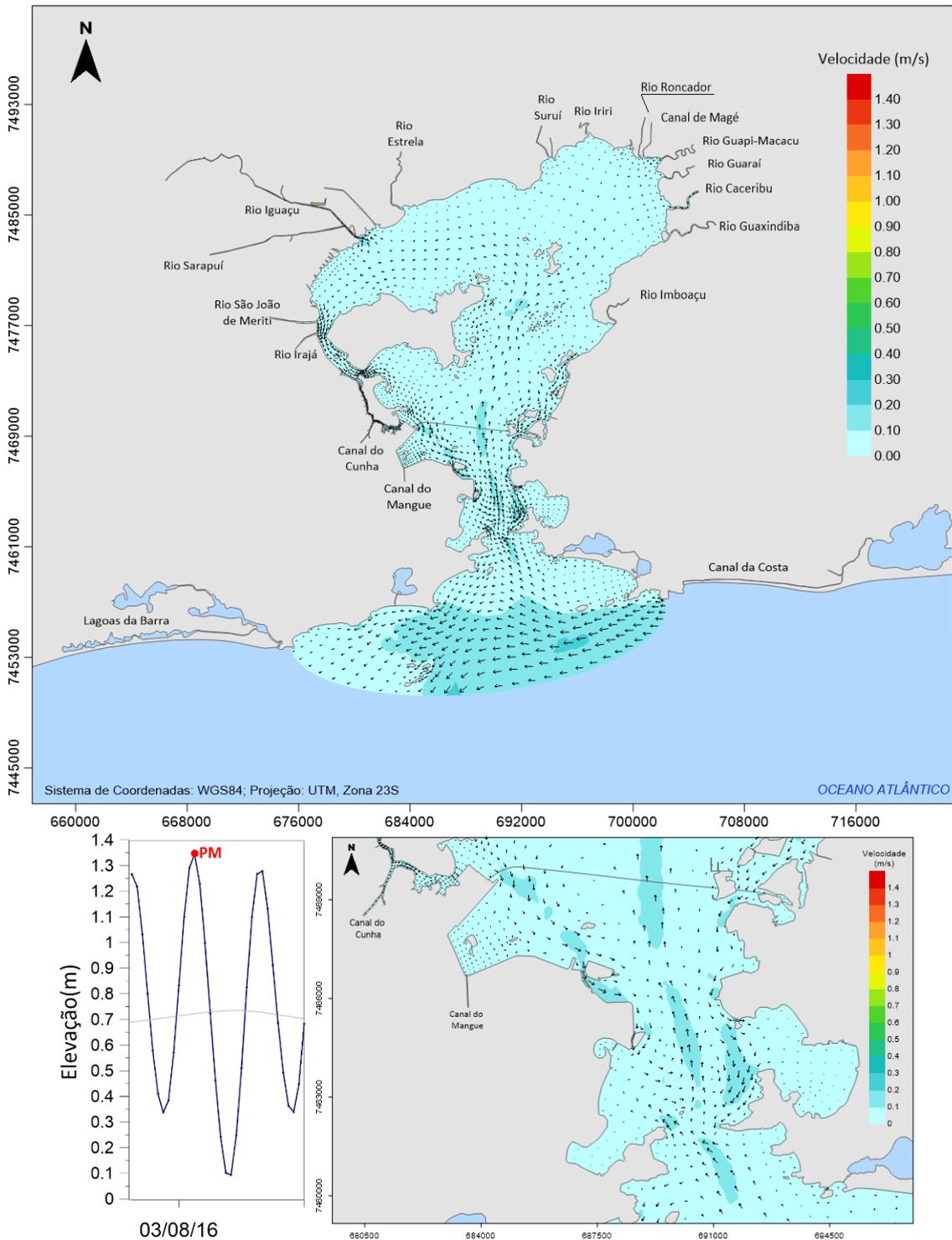


Figura 4.11 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Esse instante de maré apresenta baixas vazões dentro da Baía, pois se trata de um momento de inversão de correntes, no qual é interessante notar a formação de vórtices dentro da Baía. Nota-se ainda que, dentro da BG, esse instante possui correntes similares ao mesmo instante da quadratura (Figura 4.15).

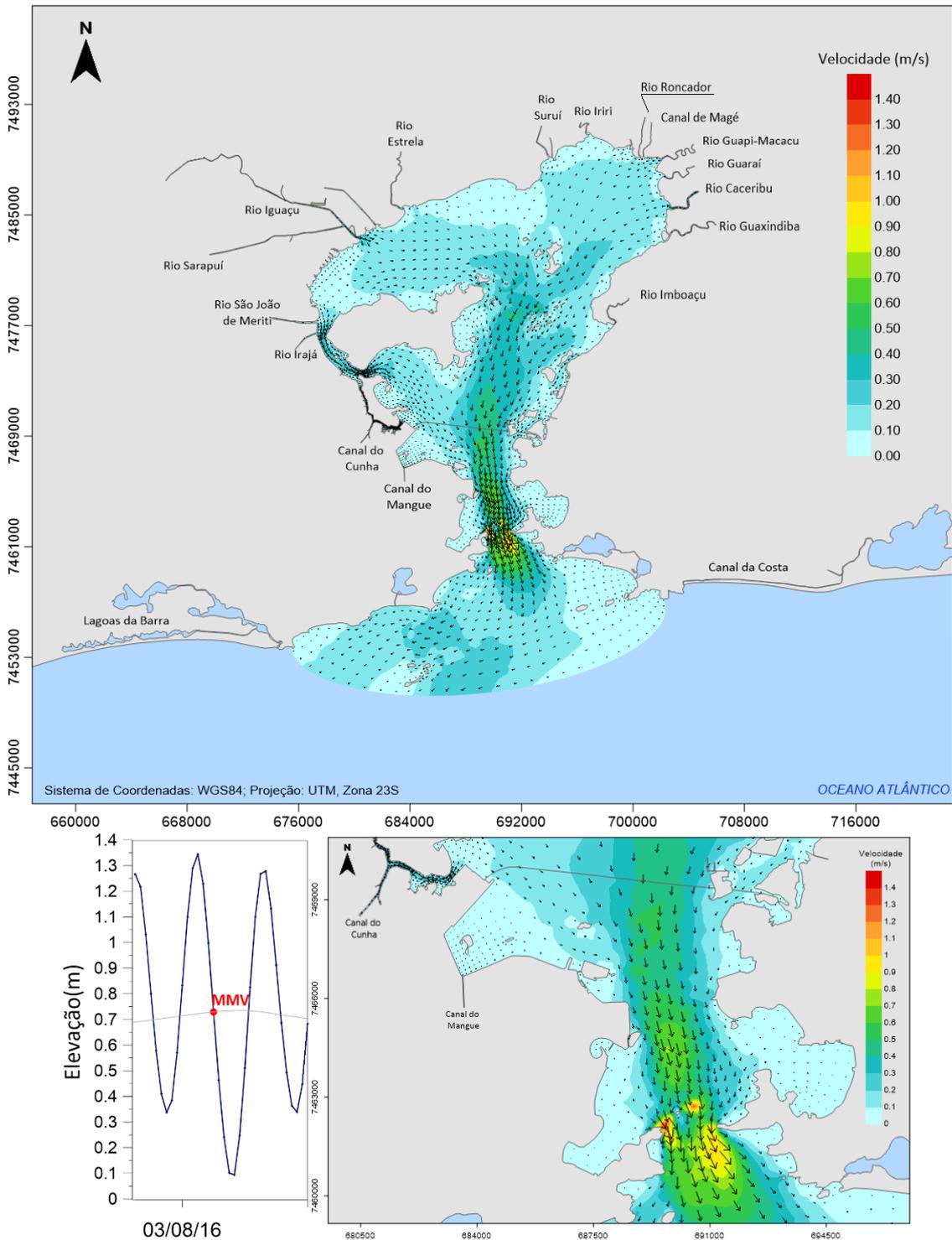


Figura 4.12 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Nesse instante, pode-se observar o momento de maiores velocidades na BG durante a vazante da maré. Comparando com a MMV de quadratura (Figura 4.16), nota-se que na sizígia as intensidades das correntes são muito maiores.

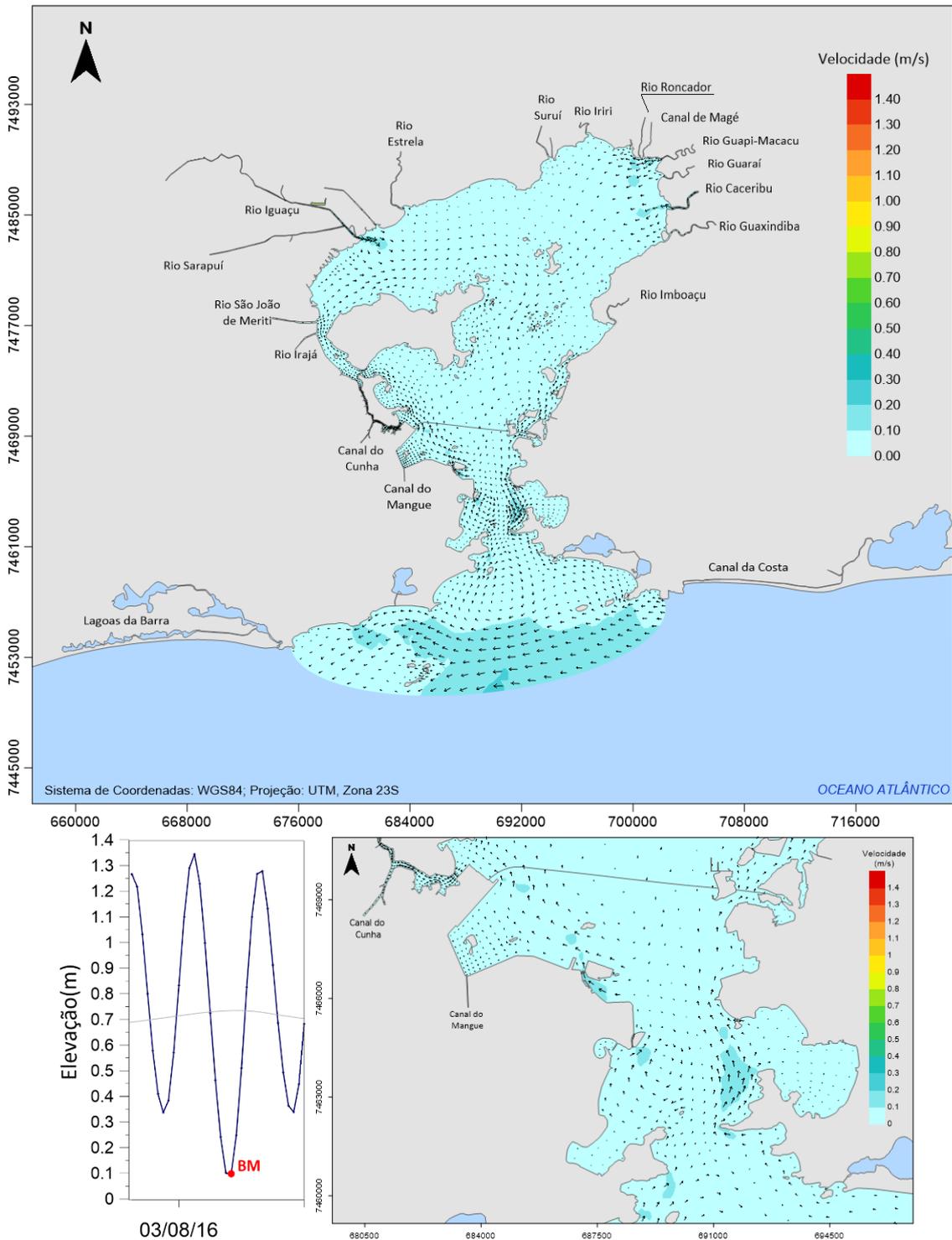


Figura 4.13 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Assim como a PM, a BM também é um instante de inversão de correntes, logo, e vê-se velocidades baixas na BG, e similares ao que se vê no mesmo instante na quadratura (Figura 4.17).

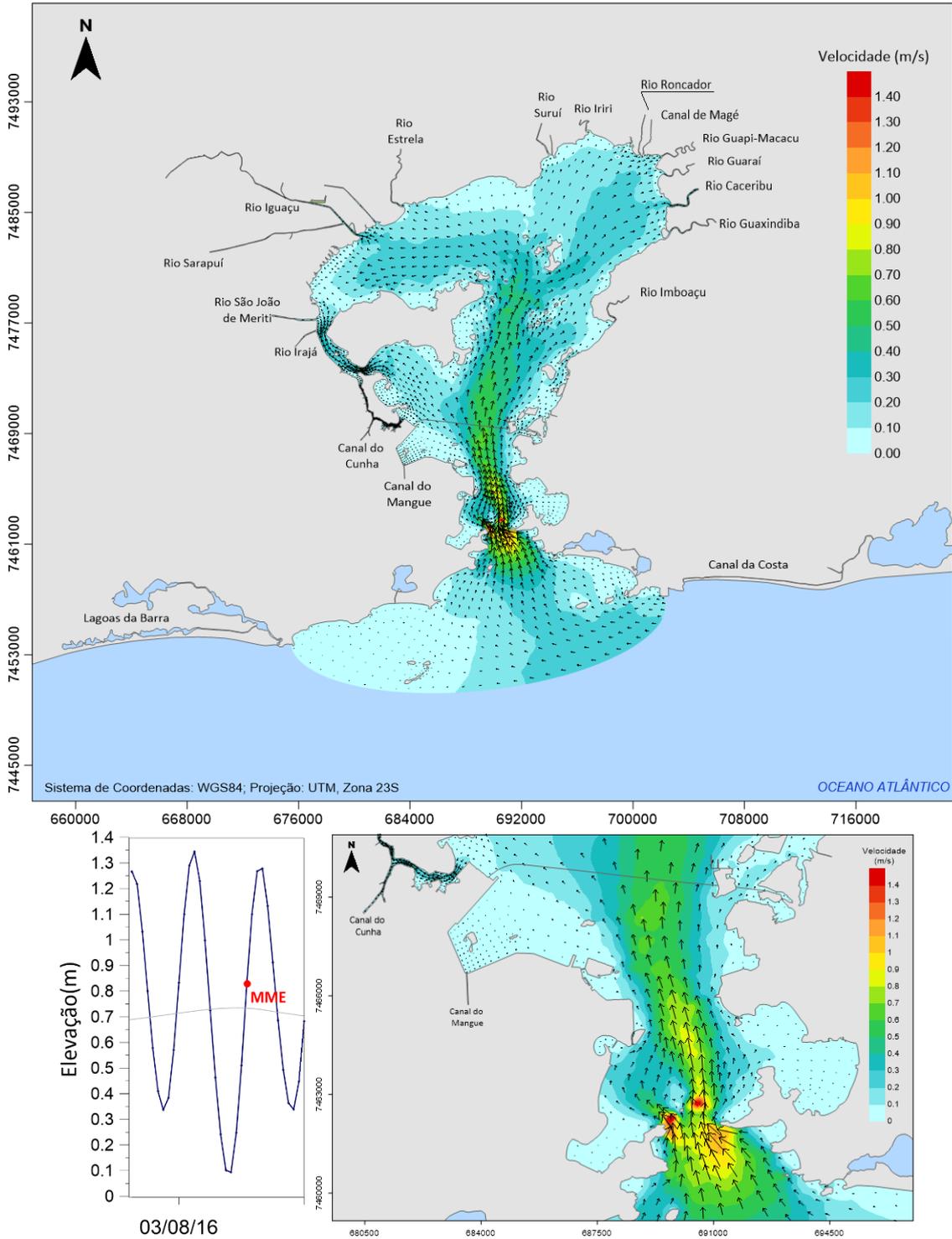


Figura 4.14 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Na enchente, momento de entrada de maré na BG, a velocidade assume seus maiores valores. Aqui também se observa velocidades bem mais elevadas que na MME de quadratura (Figura 4.18).

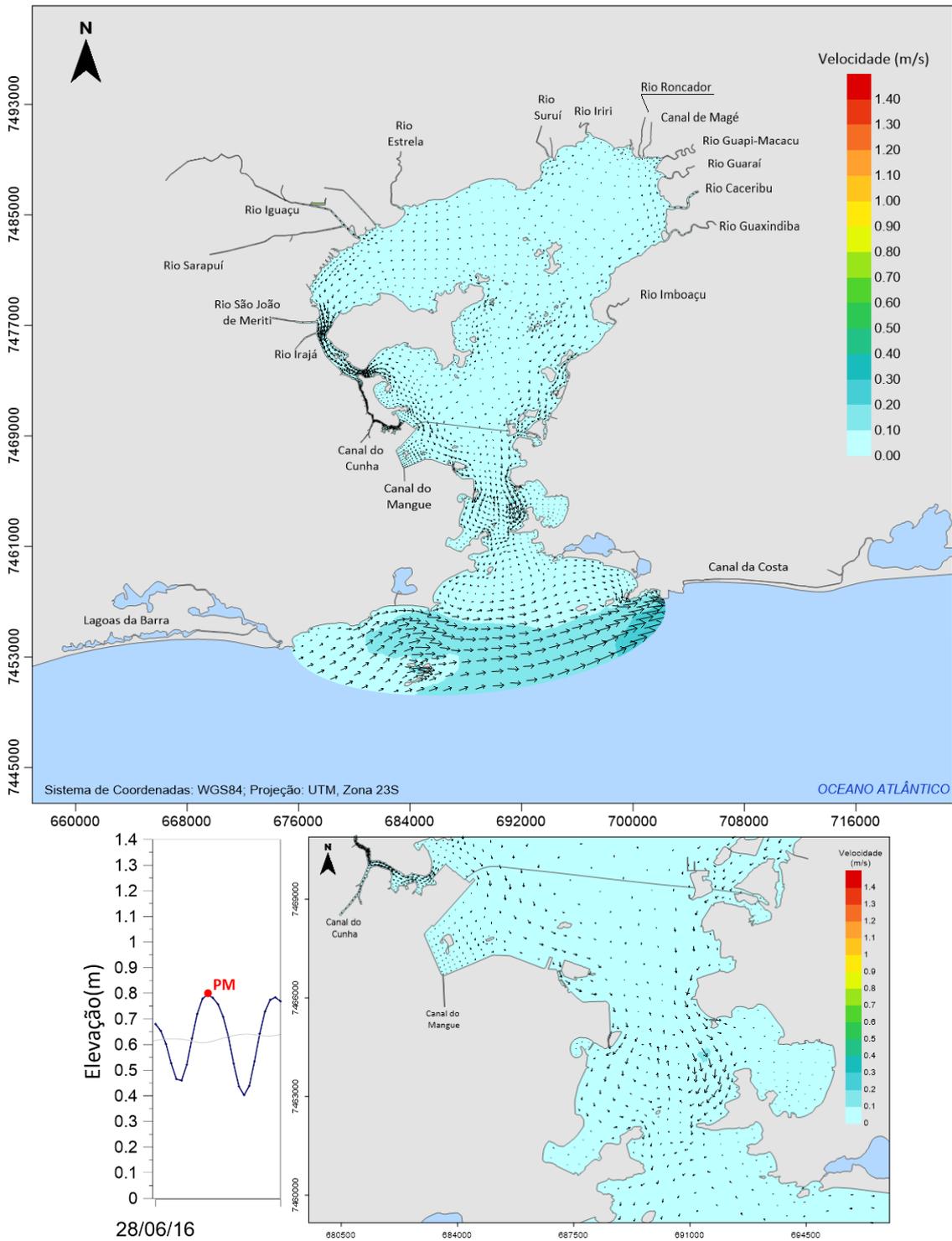


Figura 4.15 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Comparando com a PM de sizígia (Figura 4.11), nota-se que não há muita diferença nas magnitudes das correntes dentro da BG.

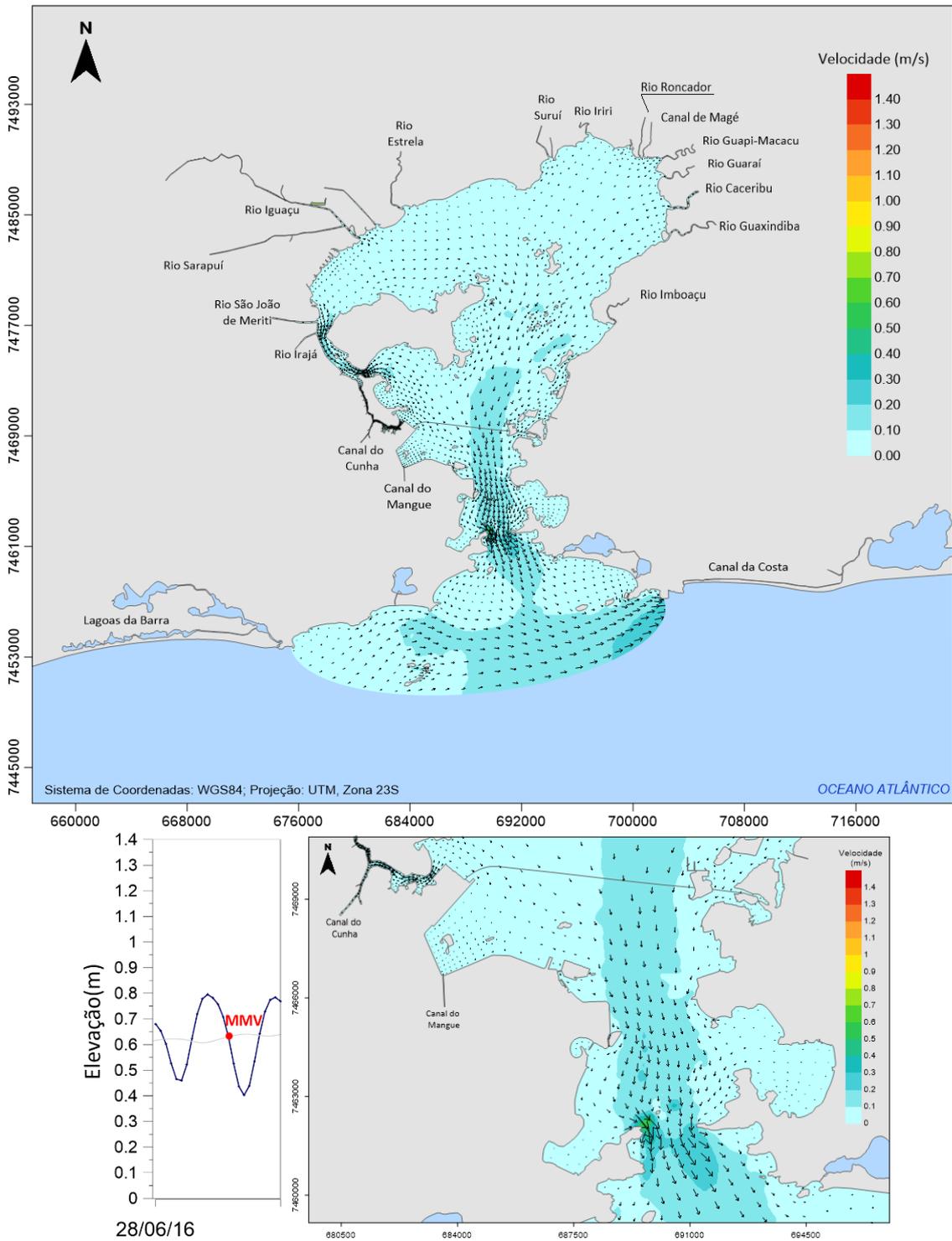


Figura 4.16 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Repare, que quando comparado com o mesmo instante em uma sizígia (Figura 4.12), a quadratura apresenta menores intensidades de correntes.

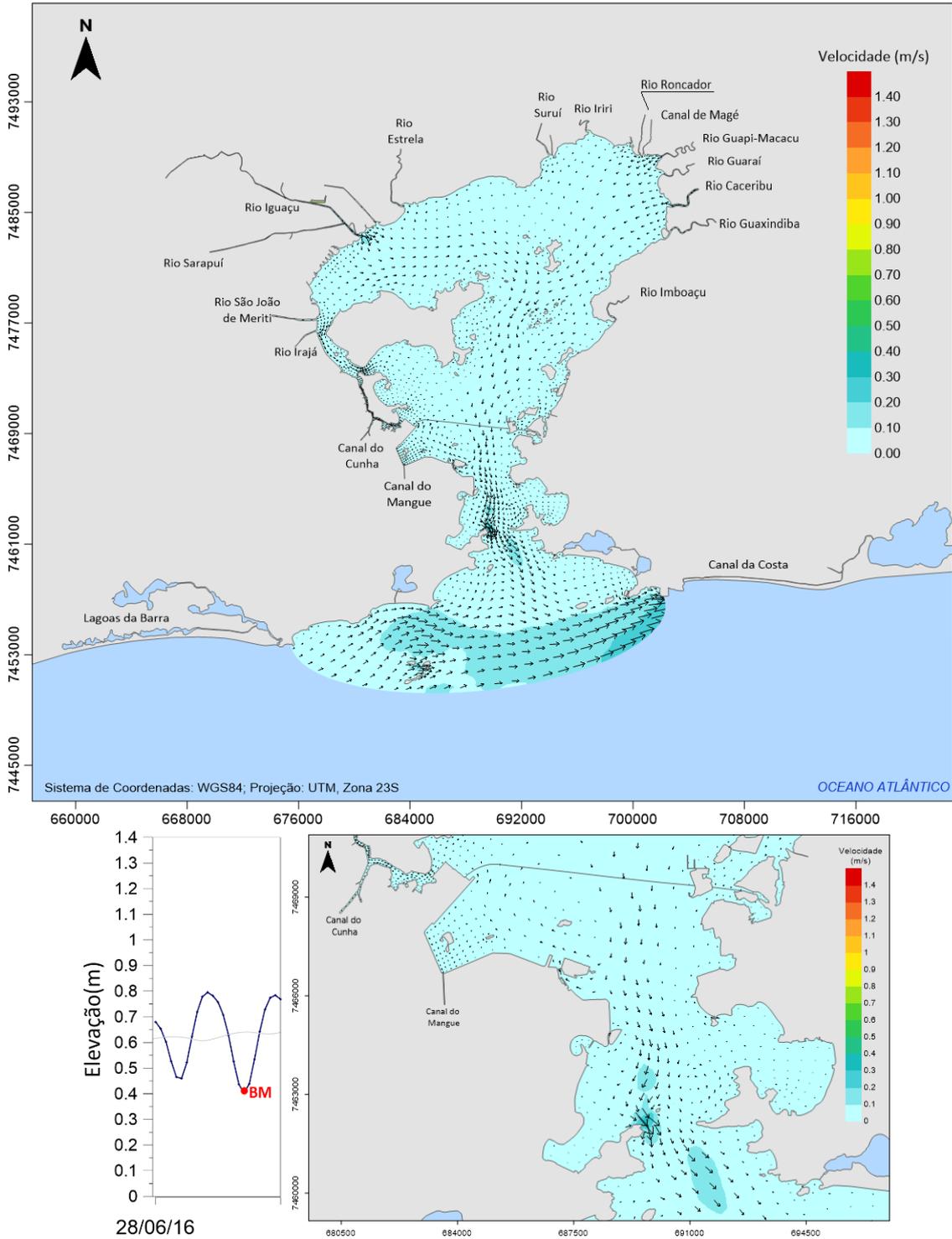


Figura 4.17 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. Assim como a PM, a BM também é um instante de inversão de correntes e apresenta velocidades baixas dentro da BG, sendo similar na quadratura e sizígia (Figura 4.13).

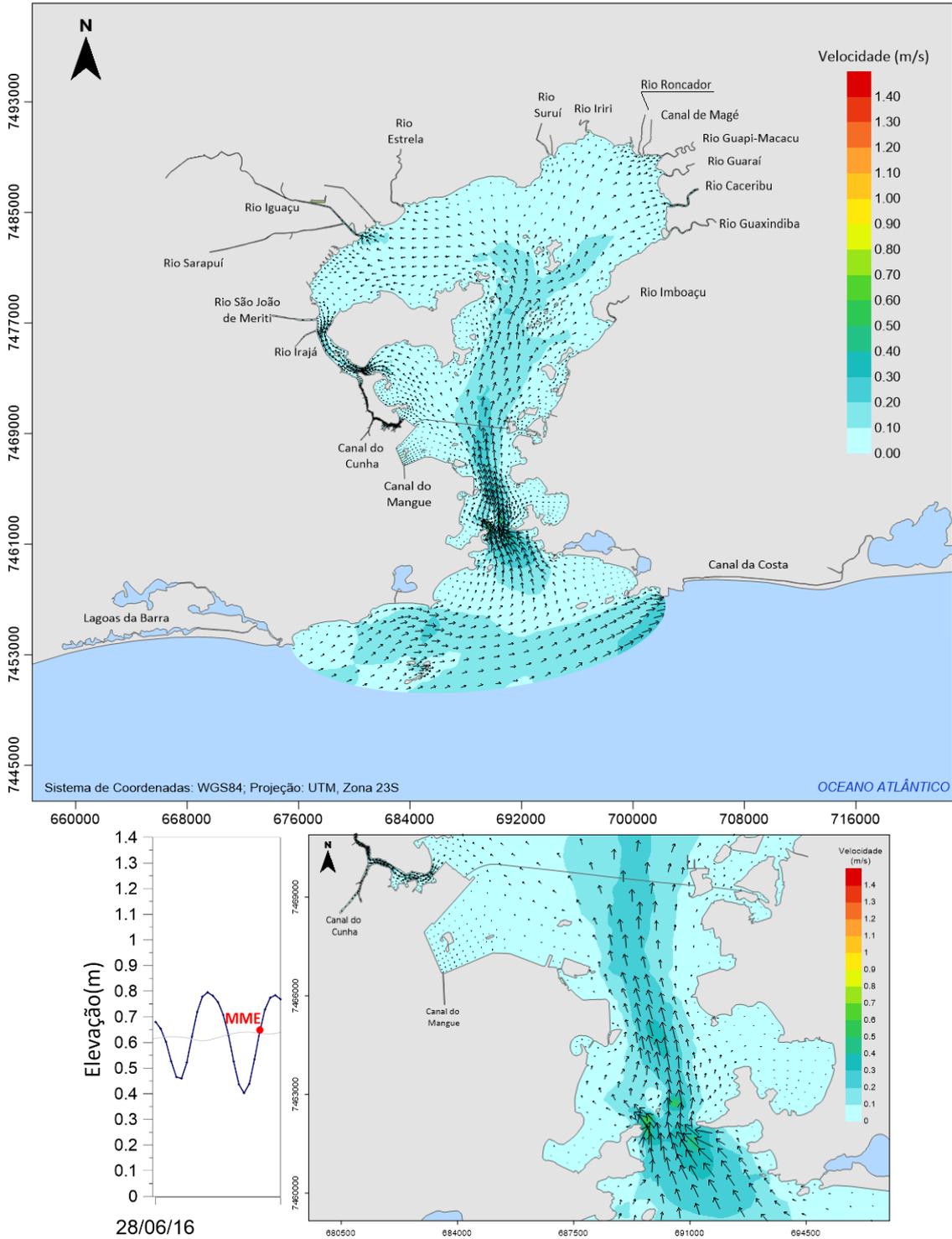


Figura 4.18 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no inverno de 2016. O instante de MME de quadratura possui velocidades mais baixas se comparado com o mesmo instante na sizígia (Figura 4.14).

4.2.4.2 Cenário de Verão

No verão, as velocidades observadas na seção da estação Boca da Barra, durante momentos de enchente e vazante, aproximaram-se de valores entre 0,1 e 0,6m/s na maré de quadratura, e entre 0,4 e 1,35m/s na maré de sizígia. As velocidades das correntes foram próximas às encontradas por Bérghamo (2006), que variam de 0,15 a 0,6m/s na quadratura e de 0,1 a 0,9m/s na sizígia.

Analogamente ao apresentado para o inverno no item 4.2.4.1, foram gerados mapas de isolinhas de correntes de instantes de PM, MMV, BM e MME de um ciclo de maré de sizígia e outro de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói. As velocidades relacionadas à maré de sizígia nos instantes de PM, MMV, BM e MME, para a estação Ponte Rio-Niterói, estão representadas da Figura 4.19 até a Figura 4.22, respectivamente. Da Figura 4.23 à Figura 4.26, estão ilustrados os mesmos instantes para uma maré de quadratura.

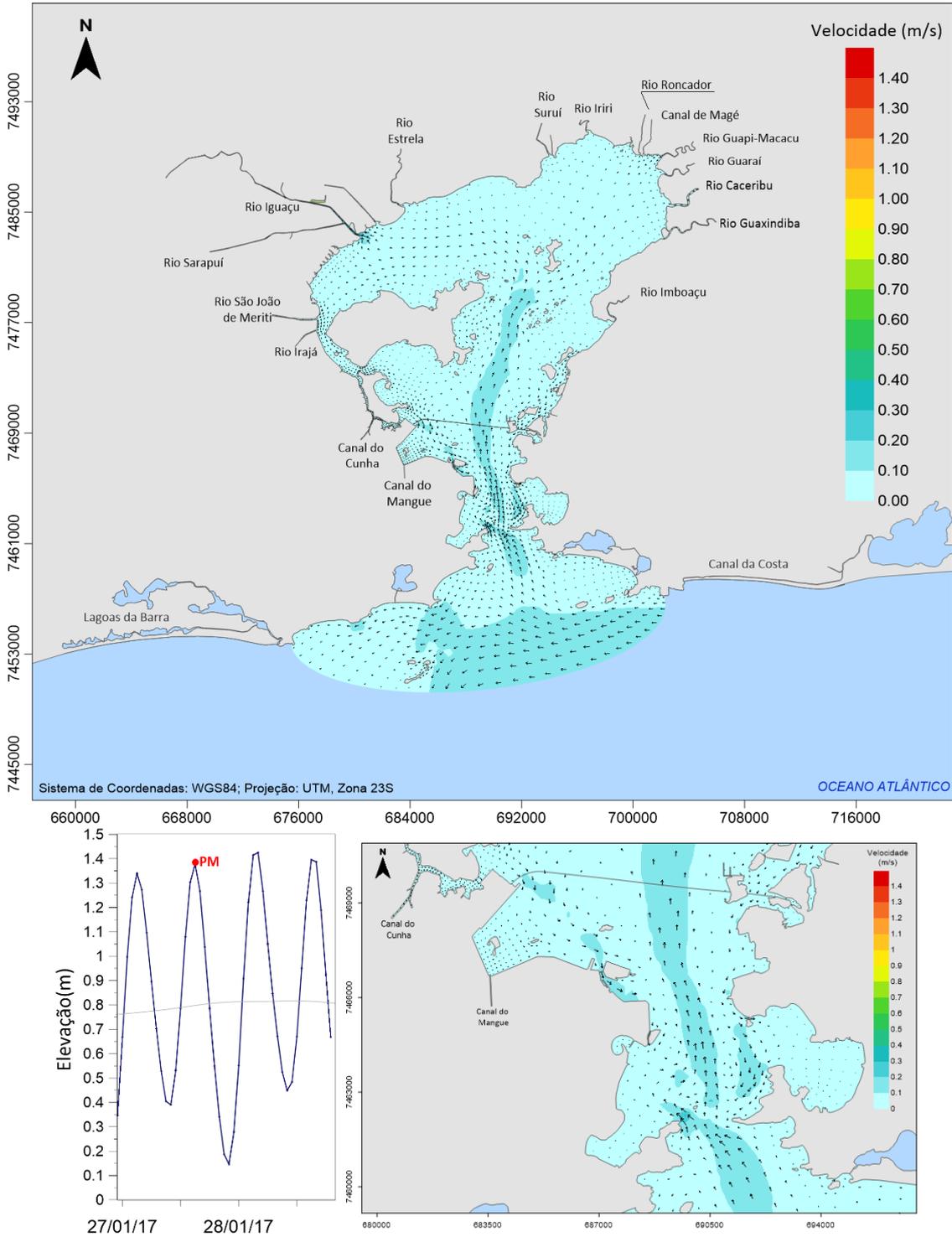


Figura 4.19 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Note as baixas velocidades devido a inversão de correntes, e similaridade com o mesmo instante em uma quadratura (Figura 4.23).

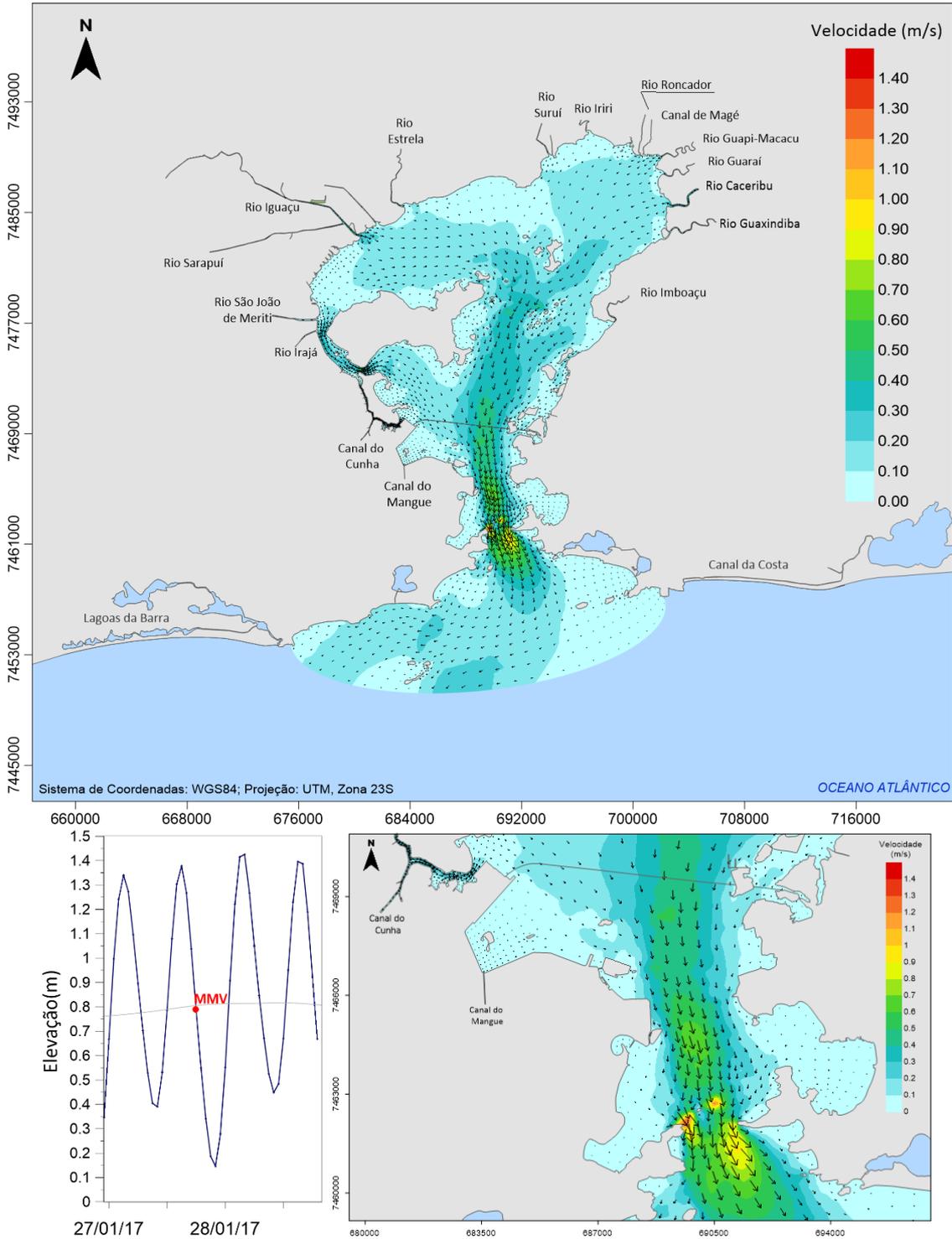


Figura 4.20 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Note que na sizígia, tem-se maiores correntes que o mesmo instante na quadratura (Figura 4.24).

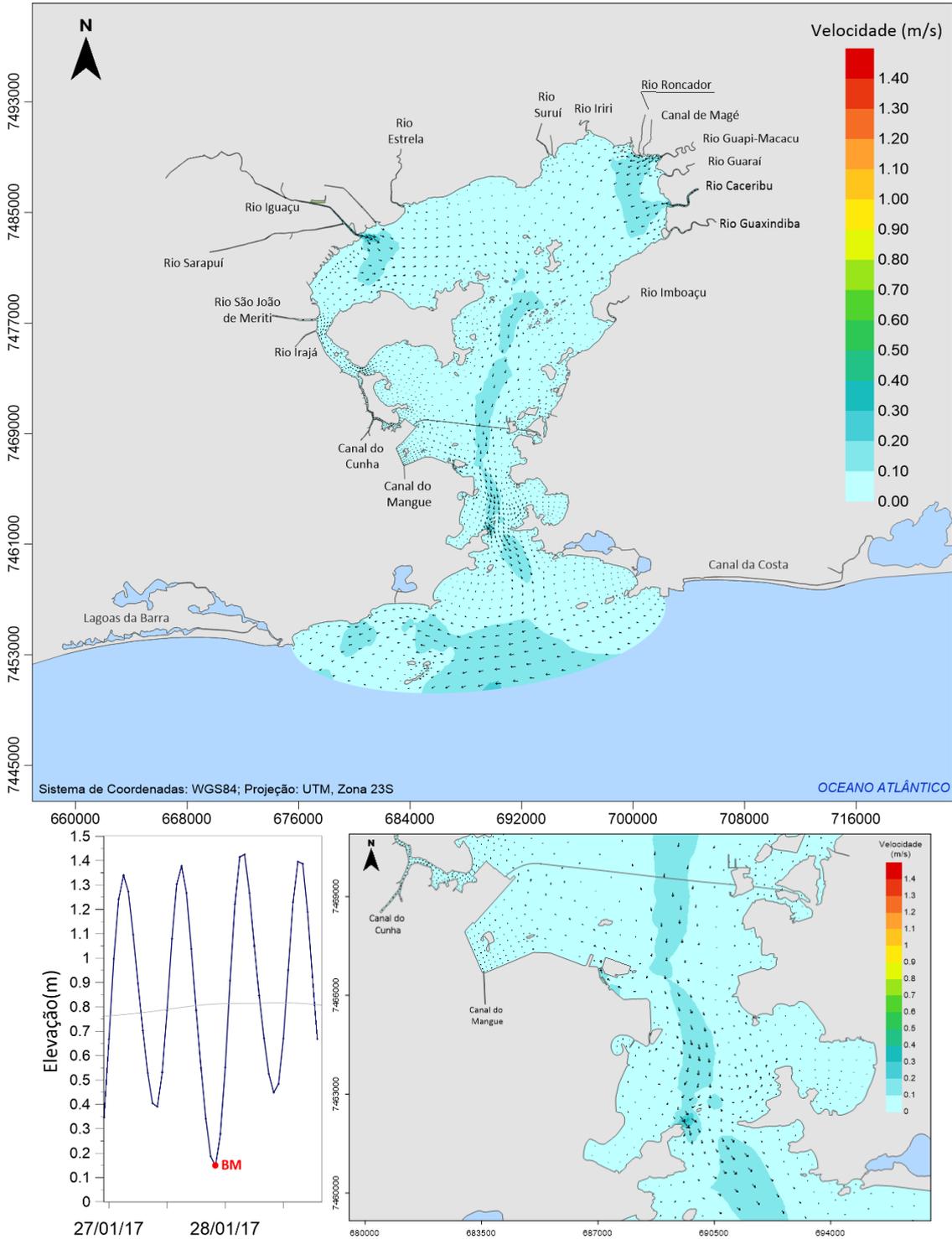


Figura 4.21 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Aqui também se nota correntes similares a PM de quadratura (Figura 4.23).

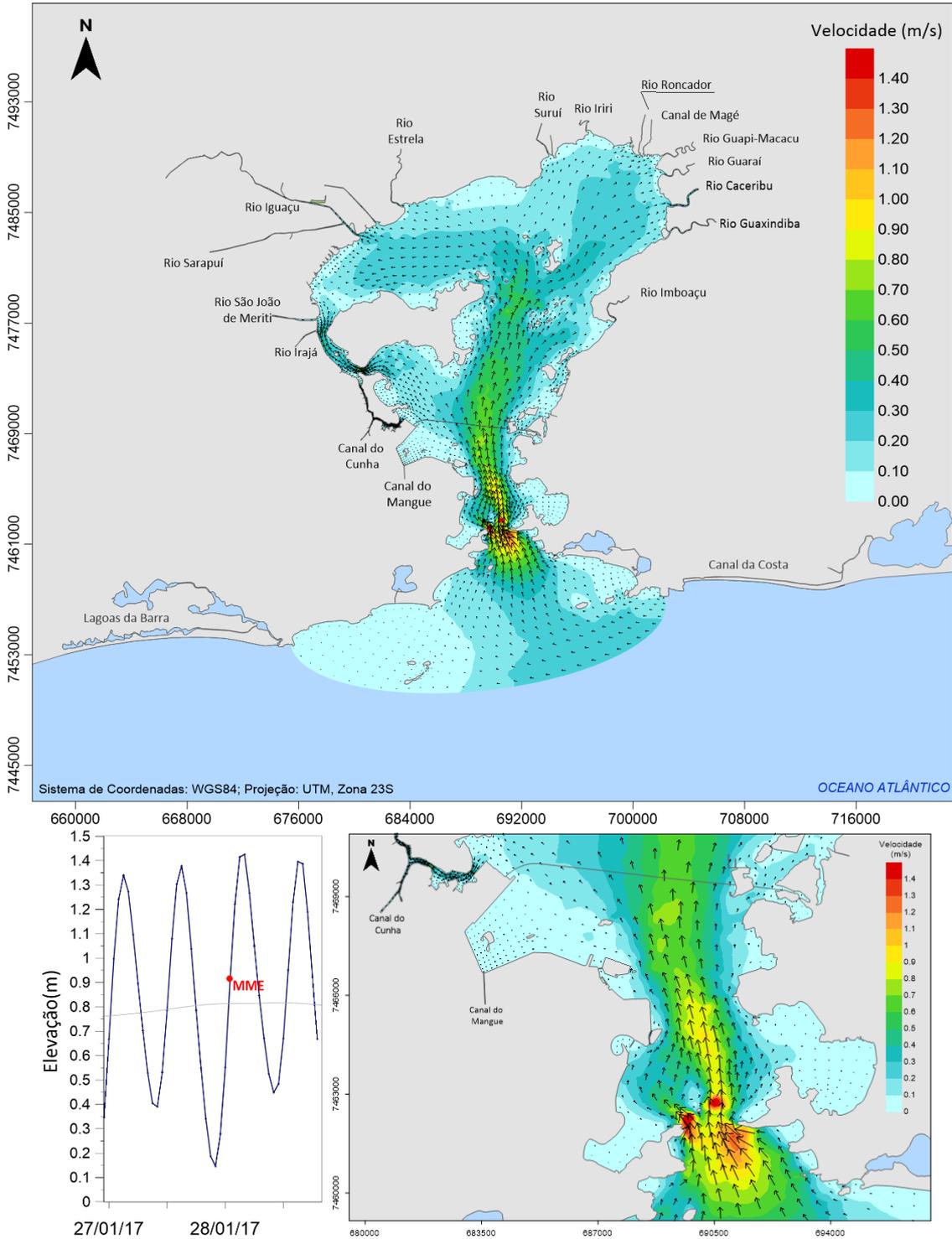


Figura 4.22 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de sizígia na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Comparando com a MME de quadratura (Figura 4.26), nota-se aqui intensidades de correntes mais elevadas.

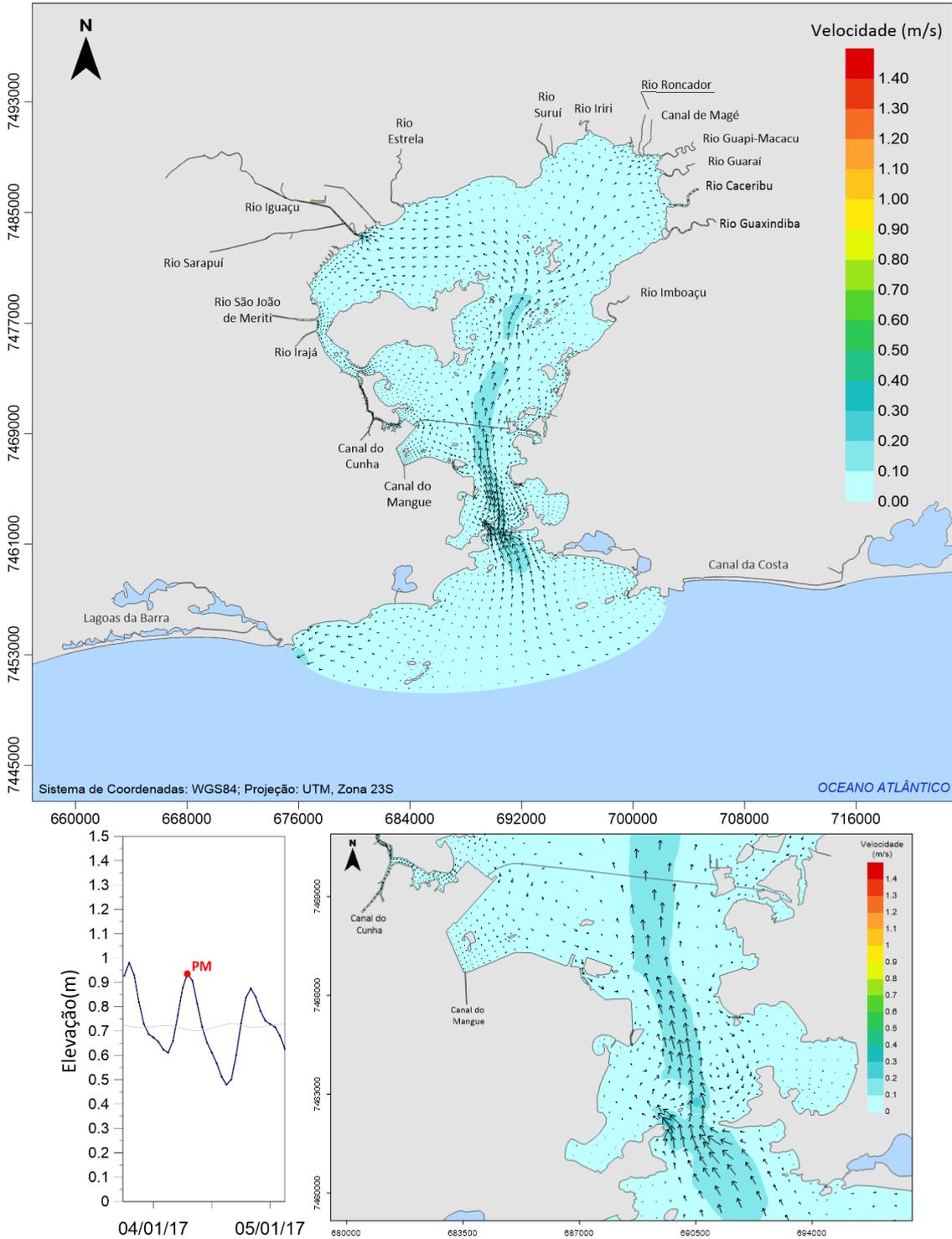


Figura 4.23 - Distribuição de correntes na BG em uma PM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Intensidades de correntes nesse instante são similares ao mesmo instante na maré de sizígia (Figura 4.19).

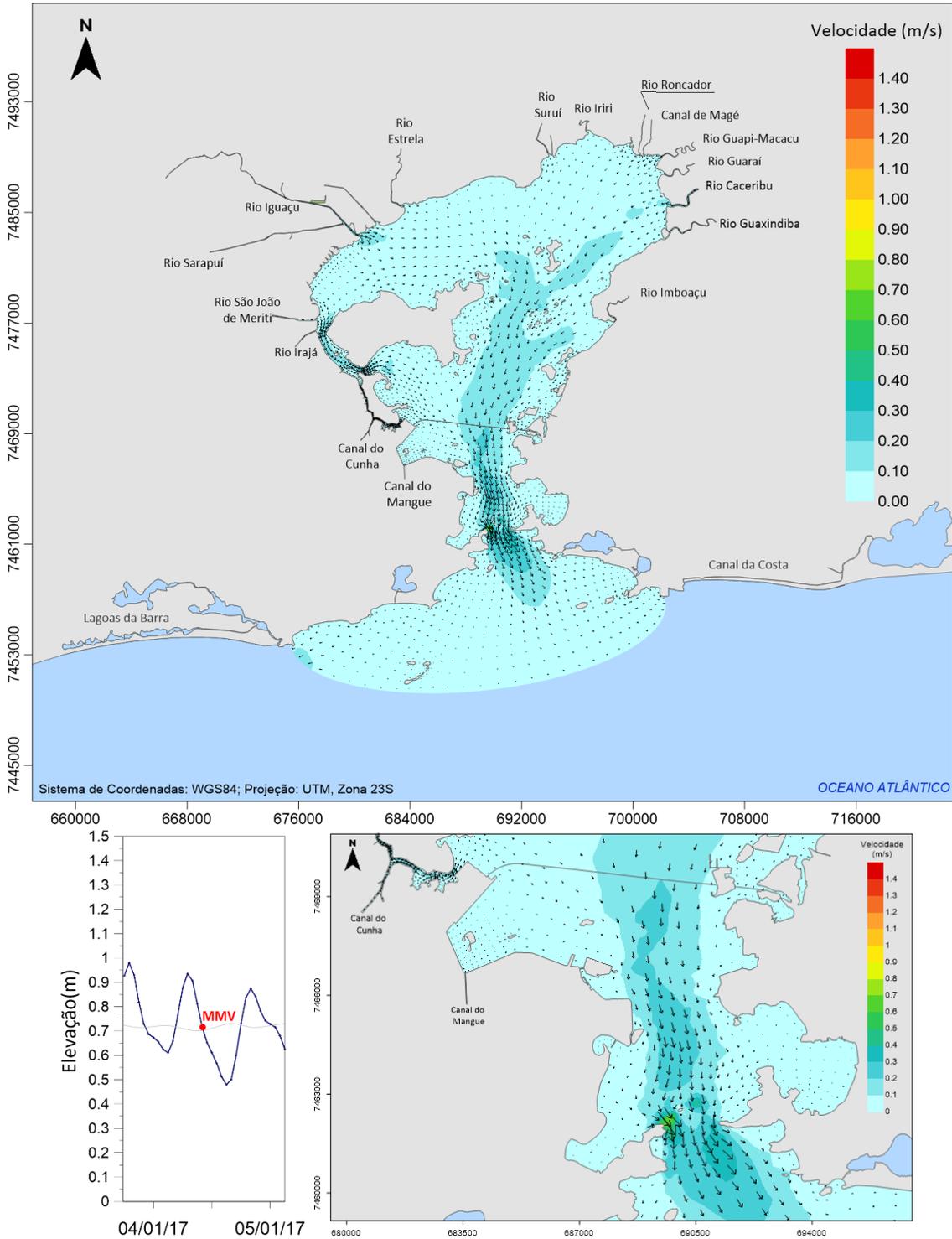


Figura 4.24 - Distribuição de correntes na BG em uma MMV de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, verão de 2016/2017. Percebe-se nitidamente menores intensidades aqui, quando comparada com a MMV de sizígia (Figura 4.20).

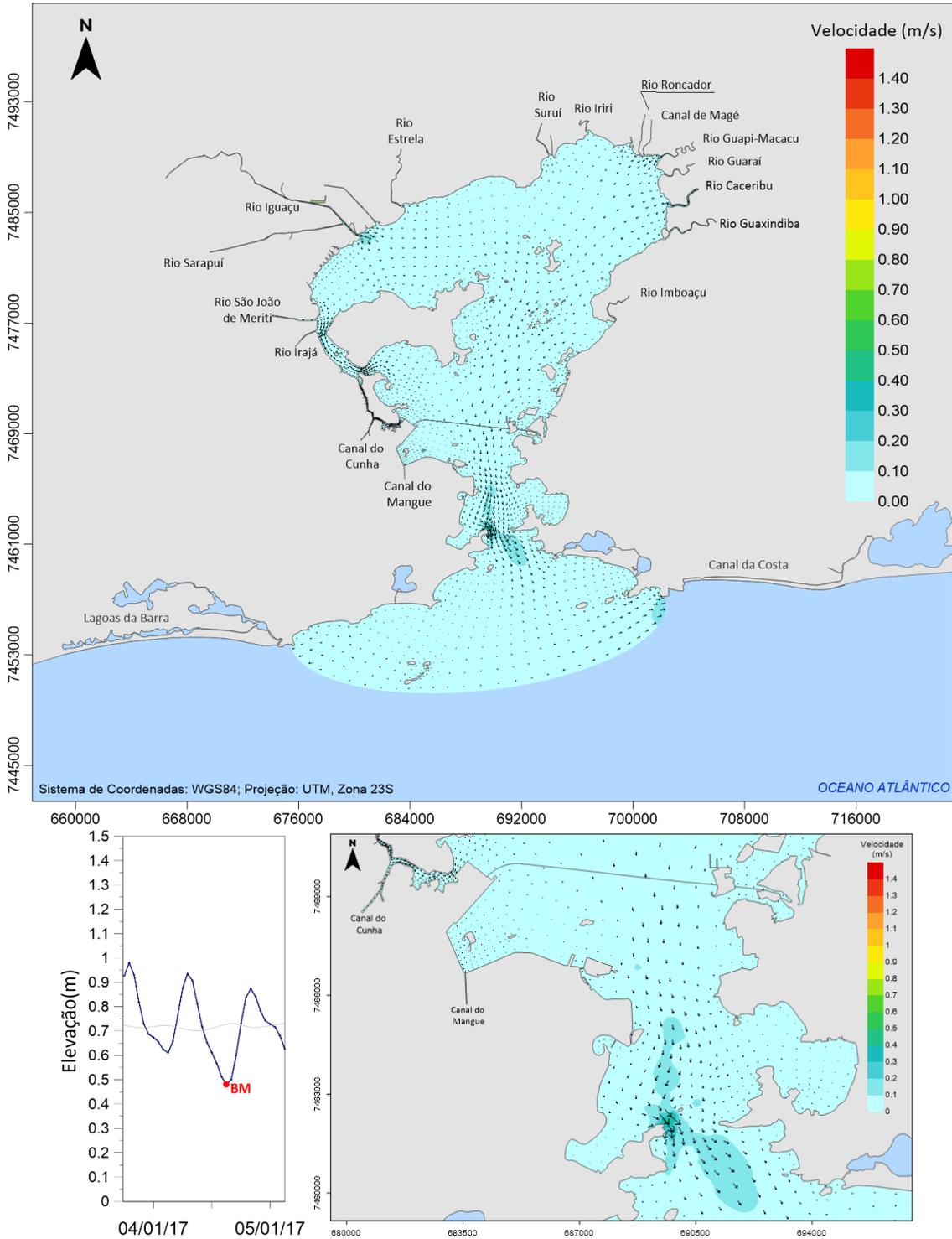


Figura 4.25 - Distribuição de correntes na BG em uma BM de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, no verão de 2016/2017. Assim como a PM, a BM também é um instante de inversão de correntes e apresenta velocidades baixas dentro da BG, sendo similar na quadratura e sizígia (Figura 4.21).

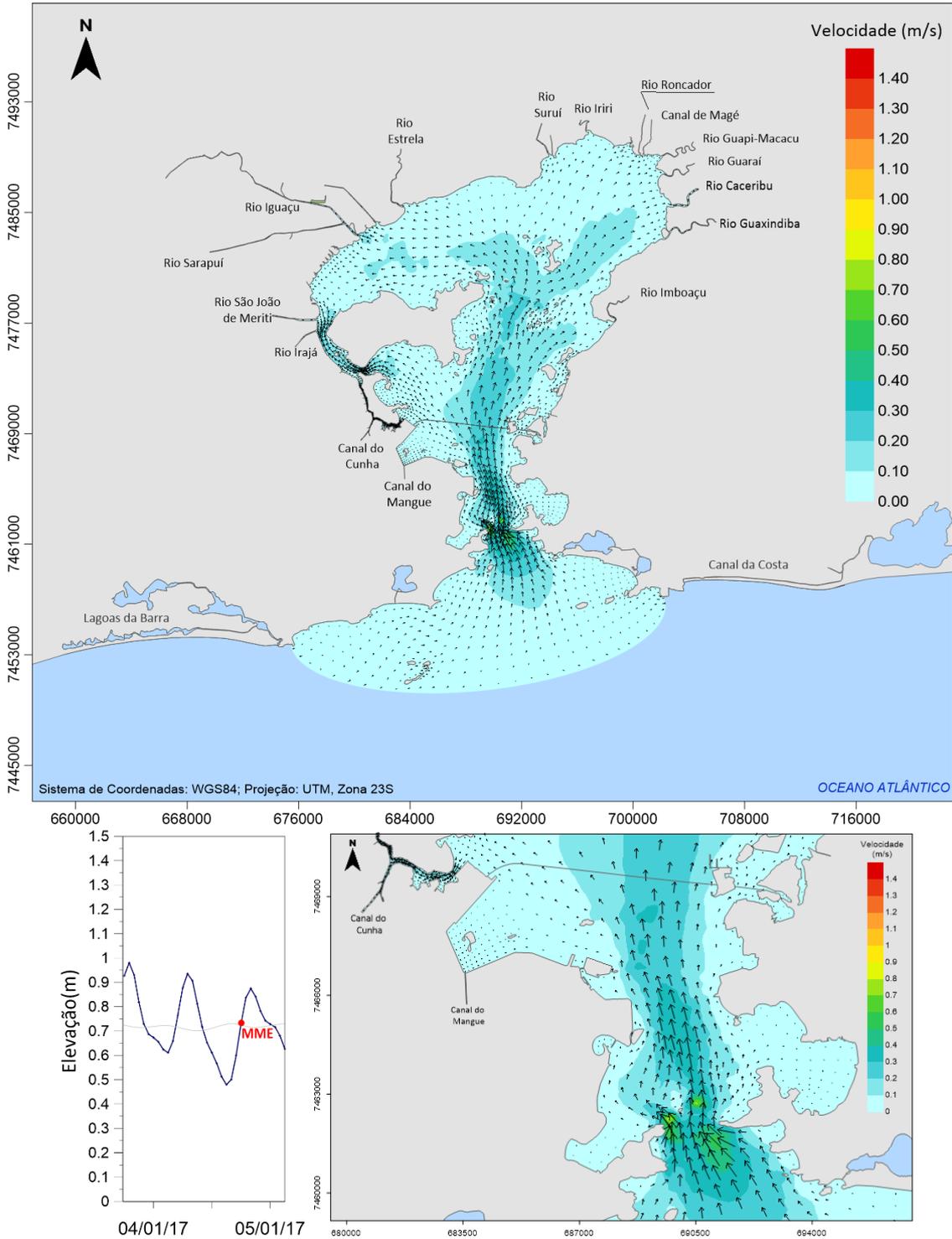


Figura 4.26 - Distribuição de correntes na BG em uma MME de quadratura na estação Ponte Rio-Niterói, verão de 2016/2017. O instante de MME de quadratura possui velocidades mais baixas se comparado com o mesmo instante na sizígia (Figura 4.22).

4.3 Análises dos Modelos de Tempos Característicos

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos modelos de Taxa de Renovação e Idade da Água. Na seção 3.4, está descrito como os modelos foram desenvolvidos, suas condições iniciais e de contorno. A seguir, serão apresentados os resultados de cada modelo, bem como discussões pertinentes.

4.3.1 Taxa de Renovação

Os resultados de Taxa de Renovação estão a seguir na forma de mapas de isolinhas e gráficos de séries temporais de porcentagem de água renovada. As estações cujas séries foram analisadas estão ilustradas na Figura 4.1 no início deste capítulo.

Os modelos de Taxa de Renovação simularam 90 dias em cada cenário. Conceitualmente, se o modelo rodar por um tempo suficientemente grande, a Taxa de Renovação tende a 100% em todo o domínio de modelagem, uma vez que em algum momento toda a água no sistema será renovada, como foi detalhado no item 3.4.1. Na Baía de Guanabara, após os 90 dias de simulação, não houve renovação completa das águas em todas as regiões. Cabe lembrar que essa Taxa varia no tempo e no espaço em um corpo de água natural, devido à complexidade geométrica e hidrodinâmica.

Na Baía de Guanabara, o mar representa a maior fonte de águas novas. Os rios, por sua vez, representam uma porção desta renovação, tendo maior influência próximo de suas desembocaduras, no interior da BG.

Os mapas gerados mostram que no interior da Baía as águas se renovam mais rapidamente nas áreas próximas à foz dos rios de maior vazão, como Guapi-Macacu, na região nordeste da BG, e Iguçu-Sarapuí, na região noroeste. Considerando os valores adotados neste trabalho, a vazão fluvial no verão é cerca de quatro vezes maior que no inverno, o que justifica as diferenças entre os resultados desses cenários.

Ao fim de 90 dias de simulação, essa diferença de renovação das águas entre os cenários modelados foi grande. No inverno, ainda havia regiões com Taxa de Renovação abaixo de 20% e, na maior parte da Baía, a renovação variou de 30 a 50%. No verão, a Taxa de Renovação atingiu valores próximos de 80%, evidenciando a influência da vazão fluvial na renovação de água no interior da Baía.

Por outro lado, na região Sul da BG, próximo de sua embocadura, observou-se uma renovação mais rápida no cenário de inverno, o que pode ser justificado pela maior ocorrência de frentes frias neste período do ano. Essa região é mais fortemente influenciada pelas correntes costeiras.

Outra característica observada, em ambos os cenários, foi a menor Taxa de Renovação de toda a BG em sua região central. O local mais crítico foi à leste da Ilha do Governador, onde, no inverno, a renovação não passou de 20%. Isso pode ser justificado por esta área sofrer menor influência direta das águas novas que chegam no sistema. Como as águas novas advêm dos rios e do mar, regiões mais próximas dessas fronteiras tendem a se renovar primeiro.

Os resultados para 7, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 dias de simulação, comparando inverno e verão, estão ilustrados nos mapas que vão da Figura 4.27 até a Figura 4.33.

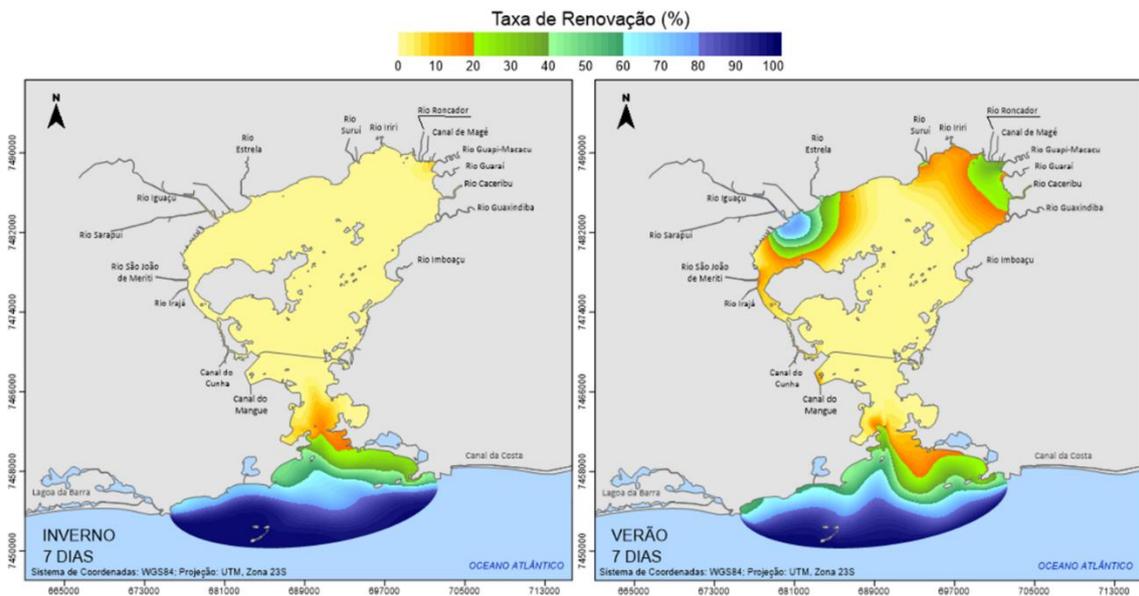


Figura 4.27 - Taxa de Renovação após 7 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Enquanto no inverno não se observa quase nenhuma renovação no interior da BG, no verão já é visível a renovação próximo da foz dos rios de maior vazão, Iguaçú Sarapuí e Guapi-Macacu.

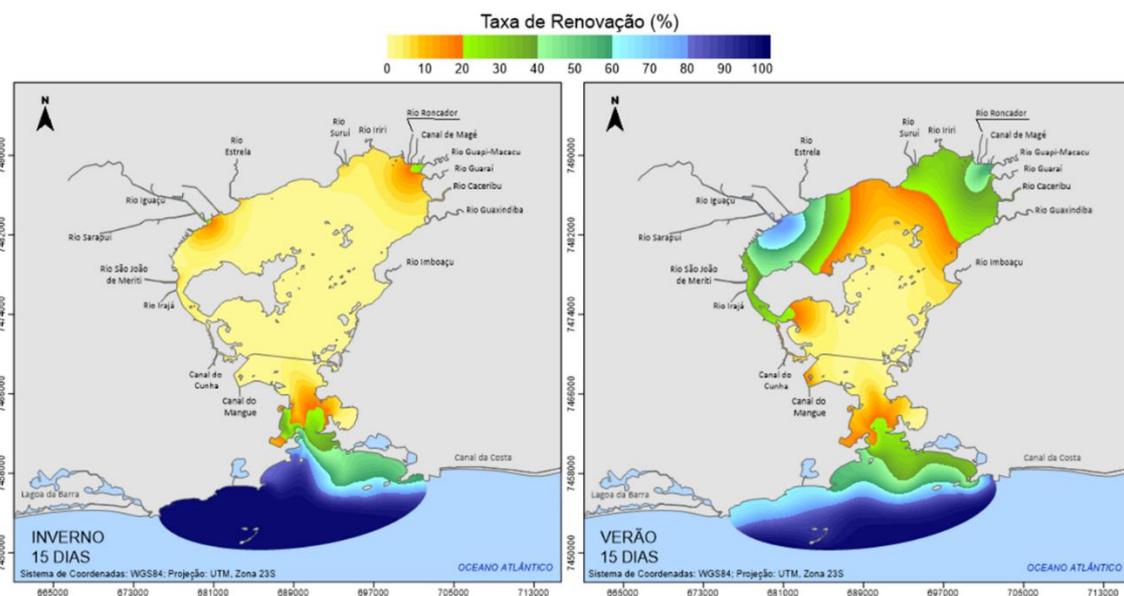


Figura 4.28 - Taxa de Renovação após 15 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Após 15 dias de simulação, no inverno começa-se a notar o crescimento da Taxa de Renovação no fundo da Baía. Por outro lado, observa-se na região Sul que no inverno a renovação é maior, provavelmente devido a correntes de frente fria mais comuns nessa estação do ano.

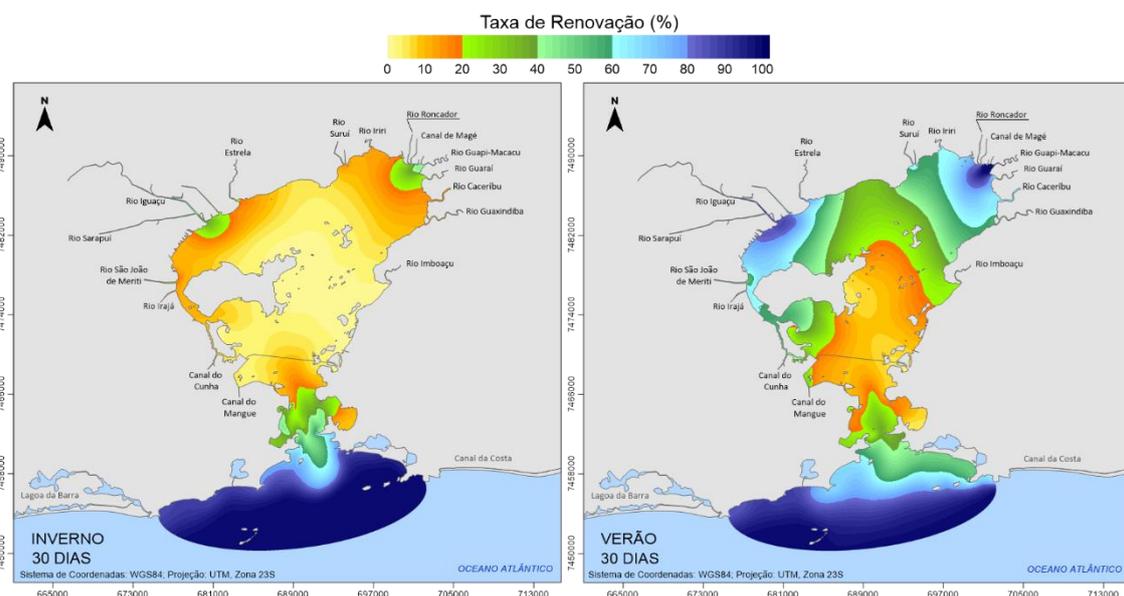


Figura 4.29 - Taxa de Renovação após 30 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Após 30 dias de simulação, no inverno, apenas as áreas próximas das fozes dos rios Iguazu-Sarapuí tiveram Taxas de Renovação superior à 20%. Por outro lado, observa-se na região Sul que no inverno a renovação é um maior.

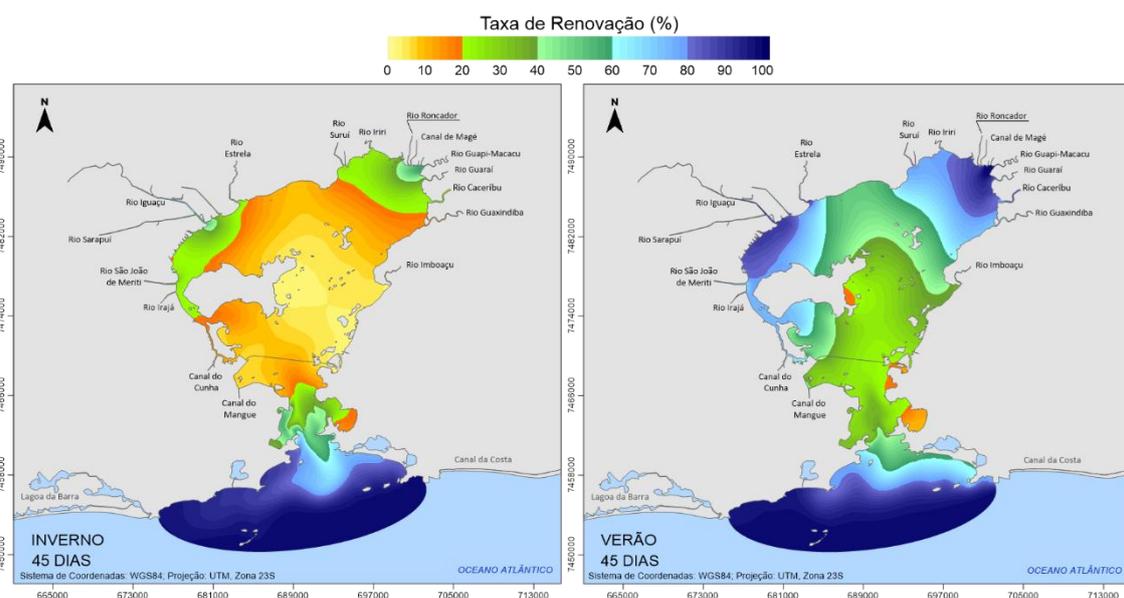


Figura 4.30 - Taxa de Renovação após 45 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Nota-se aqui que no verão uma das últimas regiões a ter suas águas mais renovadas foi a região leste à Ilha do Governador. No inverno, essa região ainda apresenta valores de renovação abaixo de 10%.

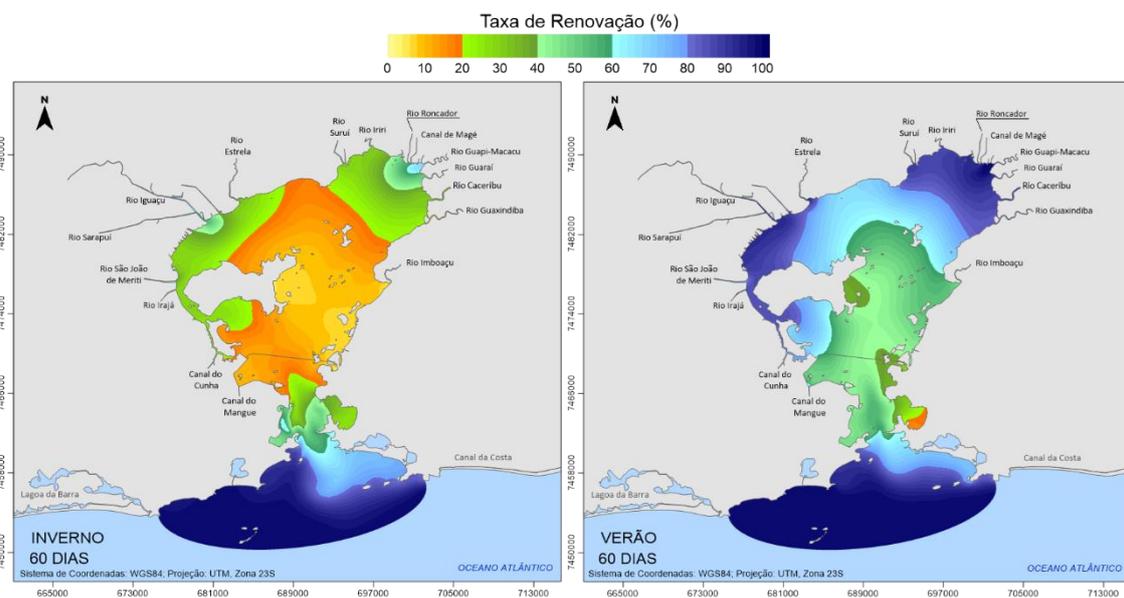


Figura 4.31 - Taxa de Renovação após 60 dias, para inverno, à esquerda e verão, à direita. A massa de água no interior da BG, predominantemente pelos rios, parece exercer maior influência sobre as trocas de água nas proximidades da Ilha Fiscal.

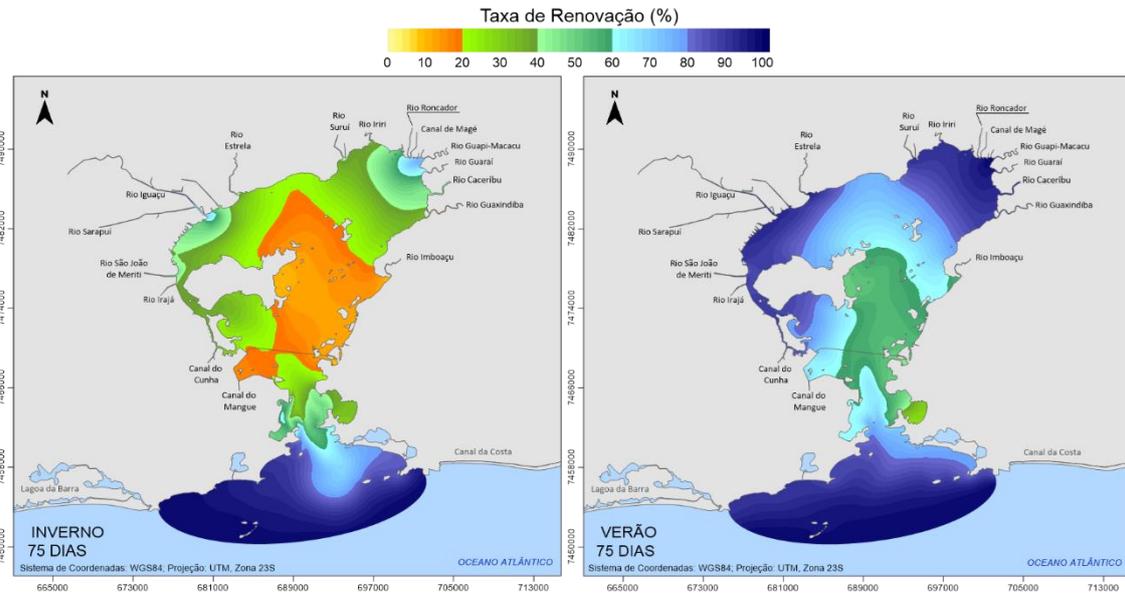


Figura 4.32 - Taxa de Renovação após 75 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Após 75 dias de simulação, a região central no inverno ainda apresenta Taxas de Renovação em torno de 20%, enquanto no verão os valores variam na faixa de 60%.

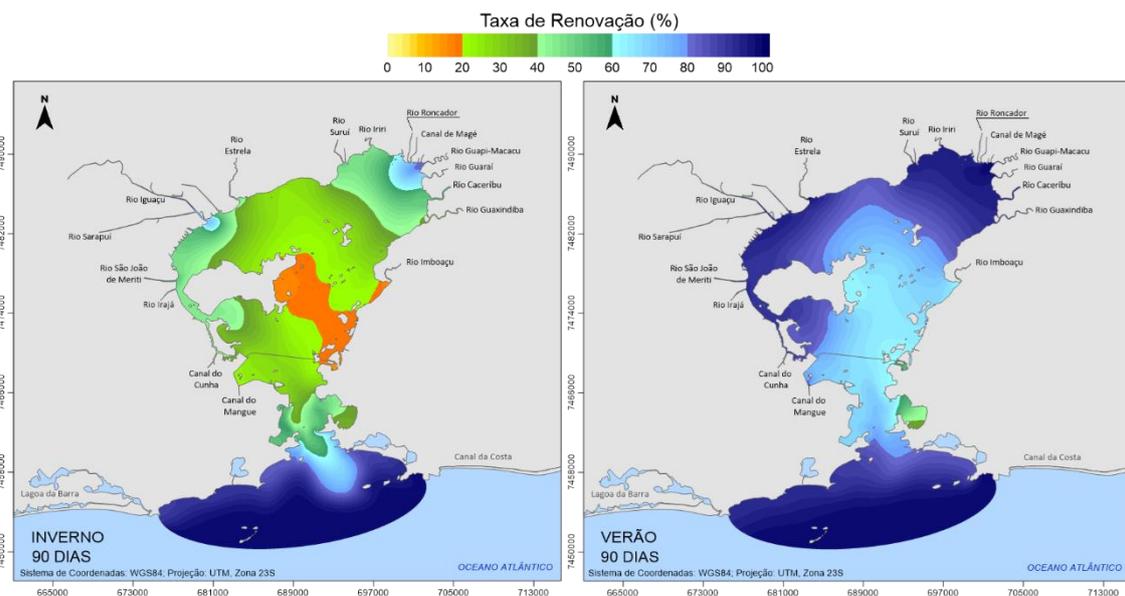


Figura 4.33 - Taxa de Renovação após 90 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. No final da simulação no inverno há variação na Taxa de Renovação de 20 a 80%, no verão essa variação é de 40 a 98%.

Os gráficos da Figura 4.35 até a Figura 4.38 exibem séries temporais para as estações Baía Noroeste, Baía Nordeste, Baía Norte, IG Leste e Ponte do Saber. Neles é possível identificar claramente como a sazonalidade influencia na renovação das águas interiores da BG. O aporte de água doce, que é maior no verão, contribui para acelerar as trocas de água nas proximidades dos estuários. No entanto, cabe destacar que, no caso da BG, os

rios contribuintes trazem consigo altas cargas poluidoras, o que gera um grande problema de qualidade da água.

Como pode ser observado nas figuras, a diferença entre verão e inverno para renovação de 50% das águas nas estações é de vários dias. A regiões Noroeste e Nordeste, com séries temporais ilustradas, respectivamente, na Figura 4.34 e na Figura 4.35, são as mais influenciadas pelos rios que estão próximos, que possuem as maiores vazões dentre os rios que desaguam na BG.

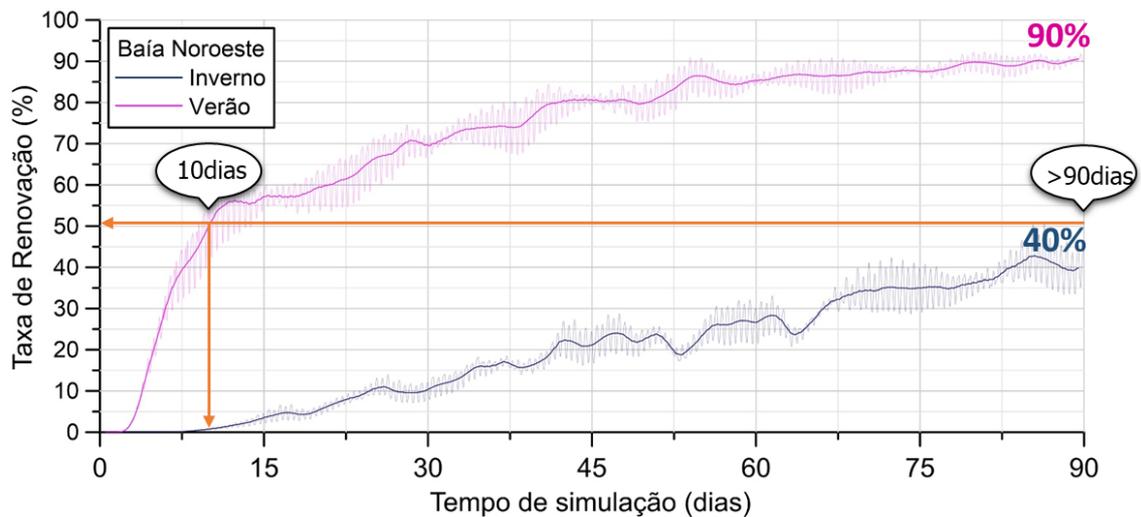


Figura 4.34 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Baía Noroeste.

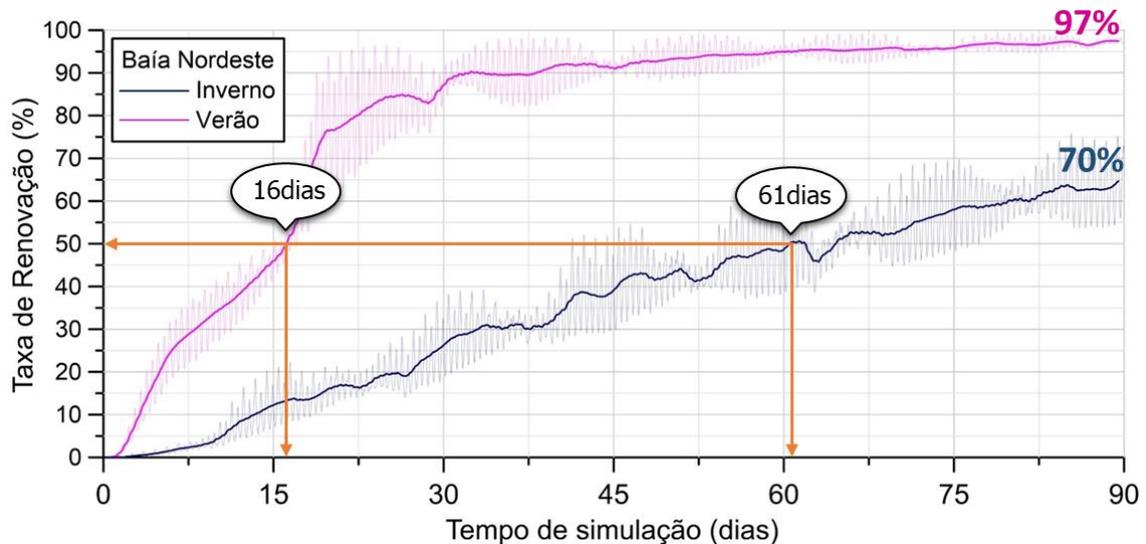


Figura 4.35 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Baía Nordeste. As linhas em destaque representam valores médios por ciclo de maré.

A renovação de 50% das águas, em algumas regiões, como a da Baía Norte e IG Leste, respectivamente ilustradas na Figura 4.36 e na Figura 4.37, que não estão sob influência direta de nenhum rio, demora mais de um mês. No verão, a renovação de 50% das águas leva cerca de 41 dias na Baía Norte e 67 dias na estação IG Leste. No inverno, ao final dos 90 dias simulados, essas estações não atingiram nem 30% de renovação das águas.

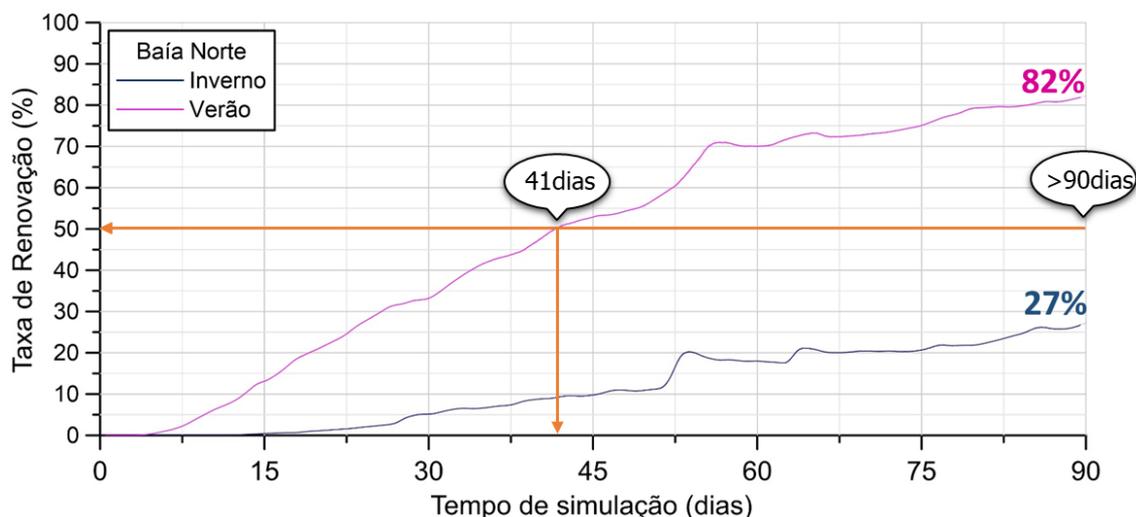


Figura 4.36 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Baía Norte.

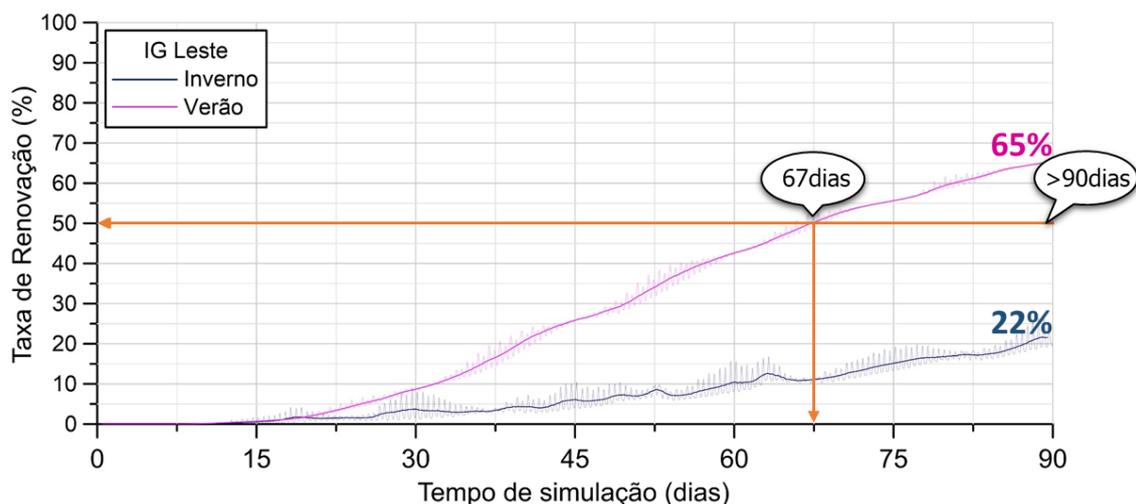


Figura 4.37 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação IG Leste.

Na estação Ponte do Saber, Figura 4.38, localizada no Canal do Fundão, também se observou uma lenta renovação das águas. Nessa estação, 50% das águas renovam-se em cerca de 34 dias no verão. No inverno, no entanto, após 90 dias de simulação, apenas 40% havia sido renovado.

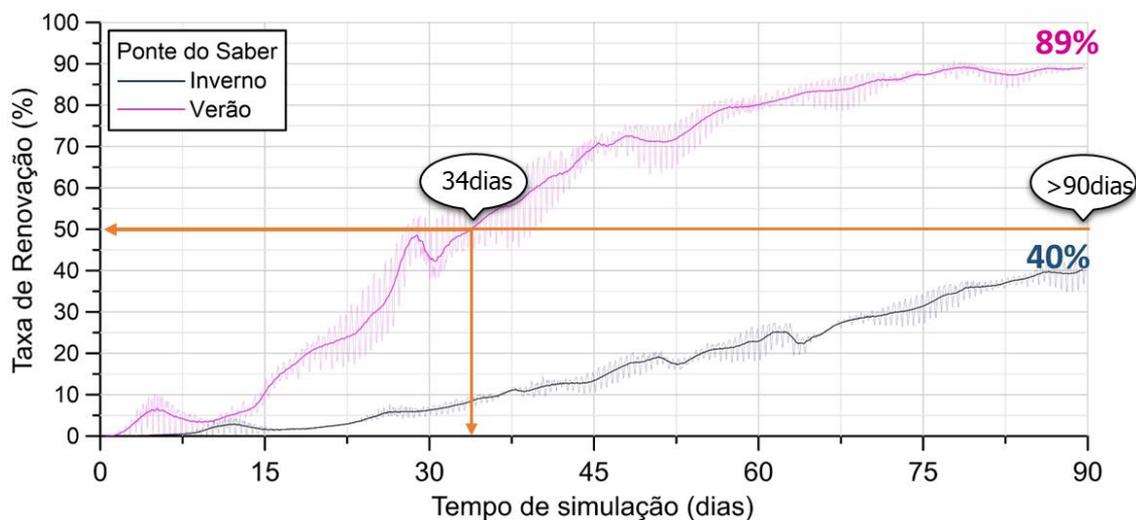


Figura 4.38 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Ponte do Saber.

No canal da embocadura da Baía de Guanabara, representado por séries temporais da estação Boca da Barra, as trocas de água são mais intensas devido à constante e intensa ação da maré nessa região, além das correntes costeiras. Na Figura 4.39, percebe-se que a renovação de 50% das águas ocorre primeiro no inverno, com diferença de dias para o verão. Nesse caso, a maior renovação no inverno é explicada pela presença de correntes costeiras mais intensas nessa época do ano, que é marcada pela passagem de frentes frias. Outra discussão que pode ser levantada nesse gráfico, é sobre os valores de renovação não serem muito altos, o que se esperaria na região da embocadura da Baía. Isso pode ser explicado pelo limite Sul da BG adotado neste estudo, que pode ter influenciado nos resultados. Outros autores consideram esse limite na região mais estreita da embocadura da BG. Nesta dissertação, o limite Sul da BG considerado engloba uma grande porção de águas na região costeira abaixo da seção mais estreita da embocadura. Lembrando que inicialmente todo o domínio recebe um valor inicial indicativo de renovação igual a zero. Logo, quanto maior o domínio, o tempo para renovação tende a aumentar.

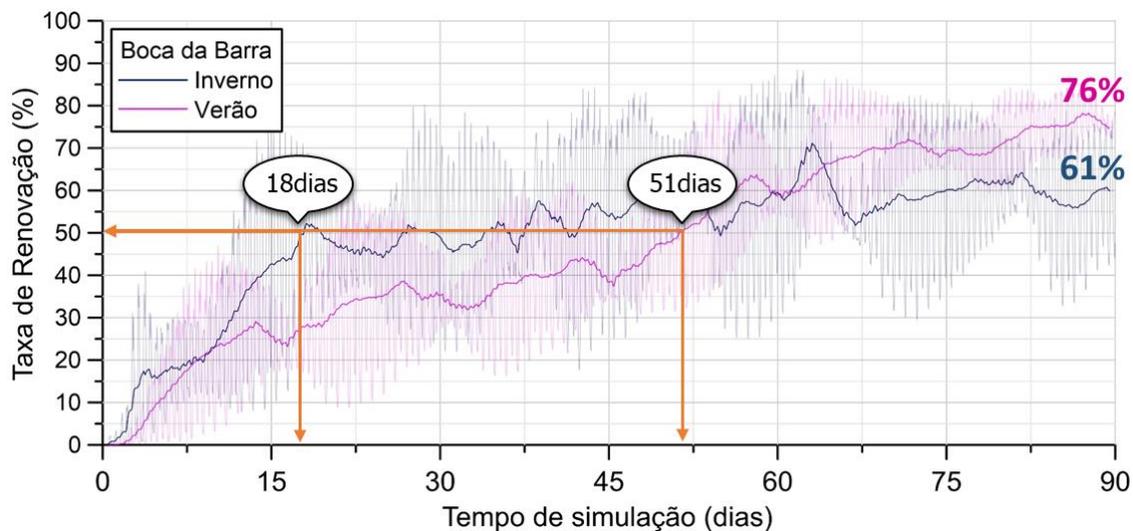


Figura 4.39 - Séries temporais de Taxa de Renovação, inverno e verão, na estação Boca da Barra.

Através de testes e análises de diversos resultados, verificou-se uma grande dificuldade acerca da calibração do modelo da Taxa de Renovação, uma vez que esta é muito sensível ao tempo de transição nas fronteiras. Esse tempo de transição é definido como o tempo necessário para que a água externa ao sistema chegue dentro do domínio de modelagem, e é definido quando a seção limite do modelo está ainda dentro da zona de inversão de correntes do estuário. Devido à ação da maré, esse tempo pode variar de horas a dias, dependendo de cada caso específico. Na ausência de medições dessa variável nos estuários da Baía de Guanabara, tentou-se calibrar o modelo através do ajuste nas fronteiras dos rios, comparando a vazão entre eles e a magnitude da influência da maré nos mesmos de acordo com a distância da foz, além da adoção de coeficientes de dispersão longitudinal e transversal para compensar a menor mistura oferecida pelo modelo hidrodinâmico 2DH, em comparação com um modelo 3D.

4.3.2 Idade da água

Como explicado no item 3.4.2, na descrição do modelo de Idade da Água, à medida que decorre o tempo de simulação, as águas no interior da BG, que inicialmente possuíam idade zero, começam a ter sua idade contabilizada. Se o modelo for rodado por um período longo o suficiente, os resultados de séries temporais de Idade da Água passam a oscilar em torno de um valor central.

O modelo de Idade da Água foi simulado por 90 dias, e pela não observância de estabilidade durante esse tempo, adotou-se o último resultado dessa simulação como condição

inicial de uma nova rodada do modelo. Valores mais estáveis para todas as estações analisadas foram encontrados por volta de 120 dias de simulação no verão, e 150 dias de simulação no inverno.

A idade das águas em cada local ao fim das simulações teve como valores medianos as idades ilustradas na Figura 4.40, com uma grande diferença entre os cenários modelados. Cabe destacar que, quando se diz que a Idade da Água em determinado ponto do domínio vale x , significa dizer que, desde o início da simulação, as águas que passam por esse ponto estão a x dias, em média, circulando pelo domínio de modelagem.

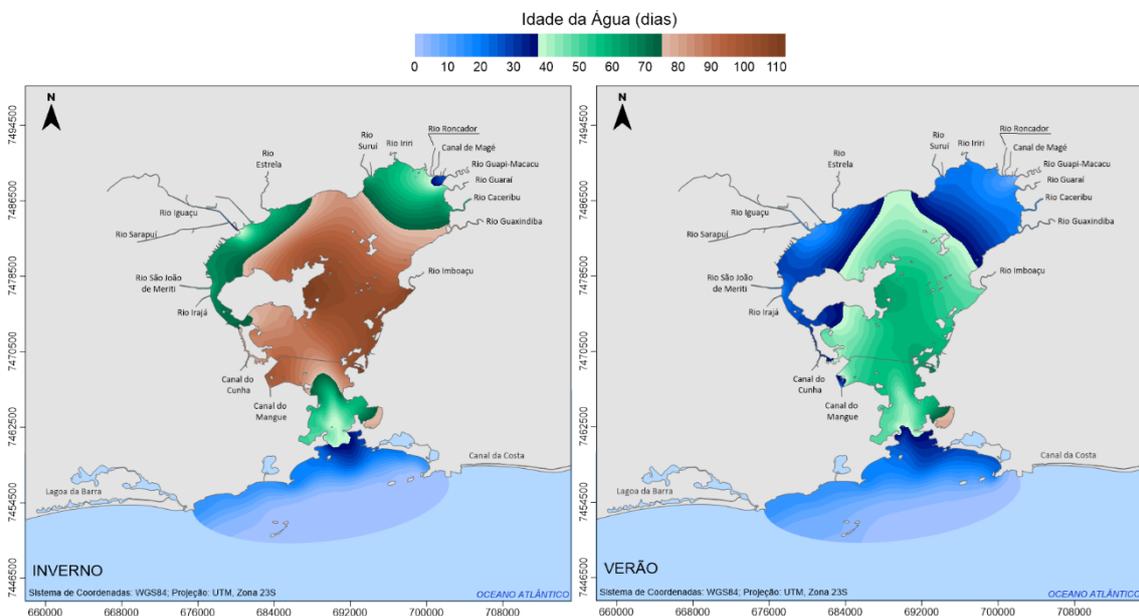


Figura 4.40 - Idade da Água ao final das simulações com valores estabilizados, para inverno, à esquerda, e verão, à direita.

Nas análises dos resultados, percebeu-se como as idades são mais elevadas no inverno, com exceção da região da Boca da Barra, onde há uma mistura mais acentuada de águas externas ao domínio da BG com águas interiores, logo idades mais baixas. Da Figura 4.41 à Figura 4.45, estão ilustradas séries temporais de idade da água extraídas, respectivamente, das estações Baía Noroeste, Baía Nordeste, Baía Norte, IG Leste e Ponte do Saber.

No interior da Baía, as estações que apresentaram menores idades foram Baía Noroeste e Baía Nordeste, que estão localizadas nas áreas de influência dos rios de maior vazão que desaguam na BG: Guapi-Macacu e Caceribu à Nordeste, e Iguçu-Sarapu à Noroeste.

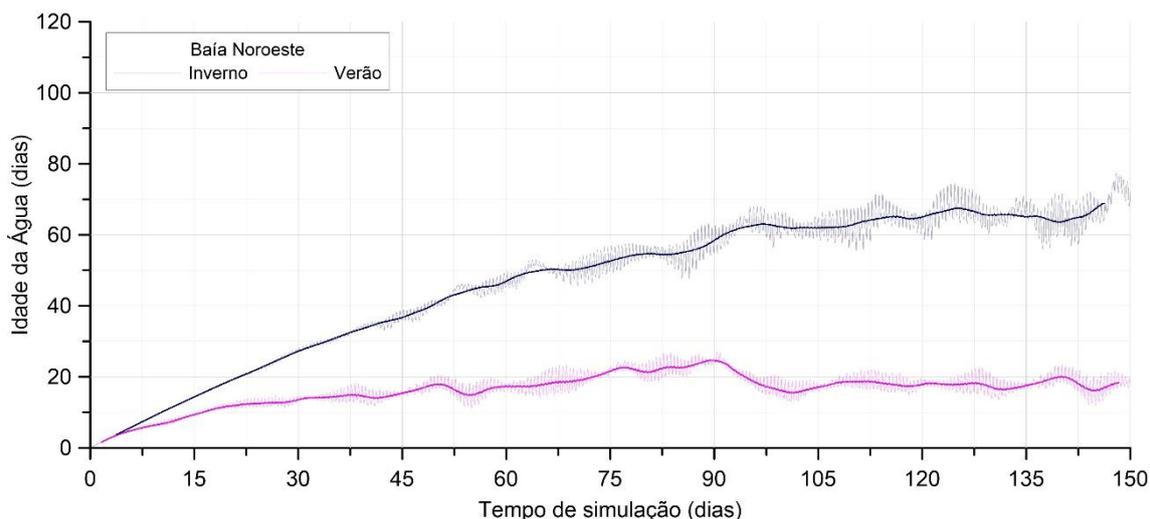


Figura 4.41 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação Baía Noroeste. As linhas em destaque representam valores médios por ciclo de maré.

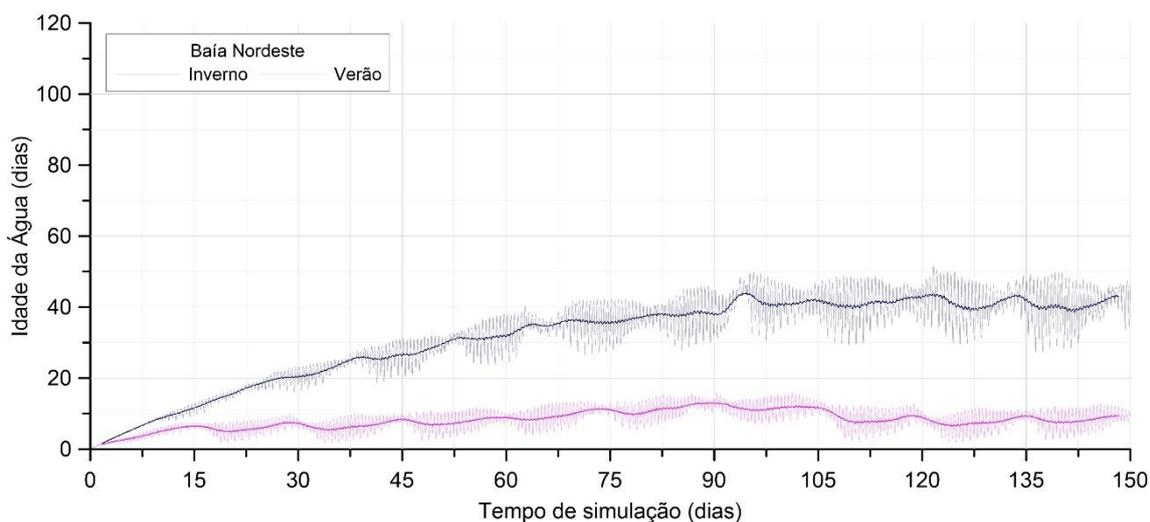


Figura 4.42 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação Baía Nordeste.

As regiões que apresentaram as maiores idades foram Baía Norte e IG Leste, que, assim como foi constatado no item 4.3.1, possuem as menores Taxas de Renovação. Na estação Baía Norte, foram encontradas idades na faixa de 85 dias. Na estação IG Leste, localizada na região leste da Ilha do Governador, obtiveram-se idades de até 105 dias, valor próximo da idade de 110 dias nessa região, encontrada por Porto e Ponte (2018).

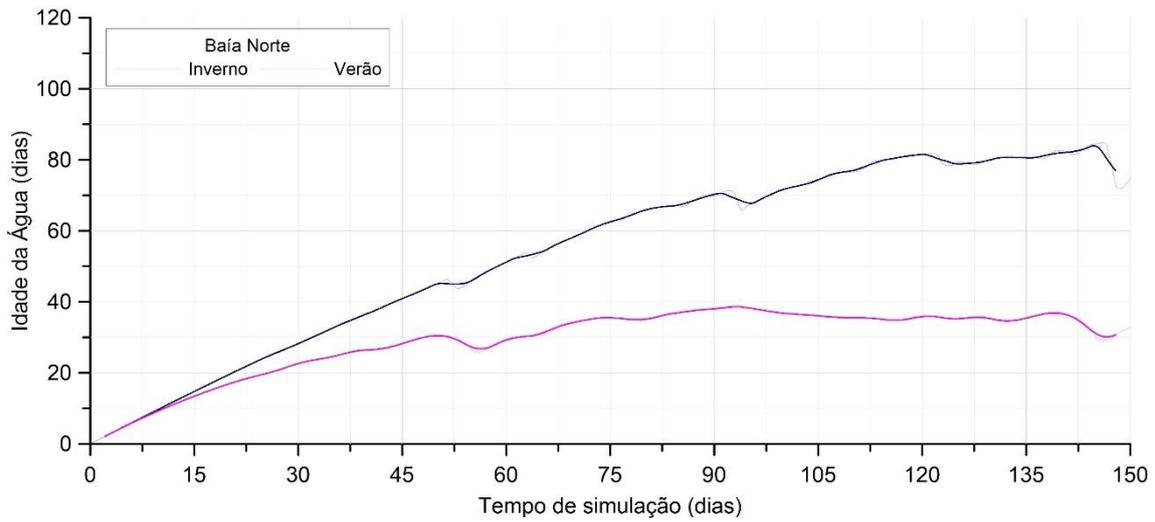


Figura 4.43 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação Baía Norte.

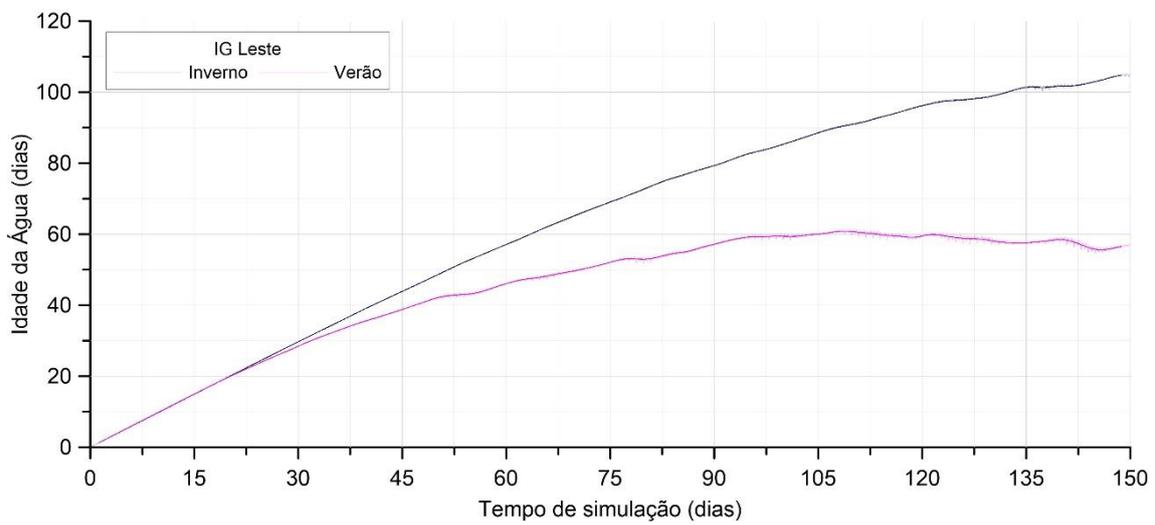


Figura 4.44 - Séries temporais de Idade da Água, inverno e verão, na estação IG Leste.

Na estação Ponte do Saber, Figura 4.45, no Canal do Fundão, constataram-se idades variando de 30 até cerca de 80 dias, entre verão e inverno.

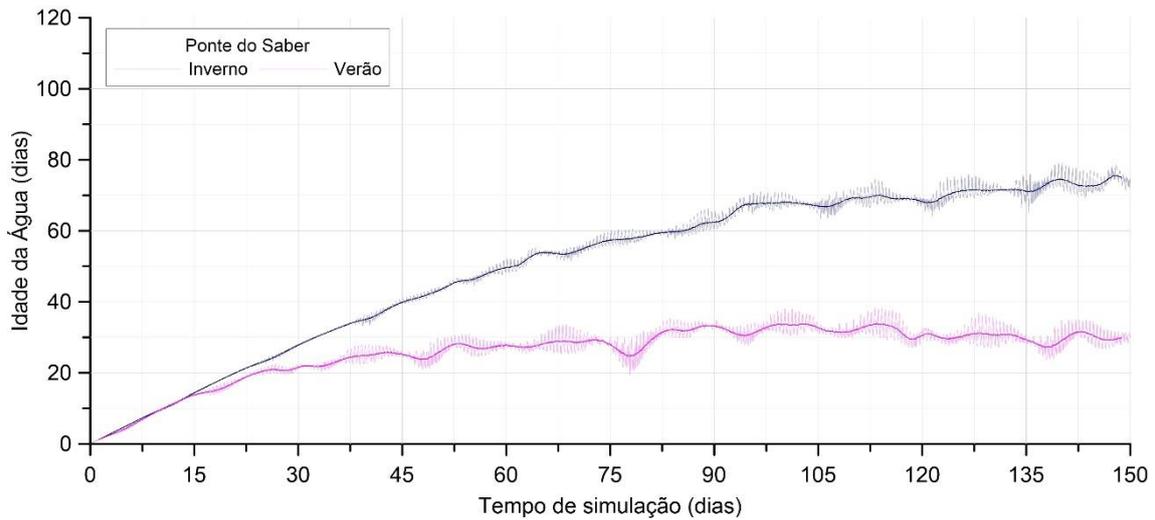


Figura 4.45 - Séries temporais Idade da Água, inverno e verão, na estação Ponte do Saber.

A seguir, da Figura 4.46 até a Figura 4.49, são exibidos mapas indicando a porcentagem de existirem Idades de Água inferiores a 7, 15, 30 e 60 dias, para inverno e verão. Os mapas foram gerados a partir dos resultados com idade da água já estabilizados após todas as simulações.

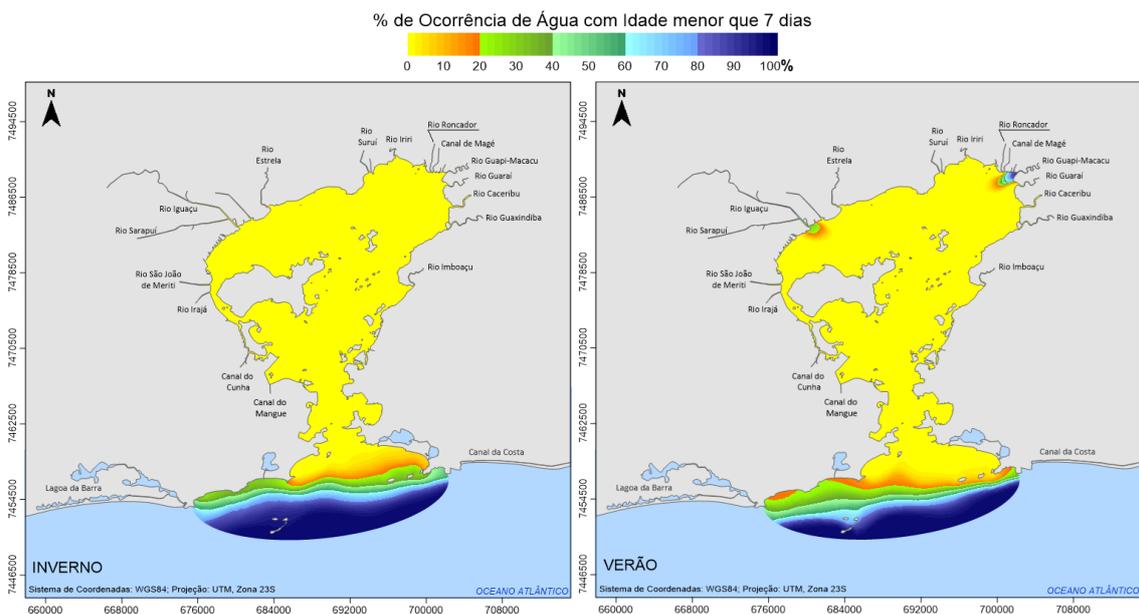


Figura 4.46 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água inferior a 7 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Pode-se perceber que as regiões de rápida renovação e menor idade estão próximas das fronteiras.

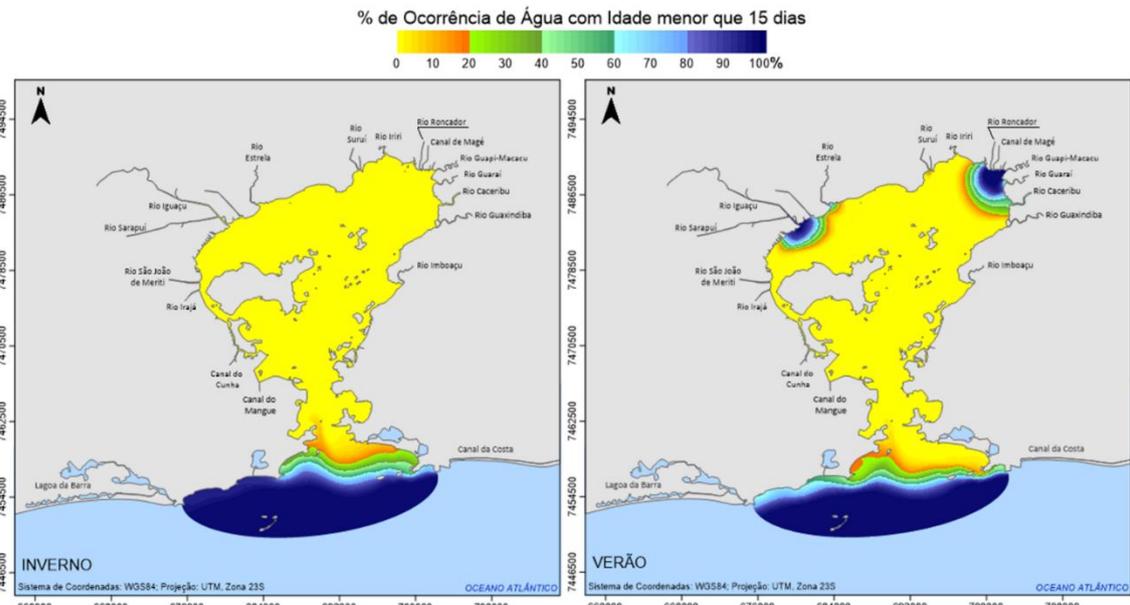


Figura 4.47 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água inferior a 15 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Aqui pode-se ver que apenas no verão, e próximo dos rios de maior vazão, existem algum percentual de idades inferiores a 15 dias. Na região Sul, o maior percentual de ocorrência de idades menores que 15 dias está próximo do limite da BG.

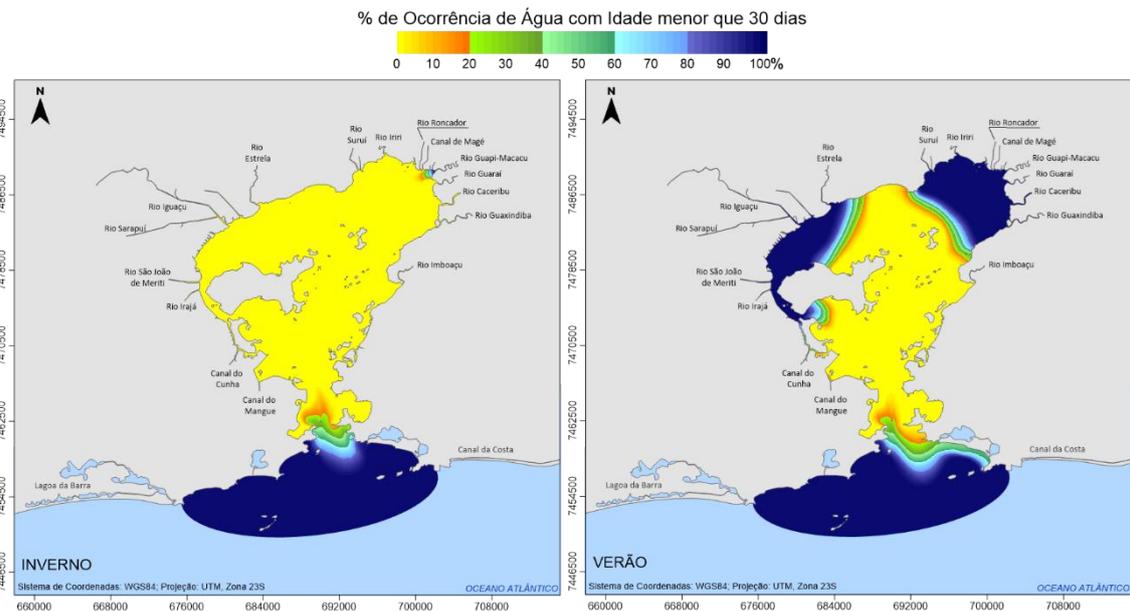


Figura 4.48 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água inferior a 30 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Observa-se nesta figura que no inverno a grande maioria da extensão da BG apresenta idade de águas superior a 30 dias.

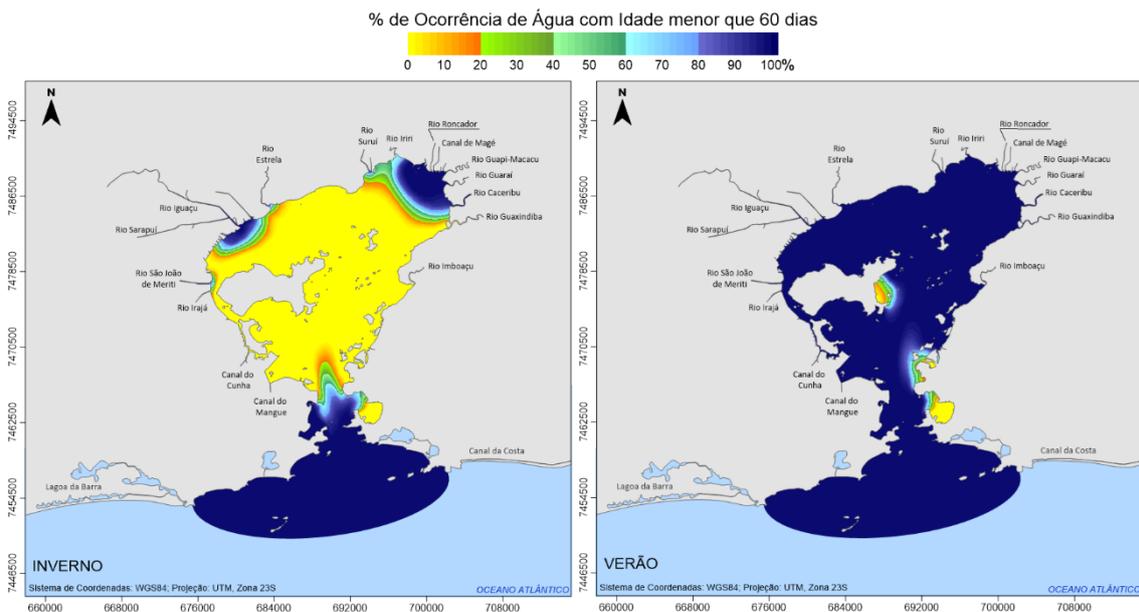


Figura 4.49 - Porcentagem de ocorrência de Idade da Água superior a 60 dias, para inverno, à esquerda, e verão, à direita. Nessa figura percebe-se que em geral, no interior da BG as águas no verão possuem idades inferiores à 60 dias. No inverno, só se observa águas mais jovens que 60 dias próximo da foz dos rios de maior vazão, e na região da embocadura, influenciada por correntes costeiras.

Essas análises sobre a idade da água podem contribuir para a identificação de regiões com maior propensão a problemas de qualidade da água, uma vez que a renovação de águas na Baía de Guanabara desempenha um importantíssimo papel no transporte de poluentes para fora da Baía.

4.4 Análises dos Modelos de Qualidade da Água

Na Baía de Guanabara, assim como em qualquer corpo d'água natural, a poluição não é uniformemente distribuída. A qualidade da água na BG varia, espacial e temporalmente, dependendo dos padrões de circulação hidrodinâmica, variações sazonais e do estado de degradação de cada bacia hidrográfica.

A maioria dos municípios que compõe a bacia de drenagem da Baía de Guanabara enfrenta grandes déficits de atendimento no esgotamento sanitário. Nesse sentido, as análises de qualidade da água aqui realizadas visaram detalhar informações no espelho de água da BG, levando em conta as condições em que se encontram os rios das bacias hidrográficas por meio de dados coletados em tempos irregulares em localidades esparsas.

As comparações entre os cenários de qualidade da água, como foi explicado na seção 3.5, visam verificar o grau de desacordo nas águas da BG de parâmetros limitantes expressos na Resolução CONAMA nº 357/2005. Os parâmetros considerados foram DBO, OD,

Fósforo Total, Nitrogênio Inorgânico e Nitrato. Nesta seção, os resultados serão apresentados juntamente com discussões pertinentes.

4.4.1 DBO e OD

A Figura 4.50 exibe, em valores percentuais, o quanto as concentrações de DBO excederam o limite de 5mg/L para classe 2 de águas salinas estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005. Duas características desse resultado chamam a atenção: a área com maior degradação por matéria orgânica se concentra na região oeste da BG, e, no verão, constata-se maior degradação do espelho de água da Baía do que no inverno.

Sabe-se que a região oeste da BG é a mais urbanizada, onde os municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias, Mesquita, Nova Iguaçu, Nilópolis, Rio de Janeiro e São João de Meriti têm enorme influência na qualidade das águas. Esses municípios apresentam baixos índices de tratamento de esgotos, de acordo com o Atlas de Esgotos, publicado pela ANA em 2018, com dados referentes ao ano de 2013. Dos esgotos gerados nesses municípios, grande parte é lançada em rios e córregos sem tratamento. Em Belford Roxo, 28,4% dos esgotos não são tratados. Em Duque de Caxias, esse percentual é de 75,4%; em Mesquita, de 75,0%; em Nova Iguaçu, de 90,1%; em Nilópolis, de 97,2%; no Rio de Janeiro, de 29,6%; e em São João de Meriti, de 93,4%. Todo esse esgoto sem tratamento chega à Baía de Guanabara. Isso justifica o resultado encontrado no que tange à presença de matéria orgânica em maiores concentrações na região oeste da BG. Além disso, esse resultado destaca como a qualidade ambiental da bacia reflete na saúde das águas na Baía. Logo, para se alcançar a melhoria dos padrões de qualidade na BG, deve-se atentar para os problemas nos municípios que englobam a bacia hidrográfica.

Outras regiões que apresentam elevado percentual de desacordo com o limite da Resolução CONAMA foram as áreas próximas dos rios Imboçu e Guaxindiba, cujas áreas de drenagem abrangem o município de São Gonçalo. Esse município lança 76,4% de seu esgoto sem tratamento nos seus córregos e rios (ANA, 2018).

O segundo item de destaque nos resultados de DBO foi a diferença entre a distribuição espacial e de intensidade de poluição observada nos cenários de inverno e verão. Na Figura 4.50, nota-se uma maior área do espelho de água da BG em desacordo com a legislação no verão, caracterizado por ser o período chuvoso na região.

Esse resultado pode ser explicado pela presença, nesse período, de vazões mais altas de poluição difusa carregada das bacias hidrográficas para os corpos d'água. Com o aumento das chuvas, as redes de coleta e transporte de águas pluviais, que muitas vezes são sistemas unitários em conjunto com a rede de esgotos, carregam um maior volume de águas poluídas para os rios. Além disso, a vazão de esgotos despejada nos rios nessa estação do ano pode ser influenciada pelo alto consumo de água pela população no verão, e consequente aumento da vazão de esgotos. Assim, com as vazões dos rios elevada, maior é a força das águas fluviais para contrapor as correntes de maré no estuário. Logo, mais carga poluidora consegue desaguar no espelho de água da BG.

É importante destacar a relevância da hidrodinâmica do sistema nesses resultados. Como foi observado no item 4.3.1, sobre a Taxa de Renovação, e no item 4.3.2, sobre a Idade da Água, as águas na BG, no verão, renovam-se mais rapidamente no interior da Baía, próximo da foz dos rios de maior vazão. O que seria uma característica positiva, se a qualidade dos rios que desagüam na Baía não estivesse tão deteriorada, é, na verdade, um ponto negativo que provoca uma renovação das águas da BG com águas poluídas.

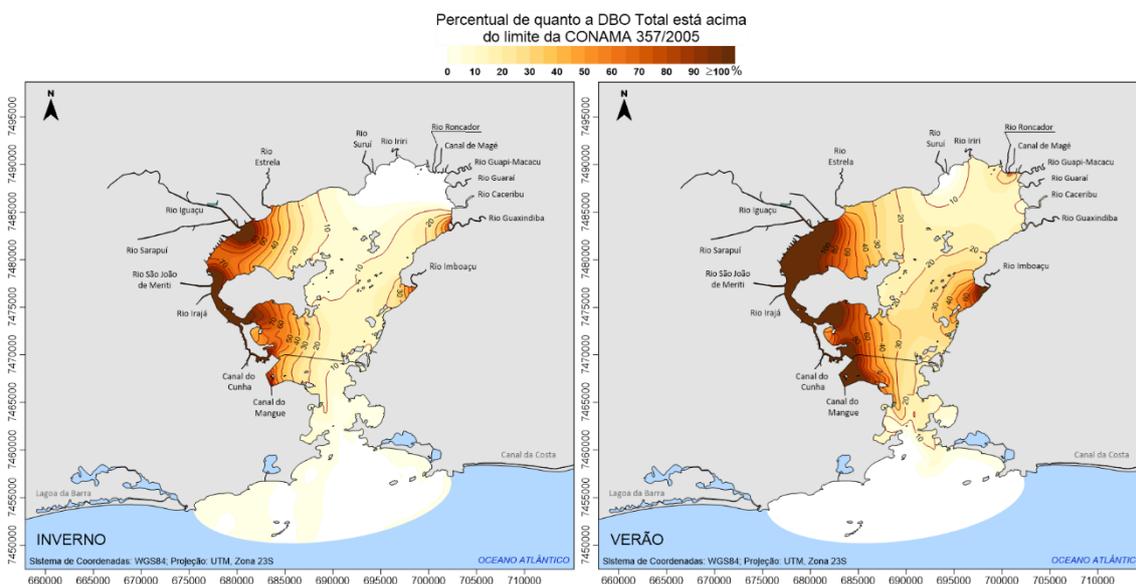


Figura 4.50 - Quantificação, em percentual, de quanto a concentração de DBO ultrapassa o valor de 5mg/L O_2 , estabelecido na Resolução CONAMA n° 357/2005. Exemplo, um valor de 80% indica que tal local está 80% acima do valor máximo requerido na Resolução.

O resultado para as concentrações de OD, na Figura 4.51, mostra que as concentrações de OD são baixas nas regiões de maior DBO, o que é coerente, uma vez que esses parâmetros estão diretamente relacionados. Quanto maior a matéria orgânica no meio, maior

o consumo de oxigênio pelos micro-organismos que irão atuar na sua estabilização, o que provoca queda de OD disponível.

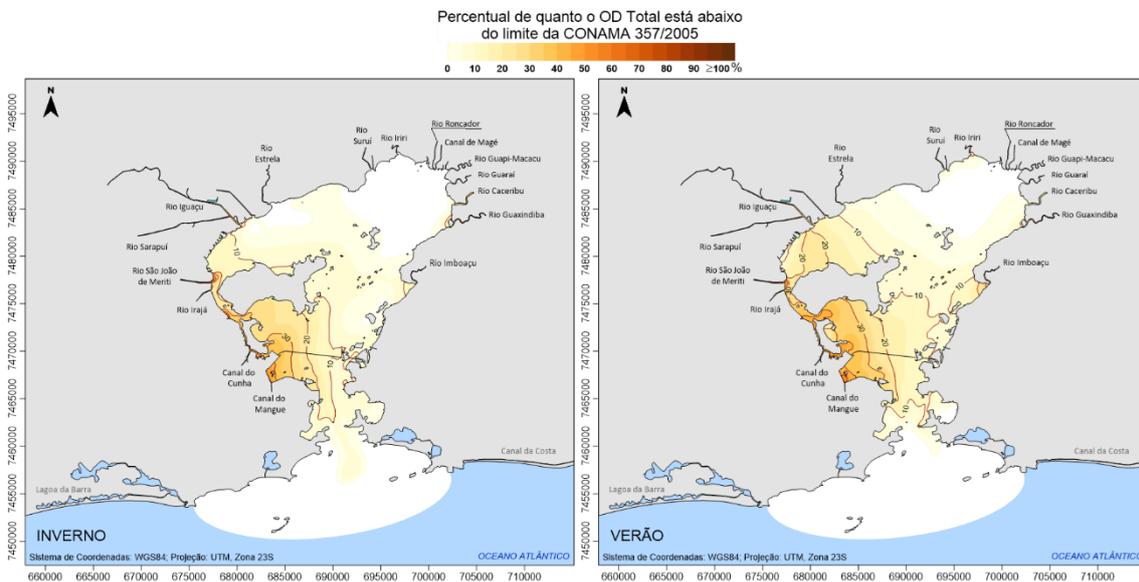


Figura 4.51 - Percentual quanto a concentração de OD está abaixo do limite estabelecido na CONAMA nº 357/2005. Exemplo, um valor de 20% indica que tal local está 20% abaixo do valor mínimo requerido na Resolução, que é 5mg/L.

Além da correlação dos resultados com as análises hidrodinâmicas de renovação das águas, também procurou-se avaliá-los por meio da comparação com a pontuação de saúde ambiental da Baía de Guanabara desenvolvida pela KCI Technologies (2015), nos estudos realizados através do acordo de cooperação técnica entre o Estado do Rio de Janeiro, Universidade de Maryland e KCI Technologies no Programa de Governança da BG.

O boletim elaborado apresenta uma pontuação de saúde da água na Baía de Guanabara, definida através da análise de dados de monitoramento coletados no período de 2013 a 2015 pelo Inea, nas estações de medições no espelho de água da BG. Cinco indicadores foram comparados com os limites ou metas determinadas pela Resolução CONAMA nº 357/2005, para Classe 2 em águas salinas. Cada região recebeu uma pontuação, de 0 a 100%, calculada como a média dos valores obtidos para cada estação de monitoramento analisada. A Figura 4.52 exhibe a pontuação para DBO e OD, cujos indicadores foram comparados com a concentração de 5mg/L, a mesma para ambos os parâmetros.

Confrontando a Figura 4.52 com os resultados apresentados anteriormente, nota-se que os resultados obtidos nas simulações para DBO e OD estão de acordo com a pontuação definida pelo boletim de saúde ambiental da BG. No boletim, a região oeste recebeu a

menor pontuação, tanto para OD quanto para DBO, sendo as águas consideradas de qualidade muito ruim. Para o parâmetro DBO, na maior parte da BG encontra-se valores acima do determinado, para classe 2 de águas salinas, na Resolução CONAMA nº 357/2005. Na região oeste, mais crítica, as concentrações de DBO no cenário atual modelado chegam a valores maiores que o dobro de 5mg/L, definido na referida norma.

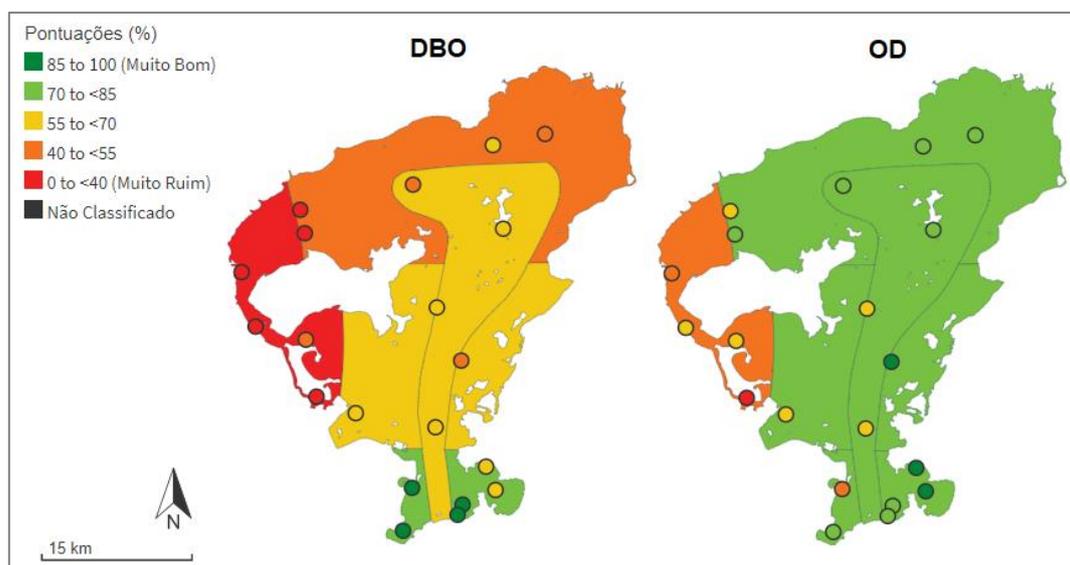


Figura 4.52 - Pontuação de saúde ambiental da Baía de Guanabara, para os indicadores DBO e OD, segundo estudo realizado por KCI Technologies (2015). Imagem adaptada de <https://ecoreport-card.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara/saude-da-baia/>. Pontos distribuídos na imagem indicam a localização das estações do Inea adotadas no estudo.

Essa comparação é válida para verificar os resultados, pois ambos os trabalhos consideraram os mesmos dados da Resolução CONAMA nº 357/2005 nas análises, tendo diferenças na metodologia e nos dados de medição utilizados. Nesta dissertação, foram adotados dados de medições na bacia hidrográfica como condição de contorno nos modelos. Os cenários atual e desejado tiveram distribuições de concentrações no espelho de água da Baía simuladas por meio de modelagem computacional. No estudo do boletim de saúde ambiental, como mencionado, foram analisadas estações distribuídas no espelho de água da BG. Apesar das diferenças metodológicas de cada estudo, os resultados foram muito semelhantes.

4.4.2 Nutrientes

Nas análises dos diferentes compostos de nitrogênio, verificaram-se valores de nitrato dentro do limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 no espelho de água da BG para o inverno, ou seja, menores que 0,7mg/L.

No Verão, como ilustrado na Figura 4.53, os resultados indicam concentrações de nitrato até 50% maiores que o limite da classe 2, próximo da foz do Rio Iguaçu-Sarapuí. Considerando que a vazão média de verão no rio Iguaçu-Sarapuí é 3,5 vezes maior que a de inverno, sabe-se que o rio chega com mais força para contrapor a maré no estuário. Logo, mais poluição é carregada para dentro da Baía. Correlacionando o resultado obtido com as condições de saneamento, percebe-se que o rio Sarapuí e seus afluentes recebem grandes cargas de esgotos dos municípios às suas margens. Além disso, sabe-se que nitrito é um indicativo de poluição remota, ou seja, de lançamentos de poluentes que ocorreram há certo tempo, já que o nitrato é formado na nitrificação da amônia. Logo, valores mais altos desse composto na foz do rio podem indicar que as águas dos rios receberam cargas poluidoras no percurso na bacia hidrográfica até chegar na foz.

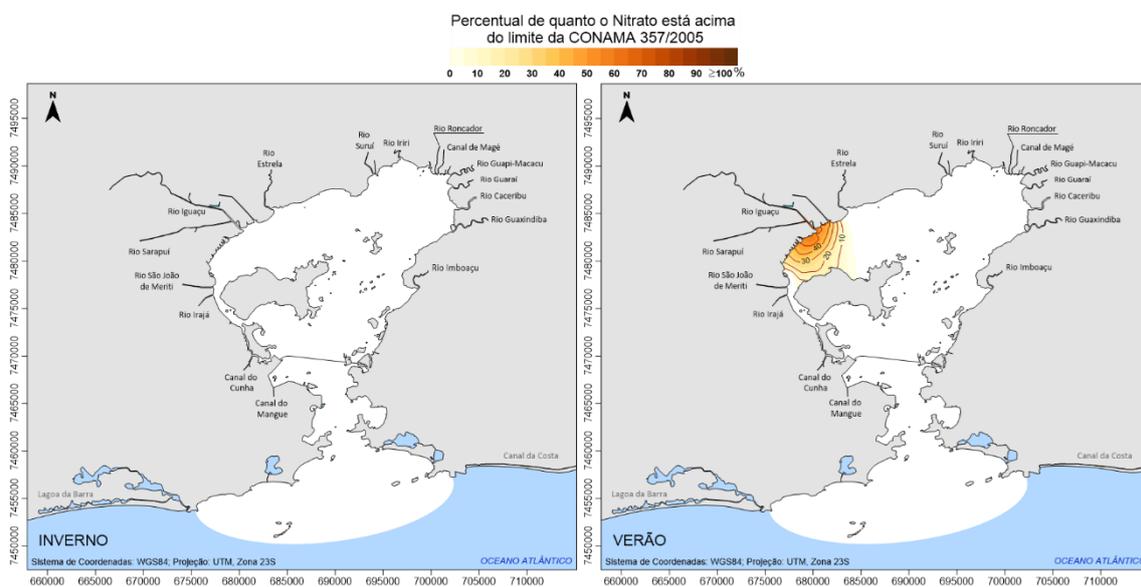


Figura 4.53 - Percentual quanto a concentração de Nitrato está acima do valor de 0,7mg/L N, estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005.

A Figura 4.54 exibe resultados da análise de Nitrogênio Inorgânico (amônia + nitrito + nitrato), que foi gerada visando a comparação com os resultados do boletim de saúde ambiental da BG. A análise comparativa desses resultados com a pontuação do boletim de saúde ambiental, ilustrada na Figura 4.55, mostra uma discordância entre as concentrações obtidas nas simulações computacionais e no boletim. Com base nessa conferência de nitrogênio total, o resultado obtido não parece não estar coerente em toda a BG. Na região oeste da Baía, a partir dos resultados da modelagem, vê-se que existe alguma porção das águas em desacordo com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005

(1,6mg/L) no verão. No boletim de saúde ambiental, essa área é considerada com qualidade ruim. Logo, os resultados são razoáveis. No restante da BG, no entanto, as modelagens não mostraram mais áreas em desacordo, enquanto no boletim de saúde ambiental a pontuação para a maior parte da BG é inferior a 50% na região norte e nordeste. Apenas o canal principal da Baía recebeu nota acima de 80%, sendo considerada boa.

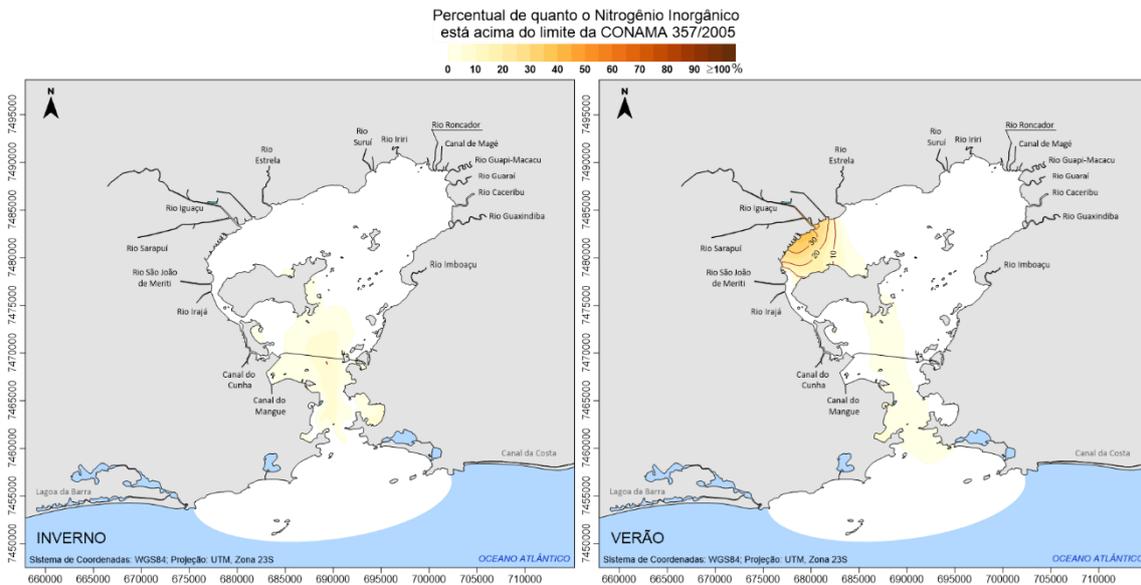


Figura 4.54 - Percentual de quanto a concentração de Nitrogênio Inorgânico está acima do valor de 1,6 mg/L N, estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005.

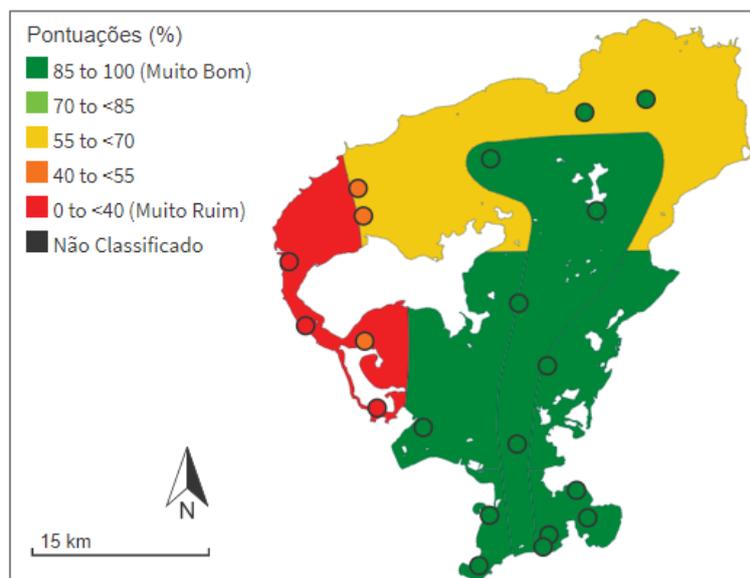


Figura 4.55 - Pontuação de saúde ambiental da Baía de Guanabara, para os indicadores Nitrogênio Inorgânico, segundo estudo realizado por KCI Technologies (2015). Imagem adaptada de <https://ecoreportcard.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara/saude-da-baia/>

Logo, considera-se que as análises de compostos de nitrogênio necessitam de maior atenção. Neste estudo, dispôs-se apenas de medições de nitrato para as modelagens e os outros

compostos de nitrogênio foram estimados. Isso mostra que dados coletados são fundamentais para melhoria das simulações.

Na análise de fósforo total, constatou-se que quase a totalidade do espelho de água da BG encontra-se fora do limite da Resolução CONAMA nº 357/2005, que define o valor máximo de 0,093mg/L para águas salinas na classe 2. A Figura 4.56 ilustra os resultados obtidos para inverno e verão através dos Modelos de Qualidade da Água.

Nesse resultado, verificou-se, ainda, uma distinção entre os cenários de inverno e verão. No verão, parece haver uma maior área do espelho de água, na região nordeste, onde as concentrações de fósforo total se encontram dentro do limite de 0,093mg/L adotado no estudo. A grande influência desse resultado está na variação sazonal das vazões fluviais, que como já discutido, impactam na renovação das águas. Nesse caso, verificou-se um impacto positivo dos rios Surui, Surui Mirim e Iriri no espelho d'água da Baía. Esses rios possuem boas condições de qualidade da água, segundo os dados do Inea utilizados para compor o cenário atual no presente trabalho, que podem ser vistos na Tabela 3.7, no item 3.5.2.

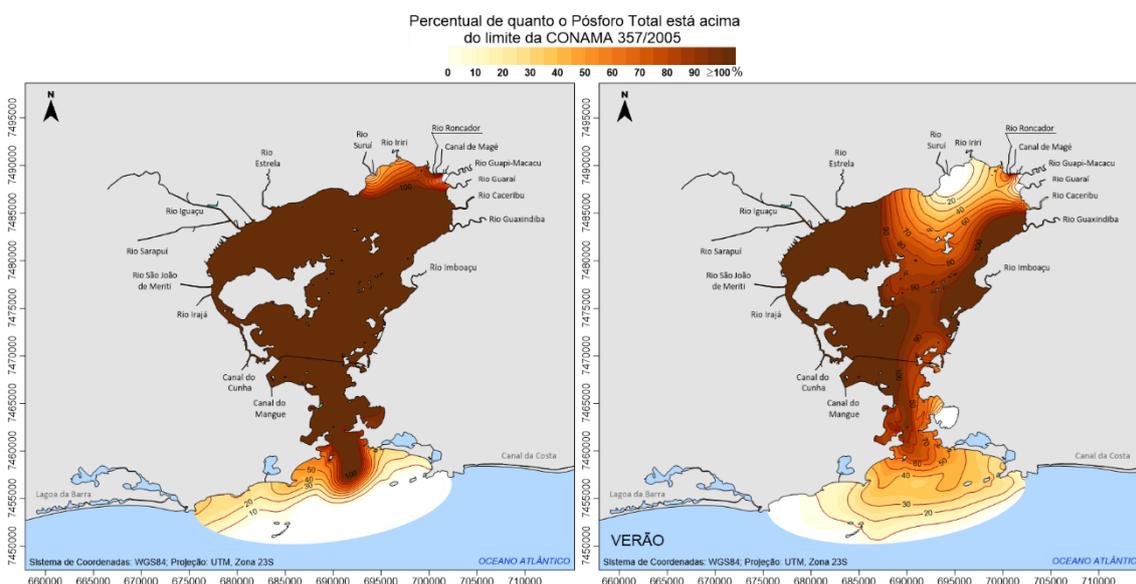


Figura 4.56 - Percentual de quanto a concentração de Fósforo Total está acima do valor de 0,093mg/L P, valor de águas salinas na classe 2, estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005.

Comparando os resultados da modelagem com a pontuação do boletim de saúde ambiental da BG, Figura 4.57, pode-se dizer que o parâmetro fósforo foi bem representado na

modelagem, e que os resultados observados parecem coerentes. Ambos os estudos chegam a mesma conclusão: o parâmetro fósforo total se encontra acima do limite estabelecido pela Resolução CONAMA na maior parte da BG.

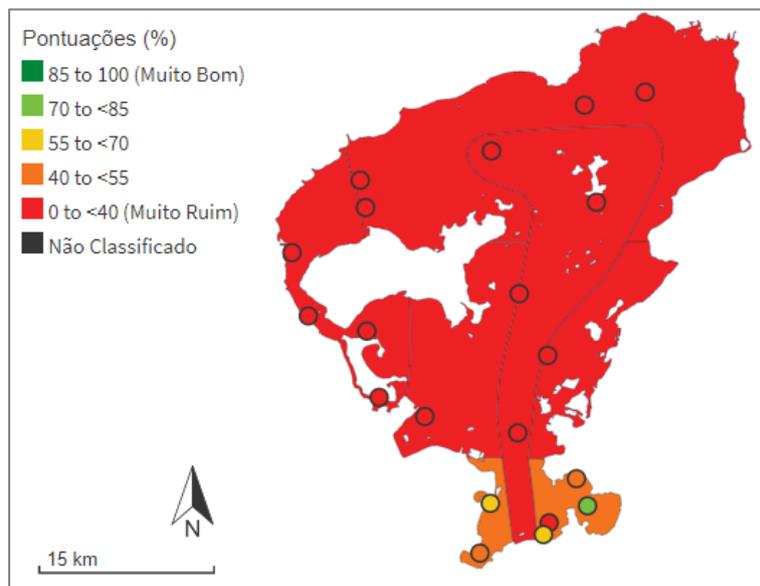


Figura 4.57 - Pontuação de saúde ambiental da Baía de Guanabara, para os indicadores Fósforo Total, segundo estudo realizado por KCI Technologies (2015). Imagem adaptada de <https://ecoreportcard.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara/saude-da-baia/>

Cabe destacar que, esses resultados podem ser, em grande parte, influenciados pelos tipos de tratamento de esgotos adotados nos municípios ao redor da Baía de Guanabara. Quando esses municípios têm seus esgotos tratados, esse tratamento não realiza remoção de compostos de fósforo e nitrogênio. Logo, grandes concentrações de fósforo são esperadas nos rios, e, conseqüente, na Baía. Esse composto é comumente encontrado nos esgotos sanitários, que são a grande fonte poluidora de águas na região.

5 CONCLUSÕES

Através das análises realizadas, constata-se que o modelo adotado fornece uma boa representação dos padrões de circulação hidrodinâmica na Baía de Guanabara, como apontado na seção 4.2. Características de estuários bem conhecidas foram confirmadas pela modelagem computacional, como a inversão da maré nos estuários dos rios afluentes na BG, e a característica de estuário hipersíncrono, com marés para o interior da Baía com amplitudes maiores que as da embocadura, o que foi mostrado no item 4.2.1. Identificou-se, no item 4.2.2, a característica dominante de propagação de maré com tendência à estacionária, com velocidades de correntes mais elevadas nas MMV e MME, e mais baixas em momentos de PM e BM. As velocidades mais elevadas se concentram na região do canal central, onde há um estreitamento da embocadura da BG. As velocidades mais baixas acontecem na região ao norte, mais interior. Como foi destacado no item 4.2.4, a sazonalidade não influencia de forma significativa nos padrões de circulação hidrodinâmica.

A partir dos Modelos de Taxa de Renovação e Idade da Água, fez-se uma caracterização de como ocorrem as trocas de massas de água na Baía de Guanabara. Como discutido, seria inconsistente definir um único tempo de residência para toda a BG, uma vez que a idade das águas varia temporal e espacialmente em corpos de água naturais, como estuários, que são heterogêneos.

Os principais meios de chegada de água nova no sistema são: o mar, que desempenha papel fundamental na renovação das águas na BG; e os rios, que possuem influência acentuada na região mais à nordeste e noroeste no interior da Baía. A sazonalidade possui grande influência na renovação das águas no interior da BG, principalmente nas regiões nordeste e noroeste, onde se encontram os rios de maior vazão. Destaca-se que as vazões fluviais são cerca de 4 vezes maiores no verão ($\sim 175 \text{ m}^3/\text{s}$) do que no inverno ($\sim 42 \text{ m}^3/\text{s}$), o que provoca uma renovação mais rápida naquela estação do ano. Na região sul, a renovação é mais influenciada pelas correntes costeiras e maiores renovações próximo da embocadura ocorrem com incidência de frentes frias. Essas diferenças são nitidamente ilustradas nos resultados apresentados na seção 4.3.1. No entanto, apesar das trocas proporcionadas pela interação das águas dos rios e do mar com a água dentro da BG, algumas regiões da BG apresentam idades da água elevadas, como foi exposto na seção 4.3.2. Por

exemplo, a região Leste à Ilha do Governador chega a ter águas com idades de até 105 dias no inverno.

A lenta renovação das águas, característica desse sistema estuarino, em algumas regiões, o torna mais vulnerável à poluição por lançamentos de efluentes. Em especial na BG, cujos rios encontram-se poluídos.

As análises de qualidade da água, com os resultados das modelagens realizadas, confirmam que a região oeste da BG se encontra com maior nível de degradação ambiental por matéria orgânica. Esta região apresentou concentrações baixas de OD, e concentrações de DBO que ultrapassam, em mais de 100%, o valor requerido na Resolução CONAMA nº 357/2005 para classe 2 de águas salinas. Nas análises das concentrações de nutrientes, notou-se como as BG encontra-se em desacordo com a referida norma, e também, a necessidade de haver séries de dados medidos para todos os compostos de nutrientes modelados.

Mediante a análise conjunta entre Taxa de Renovação, Idade da Água e Qualidade da Água, pode-se reafirmar a importância do exame de fatores hidrodinâmicos em conjunto com a qualidade da água. A modelagem tem um enorme potencial para detalhamento das informações sobre áreas de risco e potencialmente prioritárias para ações de recuperação. Este estudo mostrou que mesmo no cenário de verão, no qual poderia ser esperado melhor qualidade da água pela maior diluição, na verdade, o que se tem é um aumento da poluição no espelho d'água da BG. Isso ocorre porque os rios das bacias hidrográficas adjacentes à Baía encontram-se poluídos. Logo, grande parte das águas continentais que renovam a BG não é de boa qualidade.

6 RECOMENDAÇÕES

O trabalho realizado explicita a utilidade de modelagem computacional como ferramenta de suporte à gestão de recursos hídricos, como a Baía de Guanabara. Nesse sentido, uma recomendação importante que se faz é a utilização da modelagem como ferramenta de suporte ao monitoramento, de forma integrada. Utilizar modelos computacionais para definição e melhoria da rede de monitoramento. Por meio da modelagem computacional, pode-se fazer um planejamento do monitoramento, interpretação e reanálise de dados medidos, entre outros usos. E a otimização da rede de monitoramento pode contribuir para calibração e otimização dos modelos.

Na Baía de Guanabara, para propor ações de melhoria de qualidade da água, é imprescindível se atentar para as condições de saneamento e outros fatores de degradação ambiental nas bacias hidrográficas que drenam para a Baía. A deterioração da qualidade das águas da BG são reflexo dos impactos ambientais presentes na bacia de drenagem. Nesse sentido, recomenda-se a elaboração de estudos localizados para identificar como a melhoria da qualidade da água em cada bacia hidrográfica poderia impactar a qualidade da água na BG. Por exemplo, se todo o rio Iguaçu-Sarapuí fosse enquadrado dentro das concentrações da legislação, como isso impactaria na qualidade da água na BG? A modelagem pode servir como grande auxílio na elaboração de prognósticos para definição de prioridades de investimentos.

Outra recomendação, é a realização de estudos mais aprofundados sobre a prescrição de condições de contorno em seções de modelos localizadas dentro da zona de inversão de correntes de estuários. Esse é um ponto importantíssimo na modelagem desses corpos hídricos, que pode gerar incertezas e merece atenção. Com tais estudos, pode-se melhorar a qualidade dos resultados em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, Agência Nacional de Águas. Atlas de Esgotos. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/atlas-esgotos>>. Acesso em: 09 de jun de 2018.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12209:2011 - Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro. 2011.
- AMADOR, Elmo da Silva. **Baía de Guanabara: ocupação histórica e avaliação ambiental**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2013. 516 p. .978-85-7193-261-6.
- AMADOR, Elmo da Silva. **Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza**. Rio de Janeiro, RJ: Edição do Autor, 1997.
- ANDRIONI, Léo de Lacerda. **Resposta da Baía de Guanabara a eventos extremos**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013. 71 p. Disponível em: <<http://www.pec.coppe.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/378-msc-pt-2013/4218-leo-de-lacerda-andrioni>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- BÉRGAMO, Alessandro Luvizon. **Características hidrográficas, da circulação e dos transportes de volume e sal na Baía de Guanabara (RJ): variações sazonais e moduladas pela maré**. Tese (Doutorado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21132/tde-22052007-161032/pt-br.php>>. Acesso em: 14 jan. 2018.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em 15 nov. 2017.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol_lanceflue_30e31mar11.pdf>. Acesso em 15 nov. 2017.
- CARVALHO, João Luiz Baptista de. **Modelagem e Análise do Lançamento de Efluentes Através de Emissários Submarinos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003. Disponível em: <http://www.teses.oceanica.ufrj.br/pdfs/2003_doutorado_joao_luiz_baptista_de_carvalho.pdf>.
- COELHO, Victor Monteiro Barbosa. **Baía de Guanabara: uma história de agressão ambiental**. [S.l.]: Casa da Palavra, 2007. .978-85-7734-076-7.

COSTA, Maria Angélica Maciel. Da lama ao caos: um estuário chamado Baía de Guanabara. **Cad. Metrop.**, São Paulo, v. 17, n. 33, p. 15-39, maio 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2236-99962015000100015&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 12 jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2015-3301>.

CUNHA, Maria de Fátima Rodrigues da. **Modelagem Estocástica Conjunta de Precipitação e Nível do Mar na Baía de Guanabara**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/96-1996/1364-maria-de-fatima-rodrigues-da-cunha>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

DAHER, Victor Bastos; NOGUEIRA, Izabel Cristina; TEIXEIRA, Gregório Luiz Galvão; *et al.* Análise das Estimativas de Maré Meteorológica pelo Modelo Oceânico Global HYCOM/NCODA Na Região ao Largo da Baía da Ilha Grande - RJ. **Anais Hidrográficos**, n. Superintendência de Ensino da DHN, p. 113–124, 2016. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/anais/ah_2016.pdf>. Acesso em: 14 maio 2018.

DYER, Keith. R. **Estuaries: A Physical Intriduction**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 1997.

FEITOSA, Renato Castiglia. Ocean outfalls as an alternative to minimizing risks to human and environmental health. **Ciênc. saúde coletiva**, v. 22, n. 6, p. 2037–2048, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232017002602037&lng=en&nrm=iso>.

FRANCIS-FLOYD, Ruth; RIGGS, Allen. A Beginner's Guide to Water Management – Fish Kills. 2017. Disponível em: <<https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/FA/FA10400.pdf>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

GUIMARÃES, Giselle Parno; SIGNORI, Camila Negrão; REGO, Bruno Cavalcante; *et al.* Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) – Guanabara: Perfilagem de fatores físicos, físico-químicos e químicos em três estações na Baía de Guanabara. *In: Gramado*, RS: [s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.peldguanabara.lncc.br/pdf/producao_pdf_49.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2018.

IBG, Instituto Baía de Guanabara. **A Região Hidrográfica – Instituto Baía de Guanabara**. 2014. Disponível em: <http://baiadeguanabara.org.br/site/?page_id=4548>. Acesso em: 12 abr. 2018a.

IBG, Instituto Baía de Guanabara. **Rios nas Cidades – Instituto Baía de Guanabara**. 2014. Disponível em: <http://baiadeguanabara.org.br/site/?page_id=4752>. Acesso em: 12 abr. 2018b.

JICA. Japan International Cooperation Agency. The Federative Republic of Brazil. **The study on management and improvement of the environmental conditions of Guanabara Bay of Rio de Janeiro: Volume 1. Summary**. Tokyo: Kokusai Kokyo. 1994. 72p. Disponível em: <http://libopac.jica.go.jp/images/report/11198470_01.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2017

JORDÃO, Eduardo Pacheco e PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

KAUFMANN, Clarisse Lacerda Gomes. **Estudo Hidrodinâmico e de Qualidade de Água após Revitalização da Circulação do Canal do Fundão, Baía de Guanabara – RJ**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.teses.oceanica.ufrj.br/pdfs/2009_mestrado_clarisse_kaufmann.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2017.

KCI. **PRA-BAÍA: Plano de Recuperação Ambiental da Baía de Guanabara e sua Bacia Hidrográfica**, 2016. (Programa de Fortalecimento da Governança e da Gestão da Baía de Guanabara Convênio de Cooperação Técnica: ATN/OC-14223-BR SDP No: SQC No 01/2014).

KOURAFALOU, V.H.; DE MEY, P.; STANEVA, J.; *et al.* Coastal Ocean Forecasting: science foundation and user benefits. **Journal of Operational Oceanography**, v. 8, n. sup1, p. s147–s167, 2015. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1755876X.2015.1022348>>. Acesso em: 6 jun. 2018.

LABH2O. **Estudos Hidrológicos da Bacia Contribuinte à Baía de Guanabara**. Relatório Interno. Rio de Janeiro, RJ: Laboratório de Hidrologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

LIMA, Elizabeth Cristina da Rocha. **Qualidade de água da baía de Guanabara e saneamento: uma abordagem sistêmica**. Tese de Doutorado em Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/limaecr.pdf>>.

MACHADO, Bernardo Vianna Zurli; SILVA, Renan Marcelo Leal Campos Fonseca de. **Análise da Influência da Baía de Guanabara na Qualidade da Água das Praias Oceânicas Adjacente através de Modelagem Computacional**. Projeto Final de Curso. Engenharia Ambiental., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001726.pdf>>.

MALTA, Fernanda Siqueira. **Estudo de Correntes de Maré do Complexo Estuarino da Baía de Guanabara - RJ**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005. Disponível em: <http://www.teses.oceanica.ufrj.br/pdfs/2005_mestrado_fernanda_siqueira_malta.pdf>.

MELO FILHO, Eloi. **Maré Meteorológica na Costa Brasileira**. Tese Professor Titular, Universidade Federal de Rio Grande, 2017. Disponível em: <https://sistemas.furg.br/sistemas/sab/arquivos/conteudo_digital/000008808.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2018.

METHA, A.J.; ÖZSOY, E. Inlet Hydraulics. *In: Developments in Geotechnical Engineering*. [s.l.]: Elsevier, 1978, v. 23, p. 83–161. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444417282500114>>. Acesso em: 5 jun. 2017.

MIRANDA, Luiz Bruner De; CASTRO, Belmiro Mendes De; KJERFVE, Björn. **Princípios da Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. .85-314-0675-7.

MOTTA, Luiza do Amaral Thompson; FARIA, Pedro Ivo Dias de. **Avaliação do Impacto do Lançamento de Poluentes por Emissários Sub-marinos e Fontes Costeiras Pontuais na Balneabilidade das Praias do Rio de Janeiro e Niterói.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Ambiental., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005583.pdf>>.

OLIVEIRA, Heline Alves de. **Aplicação do Modelo Numérico Hidrodinâmico Delft3D na Baía de Guanabara.** Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel em Oceanografia., Centro Universitário Monte Serrat, Santos, 2009. Disponível em: <http://www.agrimentec.com.br/artigos/TCC_Heline_Alves_de_Oliveira.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2018.

PEREIRA, Talita Reis Antunes. **Impacto da Descarga de Efluentes Sanitários dos Rios sobre a Qualidade das Águas da Baía de Guanabara.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, 2017.

PERHI-RJ. **Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas.** Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro. Nº RT-01. Rio de Janeiro, RJ: Fundação COPPETEC, fev. 2014. Disponível em: <<http://www.hidro.ufrj.br/perhi/documentos/PDF-R3-A-RT-1/R3A-RT-1-REV-02.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2017.

PONTE, Laís; PORTO, André Carneiro. **Análise da Taxa de Renovação e Idade da Água do Sistema Estuarino da Baía de Guanabara.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024084.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

PSAM, Programa de Saneamento Ambiental. **Caracterização e Diagnóstico: Caracterização, Indicadores e Diagnóstico dos Sistemas de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário Regional.** Rio de Janeiro, RJ: Secretaria de Meio Ambiente, 2014. (Estudos Regionais da Baixada Fluminense). Disponível em: <<https://pmsbguanabara.wordpress.com/ersb/>>.

RIO DE JANEIRO (Estado). Decreto nº. 42930 de 18 de abril de 2011. **Cria o Programa Estadual Pacto pelo Saneamento.** Disponível em: <http://www.silep.planejamento.rj.gov.br/decreto_42_930_-_18042011_-_cr.htm>. Acesso em: 22 mar. 2017.

RIO DE JANEIRO. Resolução CERHI-RJ nº 107 de 22 de maio de 2013. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mda5/~edisp/inea_009662.pdf>.

ROSMAN, P.C.C.; ROSMAN, P.A.; SOUZA, D.V.R. **Modelagem de Hidrodinâmica Ambiental, Qualidade de Água e Processos Sedimentológicos em Rios Conexos ao Aproveitamento Hidrelétrico Jirau – RO.** R12 – Relatório de Modelagens para Suporte à Gestão., nº PENO-11920. Rio de Janeiro, RJ: Fundação COPPETEC, Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, dez. 2016.

ROSMAN, Paulo Cesar Colonna. **Referência Técnica do SisBaHiA.** 2018. Disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9c_.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2018.

ROVERSI, Fernando. **Estudo Hidrodinâmico e de Renovação das Águas do Sistema Estuarino de Santos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012. Disponível em: <http://www.teses.oceanica.ufrj.br/pdfs/2012_Mestrando_Fernando_Roversi.pdf>.

SACHETTO, Janaina Ribeiro. **Análise da qualidade ambiental do rio Roncador, Magé - RJ**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental., Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012. Disponível em: <<http://www.pe-amb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2012/DissertacaoJanainaSachetto.pdf>>.

SAMPAIO, Marcelle. **Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas D'água da Baía de Guanabara - RJ**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003. Disponível em: <<http://www.pec.coc.ufrj.br/en/dissertacoes-de-mestrado/103-msc-pt-2003/1830-marcelle-sampaio>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

SANTOS, Leila Heizer. **Um modelo para trajetória de partículas em corpos de água rasos: O caso do Emissário de Icaraí - Baía de Guanabara**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1995. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/95-1995/1340-leila-heizer-santos>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

SANTOS, Suzan Juliana da Costa. **Determinação do estado trófico a partir da aplicação dos índices O'Boyle e TRIX nos compartimentos da Baía de Guanabara, RJ**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.uff.br/jspui/handle/1/1642>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

SILVA, Flávio José Lyra da. **Um arcabouço para o desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão para a gestão de recursos Hídricos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&view=article&id=8323:flavio-jose-lyra-da-silva&catid=391&lang=pt-br&Itemid=154>. Acesso em 10 jul. 2017

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2016**. Disponível em: <<file:///C:/Users/veron/Zotero/storage/JQG-NANPQ/diagnostico-ae-2016.html>>. Acesso em 10 fev. 2018

SOUZA, Alane Patricia de Melo. **Avaliação do efeito do assoreamento na hidrodinâmica e no tempo de residência de um complexo estuarino lagunar tropical**. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1988>>. Acesso em: 16 maio 2018.

TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura. **Limnologia**. [s.l.]: Oficina de Textos, 2016.

VALENTE, José Pedro Serra; PADILHA, Pedro Magalhães; SILVA, Assunta Maria Marques. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lava-

pés/Botucatu - SP. **Eclet. Quím.**, São Paulo, v. 22, p. 49-66, 1997. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46701997000100005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 17 de junho de 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-46701997000100005>.

VIEIRA, Márcio Viveiros. **O Programa de Despoluição da Baía de Guanabara. Entraves institucionais e impactos territoriais na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009. Disponível em: <<http://objdig.ufrj.br/16/teses/772140.pdf>>.

VILELA, Carla de Paula Xavier. **Investigação do efeito de vento na circulação da Baía de Guanabara - RJ**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1992. Disponível em: <http://www.teses.oceanica.ufrj.br/pdfs/1992_mestrado_carla_de_paula_xavier_vilela.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2018.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, n. 1).

XAVIER, Andrea Gallo. **Estudo da Circulação Hidrodinâmica e do Transporte de Contaminante no Estuário do Rio Iguaçu – Baía de Guanabara**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996. Disponível em: <http://www.teses.oceanica.ufrj.br/pdfs/1996_mestrado_andre_gallo_xavier.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2017.