Universidade Federal Fluminense
Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra
Dissertação de Mestrado

Augusto dos Santos Rosa

Alternativas para Aumento de Renovação das Águas do Sistema Lagunar de Saquarema - RJ

Niterói
2025

Augusto dos Santos Rosa

Alternativas para Aumento de Renovação das Águas do Sistema Lagunar de Saquarema - RJ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.
Áreas de Concentração: Modelagem Numérica, Hidrodinâmica, Hidrografia, Oceanografia.

Orientador: Rodrigo Amado Garcia Silva

Niterói
2025

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

R788a Rosa, Augusto dos Santos
Alternativas para Aumento de Renovação das Águas do Sistema Lagunar de Saquarema - RJ / Augusto dos Santos Rosa. - 2025.
123 p.: il.

Orientador: Rodrigo Amado Garcia Silva.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2025.

1. Modelagem numérica. 2. Hidrografia. 3. Renovação de água. 4. Limnologia. 5. Produção intelectual. I. Silva, Rodrigo Amado Garcia, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. III. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

Augusto dos Santos Rosa

Alternativas para Aumento de Renovação das Águas do Sistema Lagunar de Saquarema - RJ.

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA (PPG-DOT) DA UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

Niterói, 12 de março de 2025.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br
RODRIGO AMADO GARCIA SILVA
Data: 13/03/2025 16:27:22-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

Rodrigo Amado Garcia Silva, D.Sc. – UFF

Documento assinado digitalmente
gov.br
FABIO FERREIRA DIAS
Data: 13/03/2025 18:31:21-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Fábio Ferreira Dias, D.Sc. – UFF

Documento assinado digitalmente
gov.br
LIDIANE DOS SANTOS LIMA
Data: 17/03/2025 13:10:48-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

___ _____

Lidiane dos Santos Lima, D.Sc. – ONU-HABITAT

Documento assinado digitalmente
gov.br
TIAGO ZENKER GIRELI
Data: 19/03/2025 15:49:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

Tiago Zenker Gireli, D.Sc. – UNICAMP

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Wilson e Juliana.

AGRADECIMENTOS

À Olorum e a todos os orixás, em especial meu pai Oxóssi e minha mãe Iemanjá, por me dar a força e sabedoria necessárias para seguir minha caminhada.

À família espiritual que me protege e me aconselha, que nos momentos mais conturbados me colocou de volta no bom caminho, Vovó Cambinda, Seu Caveira, Maria Padilha Rainha das 7 Encruzilhadas, Margarida, Maria Rosa, Seu 7 Flechas e todos aqueles que ainda não se manifestaram, mas que sinto a presença comigo.

À minha avó Djanira, ainda que não estivesse mais presente nesta minha jornada, foi fundamental em minha vida e possibilitou que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais Wilson e Juliana, por sempre me incentivarem de todas as formas possíveis na busca por conhecimento.

Ao meu amor Danielle, por toda a dedicação e carinho, por atravessar comigo meus momentos mais difíceis e por trazer mais vida aos meus dias.

À minha querida Ágatha e meus companheiros Patolino e Tom por tornarem meus dias mais alegres.

À Universidade Federal Fluminense, por se tornar verdadeiramente uma segunda casa, desde os tempos de graduação. Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra por todo apoio e por acreditar no meu trabalho.

Ao meu orientador Rodrigo pela disposição de encarar comigo a realização deste trabalho, por dividir comigo tanto conhecimento, pela disponibilidade para sanar meus inúmeros questionamentos e pela compreensão com os problemas que apareceram no caminho.

Ao LABCOST e aos meus colegas Roberta, Melissa, Daniel, Gabriel, Raiane e Alice, por todo o aprendizado que vocês me proporcionaram.

Aos meus eternos companheiros e irmãos dos Reinos Distantes, Gaizen, Raziel, Galdrax, Harvey e Albiol, ainda que a distância física seja enorme, nossos corações sempre estarão próximos.

Agradeço a minha amiga Letícia por me ouvir quando ninguém mais me aguentava.

Ao meu novo irmão Sílvio por me ensinar tanto sobre perseverança e dedicação.

Aos professores André e Flávio, por tantos ensinamentos e pelo ótimo café pós almoço.

A todos os funcionários da manutenção e da segurança da Universidade Federal Fluminense, em especial à querida Maria, que sempre tinha um sorriso para animar o dia.

À Maristela e Larêssa, pela paciência e por toda a ajuda ao longo destes 2 anos.

EPÍGRAFE

“Se não pode mudar seu destino, mude sua atitude.”

Roronoa Zoro

Resumo da Dissertação apresentada ao PPG-DOT/UFF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

Análise dos Tempos Hidráulicos Característicos do Sistema Lagunar de Saquarema com Propostas de Soluções para a Melhoria da Renovação de suas Águas.

Augusto dos Santos Rosa

Março/2025

Orientador: Rodrigo Amado Garcia Silva

Programa: Dinâmica dos Oceanos e da Terra

A preservação e o uso sustentável de sistemas lagunares costeiros são desafiadores, dada sua importância ecológica e socioeconômica. O Sistema Lagunar de Saquarema, no estado do Rio de Janeiro, destaca-se pelo apelo ecoturístico, mas apresenta problemas de renovação e de qualidade de suas águas, agravadas pelo assoreamento do canal da Barra Franca e pela ocupação urbana desordenada. Este estudo utiliza modelagem numérica – com modelos hidrodinâmicos e de transporte euleriano e lagrangeano – para investigar soluções que aumentem a taxa de renovação das águas. Foram simulados cenários como a situação atual, a implementação do guia-corrente previsto no EIA da Barra Franca, o aprofundamento do canal, e novas conexões com o mar próximas às lagoas Mombaça e Jaconé. As análises da circulação hidrodinâmica, movimento de partículas, taxa de renovação e idade da água indicaram melhorias expressivas, reduzindo, por exemplo, em até 30 dias a idade da água na lagoa de Jaconé. Os resultados destacam a modelagem computacional como ferramenta estratégica para a gestão sustentável e integrada de sistemas lagunares costeiros.

Palavras-Chave: Sistemas lagunares; Saquarema; Idade da Água; Taxa de Renovação das Águas; Modelagem Hidrodinâmica

Abstract of Dissertation presented to PPG-DOT/UFF as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Analysis of the Characteristic Hydraulic Times of the Saquarema Lagoon System with Proposed Solutions for Improving the Renewal of its Waters.

Augusto dos Santos Rosa

March/2025

Advisor: Rodrigo Amado Garcia Silva

Department: Dynamics of Ocean and Earth

The preservation and sustainable use of coastal lagoon systems are challenging, given their ecological and socio-economic importance. The Saquarema Lagoon System, in the state of Rio de Janeiro, stands out for its ecotourism appeal, but has problems with the renewal and quality of its waters, aggravated by the silting up of the Barra Franca channel and by disorderly urban occupation. This study uses numerical modeling - with Eulerian and Lagrangian hydrodynamic and transport models - to investigate solutions that increase the rate of water renewal. Scenarios were simulated such as the current situation, the implementation of the current guide foreseen in the Barra Franca EIA, the deepening of the channel, and new connections with the sea near the Mombaça and Jaconé lagoons. Analyses of hydrodynamic circulation, particle movement, renewal rate and water age indicated significant improvements, reducing, for example, the water age in Jaconé lagoon by up to 30 days. The results highlight computer modeling as a strategic tool for the sustainable and integrated management of coastal lagoon systems.

Keywords: Lagoon Systems; Saquarema; Water Age; Water Renewal Rate; Hydrodynamic Modeling

Sumário

1 Introdução 19
2 Objetivos 21
2.1 Objetivos específicos 21
3 Revisão Bibliográfica 22
3.1 Marés 22
3.1.1 Maré Astronômica 23
3.2 Estuários 24
3.2.1 Lagunas Costeiras 26
3.2.2 Canais de maré 27
3.2.3 Prisma de maré 28
3.2.4 Relação entre prisma de maré e área da menor seção transversal 28
3.3 Estudo de Impacto Ambiental da Barra Franca 29
3.4 trabalhos semelhantes 30
4 Metodologia 32
4.1 Área de Estudo 32
4.2 Definição dos modelos 36
4.2.1 Modelo Hidrodinâmico 36
4.2.2 Modelo de Transporte Euleriano 38
4.2.3 Modelo de Transporte Lagrangeano 40
4.3 Cenários de simulação 40
4.4 Malhas 43
4.4.1 Malha do Cenário de Situação Atual 43
4.4.2 Malha do Cenário de Projeto 1 44
4.4.3 Malha do Cenário de Projeto 2 46
4.4.4 Malha do Cenário de Projeto 3 47

4.4.5 Malha do Cenário de Projeto 4 48
4.5 Dados Ambientais 50
4.5.1 Batimetria 50
4.5.2 Marés 56
4.5.3 Vazões fluviais 59
4.5.4 Vento 60
4.5.5 Sedimento de fundo 61
5 Resultados e discussões 62
5.1 Situação Atual 63
5.1.1 Resultados Hidrodinâmicos 64
5.1.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano 67
5.1.3 Taxa de Renovação e Idade da Água 70
5.2 Cenário de Projeto 1 72
5.2.1 Resultados Hidrodinâmicos 72
5.2.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano 75
5.2.3 Taxa de Renovação e Idade da Água 78
5.3 Cenário de Projeto 2 80
5.3.1 Resultados Hidrodinâmicos 80
5.3.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano 83
5.3.3 Taxa de Renovação e Idade da Água 86
5.4 Cenário de Projeto 3 88
5.4.1 Resultados Hidrodinâmicos 88
5.4.2 Resultados do modelo de Transporte Lagrangeano 91
5.4.3 Taxa de Renovação e Idade da Água 94
5.5 Cenário de Projeto 4 96
5.5.1 Resultados Hidrodinâmicos 96
5.5.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano 99

5.5.3 Taxa de Renovação e Idade da Água 102
5.6 Análise das Taxas de renovação de água por lagoa 104
5.6.1 Lagoa de Fora 104
5.6.2 Lagoa Boqueirão 105
5.6.3 Lagoa Jardim 106
5.6.4 Lagoa Mombaça 107
5.6.5 Lagoa Jaconé 108
5.7 Discussões 109
6 Conclusões 113
6.1 Recomendações 115
7 Referências 117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caracterização de uma onda de maré. 22
Figura 2 - Fenômeno de marés enchentes e vazantes em um sistema lagunar. 23
Figura 3 - Marés resultantes da força gravitacional e do posicionamento dos corpos celestes Lua e Sol em relação à Terra. 24
Figura 4 - Esquema de um estuário com representação de suas zonas segundo influência. 25
Figura 5 - Tipo de lagunas costeiras existentes. (A) Laguna Aberta. (B) Laguna Restrita. (C) Laguna sufocada.....26
Figura 6 - Esquema de prisma de maré. 28
Figura 7 - Mapa e gráfico de distribuição de uso do solo do município de Saquarema. 33
Figura 8 - Lagoas e afluentes contribuintes para o Sistema Lagunar de Saquarema. 34
Figura 9 - Planta baixa do molhe guia-corrente instalado na Praia de Itaúna. 35
Figura 10 - Situação atual das obras para conexão permanente do Canal da Barra Franca em Saquarema, onde é possível observar um grande assoreamento em seu interior por conta do transporte litorâneo.....35
Figura 11 - Região de implementação da nova conexão com o mar, destacada em azul, próxima a lagoa Mombaça. Nesse caso a conexão intercepta a Rodovia RJ-102 e a Rua B. 42
Figura 12 - Região de implementação da nova conexão com o mar, destacada em azul, próxima a lagoa Jaconé. Nesse caso a conexão intercepta a Rodovia RJ-102. 43
Figura 13 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização da Situação Atual do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a região do Canal da Barra Franca. 44
Figura 14 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 1 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a região do Canal da Barra Franca. 45
Figura 15 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 2 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta. 46

Figura 16 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 3 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta. 47
Figura 17 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 4 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a nova conexão com o mar próxima a Lagoa Mombaça (retângulo amarelo) e para a nova conexão com o mar próxima a Lagoa de Jaconé (retângulo vermelho). 48
Figura 18 - Malha da região da nova conexão com o mar próxima a Lagoa Mombaça. 49
Figura 19 - Malha da região da nova conexão com o mar próxima a Lagoa de Jaconé. 49
Figura 20 - Mapa Batimétrico das lagoas do Sistema Lagunar de Saquarema. A imagem inferior a esquerda representa a situação com o Canal da Barra fechado, enquanto a outra representa o canal aberto. NR: IBGE. 50
Figura 21 - Perfis topográficos de praia e caracterização da dinâmica do arco praial Jaconé-Saquarema. 51
Figura 22 - Contornos Batimétricos do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a região do Canal da Barra Franca. 52
Figura 23 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 1, com destaque para a região do Canal da Barra Franca. 53
Figura 24 - Batimetria da região da Barra Franca. à esquerda o cenário de situação atual e à direita a batimetria da região utilizada nos cenários de projeto. 53
Figura 25 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 2, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta. 54
Figura 26 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 3, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta. 55
Figura 27 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 4, com destaque para as duas novas conexões com o oceano propostas. 56
Figura 28 - Ponto de Obtenção de Constantes Harmônicas pelo FES. 57
Figura 29 - Curva de Maré Prevista, em torno do Nível Médio do Mar, para janeiro de 2023. 58
Figura 30 - Pontos 1 e 2 Utilizados para o Cálculo da Diferença de Fase Proporcional para os Nós da Fronteira Aberta. 58
Figura 31 - Afluentes que desembocam no Sistema Lagunar de Saquarema. 59

Figura 32 - Ponto de Obtenção dos Dados de Vento usados como entrada para os Modelos Hidrodinâmicos. 60
Figura 33 - Rosa dos Ventos dos Dados de 2023 utilizados como entrada do Modelos Hidrodinâmicos do Sistema Lagunar de Saquarema. 61
Figura 34 - Pontos Selecionados para Geração de Resultados das Lagoas no Sistema Lagunar de Saquarema. 62
Figura 35 - Séries de Nível em relação ao NMM da região marítima de Saquarema em vermelho e da Lagoa de Fora em azul claro, em azul escuro destaca-se uma preamar no dia 03/01/23 e uma baixa-mar no dia 13/01/23. 63
Figura 36 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de Situação Atual para o mês de janeiro de 2023. 64
Figura 37 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o Sistema Lagunar de Saquarema com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 0.93 m/s. 66
Figura 38 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o Sistema Lagunar de Saquarema com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.20 m/s. 67
Figura 39 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual. 68
Figura 40 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual 30 dias depois do instante inicial. 68
Figura 41 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual 60 dias depois do instante inicial. 69
Figura 42 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual 90 dias depois do instante inicial. 69
Figura 43 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema em um período de 6 meses. 71
Figura 44 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema em um período de 6 meses. 71
Figura 45 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 1 para o mês de janeiro de 2023. 73
Figura 46 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 1 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.38 m/s. 74

Figura 47 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 1 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.50 m/s. 75
Figura 48 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1. 76
Figura 49 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1 depois de 30 dias do instante inicial. 76
Figura 50 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1 depois de 60 dias do instante inicial. 77
Figura 51 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1 depois de 90 dias do instante inicial. 77
Figura 52 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 1 em um período de 6 meses. 79
Figura 53 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 1 em um período de 6 meses. 79
Figura 54 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 2 para o mês de janeiro de 2023. 81
Figura 55 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 2 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.38 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.51 m/s. 82
Figura 56 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 2 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.50 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.38 m/s. 83
Figura 57 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2. 84
Figura 58 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2 depois de 30 dias do instante inicial. 84
Figura 59 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2 depois de 60 dias do instante inicial. 85
Figura 60 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2 depois de 90 dias do instante inicial. 85

Figura 61 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 2 em um período de 6 meses. 87
Figura 62 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 2 em um período de 6 meses. 88
Figura 63 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 3 para o mês de janeiro de 2023. 89
Figura 64 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 3 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.35 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.49 m/s. 90
Figura 65 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 3 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.47 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.52 m/s. 91
Figura 66 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3. 92
Figura 67 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3 depois de 30 dias do instante inicial. 92
Figura 68 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3 depois de 60 dias do instante inicial. 93
Figura 69 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3 depois de 90 dias do instante inicial. 93
Figura 70 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 3 em um período de 6 meses. 95
Figura 71 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 3 em um período de 6 meses. 96
Figura 72 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 4 para o mês de janeiro de 2023. 97
Figura 73 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 4 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.17 m/s, e das novas conexões com o mar próximas a lagoa Mombaça e a lagoa de Jaconé, com correntes máximas de 0.44 m/s e 0.33 m/s respectivamente. 98

Figura 74 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 4 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.32 m/s, e das novas conexões com o mar próximas a lagoa Mombaça e a lagoa de Jaconé, com correntes máximas de 0.37 m/s e 0.41 m/s respectivamente. 99
Figura 75 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4. 100
Figura 76 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4 depois de 30 dias do instante inicial. 100
Figura 77 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4 depois de 60 dias do instante inicial. 101
Figura 78 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4 depois de 90 dias do instante inicial. 101
Figura 79 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 4 em um período de 6 meses. 103
Figura 80 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 4 em um período de 6 meses. 103
Figura 81 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa de Fora para os cenários modelados em um período de 6 meses. 105
Figura 82 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Boqueirão para os cenários modelados em um período de 6 meses. 106
Figura 83 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Jardim para os cenários modelados em um período de 6 meses. 107
Figura 84 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Mombaça para os cenários modelados em um período de 6 meses. 108
Figura 85 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Jaconé para os cenários modelados em um período de 6 meses. 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relações entre prisma de maré e área da menor seção transversal em função das características de embocadura para a costa do Oceano Atlântico. 29
Tabela 2 - Principais Constantes Harmônicas Obtidas com o FES. 57
Tabela 3 - Vazões fluviais do Sistema Lagunar de Saquarema. 59
Tabela 4 - Padrão de cor utilizado para exposição dos resultados de taxa de renovação de água referentes a cada lagoa. 104
Tabela 5 - Prismas de maré de sizígia dos cenários modelados com o valor de seu aumento percentual em relação ao cenário de situação atual. 110

LISTA DE SIGLAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EIV	Estudo de Impacto de Vizinhança
FES2014	Finite Element Solution 2014
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
NMM	Nível Médio do Mar
SisBaHiA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

1 INTRODUÇÃO

A preservação e o uso sustentável de recursos hídricos em sistemas lagunares costeiros são desafios de grande relevância ambiental e socioeconômica. Esses ecossistemas desempenham um importante papel na manutenção da biodiversidade, no suporte às atividades humanas e na regulação de processos ecológicos costeiros. Contudo, a pressão antrópica e os impactos de fenômenos naturais têm comprometido a qualidade e a funcionalidade desses ambientes.

Nesse contexto, ferramentas como a modelagem computacional são aliados indispensáveis para a compreensão e a gestão de sistemas hídricos, possibilitando a análise de cenários e a proposição de soluções baseadas em evidências científicas. Com elas torna-se possível analisar antecipadamente e, se alimentadas com dados de entrada precisos, com bastante eficácia cenários muitas vezes complexos.

O Sistema Lagunar de Saquarema, localizado no município homônimo na Região dos Lagos do estado do Rio de Janeiro, é um exemplo notável de um ambiente vulnerável à degradação. Composto por diversas lagoas interligadas por estreitas conexões e um único canal que conecta o sistema ao oceano, essa região enfrenta problemas como o assoreamento do Canal da Barra Franca, em virtude do transporte litorâneo, ocupação urbana desordenada e qualidade inadequada das águas afluentes (Guimarães *et al.*, 2023). Tais fatores resultam em uma baixa taxa de renovação das águas, comprometendo a sustentabilidade ecológica e o potencial de uso desse sistema.

Outros trabalhos tem destacado a vulnerabilidade dos sistemas lagunares do estado do Rio de Janeiro, onde um dos principais é o acelerado processo de urbanização em seus entornos, acarretando um intenso processo de eutrofização e assoreamento desses corpos d'água (Pinto *et al.*, 2019).

Os sistemas lagunares costeiros, devido à sua dinâmica complexa, requerem uma abordagem integrativa para sua análise e manejo. A modelagem computacional permite explorar os processos hidrodinâmicos, avaliar os impactos de intervenções estruturais e prever cenários futuros. No caso deste estudo, esta ferramenta possibilita a análise dos tempos hidráulicos característicos, que são medidas que descrevem o comportamento da água em sistemas hídricos ajudando a entender o transporte, a

renovação e a dispersão de partículas, identificando limitações na circulação e propondo soluções baseadas em alternativas de conexões adicionais com o oceano.

Um dos tempos hidráulicos observados foi a taxa de renovação de águas, que representa o percentual de águas novas, ou seja, que entraram no domínio de modelagem depois do instante inicial, em um determinado local num dado momento. É preciso destacar que o conceito de taxa de renovação da água é bem distinto de qualidade da água, já que infere apenas o quanto de água renovada chegou em determinado instante no domínio, com isso, mesmo as águas de um afluente que estejam contaminadas serão percebidas como água nova para o modelo.

Analisou-se também a idade da água, conceito utilizado em modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água que quantifica o tempo que massas de água estão contidas dentro do modelo. Novamente observa-se que uma água de idade nova para o modelo não necessariamente representa uma água de qualidade.

Neste trabalho foram simulados diversos cenários, incluindo o estado atual e 4 propostas de intervenção, como a dragagem do canal existente e a criação de novas conexões com o mar nas proximidades das lagoas Mombaça e Jaconé, que apresentam os piores resultados.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivos analisar a situação hidrodinâmica atual do Sistema Lagunar de Saquarema e propor alternativas para o aumento da renovação de suas águas, por meio de novas ligações com o oceano, de maneira a melhorar a troca de massas de água do sistema. Este trabalho busca contribuir como subsídio para a gestão ambiental do município.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a hidrodinâmica do Sistema Lagunar de Saquarema na situação atual e em cenários projetados;
- Analisar as taxas de renovação de água de cada um dos cenários;
- Analisar a idade da água de cada cenário;
- Identificar as soluções mais efetivas no aumento da renovação de águas do sistema lagunar.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

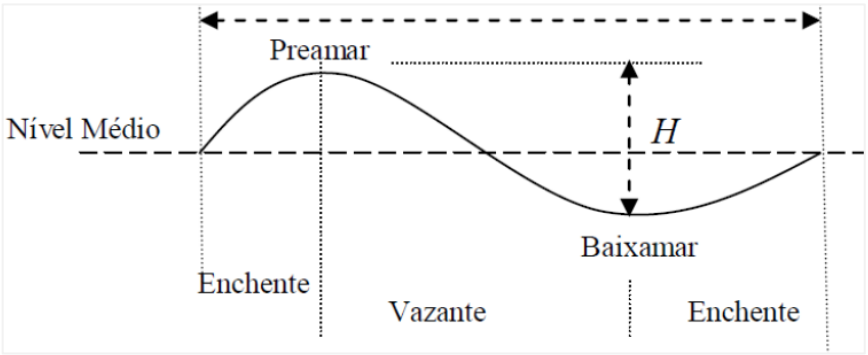
Este capítulo aborda conceitos de marés, estuários, hidrodinâmica em sistemas lagunares costeiros, canais de maré, necessários para o entendimento das etapas do trabalho.

3.1 MARÉS

As marés são ondas longas com períodos característicos, sendo classificadas como semidiurnas, quando o ciclo ocorre aproximadamente a cada 12 horas, e diurnas, com ciclos de 24 horas. Cada ciclo completo de maré apresenta fases, sendo a fase de cheia quando o nível da água sobe, e a fase de vazante, quando o nível da água diminui.

Em mar aberto, o momento em que ocorre a transição da fase de cheia para a vazante é conhecido como preamar, caracterizado pelo nível máximo de água. Já a passagem da fase de vazante para a cheia é marcada pela baixa-mar, que corresponde ao nível mínimo de água. A Figura 1 ilustra esses conceitos de forma esquemática.

Figura 1 - Caracterização de uma onda de maré.

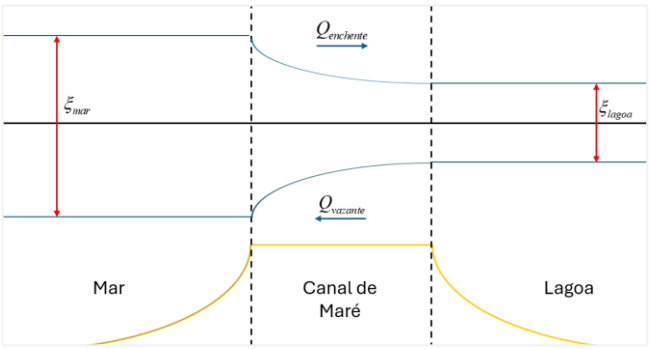


Fonte: Valentini & Rosman (2010)

Já para sistemas lagunares, os termos enchente e vazante possuem uma diferenciação em relação ao conceito para mar aberto e para baías. Nestes corpos

d’água o que ocorre é que a vazão tem o sentido contrário do gradiente de pressão, ou seja, quando o nível do mar está acima do nível da lagoa a vazão resultante será no sentido mar-lagoa, gerando a maré enchente, enquanto para o nível do mar abaixo do nível da lagoa, a vazão resultante será no sentido contrário, gerando a maré vazante. A Figura 2 ilustra o efeito de maré vazante e enchente de sistemas lagunares.

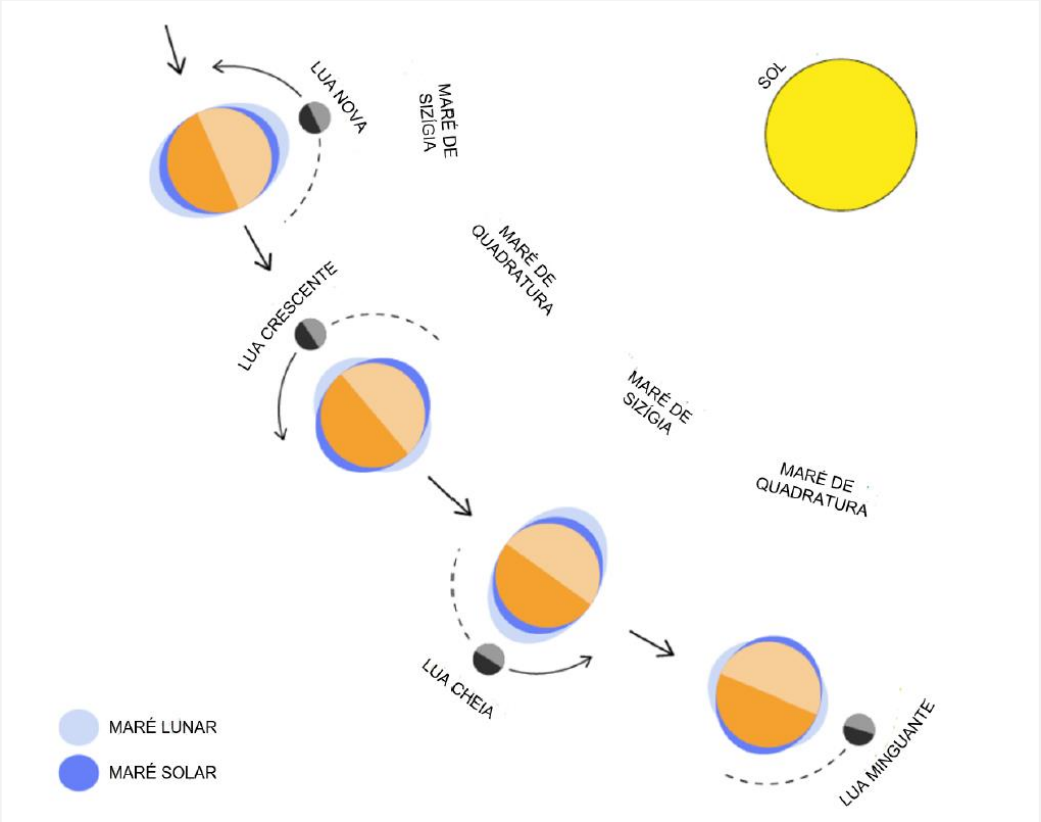
Figura 2 - Fenômeno de marés enchentes e vazantes em um sistema lagunar.



3.1.1 Maré Astronômica

A maré astronômica resulta do posicionamento relativo da Lua e do Sol em relação à Terra. Quando ocorre o alinhamento desses corpos celestes, como nas fases nova e cheia da Lua, os efeitos gravitacionais do Sol e da Lua se somam, gerando marés de sizígia, caracterizadas por preamares (a cota mais alta de uma maré) mais altas e baixa-mares (a cota mais baixa de uma maré) mais baixas. Por outro lado, nas fases crescente e minguante, a Lua forma um ângulo de aproximadamente 90 graus com o Sol em relação à Terra, resultando em marés de quadratura, com menor amplitude (Bosboom e Stive, 2022). Essas diferenças de alinhamento estão esquematizadas na Figura 3.

Figura 3 - Marés resultantes da força gravitacional e do posicionamento dos corpos celestes Lua e Sol em relação à Terra.



Fonte: Adaptado de Bosboom & Stive (2022)

3.2 ESTUÁRIOS

As zonas costeiras apresentam-se como ecossistemas únicos, altamente complexos, sensíveis e vulneráveis, derivados das interações entre atmosfera, biosfera, geosfera e hidrosfera (Dias, 2003). Nelas localizam-se os estuários, definidos como ambientes de transição entre o continente e o oceano, de intenso dinamismo, onde há mistura e diluição da água do mar e a parte do rio sujeita a oscilação de maré, sendo assim sujeitos a intensidade das descargas fluviais, de correntes de maré e da influência dos ventos (Cameron e Pritchard, 1963).

Os estuários são formados em uma estreita faixa existente na fronteira entre o continente e o oceano, nas regiões de desembocadura dos rios. Sua forma e extensão possuem um alto dinamismo em função de fenômenos naturais de erosão e

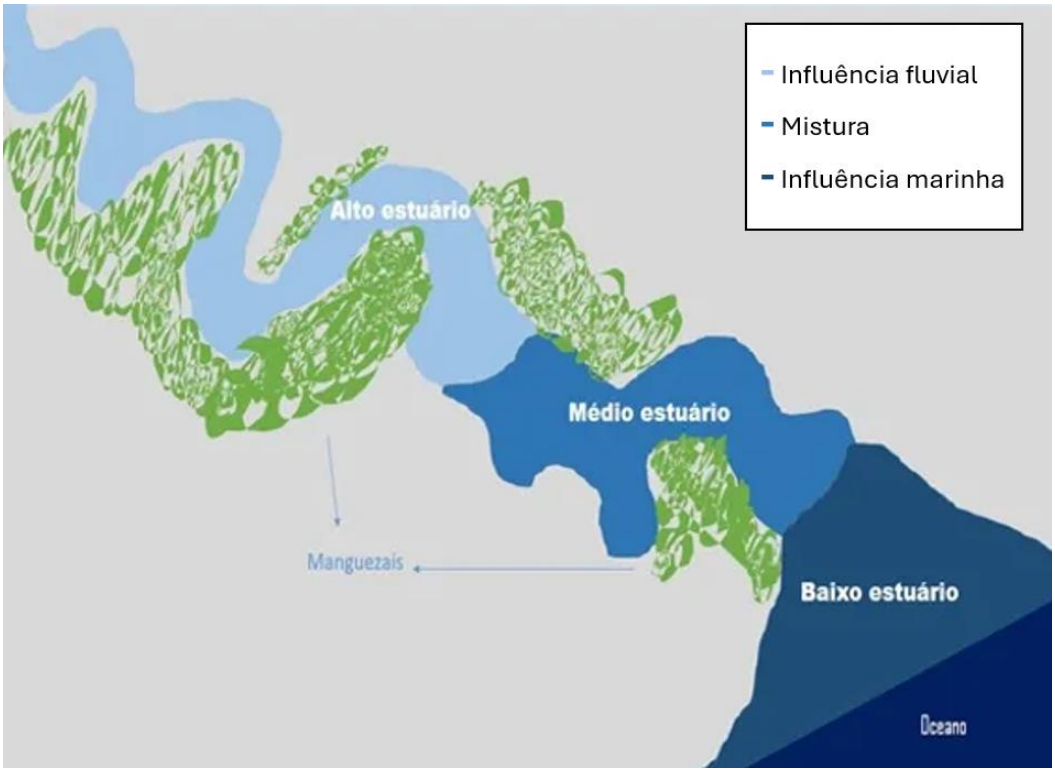
sedimentação, além de serem altamente suscetíveis a mudanças no nível do mar e são considerados ambientes de transição entre o mar e os afluentes (Dyer, 1997).

Os estuários podem ser classificados de acordo com sua forma física ou pelo grau de estratificação de suas águas (Perillo, Piccolo e Pino-Quivira, 1999). Possuem alta importância ecológica, sendo considerados áreas críticas para a reprodução e desenvolvimento de espécies, devido sua alta produtividade primária, devido a entrada de matéria orgânica e diversidade biológica (Miranda, Castro e Kjerfve, 2002).

Além disso, possuem zonas de classificação de acordo com seu gradiente de salinidade (Neves *et al.*, 2020), que podem ser observadas na Figura 4:

- Alto estuário – região de grande influência fluvial, com baixíssimas concentrações de salinidade, mas sujeita a influência de maré.
- Médio estuário – área onde acontece a mistura dos aportes fluviais continentais e a água do mar.
- Baixo estuário – região costeira, com grande influência marinha, que se estende até a frente da pluma do estuário.

Figura 4 - Esquema de um estuário com representação de suas zonas segundo influência.



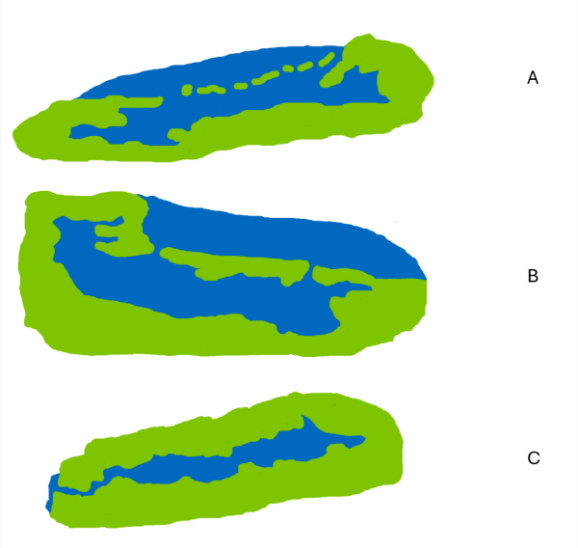
É importante ressaltar que essas zonas nem sempre estarão presentes simultaneamente em um estuário. Um estuário com influência de uma baixa amplitude de maré pode não apresentar a região de baixo estuário (Marone *et al.*, 2007).

3.2.1 Lagunas Costeiras

Lagunas costeiras são corpos d'água de presença bastante comum no litoral do Brasil, principalmente nas regiões sul e sudeste. Podem ser classificadas de acordo com a troca de massas d'água com o mar, podendo ser abertas, restritas ou sufocadas (Kjerfve, 1986).

As lagunas abertas possuem largos canais de ligação e correntes intensas, que possibilitam intensas trocas de massas de água com o oceano, as lagunas restritas são aquelas com múltiplos canais, são fortemente influenciadas por ventos, tendendo a serem bem misturadas, já as sufocadas ocorrem ao longo das linhas de costa, possuem canais estreitos, que tornam limitadas as trocas de massa de água com o mar, sendo sua circulação dominada pelos padrões de vento. A Figura 5 ilustra cada um dos tipos abordados aqui.

Figura 5 - Tipo de lagunas costeiras existentes. (A) Laguna Aberta. (B) Laguna Restrita. (C) Laguna sufocada.



Os sistemas lagunares são corpos d'água com conexão direta com o mar, caracterizados por trocas de água salgada e doce, além de forte dinâmica biológica e

sedimentar. Já as lagoas costeiras em regime de cheias são aquelas que possuem sua conexão com o oceano interrompidas, ocorrendo apenas eventuais trocas durante grandes eventos de cheia, isso caracteriza um estágio avançado de degeneração dos sistemas lagunares, marcando um impacto ambiental significativo (Rosman, 2010).

3.2.2 Canais de maré

Os canais de maré são caracterizados por apresentarem uma dinâmica diferente em relação aos canais tradicionais, já que nestes o escoamento se dá por ação da gravidade em virtude da componente peso da água na direção do caimento, enquanto nos canais de maré o escoamento é gerado por gradientes horizontais de pressão em virtude da inclinação da superfície da água em relação a horizontal causada pela presença de ondas longas (Melo Filho, 1998).

Resumidamente, na maré enchente o nível de água na parte marítima está mais elevado que no interior do canal, com isso ocorre uma forçante no sentido oceano-lagoa, já na maré vazante o sentido se inverte. Com isso o escoamento em canais de maré é oscilatório, impossibilitando considerá-lo permanente (Wright, Colling e Park, 1999).

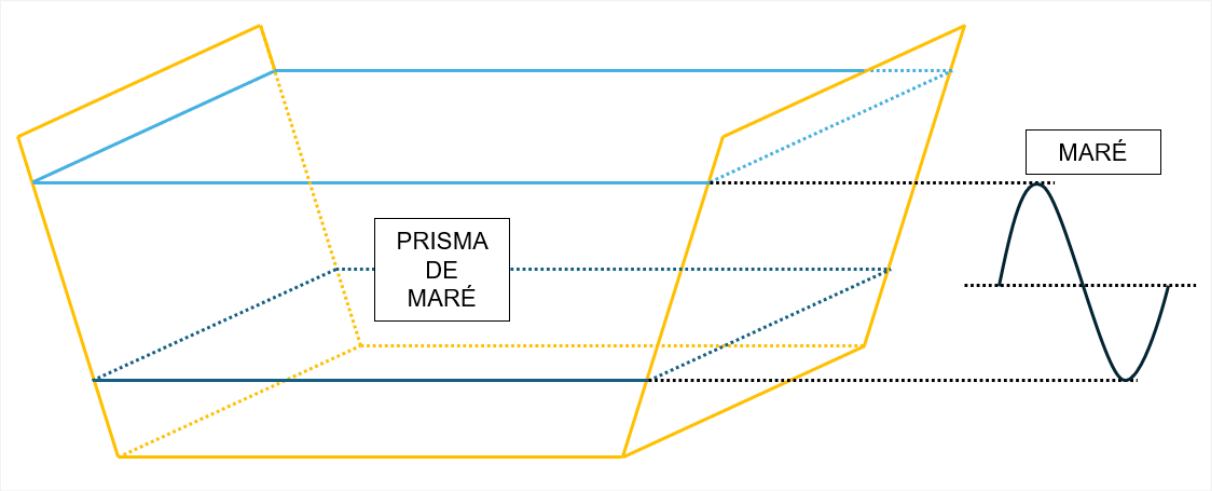
Esses canais são dominados pelo fenômeno de marés, daí a origem do nome, e sua estabilidade hidro-sedimentológica, ou seja, sua capacidade de manter sua embocadura desobstruída depende dos seguintes fatores: transporte litorâneo, gerado na zona de arrebentação das ondas, vazões líquidas e sólidas vindas a montante do canal e por fim magnitude das correntes de maré, que variam em função das fases da maré e das características morfológicas do sistema lagunar (Silva e Rosman, 2016).

Nos estuários e canais de marés, mudanças significativas em um grupo geram mudanças nas variáveis do outro grupo, gerando um processo de retroalimentação, sendo o mecanismo de propagação de marés o causador fundamental desse complexo efeito, assim como o prisma de maré (Motta, 1978). Com isso, conclui-se que a estabilidade dos canais de maré depende do equilíbrio entre agentes estabilizadores, como o fluxo de marés, e desestabilizadores, como processos sedimentológicos (Rosman, 2010).

3.2.3 Prisma de maré

O prisma de maré é definido como o volume de água que adentra o sistema lagunar durante a maré enchente. Com isso é importante observar que um aumento no prisma de maré produzirá maiores velocidades de correntes e capacidade de mistura de água. A Figura 6 ilustra um prisma de maré.

Figura 6 - Esquema de prisma de maré.



3.2.4 Relação entre prisma de maré e área da menor seção transversal

A estabilidade de canais de maré de canais de maré leva em consideração relações entre os agentes estabilizadores e desestabilizadores. Um dos critérios leva em consideração a relação entre o prisma de maré e a área da menor seção transversal.

Neste critério tem-se que o prisma de maré (P) é o volume em metros cúbicos de água que entra nas lagoas pelo canal, durante a maré enchente e a área da menor seção transversal do canal (A_c) é a área hidráulica em metros quadrados em relação ao nível médio do mar da menor seção transversal do canal de maré (Rosman, 1992).

Assim, através de observações e medições em canais de maré estáveis com embocaduras em costas arenosas, definiu-se as seguintes relações (O'Brien, 1969):

$$A_c = 6.56 \times 10^{-5} P \quad (1)$$

$$A_c = 9.02 \times 10^{-4} P^{0.85} \quad (2)$$

A equação (1) é utilizada para canais sem guia-corrente enquanto a equação (2) com dois guia-correntes.

Através da análise de regressão de 108 canais de maré estáveis em praias de costa aberta com granulometria e características de embocadura variadas, observa-se que os canais com ou sem guia-correntes na embocadura, em 95% dos casos, apresentavam área da menor seção transversal dentro dos seguintes limites (Jarret, 1976):

$$5.20 \times 10^{-4} P^{0.97} \leq A_c \leq 4.03 \times 10^{-4} P^{0.95} \quad (3)$$

Com valor mais frequente em torno de:

$$A_c = 1.57 \times 10^{-4} P^{0.95} \quad (4)$$

A mostra algumas das relações observadas por Jarret para a costa do Oceano Atlântico:

Tabela 1 - Relações entre prisma de maré e área da menor seção transversal em função das características de embocadura para a costa do Oceano Atlântico.

Fórmula Geral: $A_c = a_1 \times P^{m1}$ com A_c em ft² e P em ft³		
Nº de guia-correntes	a_1	m_1
0, 1 ou 2	7.75×10^{-6}	1.05
0 ou 1	5.37×10^{-6}	1.07
2	3.77×10^{-5}	0.95

Fonte: Adaptado de Jarret (1976)

3.3 ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL DA BARRA FRANCA

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da Barra Franca na Lagoa de Saquarema – RJ, publicado em 2000, foi elaborado com o objetivo de avaliar os efeitos da abertura permanente do único canal que conecta o sistema lagunar ao mar, visando melhorar a troca de suas águas e, consequentemente, a qualidade ambiental do sistema

lagunar. Foi fundamental para embasar decisões sobre intervenções na região, considerando diversos aspectos como hidrodinâmicos, ecológicos e socioeconômicos.

Faz uma ampla caracterização da região de estudo, que inclui processos de formação e origem do sistema lagunar, dados geográficos e caracterização dos meios biótico e antrópico.

Apresenta modelagem numérica visando prever os efeitos da abertura permanente do canal e a partir dos resultados dos modelos em adição com os impactos gerados para as comunidades, define uma matriz de impactos, que auxilia na gestão dos problemas decorrentes e maximiza os efeitos positivos.

3.4 TRABALHOS SEMELHANTES

É possível encontrar estudos semelhantes na literatura, que reforçam a importância da modelagem hidrodinâmica ambiental como ferramenta para análise de viabilidade de abertura de canais de maré para melhoria de renovação de águas em sistemas lagunares, com muitos deles localizados no Estado do Rio de Janeiro.

O Sistema Lagunar de Araruama, vizinho ao Sistema Lagunar de Saquarema, também possui apenas uma única conexão com o oceano mesmo sendo a maior laguna hipersalina do Brasil, através do Canal do Itajurú, localizado no município de Cabo Frio. A modelagem numérica foi utilizada como ferramenta de análise de estabilidade de um novo canal de maré na região de Praia Seca, no extremo oeste do sistema lagunar, para um período de 1 ano (Silva e Rosman, 2016).

Há trabalhos de modelagem numérica que investigam os efeitos da desobstrução de canais de maré na idade e na taxa de renovação da água, mostrando a influência positiva da dragagem para a mistura de massas d’água para os sistemas lagunares. No caso do estudo referente ao Complexo Lagunar de Jacarepaguá pode-se observar um aumento de 41% no prisma de maré do Canal de Joatinga (Silvar, Andrade e Rosman, 2024). Ainda sobre os efeitos da desobstrução de ligações com o mar para a renovação de massas d’água, o estudo sobre o Sistema Lagunar de Piratininga, localizado no município de Niterói, e a influência da desobstrução do Túnel

do Tibau para a renovação das águas, onde é possível observar um bom aumento nas trocas de massas d'água com o mar (Reis, Rosa e Silva, 2023).

Outros estudos reforçam a importância da modelagem numérica para análise de renovação de águas, como o estudo sobre o sistema estuarino de Santos, que revelou que efeitos de maré e de vazões afluentes geraram resultados de renovação de mais de 95% para um período de 30 dias em todos os pontos do domínio (Roversi, Rosman e Harari, 2016). Além disso, a modelagem também oferece subsídios à gestão de recursos hídricos apresentando-se como ferramenta de análise para eventos extremos, que aliados à crescente demanda, podem intensificar a degradação das águas (Silva *et al.*, 2021).

É importante destacar que os estudo mencionados possuem áreas de estudo que apresentam semelhanças em relação a região deste trabalho, como clima, regime de ventos e precipitação, demonstrando um bom desempenho dos modelos para o sistema lagunar.

4 METODOLOGIA

Este trabalho realizou-se com o auxílio de modelagem computacional, de modo a resolver de maneira rápida e otimizada o sistema de equações que envolve os fenômenos hidro ambientais existentes na área de estudo.

Cada um dos modelos, seja o atual ou os cenários propostos, foi alimentado com dados de entrada, incluindo a definição de seus domínios de modelagem, batimetria, condições iniciais e de contorno.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Saquarema, localizada na Região dos Lagos, no litoral do estado do Rio de Janeiro é conhecida tanto por suas belezas naturais quanto por sua relevância ambiental e socioeconômica. Distante cerca de 115 km da capital do estado, tem uma população de 74.234 habitantes segundo o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), com a projeção de ter superado os 100 mil habitantes em 2023 (SERENCO, 2013).

O município possui uma área total de 352.130 km², com mais de 80% formado por regiões de planícies, com o restante representando majoritariamente formações onduladas de relevo, tendo menos de 1% de sua extensão territorial formada de superfícies montanhosas (Garcia *et al.*, 2020).

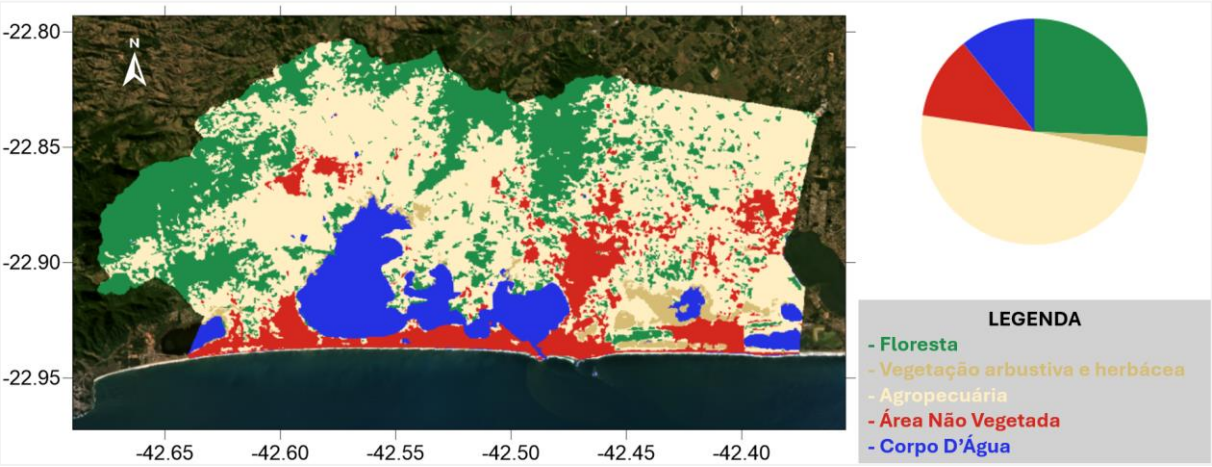
A região de Saquarema possui um clima semiárido com calor bem distribuído ao longo do ano (Kneip, 2009), determinado pela ressurgência costeira favorecida pelos ventos vindos de NE (Andrade, 2015).

O mapa de ocupação do solo do município de Saquarema pode ser observado na Figura 7. Nele observa-se que 17328 ha (49.21%) do solo tem uso para a agropecuária, deste uma parcela de 9220 ha destina-se a pastagens. As áreas de floresta compõem 9054 ha (25.71%), seguido de 4174 ha (11.85%) de área não vegetada, onde 3871 ha compõem áreas urbanizadas. Os corpos d’água ocupam 3806 ha (10.81%), onde notavelmente o Sistema Lagunar de Saquarema ocupa boa

parcela desta área. Por fim, 850 ha (2.41%) do território é composto por vegetação arbustiva e herbácea (MapBiomas, 2024).

O mapa de uso e ocupação do solo revela que o entorno do Sistema Lagunar de Saquarema é quase que inteiramente tomado pela urbanização e pela agropecuária, indicando uma forte vulnerabilidade das águas do sistema, visto que esses dois tipos de ocupação são os mais prejudiciais para a qualidade das águas.

Figura 7 - Mapa e gráfico de distribuição de uso do solo do município de Saquarema.

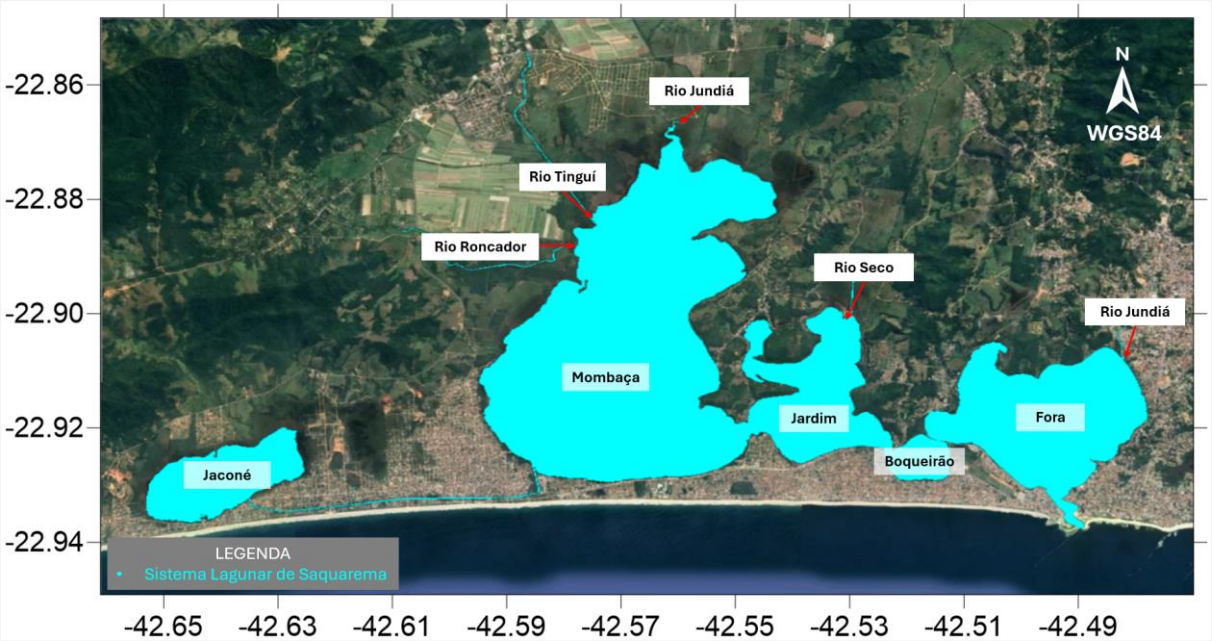


Fonte: (MapBiomas, 2024)

O Sistema Lagunar de Saquarema está localizado no município de Saquarema, no estado do Rio de Janeiro. Possui um espelho d'água de aproximadamente 22 km², que se dividem entre as lagoas de Fora, Boqueirão, Jardim e Mombaça, com extensão de cerca de 12 km pelo litoral (Bruno, 2013). Além destas há ainda a lagoa de Jaconé localizada entre os municípios de Saquarema e Maricá (Da Silva e Corrêa, 2023), com cerca de 4 km² de área.

Apesar de sua grande área, esse sistema lagunar tem no Canal da Barra Franca sua única ligação com o oceano, além disso, as lagoas também possuem ligações estreitas entre si, o que diminui ainda as trocas de água. Recebe como afluentes o rio Bacaxá na Lagoa de Fora, o rio Seco na Lagoa Jardim, enquanto os rios Roncador, Tinguí e Jundiá desembocam na lagoa Mombaça (Valadão, Candella e Minello, 2020). A Figura 8 ilustra o Sistema Lagunar de Saquarema, identificando cada uma das lagoas existentes, além de indicar os afluentes que desembocam em suas águas.

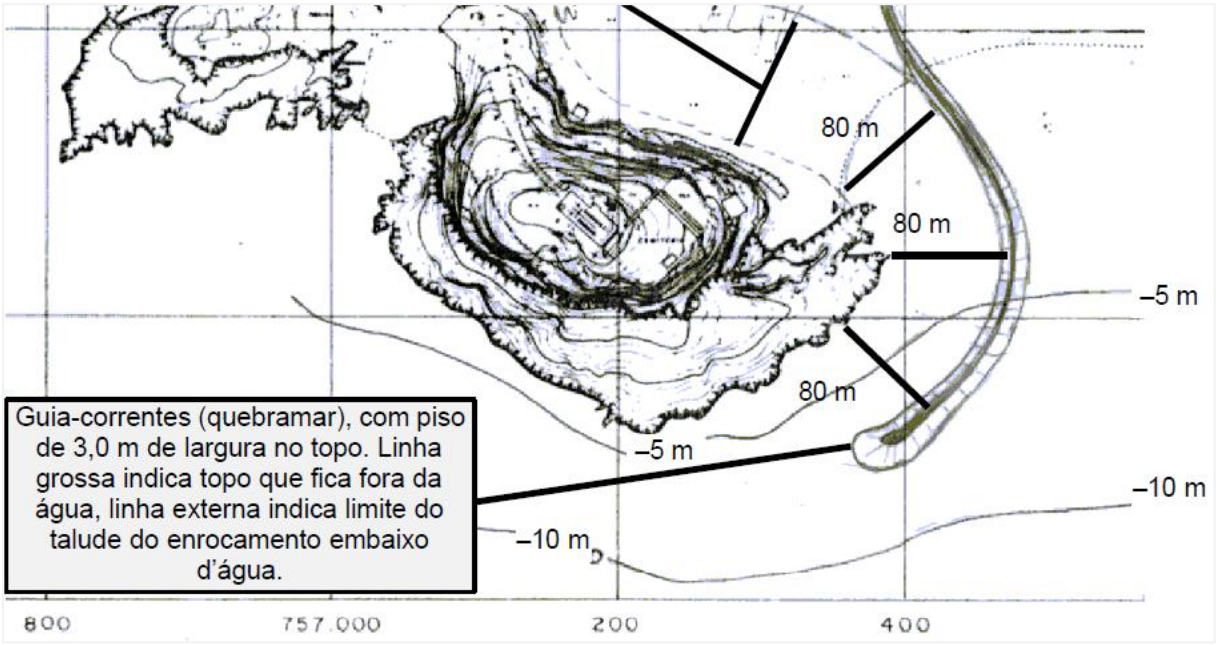
Figura 8 - Lagoas e afluentes contribuintes para o Sistema Lagunar de Saquarema.



Este Sistema Lagunar vem sofrendo com a degradação da qualidade de suas águas devido a ocupação urbana desordenada, gerando uma sobrecarga de efluentes despejados nas lagoas, somada a fenômenos naturais de transporte litorâneo de sedimentos, que geram o fechamento do Canal da Barra Franca impedindo a renovação das suas águas (Carmouze, Knoppers e Vasconcelos, 1991).

Sucessivas obras foram realizadas pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro desde 2001 para garantir o fluxo das águas de forma permanente pelo Canal da Barra Franca. As obras incluíam um molhe guia-corrente adequado, contudo, nunca foram concluídas. Com isso, o problema se intensificou, pois diversos blocos de rocha da obra interrompida foram deslocados por força das ondas, dificultando, cada vez mais, a entrada de água nas lagoas (Prefeitura de Saquarema, 2022). A Figura 9 mostra o projeto do molhe guia-corrente, enquanto a Figura 10 ilustra a situação atual da obra, onde é possível observar que o molhe guia-corrente não protege a embocadura do canal por não atingir a profundidade de fechamento, que é a área que separa a zona ativa de transporte de sedimento da área mais profunda onde há baixa dinâmica de transporte durante um certo intervalo de tempo (Kraus, Larson e Wise, 1999).

Figura 9 - Planta baixa do molhe guia-corrente instalado na Praia de Itaúna.



Fonte: (Wasserman *et al.*, 2000)

Figura 10 - Situação atual das obras para conexão permanente do Canal da Barra Franca em Saquarema, onde é possível observar um grande assoreamento em seu interior por conta do transporte litorâneo.

Fonte: Prefeitura Municipal de Saquarema

Quando adequadamente construídos o guia-corrente atua protegendo a embocadura do canal de ondas e evitando que sedimentos sejam carreados para seu interior devido aos processos litorâneos. Isso ocorre quando a estrutura é estendida

até a profundidade de fechamento, que em linhas gerais é definida pela profundidade a partir da qual o transporte significativo de sedimentos causado por ondas e correntes praticamente não ocorre mais (USACE, 2011).

Além disto a deterioração desse Sistema Lagunar se intensifica ainda mais devido à baixa qualidade das águas dos afluentes que chegam no sistema, com o rio Roncador, um dos maiores afluentes que chega nas lagoas, apresentando não conformidade para parâmetros microbiológicos em virtude de uma possível contaminação de efluentes sanitários (Guimarães *et al.*, 2023).

4.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS

Utilizou-se o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA), um sistema profissional de modelos computacionais registrado em nome do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), que desde 1987 auxilia na realização de estudos e projetos envolvendo corpos de água naturais, sendo uma ferramenta robusta para a resolução de modelos de circulação hidrodinâmica envolvendo corpos de água naturais.

4.2.1 Modelo Hidrodinâmico

Os fenômenos de circulação hidrodinâmica em sistemas lagunares costeiros são majoritariamente dependentes de efeitos de marés, ventos e aportes fluviais, enquanto as lagoas da região de estudo são corpos de águas rasas, com isso a circulação média na vertical apresenta maior relevância e variabilidade que a circulação vertical na coluna d'água (Oliveira, 2013), motivo pelo qual optou-se pela escolha dos modelos 2DH.

As equações de Navier-Stokes, representam o princípio da conservação da quantidade de movimento, fundamental na composição de modelos matemáticos para qualquer corpo d'água. Para escoamentos em águas rasas adota-se a aproximação hidrostática, na qual a pressão dinâmica é desprezível.

Considerando que em domínios relativamente pequenos a pressão atmosférica é constante, as equações de conservação da quantidade de movimento podem ser descritas da seguinte forma.

A equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x (Rosman, 2024):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -g\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) - \frac{U}{H}\sum q \qquad (5)$$

Analogamente para y, tem-se:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -g\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right) - \frac{V}{H}\sum q \qquad (6)$$

Nelas, tem-se que para a direção x e analogamente para a direção y:

- $\frac{\partial u}{\partial t}$ representa a aceleração local do escoamento.
- $u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}$ representa a aceleração advectiva do escoamento.
- $-g\frac{\partial \zeta}{\partial x}$ representa o gradiente de nível de água na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para locais onde o nível é mais baixo
- $\frac{1}{\rho_o}\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}\right)$ representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas.
- $-\frac{U}{H}\sum q$ representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área.

Os dados de entrada utilizados para os modelos foram:

- Batimetria de cada uma das lagoas, da região oceânica e do arco praial.
- Dados de maré.

- Rugosidade de fundo.
- Intensidade e direção dos ventos.
- Aportes fluviais.

4.2.2 Modelo de Transporte Euleriano

Além dos modelos hidrodinâmicos também foram utilizados modelos de transporte Euleriano, que são modelos de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas de escalares dissolvidos ou partículas de suspensão na massa d'água, permitindo gerar resultados de taxa de renovação e idade da água, que é uma métrica hidrodinâmica que quantifica o tempo médio que um volume de água permanece em um determinado domínio (Rosman, 2024).

4.2.2.1 Taxa de Renovação

Para o modelo de taxa de renovação de água admite-se duas situações para o instante inicial da simulação, um valor de referência igual a zero para as águas dentro do sistema, enquanto para as águas marítimas e aportes fluviais, esse valor de referência é igual a 100. A partir da combinação destas situações, são calculados os valores de taxa de renovação (Rosman, 2024).

Durante a simulação ocorrem processos de troca de água e processos de mistura, advindas de bacias hidrográficas e da região marítima que são interpretadas como porcentagem de água que chega na região de interesse. É importante destacar que a água nova, não é necessariamente limpa, visto que não foram utilizados como entrada dados de quantidade de matéria orgânica ou nutrientes afluentes.

Ao se rodar o modelo de Taxa de Renovação por tempo suficiente tem-se que a taxa de renovação tende a 100%.

4.2.2.2 Idade da Água

O modelo de idade da água permite observar quanto tempo a água permanece em determinada região ao longo do tempo de simulação. Para poder determinar este tempo de decaimento, é necessário que a substância marcadora de idade tenha reação cinética de primeira ordem, com taxa constante k/0 e sem outros efeitos de perdas e ganhos de massa.

Para um volume de água bem misturado considera-se uma concentração inicial C_0 dessa substância marcadora. Sendo a cinética de decaimento de primeira ordem, a variação no tempo da concentração da substância, C_t, é dada por (Rosman, 2024):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC \tag{7}$$

Cuja solução analítica leva a:

$$C(t) = C_0 \exp(-kt) \tag{8}$$

Portanto:

$$t = \frac{-\ln(C / C_0)}{k} \tag{9}$$

Conhecida a concentração inicial C_0 e a concentração C registrada, determina-se o tempo de decaimento decorrido entre o instante inicial e o instante de registro C, e é a diferença entre esses dois instantes que define a Idade da Água no momento do registro.

Para um corpo d'água natural em que há entrada de água renovada, além de saídas de água com diferentes concentrações em locais e tempos distintos, com isso a concentração torna-se função do tempo e do espaço C(x,y,t), e considera-se que o valor da idade da água é uma média da mistura de águas de diferentes idades dada por (Rosman, 2024):

$$I_A(x,y,t) = \frac{-\ln\left(\frac{C(x,y,t)}{C_o}\right)}{k} \tag{10}$$

Onde:

- k representa a unidade da taxa de decaimento.
- C_0 representa a concentração inicial da substância marcadora de idade da água.

- C representa a concentração da substância em um determinado tempo t.

4.2.3 Modelo de Transporte Lagrangeano

Os modelos de transporte Lagrangeano são utilizados para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas para camada de escoamento 2DH, que permite analisar mistura de massas d'água, tempos de troca e renovação entre as lagoas (Rosman, 2024).

Este modelo calcula a posição das partículas, que representam um centro de gravidade de uma parcela de massa, que somadas representam uma distribuição de massa.

Ao ocorrer o transporte, há o movimento de partículas, que sofrem advecção e difusão relativa, e o modelo calcula a posição de cada partícula em determinado instante somada a um vetor deslocamento probabilístico associado com a turbulência.

4.3 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Para este trabalho foram desenvolvidos modelos referentes a 5 cenários de simulação, para o mês de janeiro de 2023. São eles:

- Situação atual, com guia-corrente incompleto e irregular além de forte assoreamento no interior do Canal da Barra Franca.
- Cenário de projeto 1, com a construção do guia-corrente protegendo o canal, conforme definido pelo EIA da Barra Franca, além de um aumento na profundidade do canal para 3 metros.
- Cenário de projeto 2, abertura de uma nova conexão de 20 metros de largura com o mar na região do canal de Jaconé, próximo a lagoa Mombaça em adição do cenário de projeto 1.

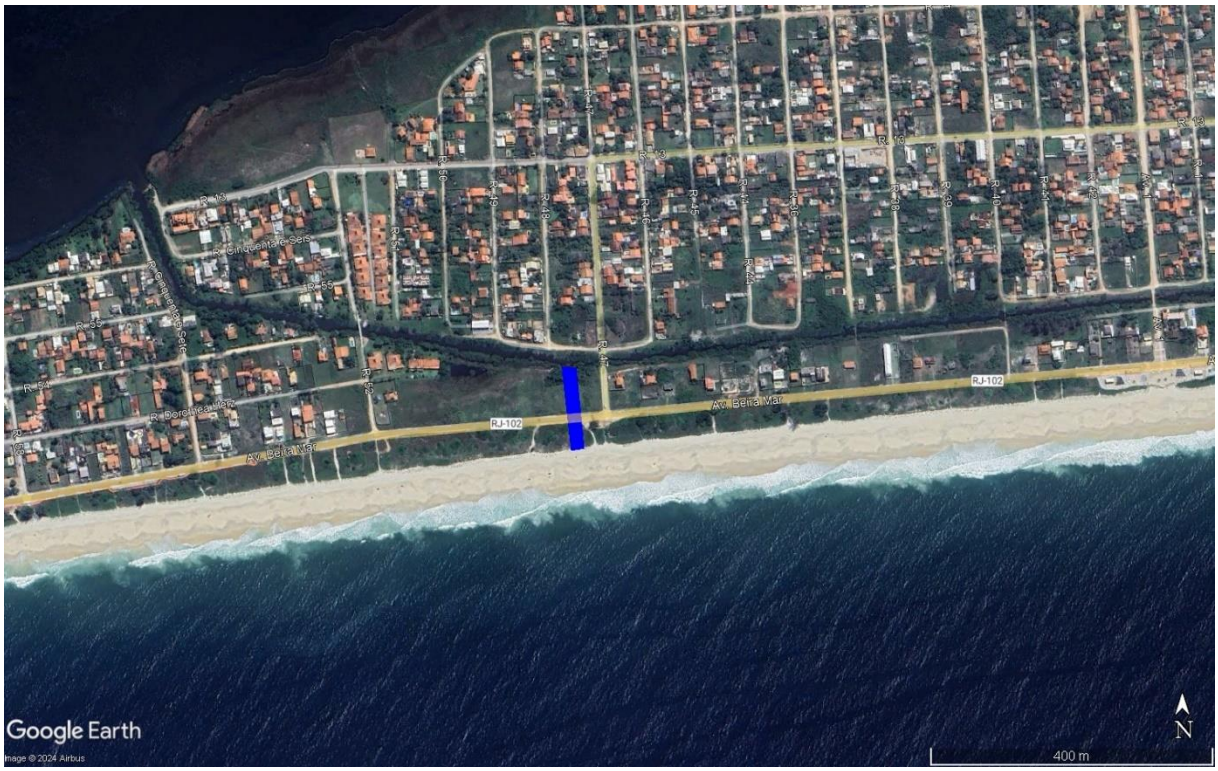
- Cenário de projeto 3, abertura de uma nova conexão de 20 metros de largura com o mar na região do canal de Jaconé, próximo a lagoa Jaconé em adição do cenário de projeto 1.
- Cenário de projeto 4, abertura das conexões com o mar propostas dos cenários de projeto 2 e 3, em adição ao cenário de projeto 1.

Destaca-se que o fator determinante para a escolha do local das novas conexões com o mar propostas nos cenários de projeto 2, 3 e 4, foi a alta urbanização no entorno das lagoas, com isso os novos canais foram abertos procurando evitar construções como ilustra a Figura 11 e a Figura 12, ainda assim não foi possível evitar a Rua B, no caso da conexão mais próxima à lagoa Mombaça, e a Rodovia RJ-102, também conhecida como Avenida Beira Mar, em nenhuma das duas novas aberturas propostas.

Deve-se destacar, ainda que este trabalho trate apenas da melhoria da renovação das águas do sistema lagunar, apenas com a implementação dessas novas aberturas, sem uma preocupação com a melhoria da coleta e do tratamento de esgoto, acarretará em uma degradação da qualidade das águas das praias no entorno dessas intervenções, já que segundo relatório do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) de balneabilidade para o ano de 2024, pontos no interior do sistema lagunar não estão em conformidade com os critérios de balneabilidade segundo a CONAMA 274/2000 (INEA, 2024).

Figura 11 - Região de implementação da nova conexão com o mar, destacada em azul, próxima a lagoa Mombaça. Nesse caso a conexão intercepta a Rodovia RJ-102 e a Rua B.

Figura 12 - Região de implementação da nova conexão com o mar, destacada em azul, próxima a lagoa Jaconé. Nesse caso a conexão intercepta a Rodovia RJ-102.



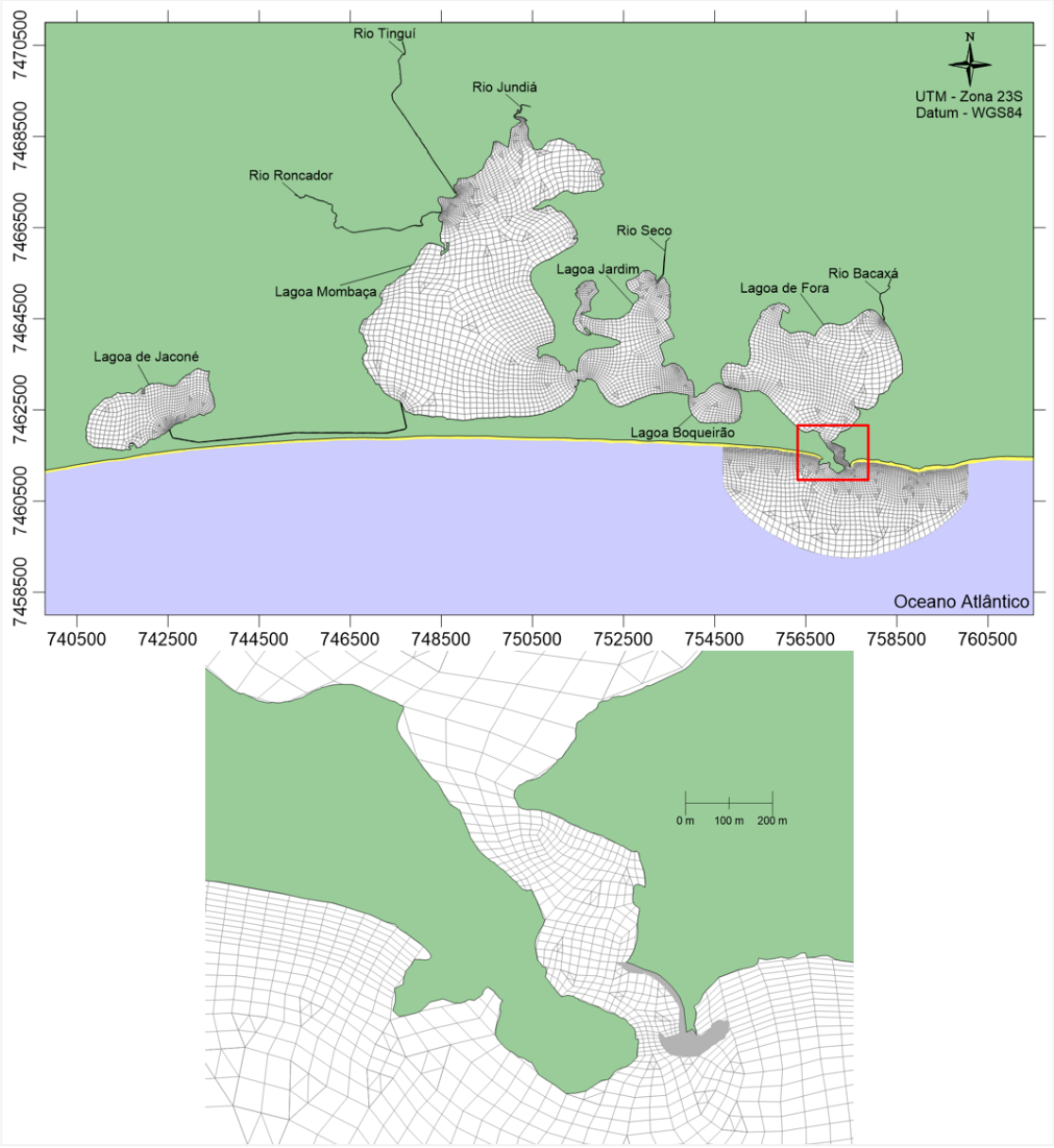
4.4 MALHAS

Definiu-se individualmente uma malha para cada uma das situações a serem modeladas utilizando o SisBaHiA, que possibilita a geração de malhas de elementos finitos quadráticos, os contornos gerados auxiliaram na delimitação espacial de cada malha.

4.4.1 Malha do Cenário de Situação Atual

A Figura 13 mostra a malha de elementos finitos utilizada na discretização do Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de situação atual. Ela é composta por 2532 elementos totais, sendo 2340 quadrangulares e 192 triangulares, com 10751 nós de cálculo.

Figura 13 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização da Situação Atual do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a região do Canal da Barra Franca.

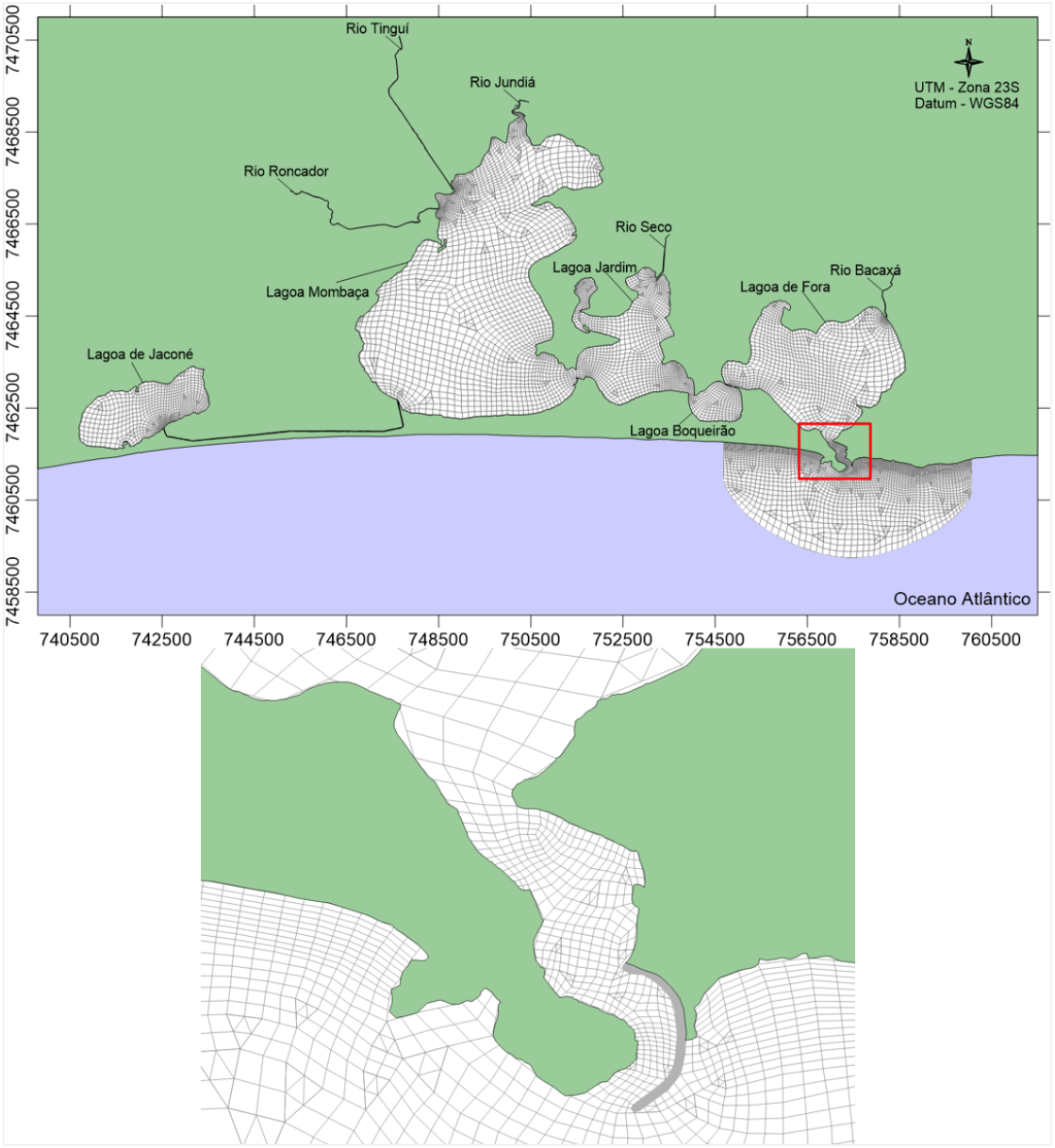


4.4.2 Malha do Cenário de Projeto 1

A Figura 14 mostra a malha de elementos finitos utilizada na discretização do Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 1. Semelhante à malha de situação atual, com exceção da região do Canal da Barra Franca. É composta por

2524 elementos totais, sendo 2340 quadrangulares e 184 triangulares, com 10683 nós de cálculo.

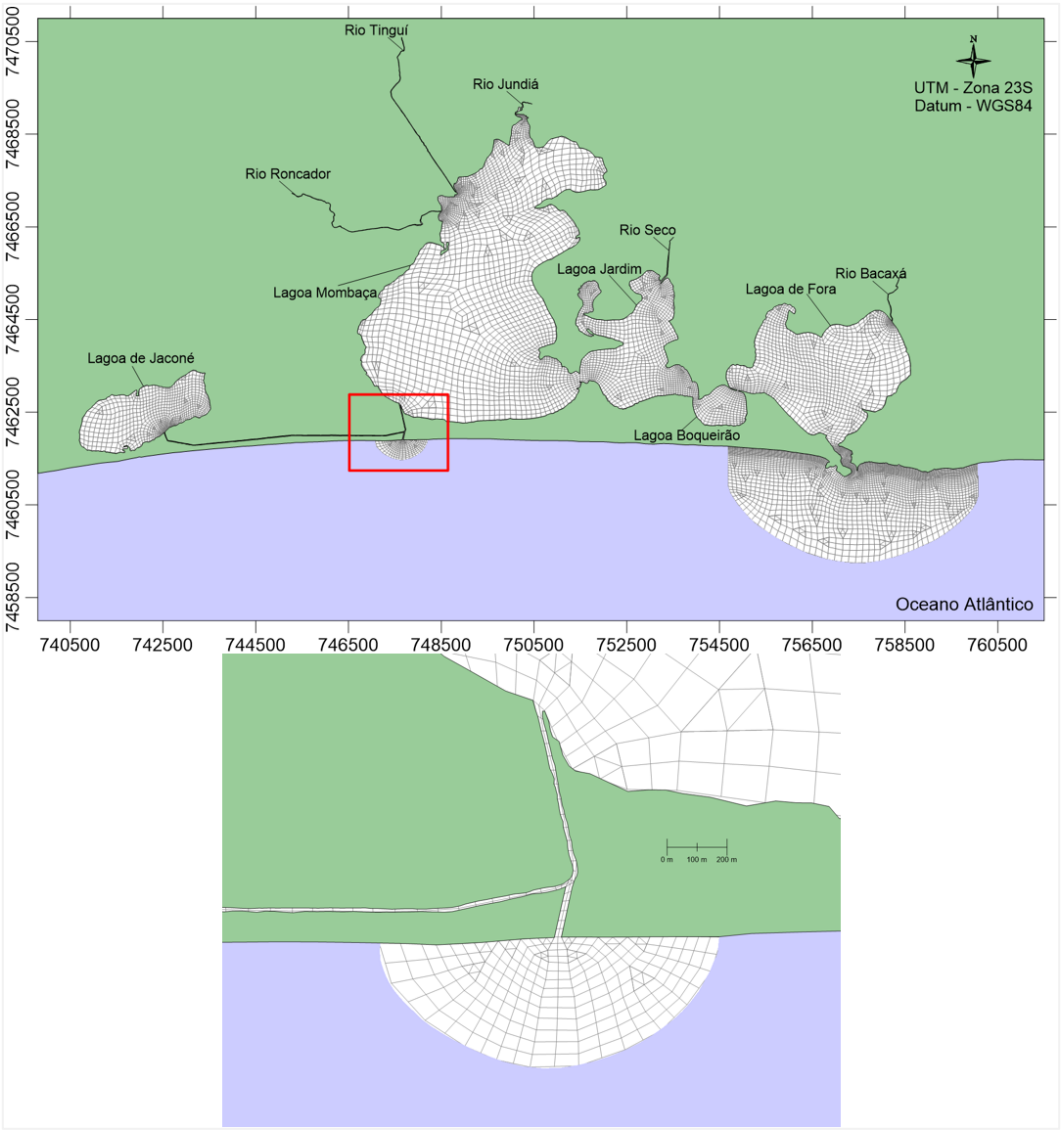
Figura 14 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 1 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a região do Canal da Barra Franca.



4.4.3 Malha do Cenário de Projeto 2

A Figura 15 mostra a malha de elementos finitos utilizada na discretização do Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 2. Ela conta com uma nova conexão com o oceano próxima a lagoa de Mombaça. É composta por 2585 elementos totais, sendo 2390 quadrangulares e 195 triangulares, com 10936 nós de cálculo.

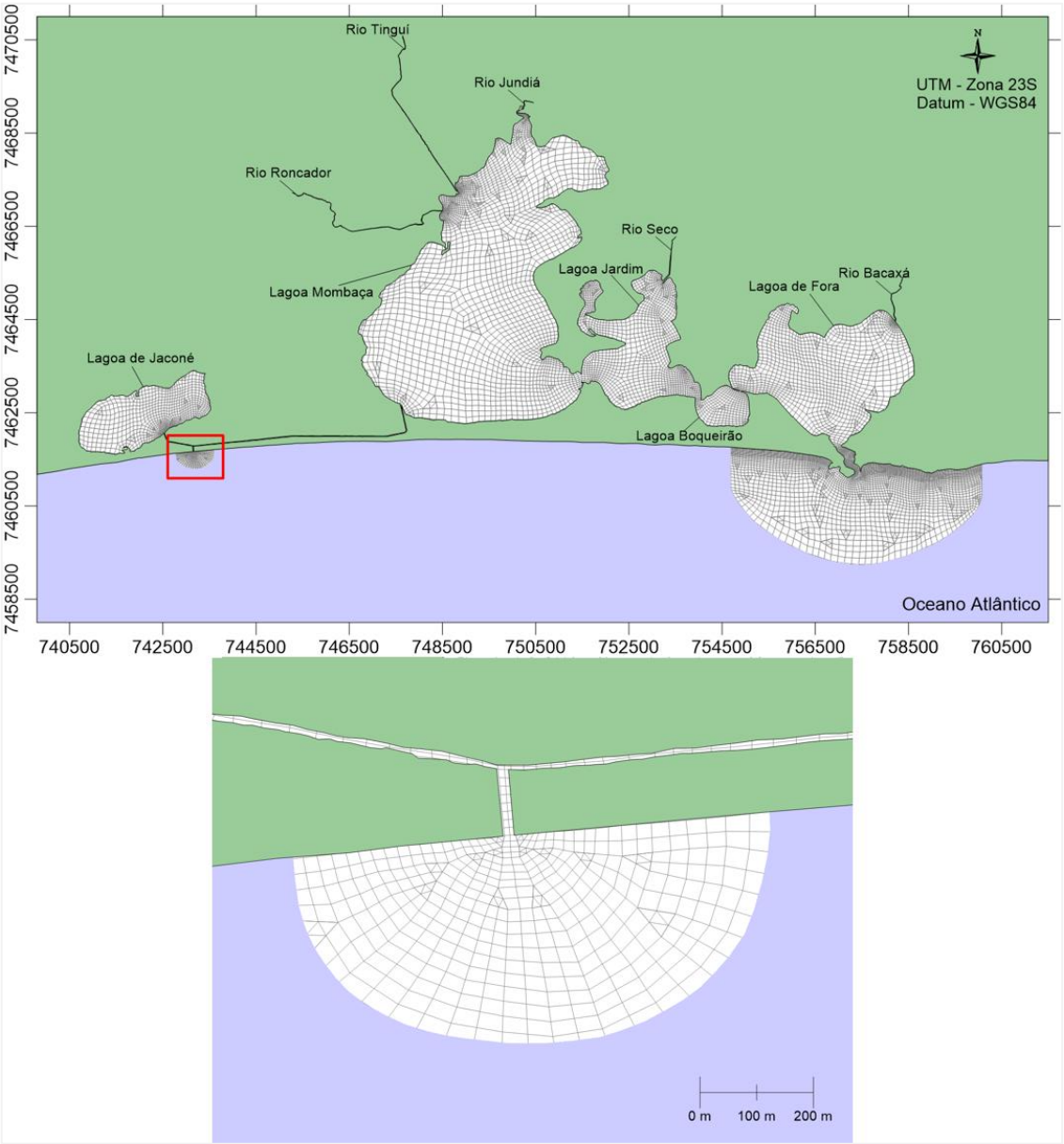
Figura 15 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 2 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta.



4.4.4 Malha do Cenário de Projeto 3

A Figura 16 mostra a malha de elementos finitos utilizada na discretização do Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 3. Ela conta com uma nova conexão com o oceano próxima a lagoa de Mombaça. É composta por 2632 elementos totais, sendo 2434 quadrangulares e 198 triangulares, com 11135 nós de cálculo.

Figura 16 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 3 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta.



4.4.5 Malha do Cenário de Projeto 4

A Figura 17 mostra a malha de elementos finitos utilizada na discretização do Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 4. Ela conta com uma nova conexão com o oceano próxima a lagoa de Mombaça. É composta por 2693 elementos totais, sendo 2484 quadrangulares e 209 triangulares, com 11388 nós de cálculo. A Figura 18 mostra a malha da região da nova conexão com o mar próxima a Lagoa Mombaça, enquanto a Figura 19 mostra a malha da região da nova conexão com o mar próxima a Lagoa de Jaconé, destacadas pelos retângulos amarelo e vermelho, respectivamente, na Figura 17.

Figura 17 - Malha de Elementos Finitos utilizada para Discretização do Cenário de Projeto 4 do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a nova conexão com o mar próxima a Lagoa Mombaça (retângulo amarelo) e para a nova conexão com o mar próxima a Lagoa de Jaconé (retângulo vermelho).

Figura 18 - Malha da região da nova conexão com o mar próxima a Lagoa Mombaça.

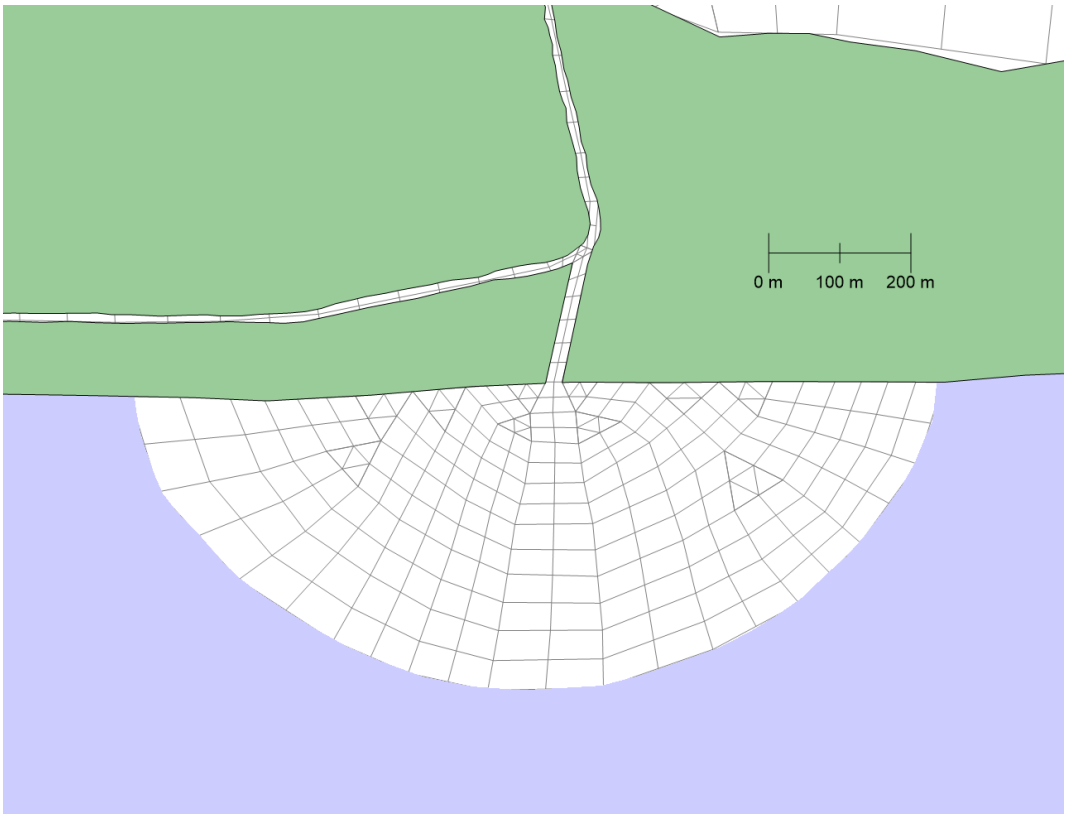
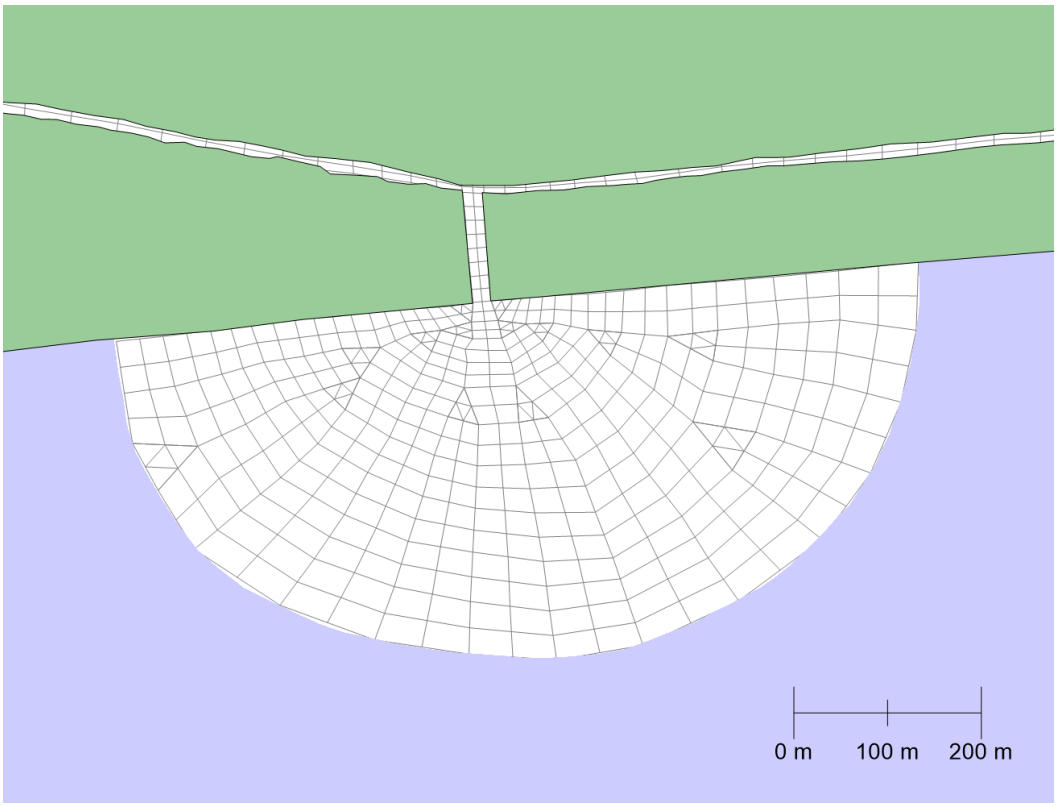


Figura 19 - Malha da região da nova conexão com o mar próxima a Lagoa de Jaconé.



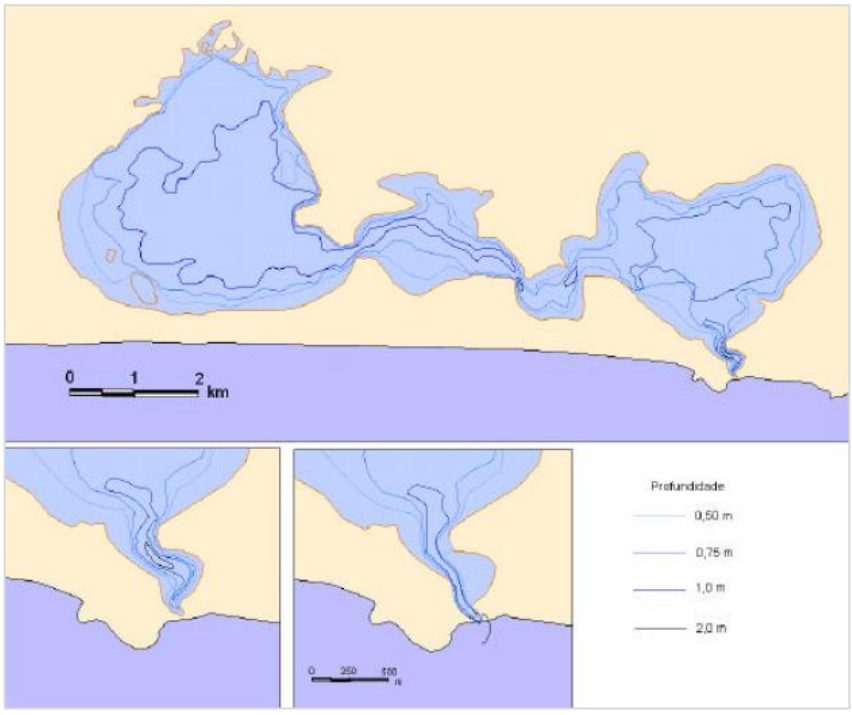
4.5 DADOS AMBIENTAIS

Nesta seção são apresentados os dados ambientais utilizados como dados de entrada para os modelos.

4.5.1 Batimetria

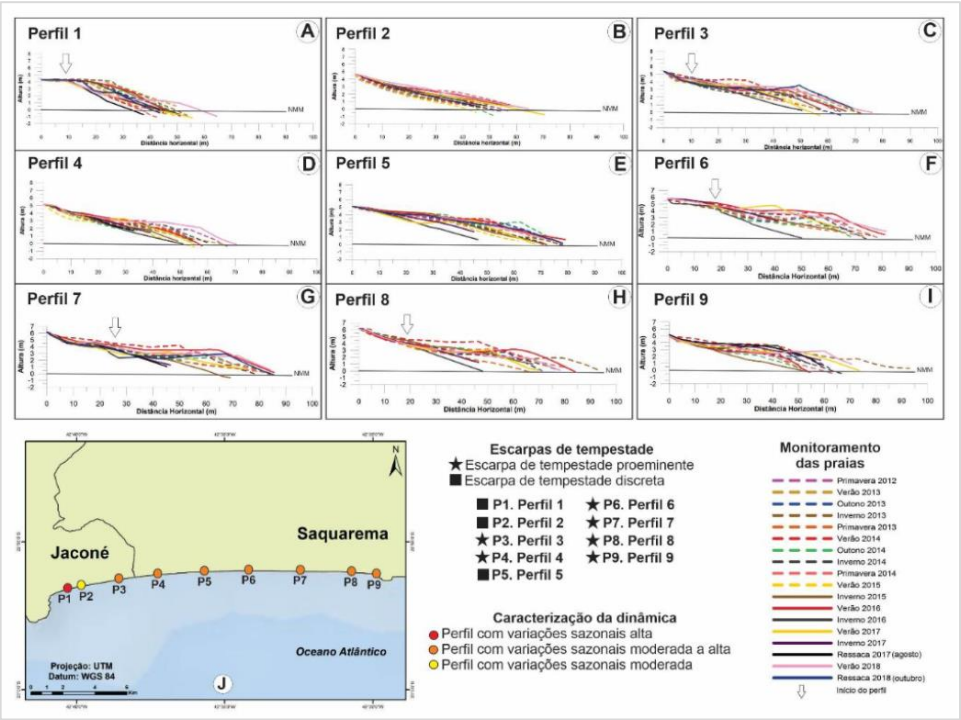
A batimetria utilizada nos modelos é oriunda de 3 fontes distintas, que foram referenciadas ao Nível Médio do Mar (NMM). A região das lagoas foi obtida a partir do EIA da Barra Franca (Wasserman *et al.*, 2000), conforme ilustra a Figura 20, a batimetria marítima foi retirada da Carta Náutica 150801, contida no Anexo A, enfim, a batimetria dos perfis de praia foi gerada a partir de monitoramento realizado entre 2012 e 2018 (Dutra *et al.*, 2022), conforme se observa na Figura 21.

Figura 20 - Mapa Batimétrico das lagoas do Sistema Lagunar de Saquarema. A imagem inferior a esquerda representa a situação com o Canal da Barra fechado, enquanto a outra representa o canal aberto. NR: IBGE.



Fonte: (Wasserman et al., 2000)

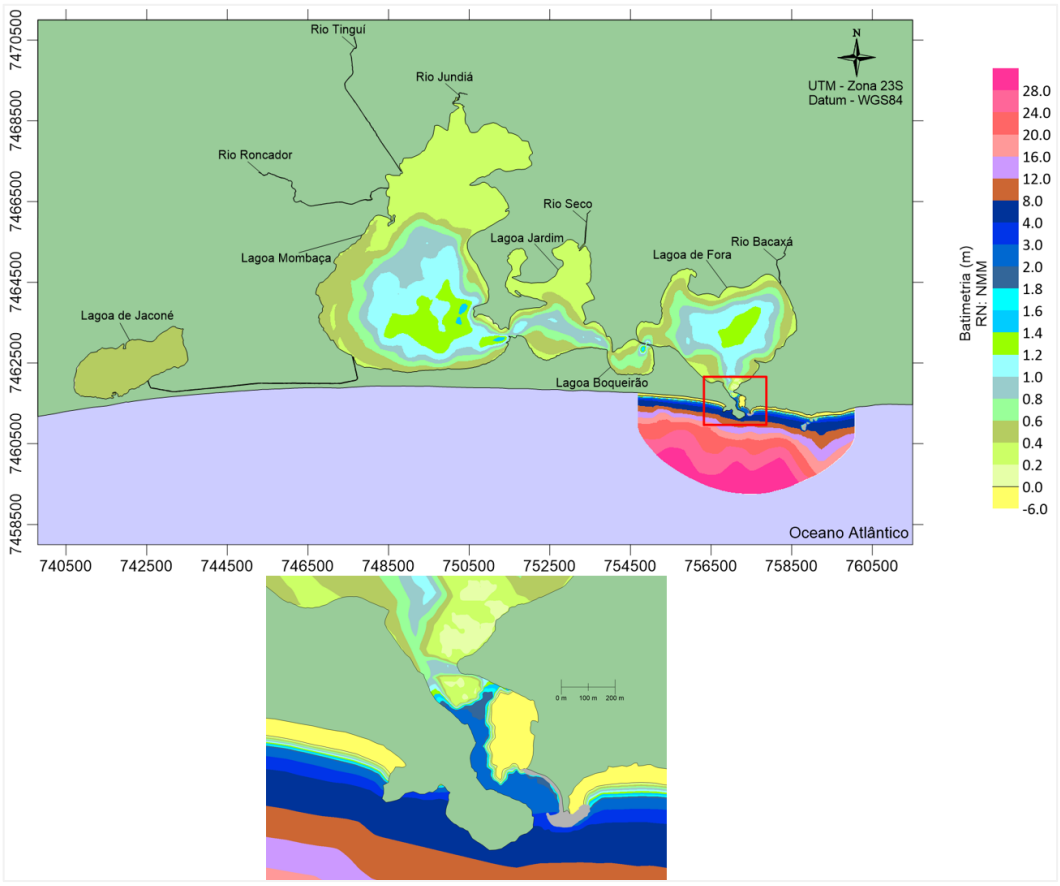
Figura 21 - Perfis topográficos de praia e caracterização da dinâmica do arco praial Jaconé-Saquarema.



Fonte: (Dutra et al., 2022)

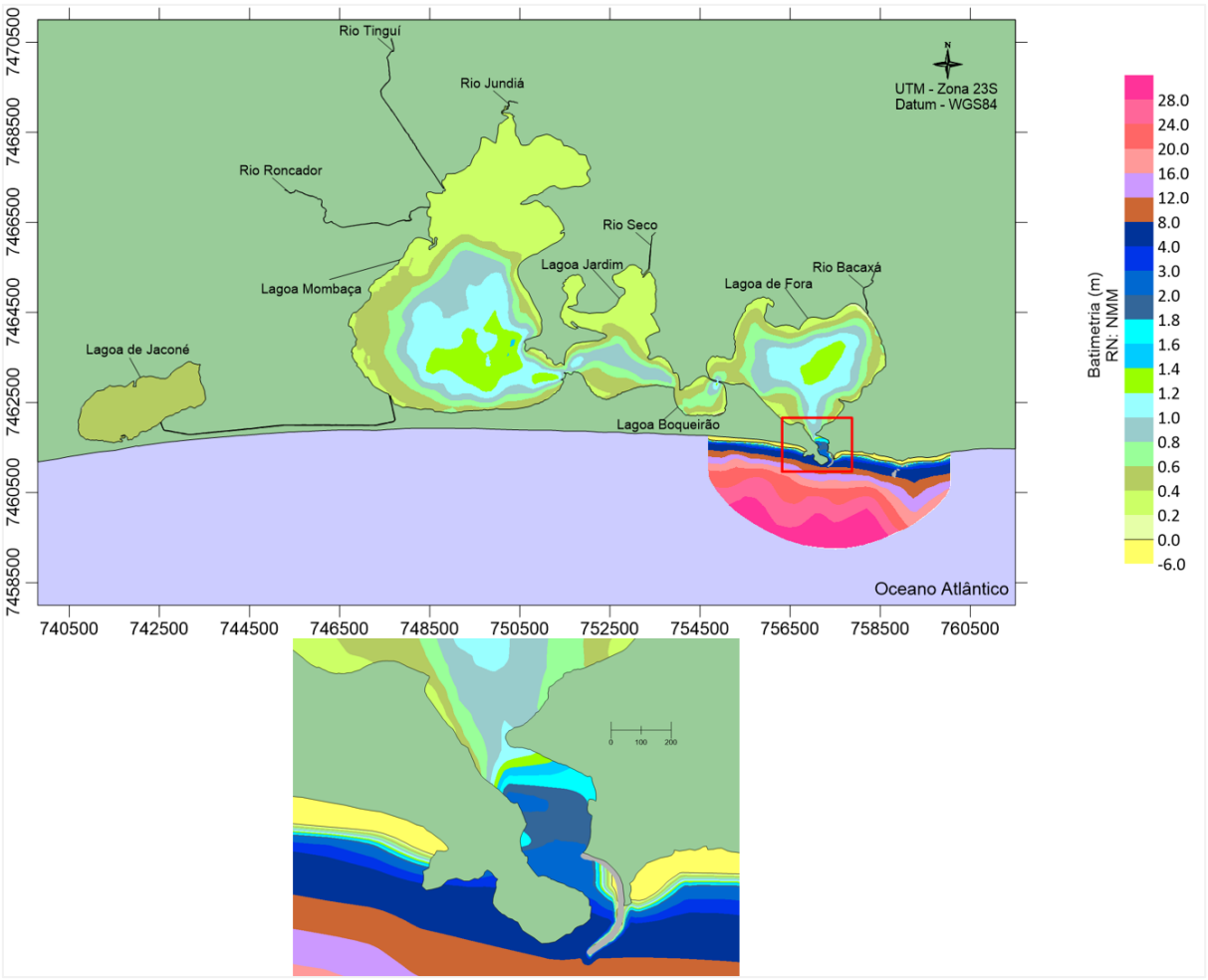
A partir destes dados gerou-se o mapa batimétrico da Figura 22 para a situação atual do Sistema Lagunar de Saquarema.

Figura 22 - Contornos Batimétricos do Sistema Lagunar de Saquarema, com destaque para a região do Canal da Barra Franca.



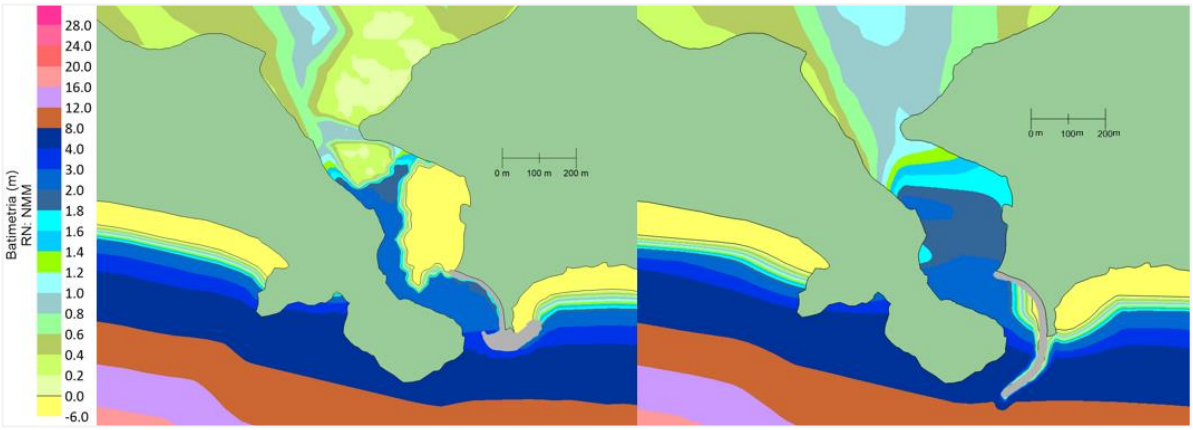
Para o cenário de projeto 1 as alterações em relação à situação atual foram o aumento da profundidade para 3 metros no interior do canal, com base no relatório apresentado no EIA da Barra Franca e a representação do molhe guia-corrente adequado, conforme ilustra a Figura 23.

Figura 23 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 1, com destaque para a região do Canal da Barra Franca.



A Figura 24 mostra a batimetria da região do canal da Barra Franca para os dois cenários.

Figura 24 - Batimetria da região da Barra Franca. à esquerda o cenário de situação atual e à direita a batimetria da região utilizada nos cenários de projeto.



Além das mudanças no Canal da Barra Franca os cenários de projeto 2, 3 e 4 também contam com as novas conexões com o mar, como ilustram a Figura 25, a Figura 26 e a Figura 27, respectivamente.

Figura 25 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 2, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta.

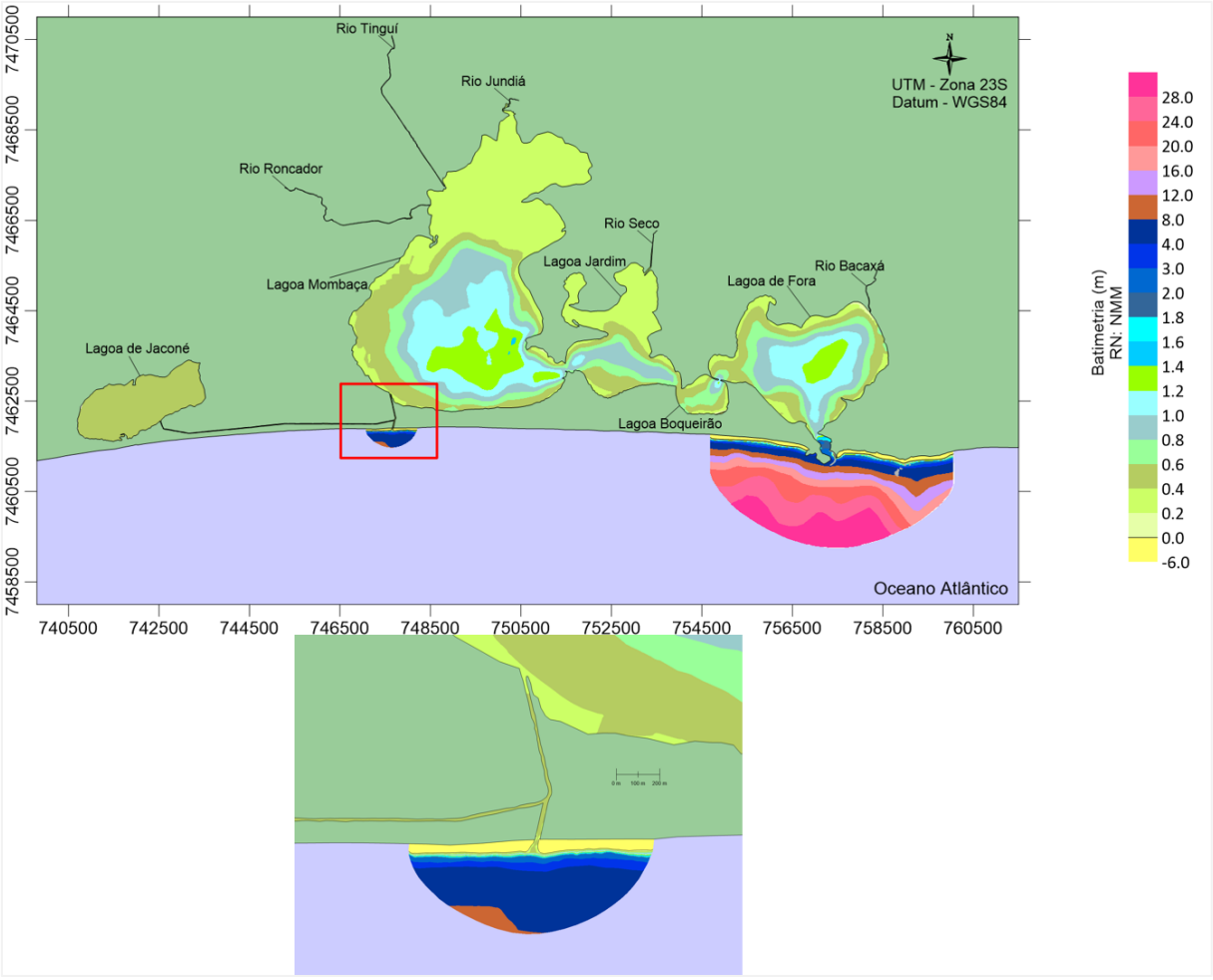


Figura 26 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 3, com destaque para a nova conexão com o oceano proposta.

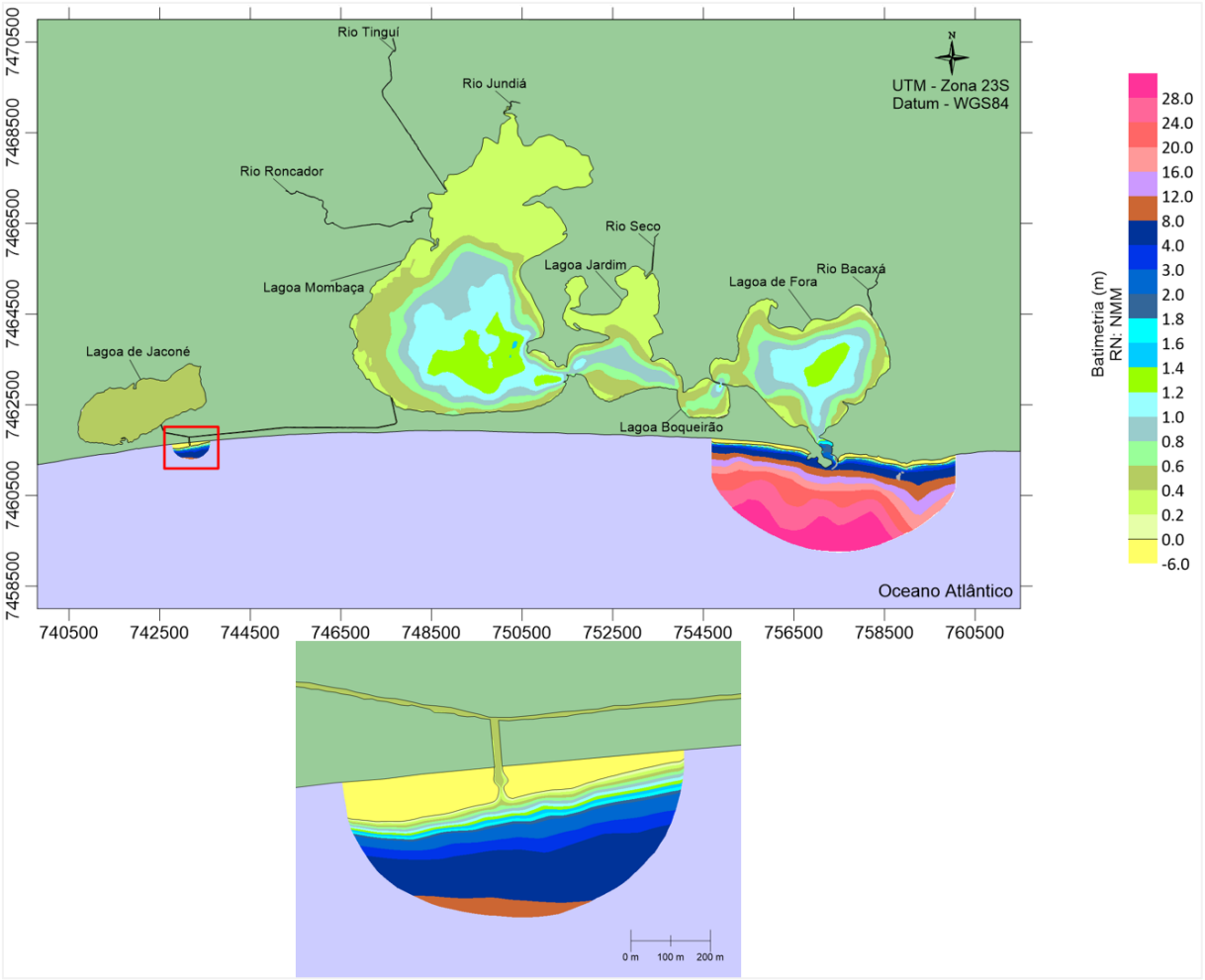
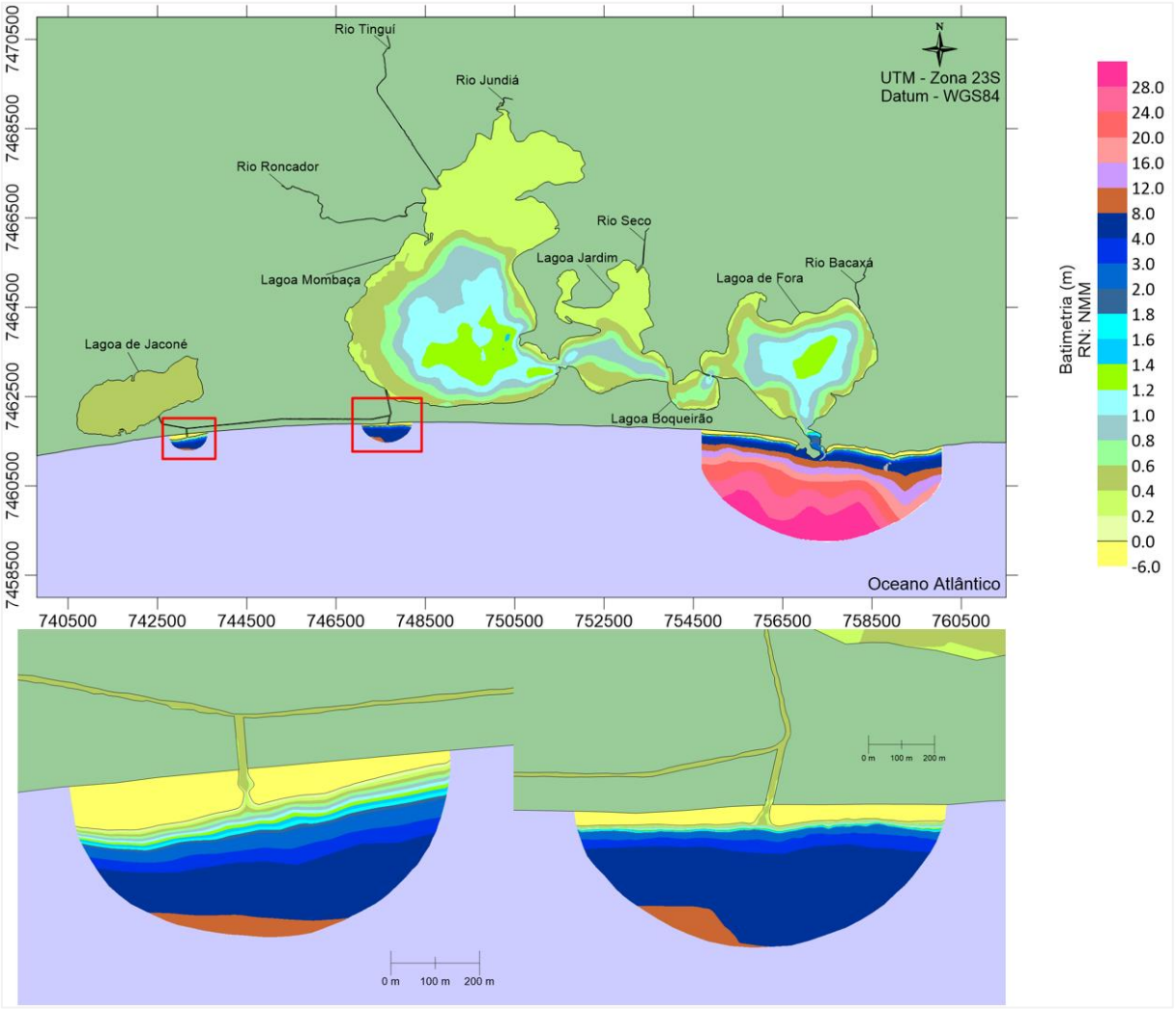


Figura 27 - Contornos Batimétricos do Cenário de Projeto 4, com destaque para as duas novas conexões com o oceano propostas.



4.5.2 Marés

A maré astronômica foi obtida a partir de constantes harmônicas do modelo *Finite Element Solution 2014* (FES2014), para o ponto exibido na Figura 28. As principais constantes estão dispostas na Tabela 2. A curva de maré prevista em torno do nível médio do mar para o mês de janeiro de 2023, utilizando as contantes obtidas, pode ser visualizada na Figura 29.

Aplicou-se também para os nós da fronteira aberta uma diferença de fase proporcional a diferença de fase entre o ponto 1, de mesma longitude da Estação Maregráfica da Ilha Fiscal, e o ponto 2, de mesma longitude da Estação Maregráfica

da Ilha do Forno, em relação a maior constante (M2), identificados na Figura 30. Essa diferença

Figura 28 - Ponto de Obtenção de Constantes Harmônicas pelo FES.

Tabela 2 - Principais Constantes Harmônicas Obtidas com o FES.

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (grau)
M2	44714	0.30	78.31
S2	43200	0.16	85.79
O1	92950	0.10	86.63
K1	86164	0.06	145.38
K2	43082	0.05	79.85
N2	45570	0.04	113.95
Q1	96726	0.03	62.93
M4	22357	0.02	18.66
P1	86637	0.02	133.96
mu2	46338	0.02	102.58
MN4	22569	0.01	334.84
T2	43259	0.01	86.36
2N2	46459	0.01	133.99
Mf	1180292	0.01	339.44
J1	83155	0.01	158.28
L2	43890	0.01	74.77
S1	86400	0.01	115.03
MS4	21972	0.01	65.49
nu2	45454	0.01	115.60

Figura 29 - Curva de Maré Prevista, em torno do Nível Médio do Mar, para janeiro de 2023.

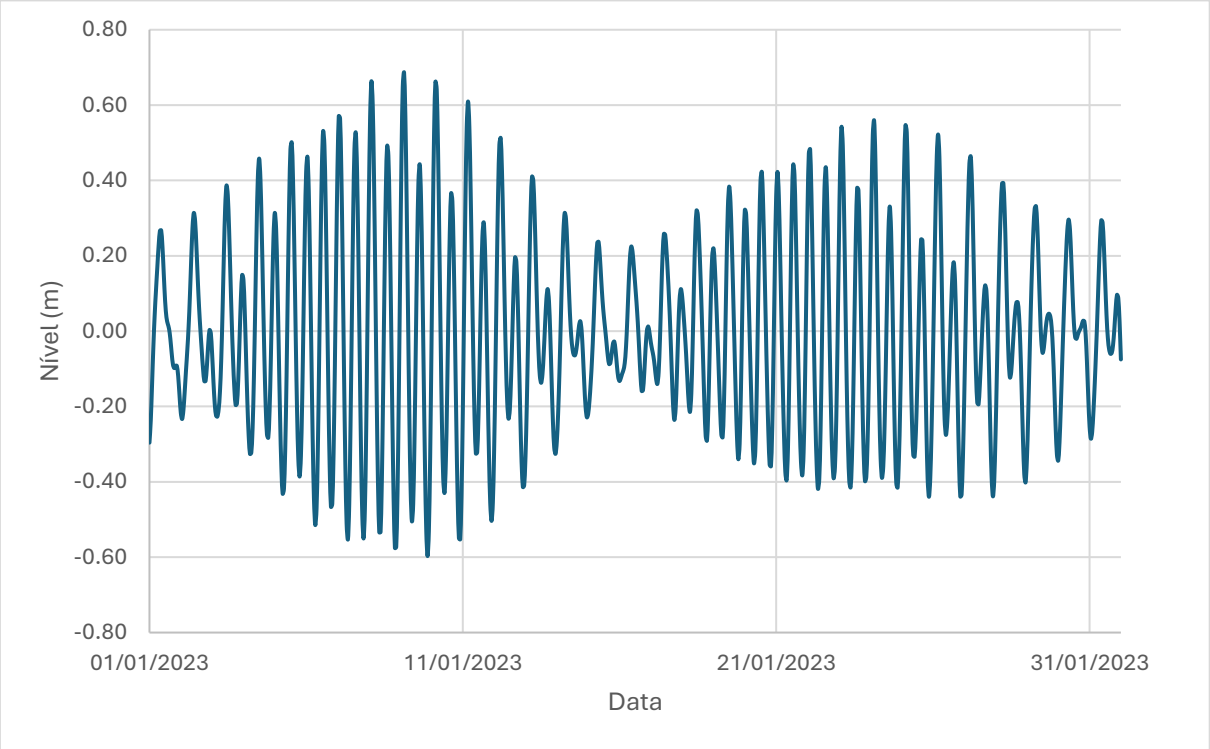
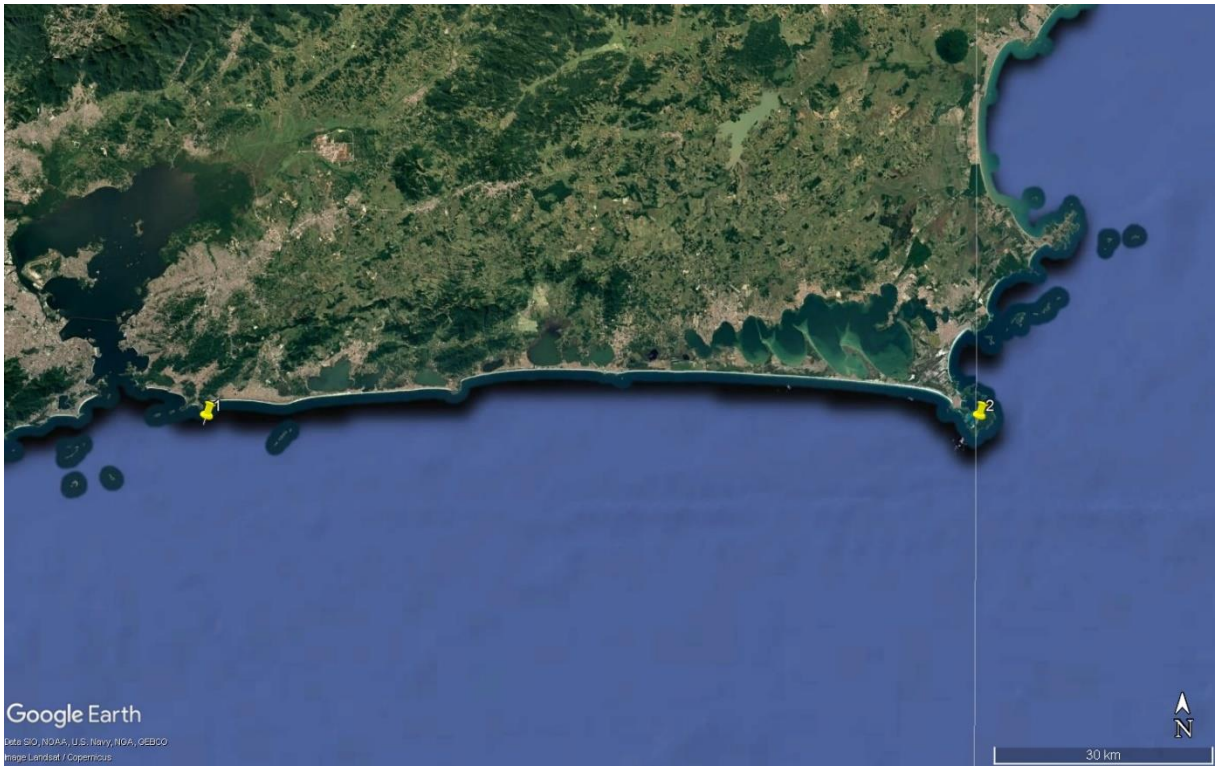


Figura 30 - Pontos 1 e 2 Utilizados para o Cálculo da Diferença de Fase Proporcional para os Nós da Fronteira Aberta.



4.5.3 Vazões fluviais

Os dados de entrada utilizados foram retirados do EIA da Barra Franca (Wasserman *et al.*, 2000), conforme disposto na Tabela 3, enquanto a localização de cada um desses afluentes pode ser observada na Figura 31.

Tabela 3 - Vazões fluviais do Sistema Lagunar de Saquarema.

Afluente	Vazão (m^3/s)
Roncador	0.49
Tinguí	0.44
Jundiá	0.86
Seco	0.22
Bacaxá	0.24

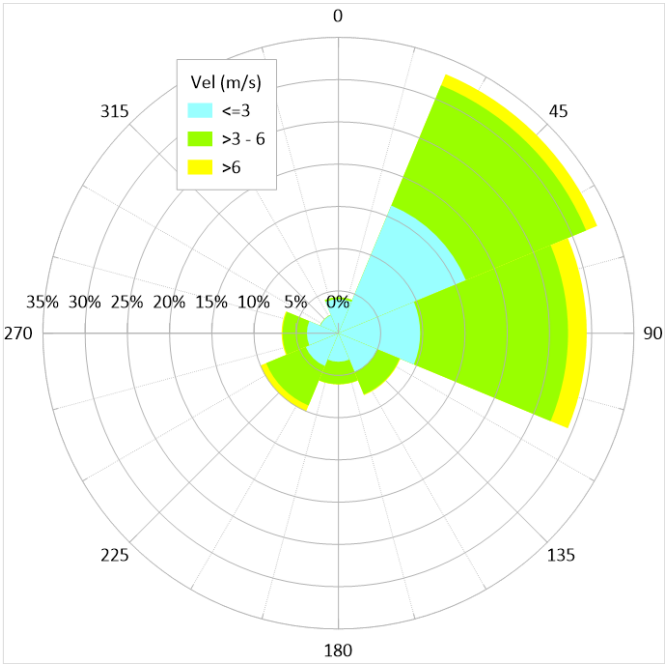
Figura 31 - Afluentes que desembocam no Sistema Lagunar de Saquarema.

4.5.4 Vento

Os dados de vento do ano de 2023 utilizados como entrada foram obtidos através do modelo de reanálise ERA5 (C3S, 2018) para o ponto destacado na Figura 32, enquanto a Figura 33, discretiza a direção e intensidade dos ventos deste no ano de 2023.

Figura 32 - Ponto de Obtenção dos Dados de Vento usados como entrada para os Modelos Hidrodinâmicos.

Figura 33 - Rosa dos Ventos dos Dados de 2023 utilizados como entrada do Modelos Hidrodinâmicos do Sistema Lagunar de Saquarema.



Pode-se observar forte incidência de ventos de NE e E, comuns na área de estudo e responsáveis pelo empilhamento das águas em regiões mais urbanizadas.

4.5.5 Sedimento de fundo

Definiu-se um valor de rugosidade de fundo de 0.03 m, uniforme para todo o domínio de modelagem, baseado nos dados do EIA da Barra Franca (Wasserman *et al.*, 2000), que define os sedimentos de fundo das lagoas do sistema como areia fina.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos do modelo de situação atual e os cenários de projeto realizados para os pontos destacados na Figura 34, onde foi realizada a simulação para o mês de janeiro de 2023, com a aplicação de ciclos para os modelos de transporte lagrangeano e de transporte euleriano. Já os resultados de corrente serão apresentados com base nas séries de nível apresentadas na Figura 35, onde são destacados dois momentos, uma preamar às 00:00 do dia 03/01/23 e uma baixa-mar às 00:00 do dia 13/01/23.

Figura 34 - Pontos Selecionados para Geração de Resultados das Lagoas no Sistema Lagunar de Saquarema.

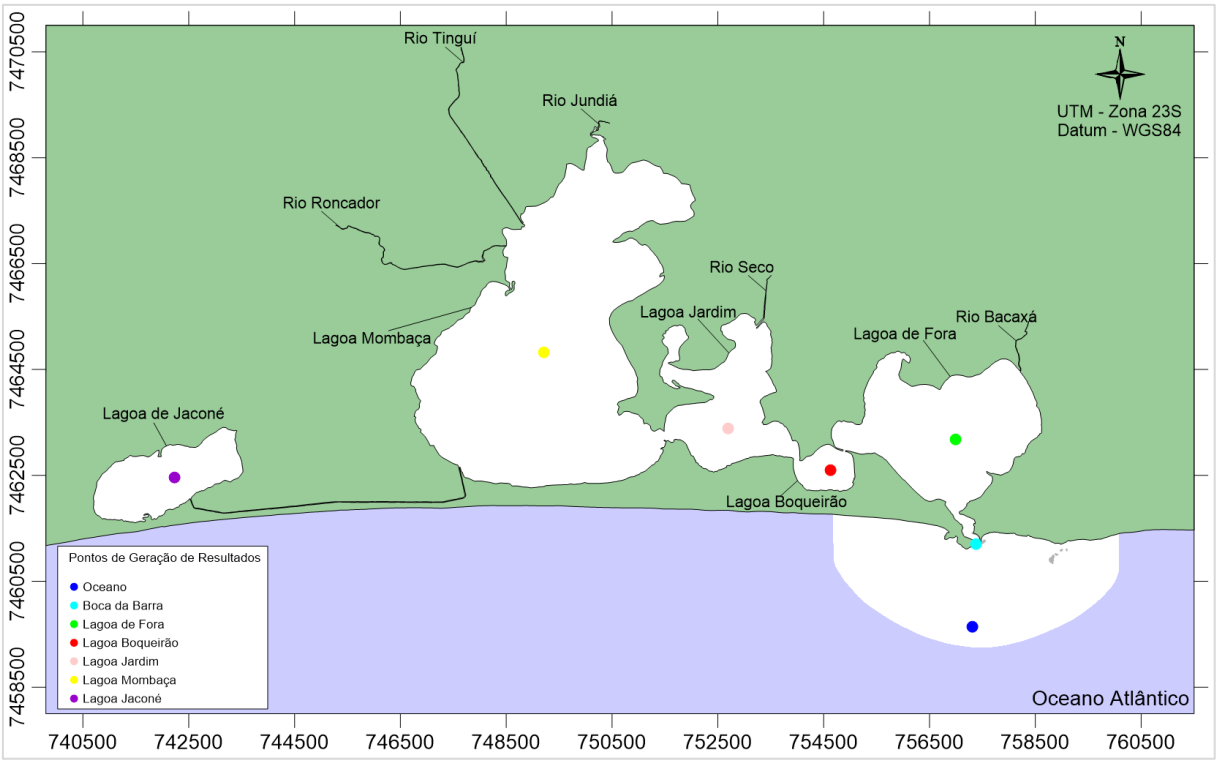
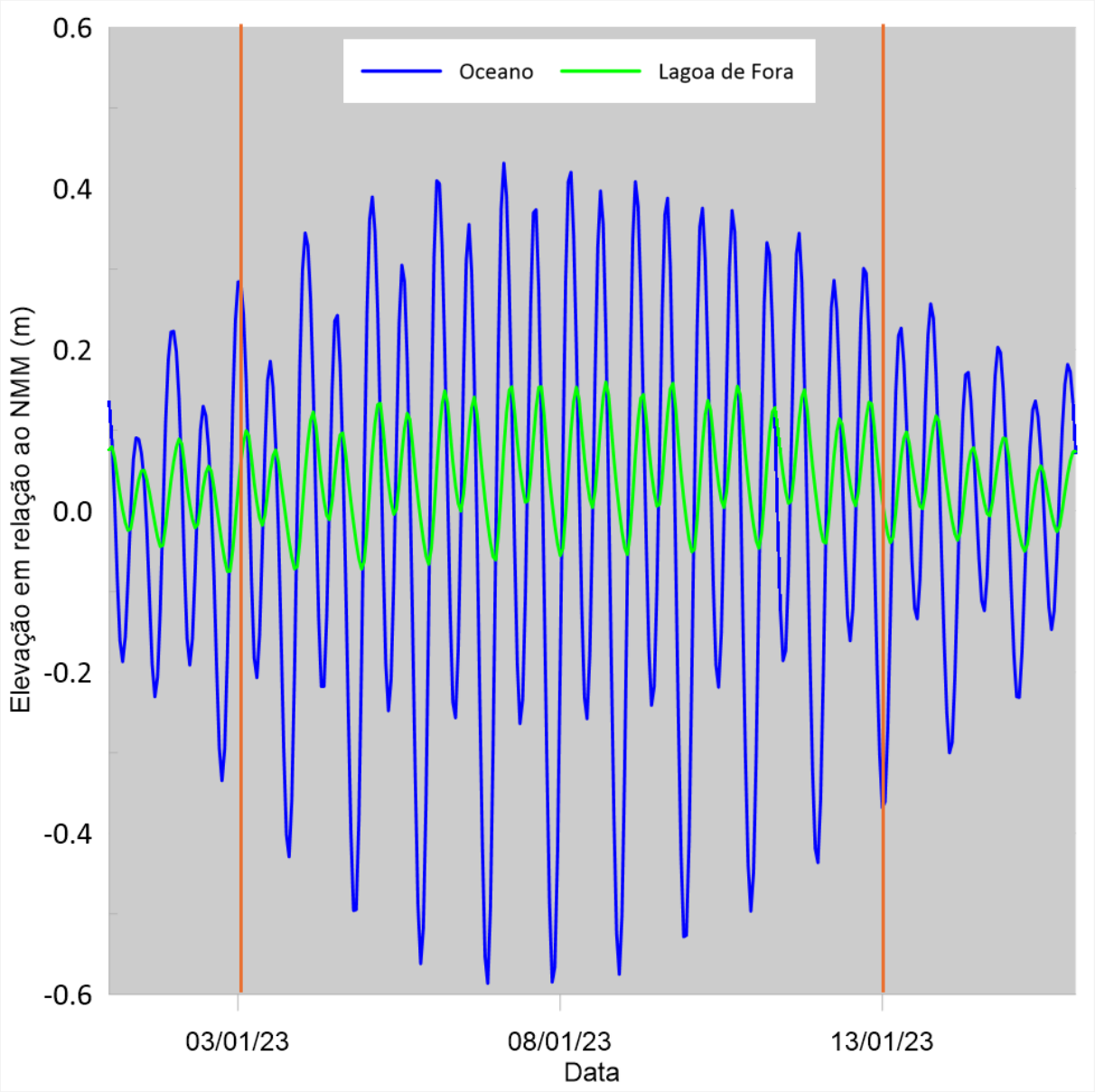


Figura 35 - Séries de Nível em relação ao NMM da região marítima de Saquarema em vermelho e da Lagoa de Fora em azul claro, em azul escuro destaca-se uma preamar no dia 03/01/23 e uma baixa-mar no dia 13/01/23.



5.1 SITUAÇÃO ATUAL

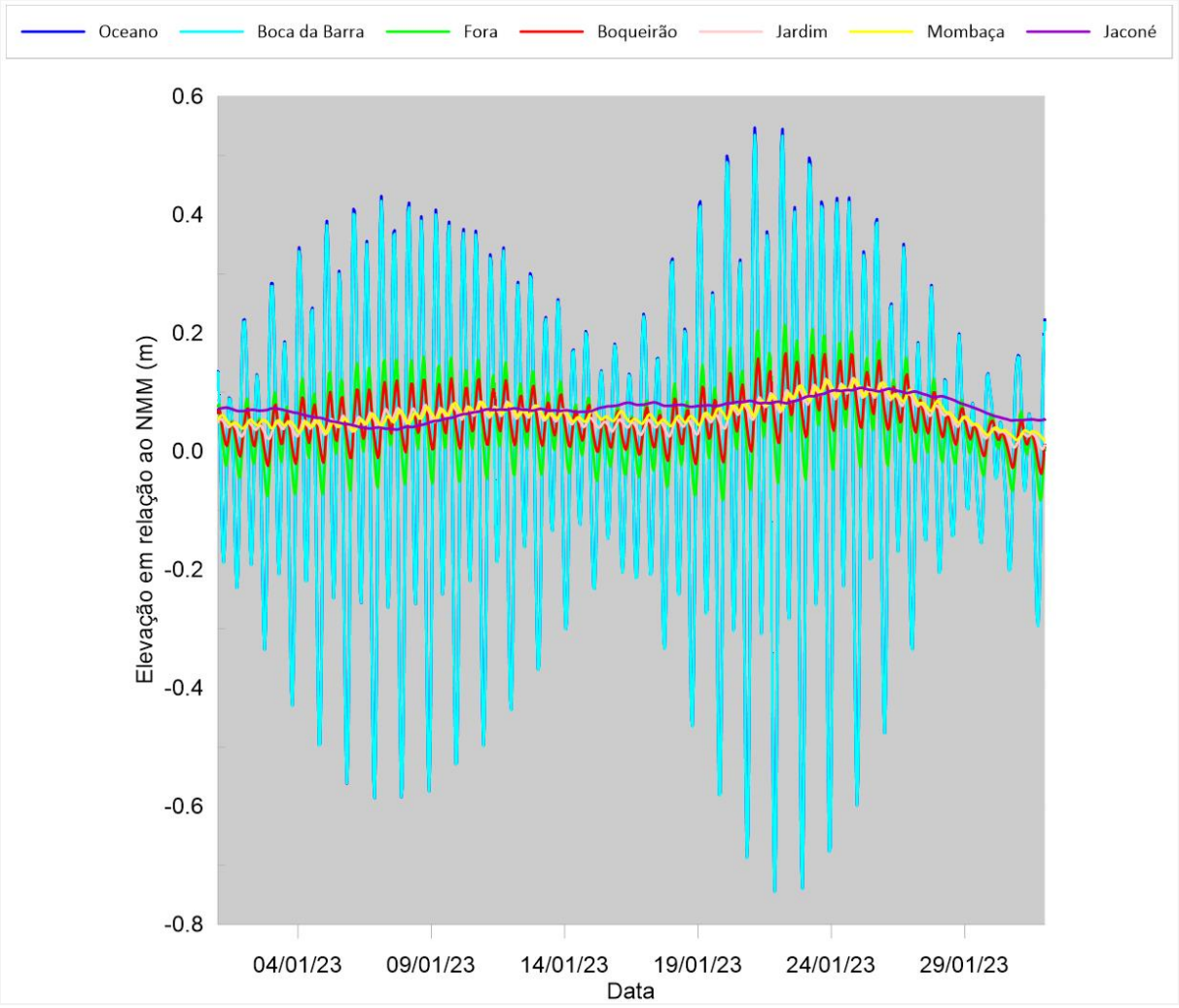
Este item apresenta os resultados obtidos para o primeiro cenário de modelagem realizado, de situação atual, no qual o Canal da Barra Franca encontra-se praticamente obstruído devido ao forte assoreamento, além da construção irregular de molhe guia-corrente.

5.1.1 Resultados Hidrodinâmicos

A Figura 36 mostra uma série de nível em relação ao NMM para os pontos destacados na Figura 34, é possível observar uma superposição entre as séries para a região do Oceano Atlântico e Boca da Barra com cotas de sizígia de 0.55 m na preamar e de -0.74 m na baixa-mar, ambas em relação ao NMM.

Pode-se observar um forte amortecimento dos efeitos de maré já na Lagoa de Fora, mais próxima do sistema lagunar ao oceano, em que as amplitudes ficam entre 0.21 m e -0.08 m de máxima e mínima respectivamente. Esse amortecimento torna-se cada vez mais intenso, sendo quase imperceptível na Lagoa de Jaconé.

Figura 36 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de Situação Atual para o mês de janeiro de 2023.



A Figura 37 e a Figura 38 apresentam respectivamente resultados de velocidade de correntes para os instantes de preamar e baixa-mar destacados na Figura 35.

O Sistema Lagunar de Saquarema não apresenta resultados de corrente muito expressivos na região do interior de suas lagoas, onde pode-se observar maior intensidade de correntes é na região do Canal da Barra Franca, onde na preamar destacada encontra-se uma corrente máxima de módulo de 0.93 m/s, enquanto na baixa-mar registra-se uma corrente máxima de módulo de 1.20 m/s.

Figura 37 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o Sistema Lagunar de Saquarema com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 0.93 m/s.

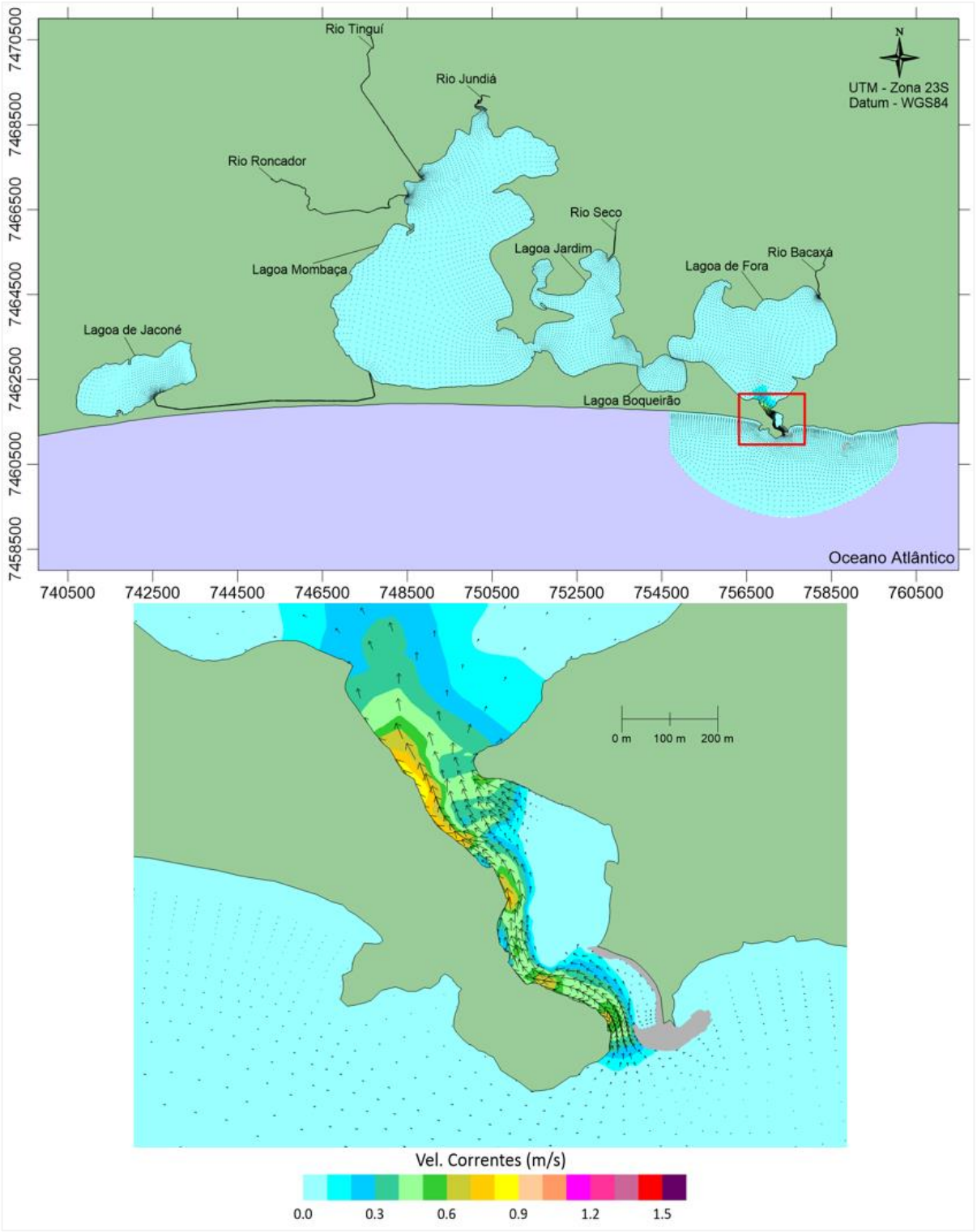
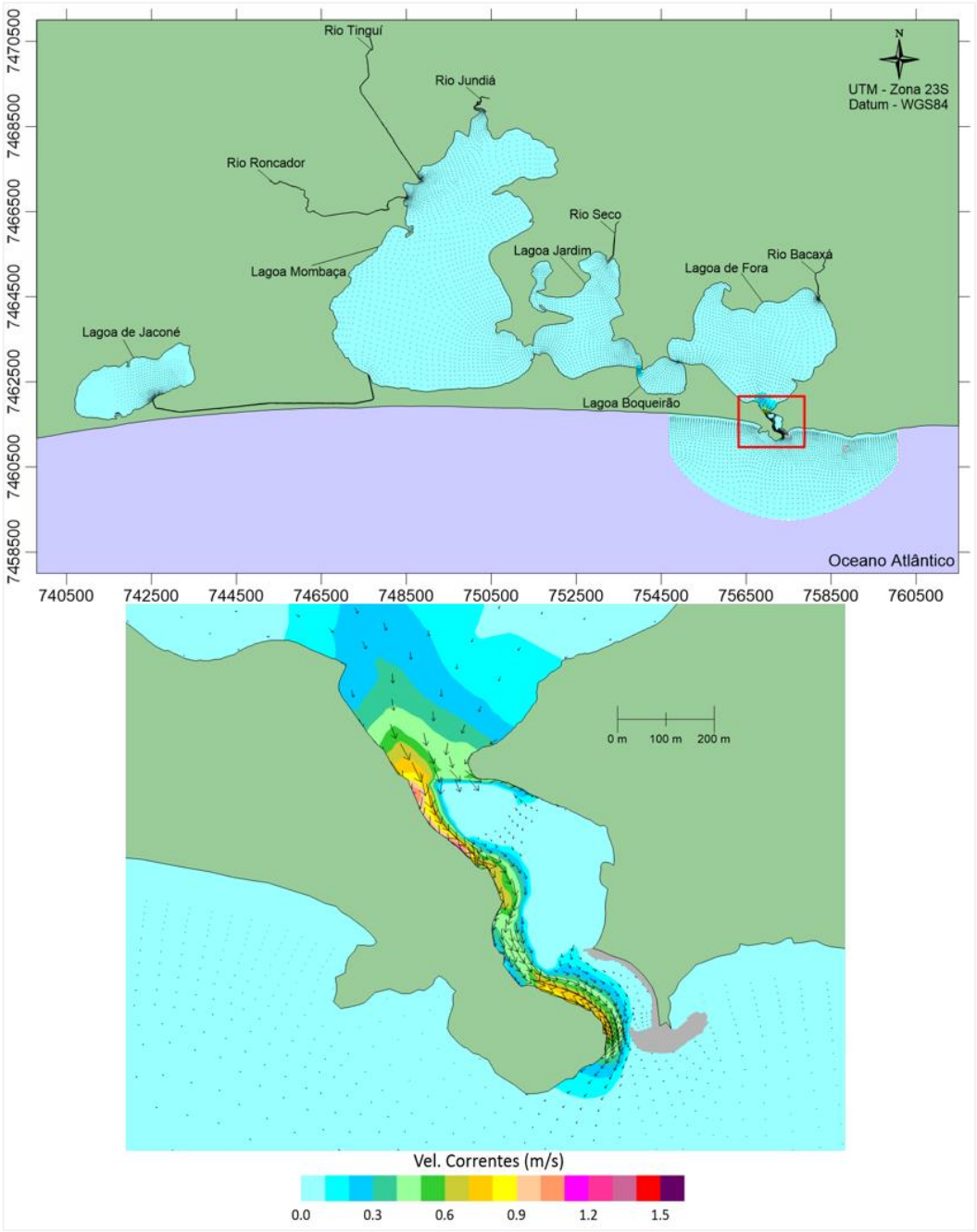


Figura 38 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o Sistema Lagunar de Saquarema com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.20 m/s.



5.1.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano

A Figura 39 mostra o instante inicial do modelo de transporte lagrangeano para o cenário atual. A Figura 40, a Figura 41 e a Figura 42 mostram, respectivamente, resultados do modelo após 30, 60 e 90 dias.

Figura 39 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual.

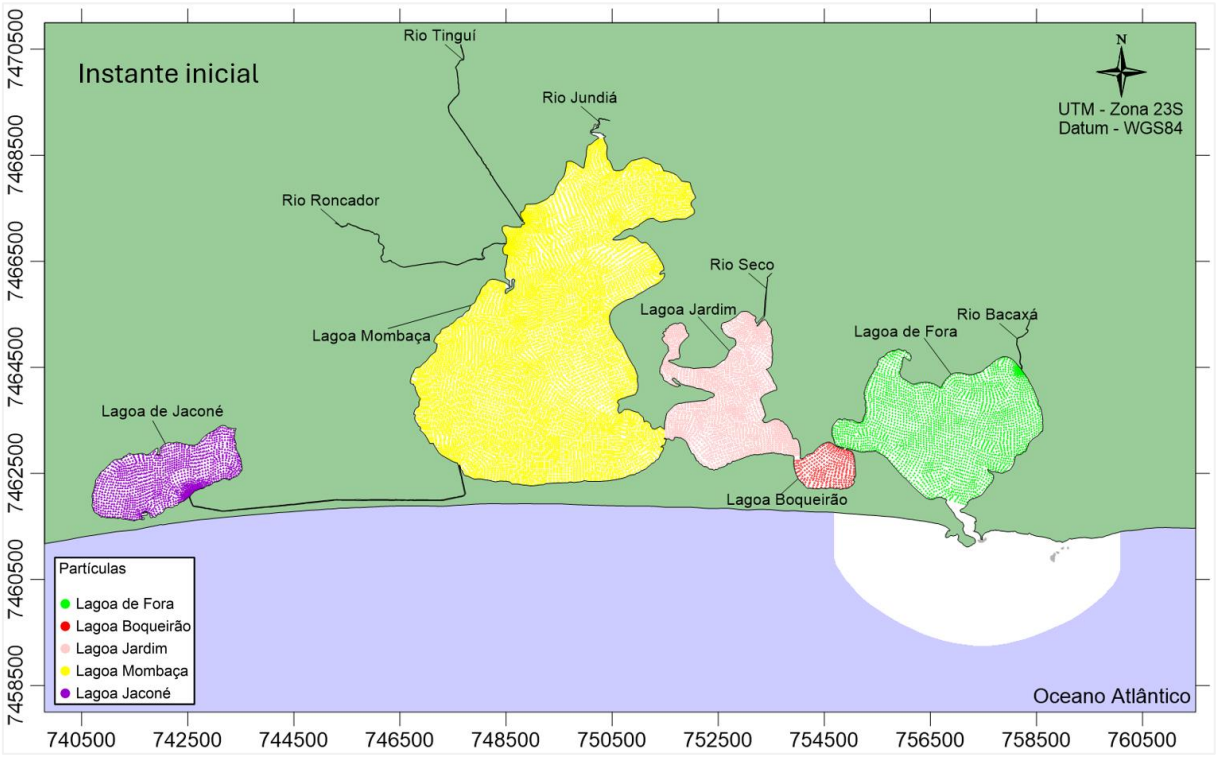


Figura 40 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual 30 dias depois do instante inicial.

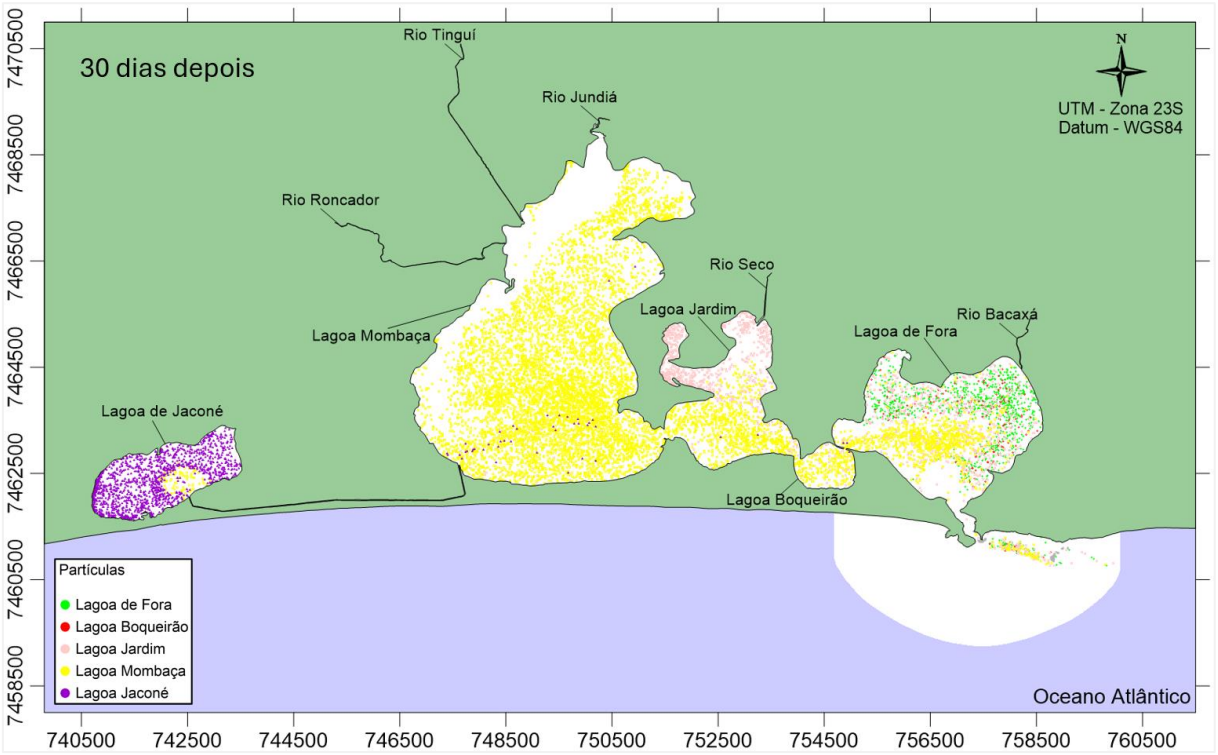


Figura 41 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual 60 dias depois do instante inicial.

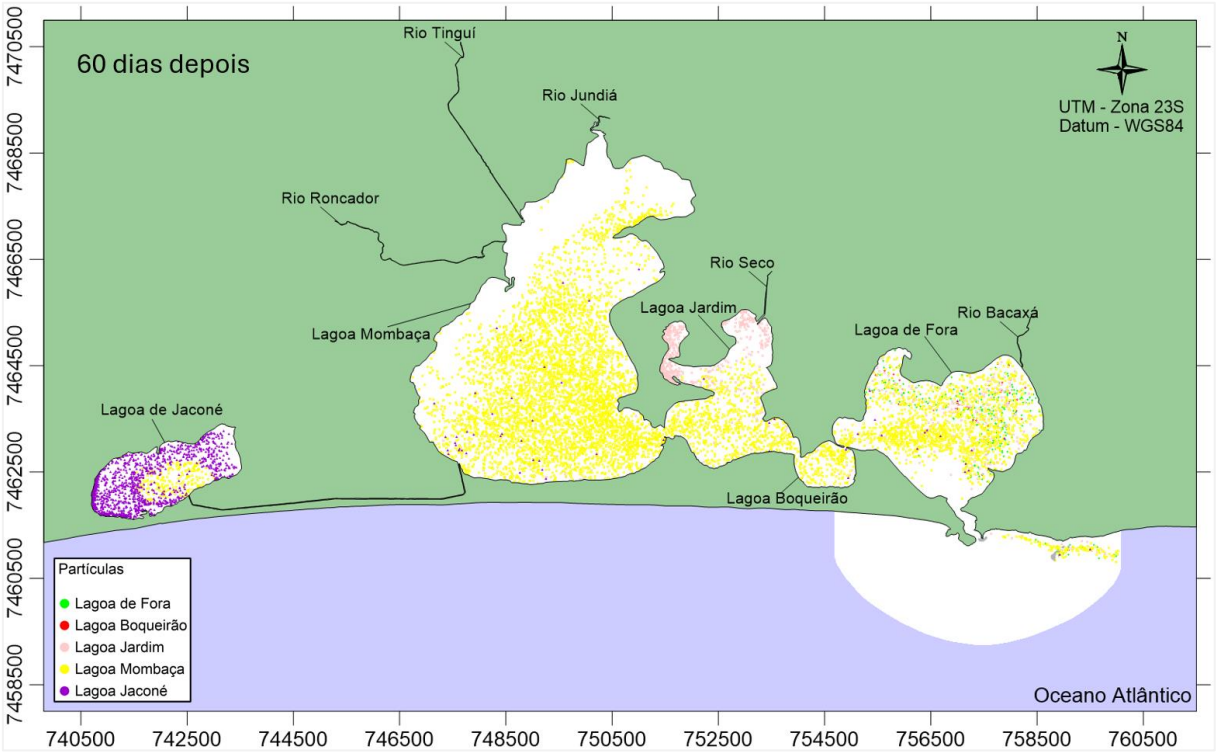
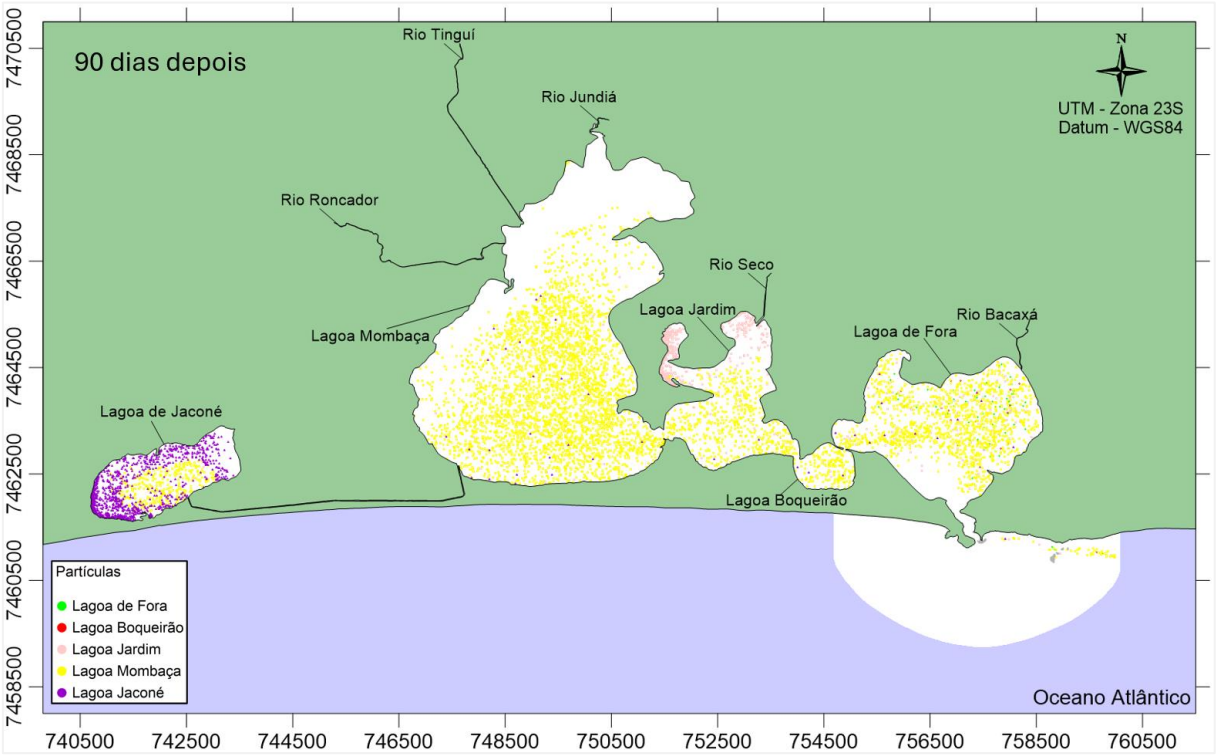


Figura 42 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de situação atual 90 dias depois do instante inicial.



É possível observar que para a situação atual do Sistema Lagunar de Saquarema há pouquíssima troca entre as massas d'água. A lagoa de Fora, ainda que com o forte assoreamento do Canal da Barra Franca, é a única que parece apresentar recebimento de água do mar, além de grande parcela de sua massa de água existente no início da simulação ser escoada para o oceano.

A lagoa Mombaça, maior em extensão do sistema, recebe quase que exclusivamente aportes fluviais, porém ela é o principal corpo responsável pelo movimento de massas de água no sistema, é possível notar que todas as outras lagoas recebem aportes dela.

As massas de água que a lagoa Boqueirão apresentava no início da simulação são quase que em sua totalidade escoadas para o oceano, o mesmo acontece com a lagoa Jardim, com exceção de algumas regiões onde as águas ficam enclausuradas.

O caso mais crítico do sistema é a lagoa de Jaconé, que troca apenas uma pequena parcela de suas águas com a lagoa Mombaça, enquanto a maior parte se mantém em seu domínio.

5.1.3 Taxa de Renovação e Idade da Água

A Figura 43 apresenta os resultados de taxa de renovação das águas para pontos apresentados na Figura 34 para um período de 6 meses, onde é possível observar que há uma esperada redução nas taxas de renovação de água para as lagoas mais a montante do sistema.

É possível observar que a lagoa de Fora possui uma alta taxa de renovação de água, enquanto nas outras há uma grande redução. A lagoa Mombaça, ainda que seja uma das lagoas mais a montante do sistema, ainda possui uma renovação maior que as lagoas Boqueirão e Jardim em virtude do recebimento de 3 aportes fluviais. A lagoa de Jaconé é a que apresenta as piores taxas, visto que suas águas se encontram estagnadas e sem grandes trocas.

Já a Figura 44 mostra resultados para idade da água do sistema, para o mesmo período, onde é possível observar estagnação em alguns pontos do sistema, como na lagoa de Jaconé, em que a idade de suas águas ultrapassa 50 dias.

Figura 43 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema em um período de 6 meses.

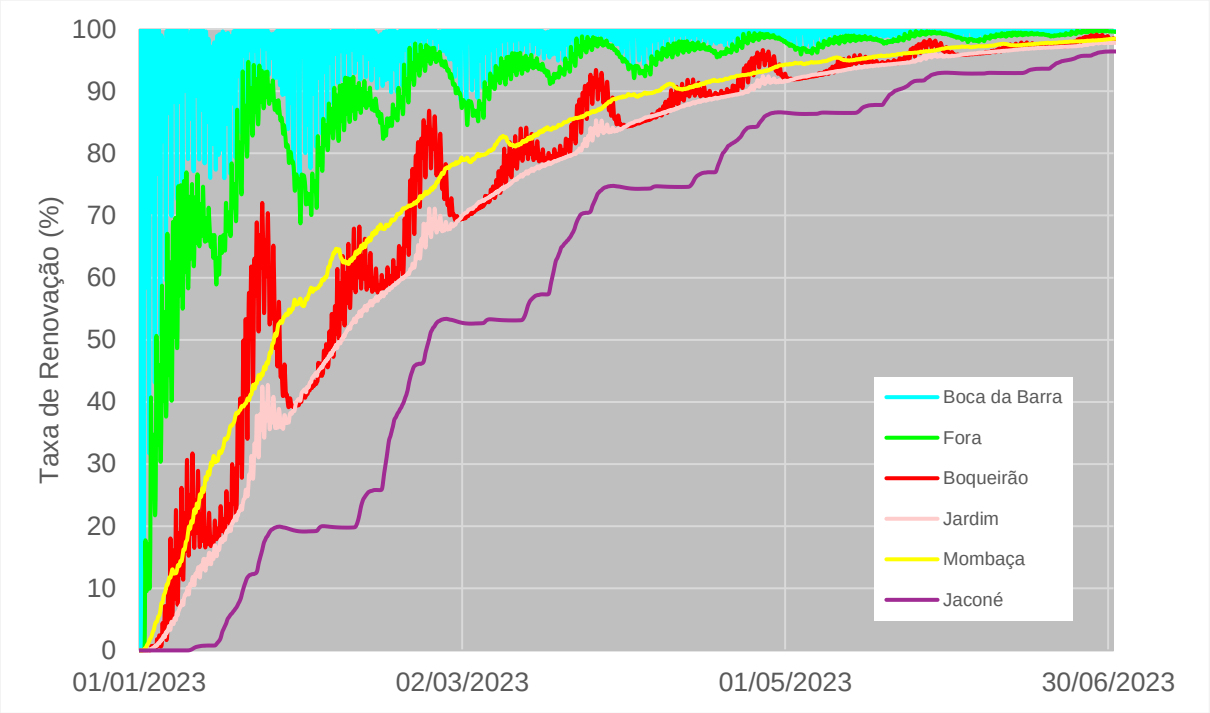
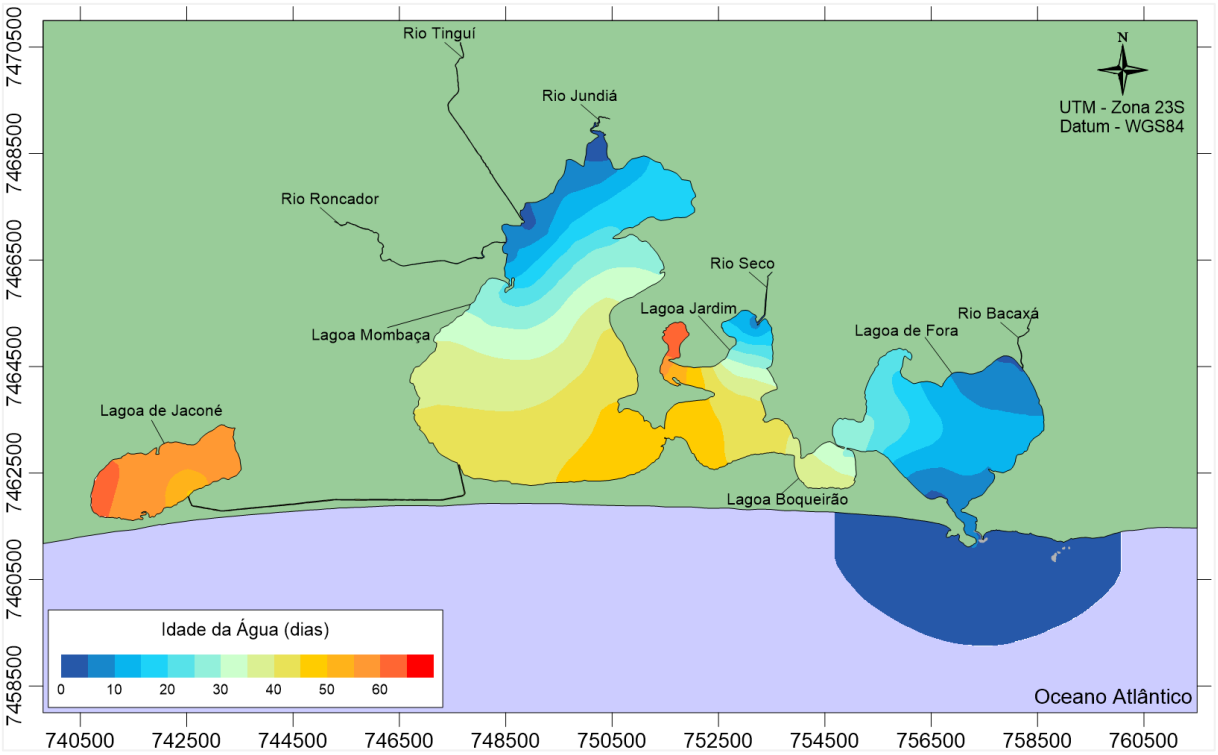


Figura 44 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema em um período de 6 meses.



5.2 CENÁRIO DE PROJETO 1

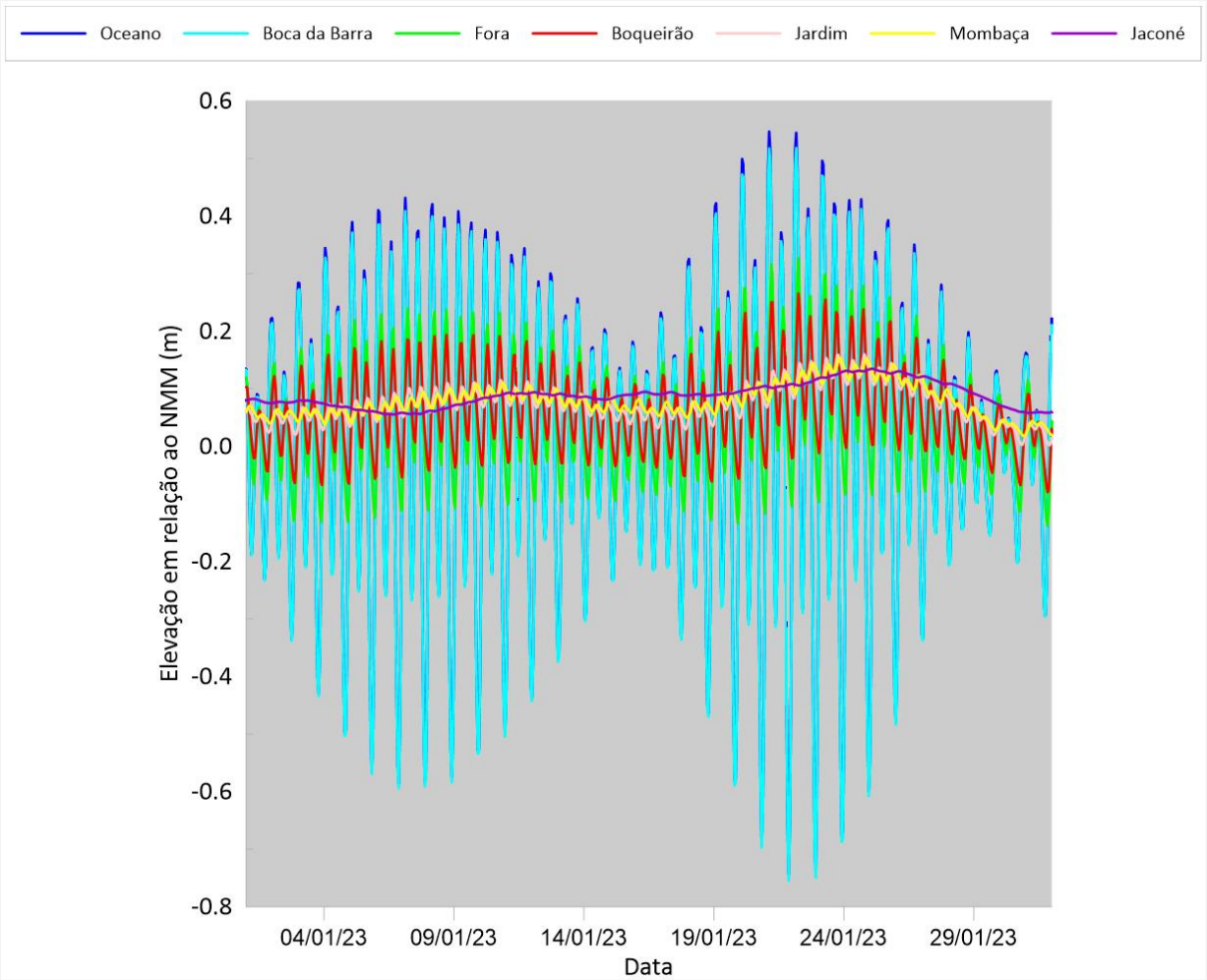
Este item apresenta os resultados obtidos para o cenário de projeto 1, onde o Canal da Barra Franca é desassoreado e um molhe guia-corrente adequado é implementado na região.

5.2.1 Resultados Hidrodinâmicos

A Figura 45 mostra uma série de nível em relação ao NMM para os pontos destacados na Figura 34, é possível observar uma superposição entre as séries para a região do Oceano Atlântico e Boca da Barra com cotas de sizígia de 0.55 m na preamar e de -0.74 m na baixa-mar, ambas em relação ao NMM.

Pode-se observar um aumento nas cotas de maré na Lagoa de Fora, mais próxima do sistema lagunar ao oceano, ficando entre 0.33 m e -0.14 m de preamar e baixa-mar respectivamente. Há também uma leve melhora na Lagoa Boqueirão, porém nas outras lagoas do sistema, os efeitos de maré ainda são bastante amortecidos.

Figura 45 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 1 para o mês de janeiro de 2023.



A Figura 46 e a Figura 47 apresentam respectivamente resultados de velocidade de correntes para os instantes de preamar e baixa-mar destacados na Figura 35.

Ocorreu um aumento no módulo de velocidade de correntes para este cenário, como esperado as maiores intensidades de correntes ocorrem na região do Canal da Barra Franca, onde na preamar destacada encontra-se uma corrente máxima de módulo de 1.38 m/s, enquanto na baixa-mar registra-se uma corrente máxima de módulo de 1.50 m/s.

Figura 46 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 1 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.38 m/s.

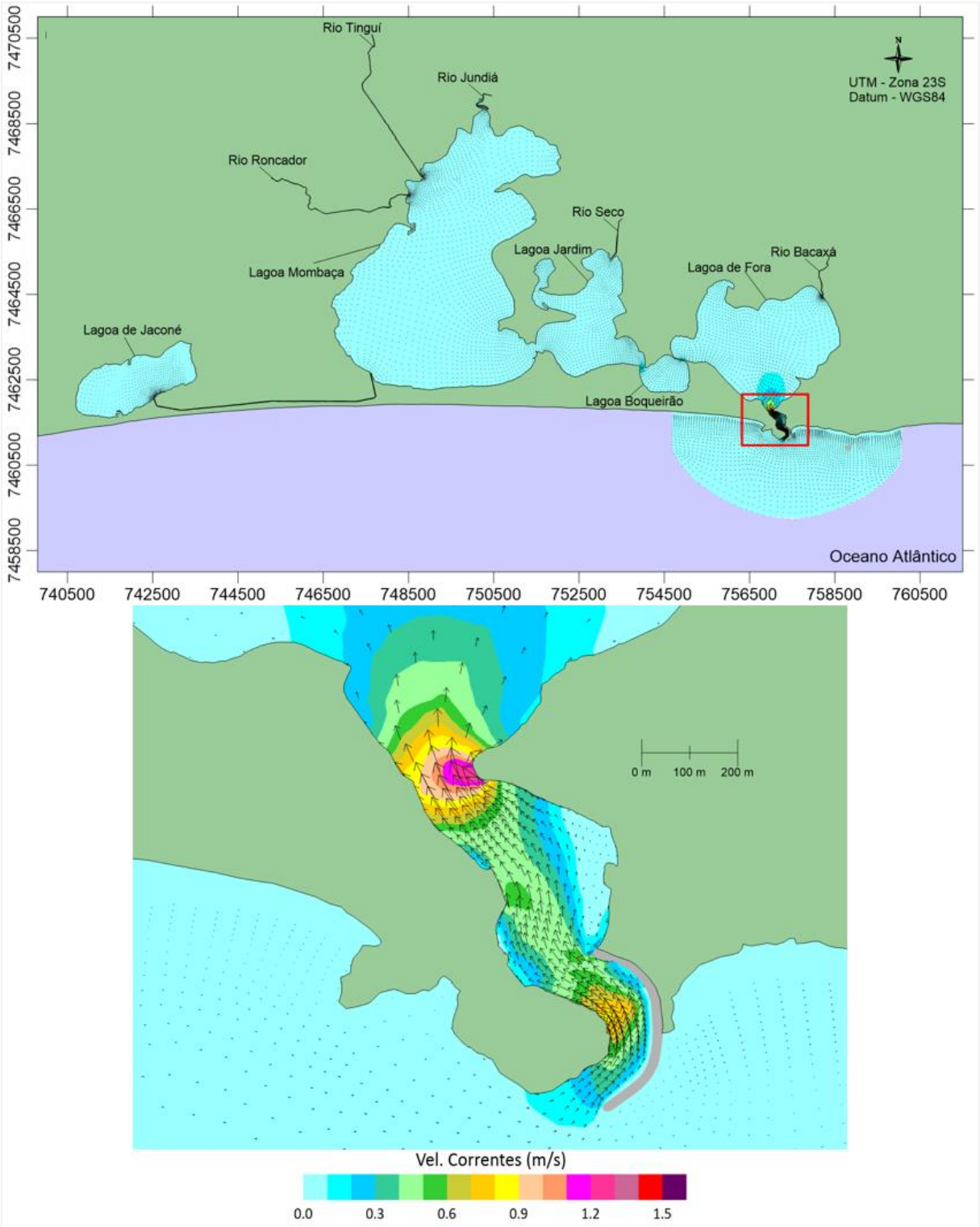
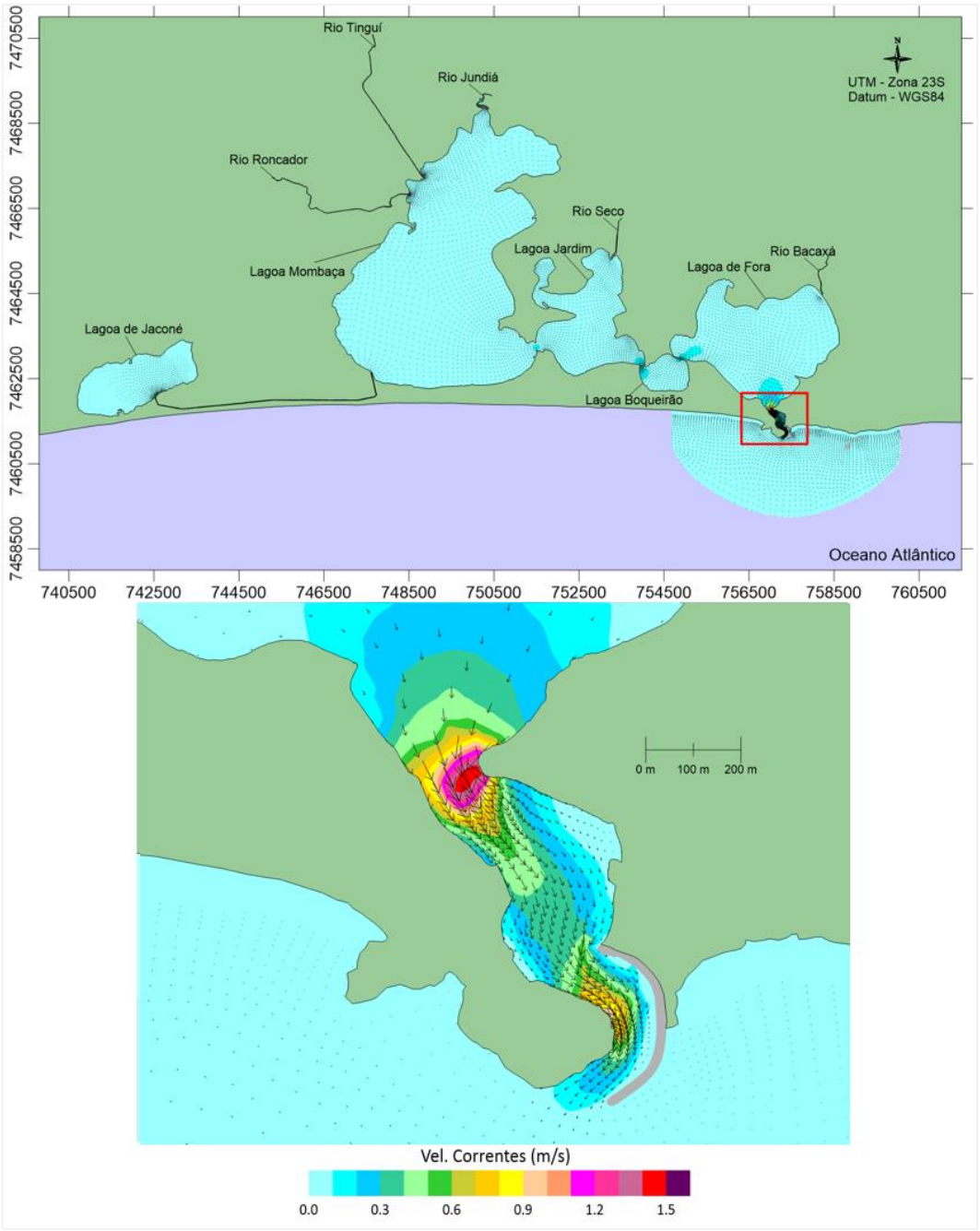


Figura 47 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 1 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.50 m/s.



5.2.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano

A Figura 48 mostra o instante inicial do modelo de transporte lagrangeano para o cenário atual. A Figura 49, a Figura 50 e a Figura 51 mostram, respectivamente, resultados do modelo após 30, 60 e 90 dias.

Figura 48 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1.

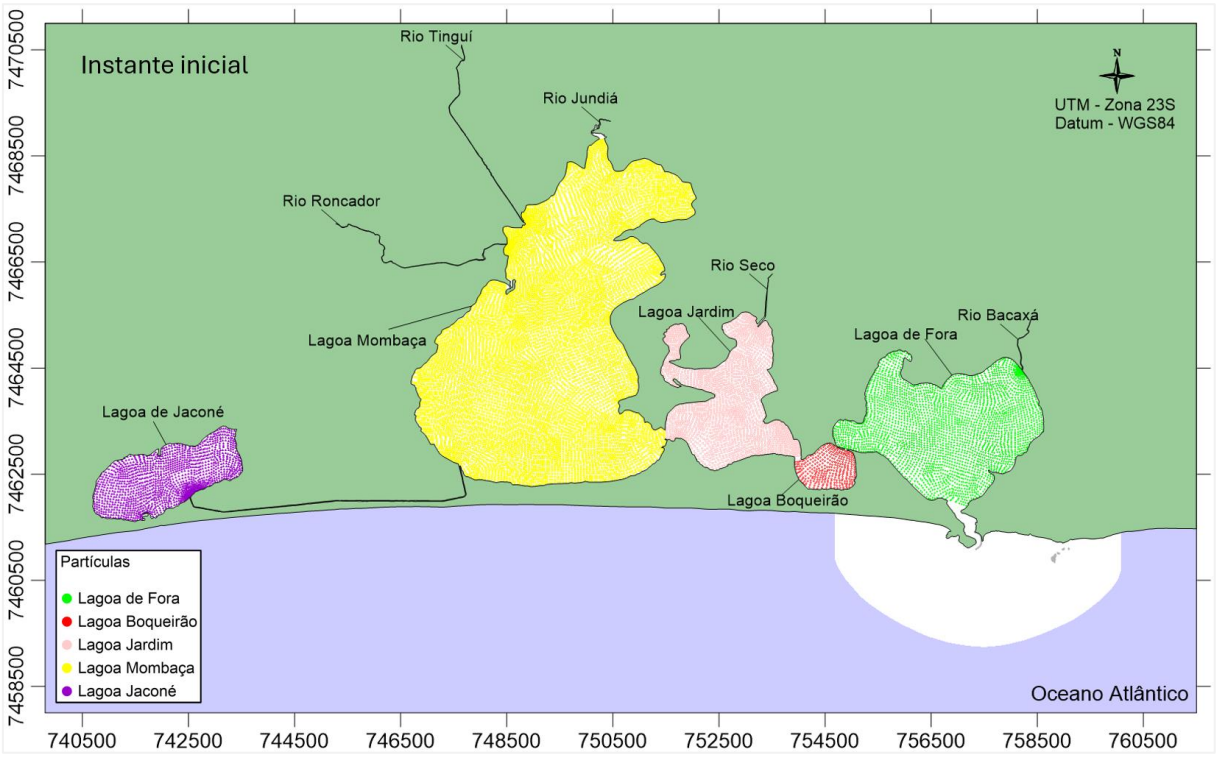


Figura 49 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1 depois de 30 dias do instante inicial.

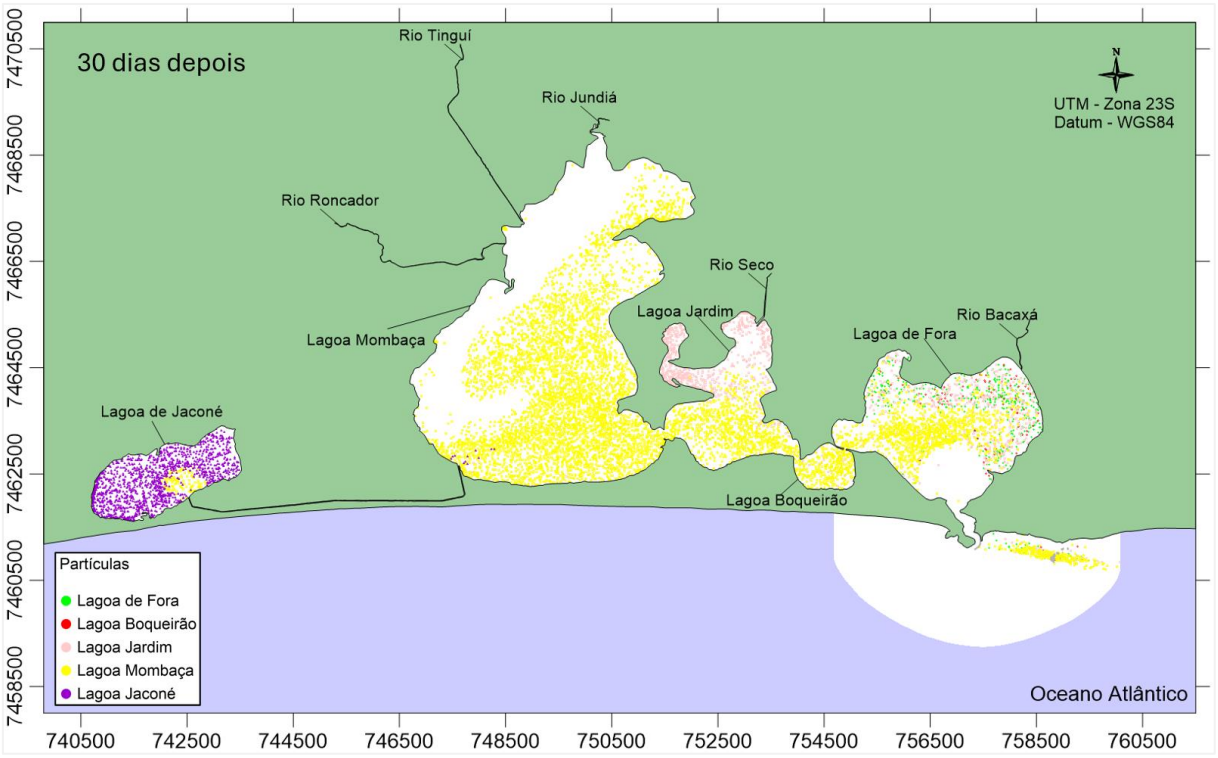


Figura 50 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1 depois de 60 dias do instante inicial.

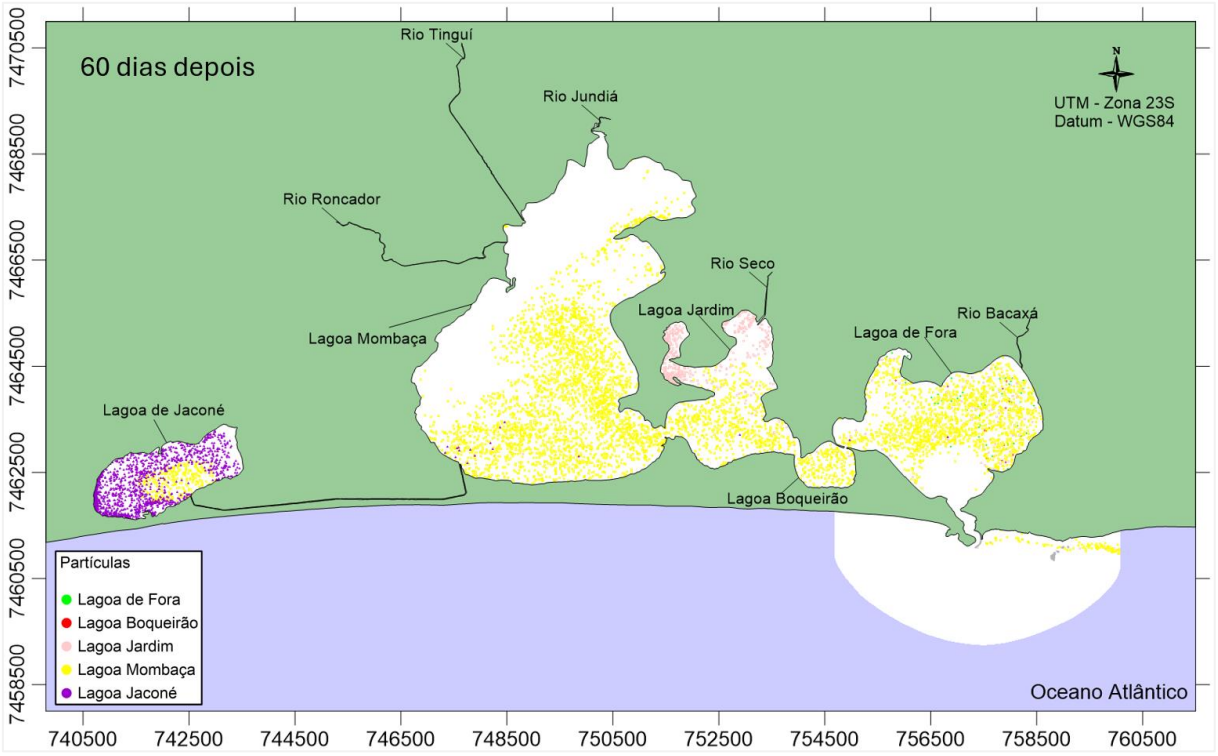
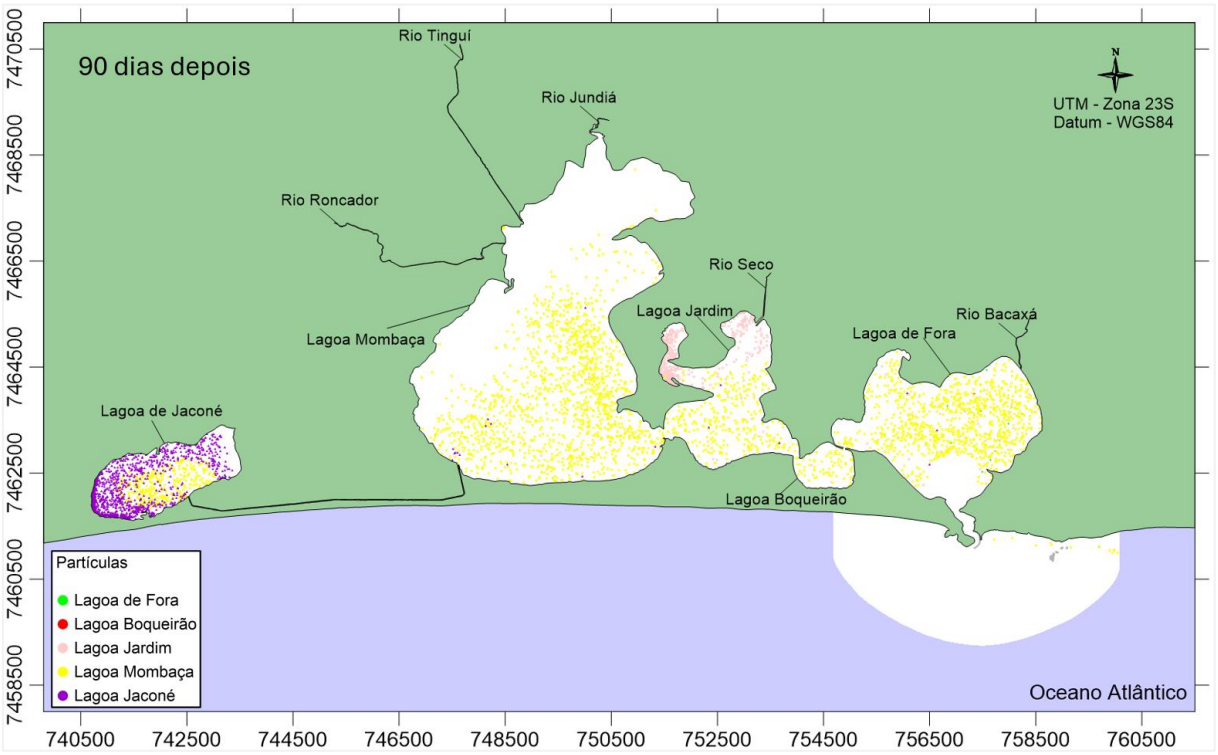


Figura 51 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 1 depois de 90 dias do instante inicial.



É possível observar que o cenário de projeto 1 continua bastante estagnado em relação a trocas de massas d'água. Aparentemente há uma melhora em relação a situação atual apenas para a Lagoa de Fora, onde parece haver uma entrada maior de águas marítimas nessa lagoa.

As lagoas intermediárias Boqueirão e Jardim não apresentam mudanças muito significativas, da mesma forma, a lagoa Mombaça, maior em extensão do sistema, recebe quase que exclusivamente aportes fluviais.

Novamente, a lagoa Jaconé é aquela que apresenta mais dificuldade em realizar trocas de massas de água com os outros corpos d'água do sistema.

5.2.3 Taxa de Renovação e Idade da Água

A Figura 52 apresenta os resultados de taxa de renovação das águas para pontos apresentados na Figura 34 para um período de 6 meses, onde é possível observar que há uma esperada redução nas taxas de renovação de água para as lagoas mais a montante do sistema.

É possível observar que a lagoa de Fora possui uma alta taxa de renovação de água, enquanto nas outras há uma grande redução. A lagoa Mombaça, ainda que seja uma das lagoas mais a montante do sistema, ainda possui uma renovação maior em alguns instantes que as lagoas Boqueirão e Jardim em virtude do recebimento de 3 aportes fluviais. A lagoa de Jaconé é a que apresenta as piores taxas, visto que suas águas se encontram estagnadas e sem grandes trocas.

Já a Figura 53 mostra resultados para idade da água do sistema, para o mesmo período, onde é possível observar estagnação em alguns pontos do sistema, como na lagoa de Jaconé, em que a idade de suas águas ultrapassa 50 dias.

Figura 52 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 1 em um período de 6 meses.

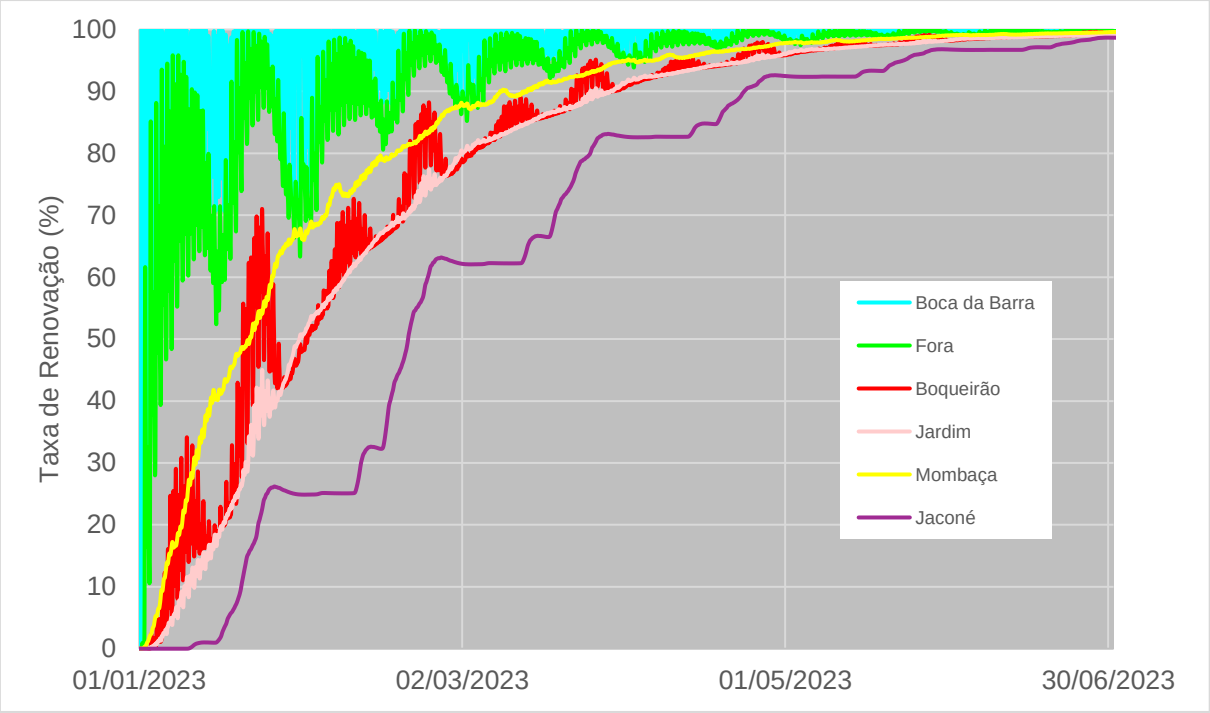
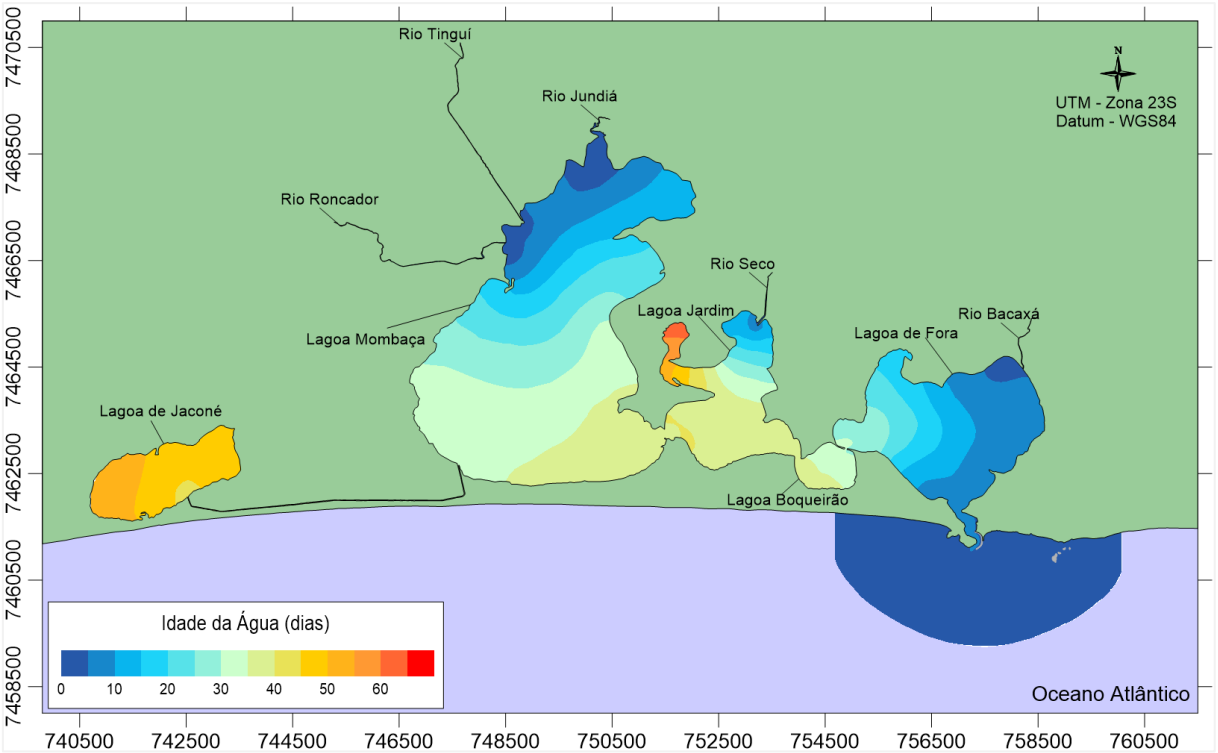


Figura 53 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 1 em um período de 6 meses.



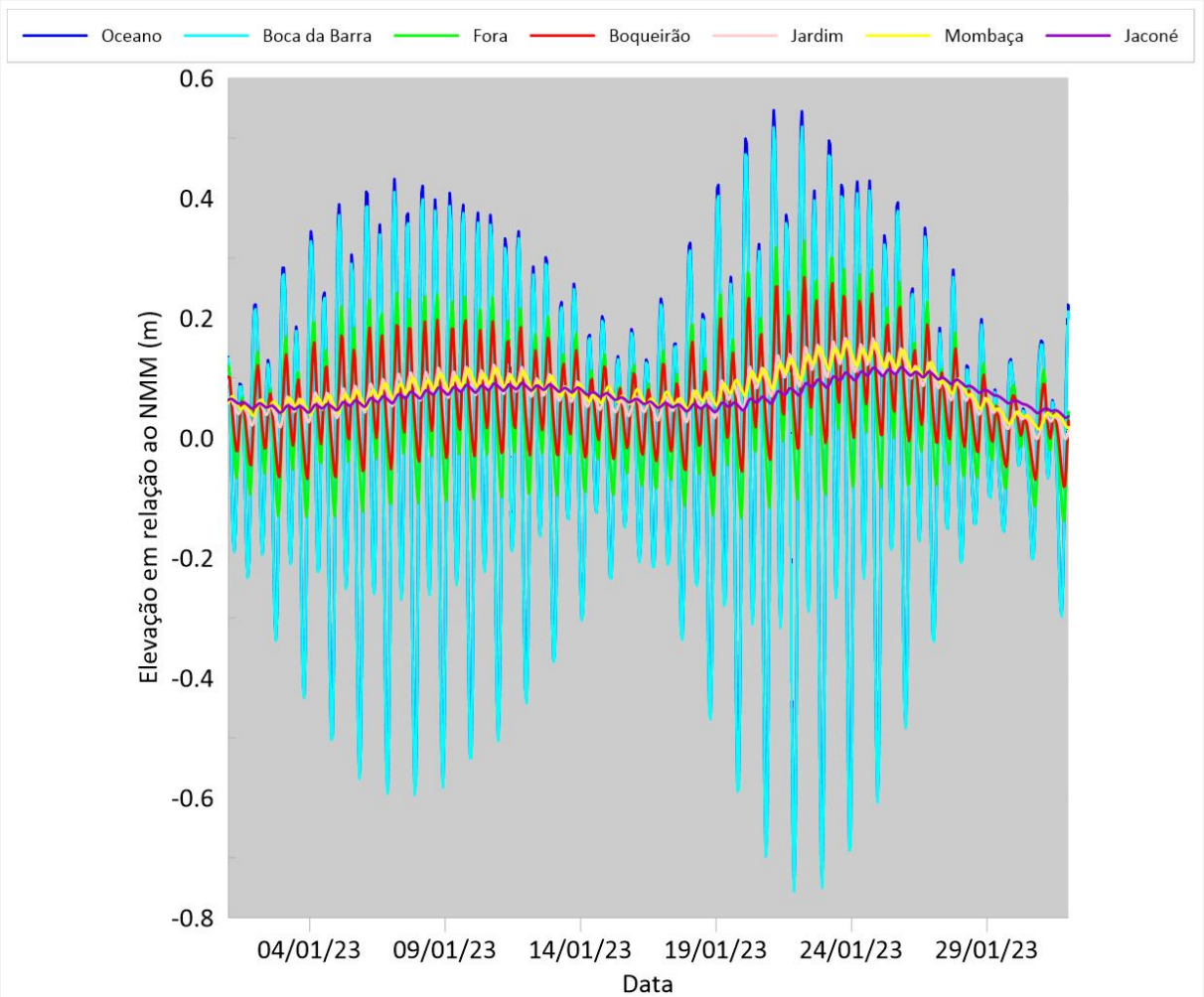
5.3 CENÁRIO DE PROJETO 2

Este item apresenta os resultados obtidos cenário de projeto 2, onde é implementada uma nova conexão com o oceano, próximo a lagoa Mombaça, além de manter as intervenções apresentadas no cenário de projeto 1.

5.3.1 Resultados Hidrodinâmicos

A Figura 54 mostra uma série de nível em relação ao NMM para os pontos destacados na Figura 34, é possível observar uma superposição entre as séries para a região do Oceano Atlântico e Boca da Barra com cotas de sizígia de 0.55 m na preamar e de -0.74 m na baixa-mar, ambas em relação ao NMM. Pode-se observar que a lagoa Jaconé apresenta sinais de influência de marés, com 0.03 m e 0.12 m de cota de baixa-mar e preamar, respectivamente.

Figura 54 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 2 para o mês de janeiro de 2023.



A Figura 55 e a Figura 56 apresentam respectivamente resultados de velocidade de correntes para os instantes de preamar e baixa-mar destacados na Figura 35.

O Sistema Lagunar de Saquarema não apresenta resultados de corrente muito expressivos na região do interior de suas lagoas, onde pode-se observar maior intensidade de correntes é na região do Canal da Barra Franca, onde na preamar destacada encontra-se uma corrente máxima de módulo de 1.38 m/s, enquanto na baixa-mar registra-se uma corrente máxima de módulo de 1.50 m/s. Já a nova conexão com o mar apresenta na preamar uma corrente máxima de módulo 0.51 m/s, enquanto na baixa-mar uma corrente máxima de módulo 0.48 m/s.

Figura 55 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 2 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.38 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.51 m/s.

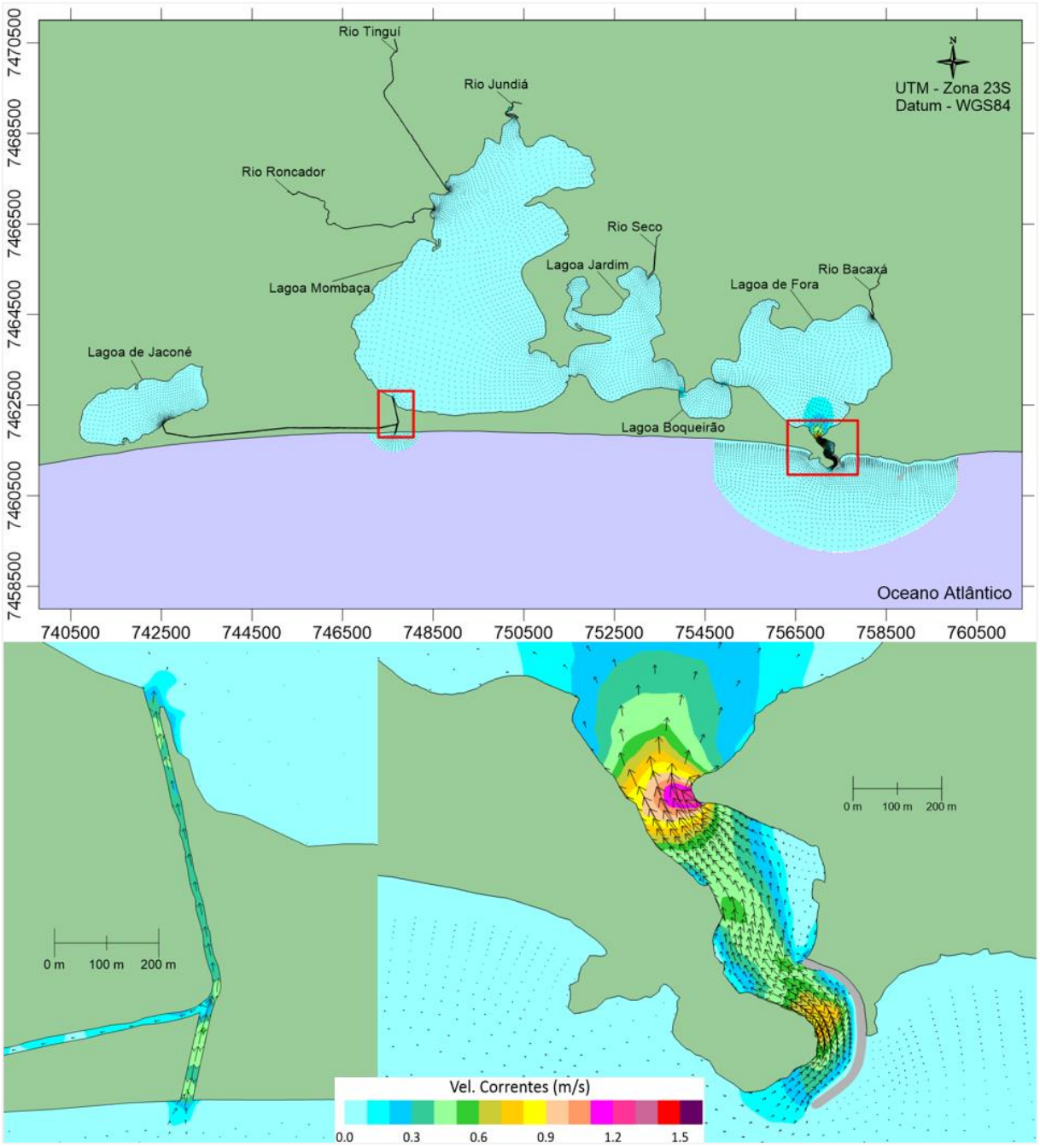
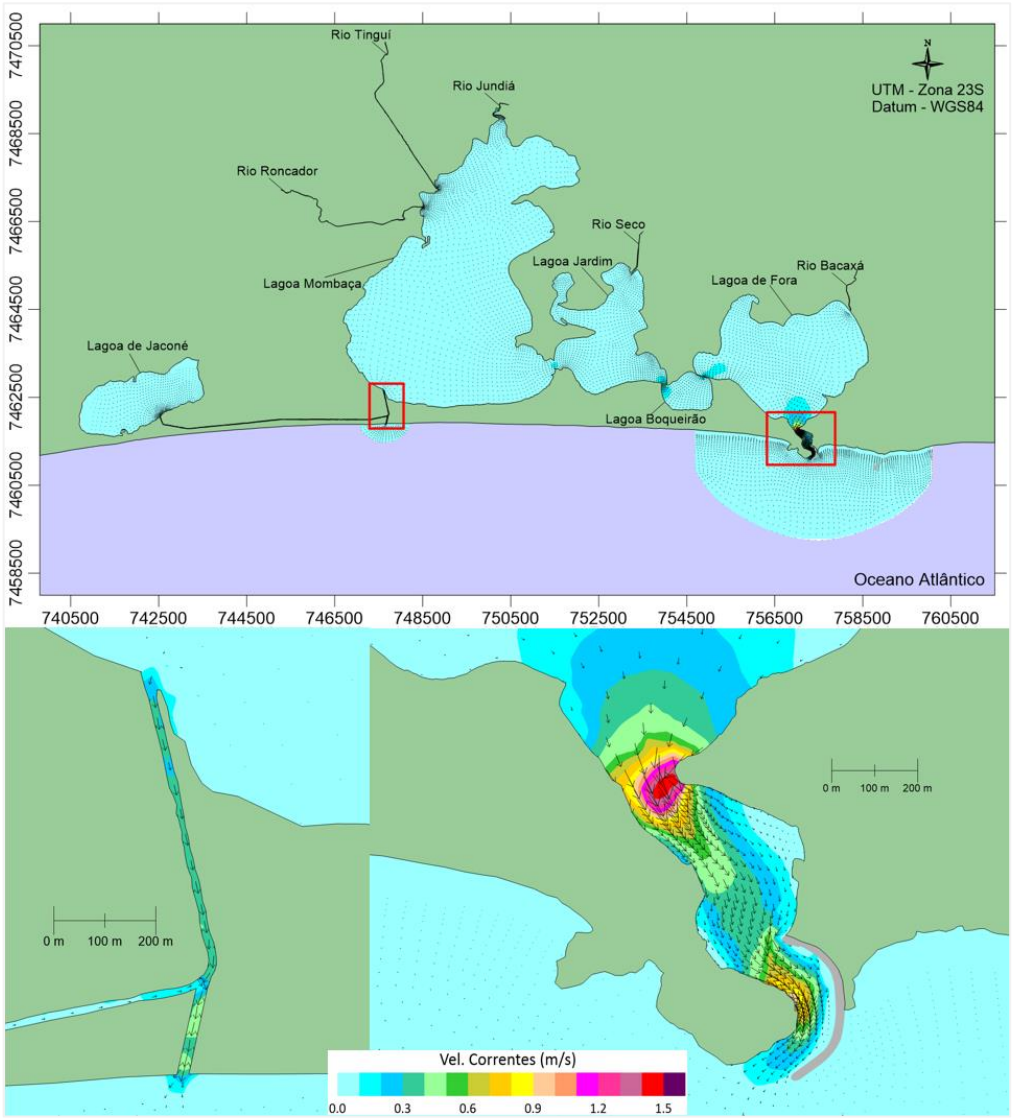


Figura 56 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 2 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.50 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.38 m/s.



5.3.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano

A Figura 57 mostra o instante inicial do modelo de transporte lagrangeano para o cenário de projeto 2. A Figura 58, a Figura 59 e a Figura 60 mostram, respectivamente, resultados do modelo após 30, 60 e 90 dias.

Figura 57 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2.

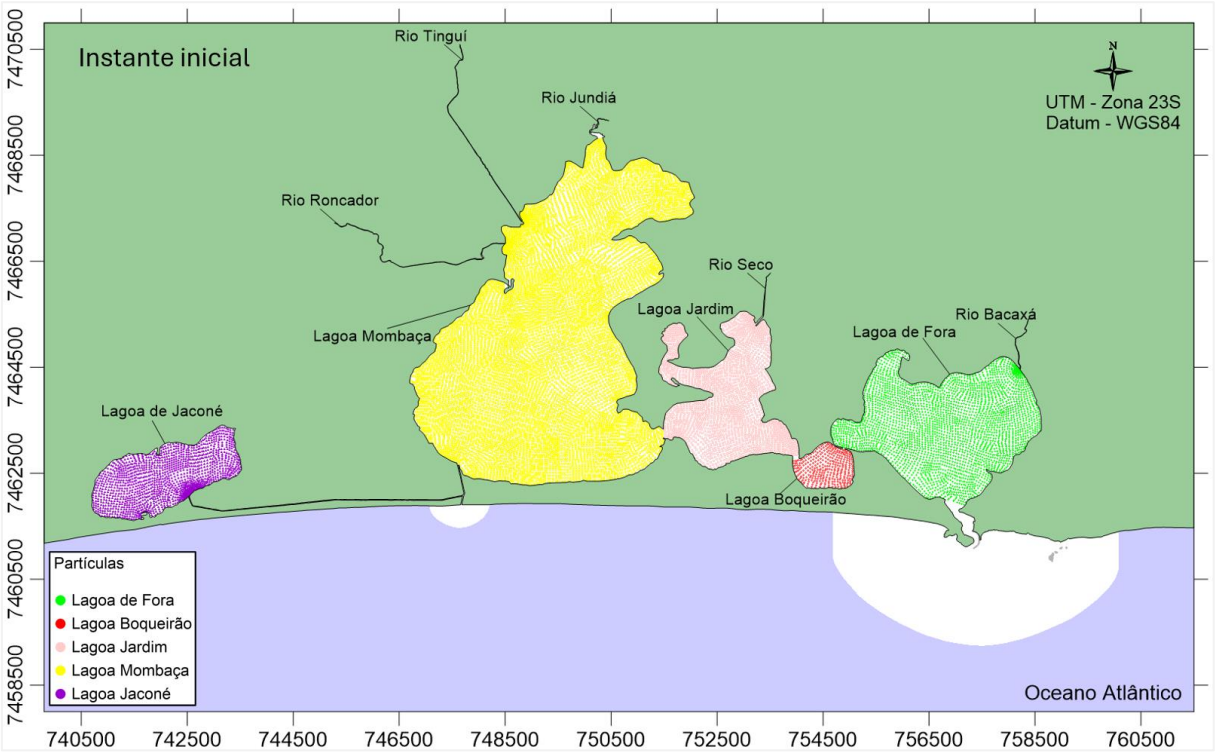


Figura 58 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2 depois de 30 dias do instante inicial.

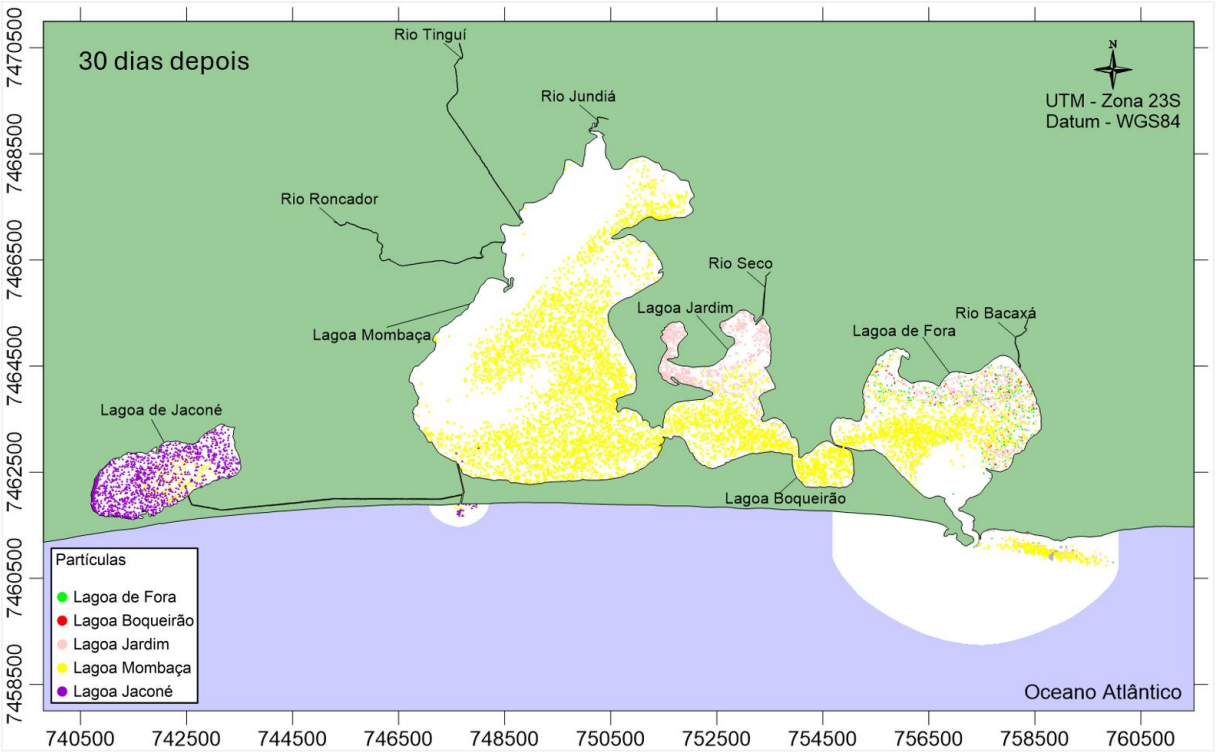


Figura 59 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2 depois de 60 dias do instante inicial.

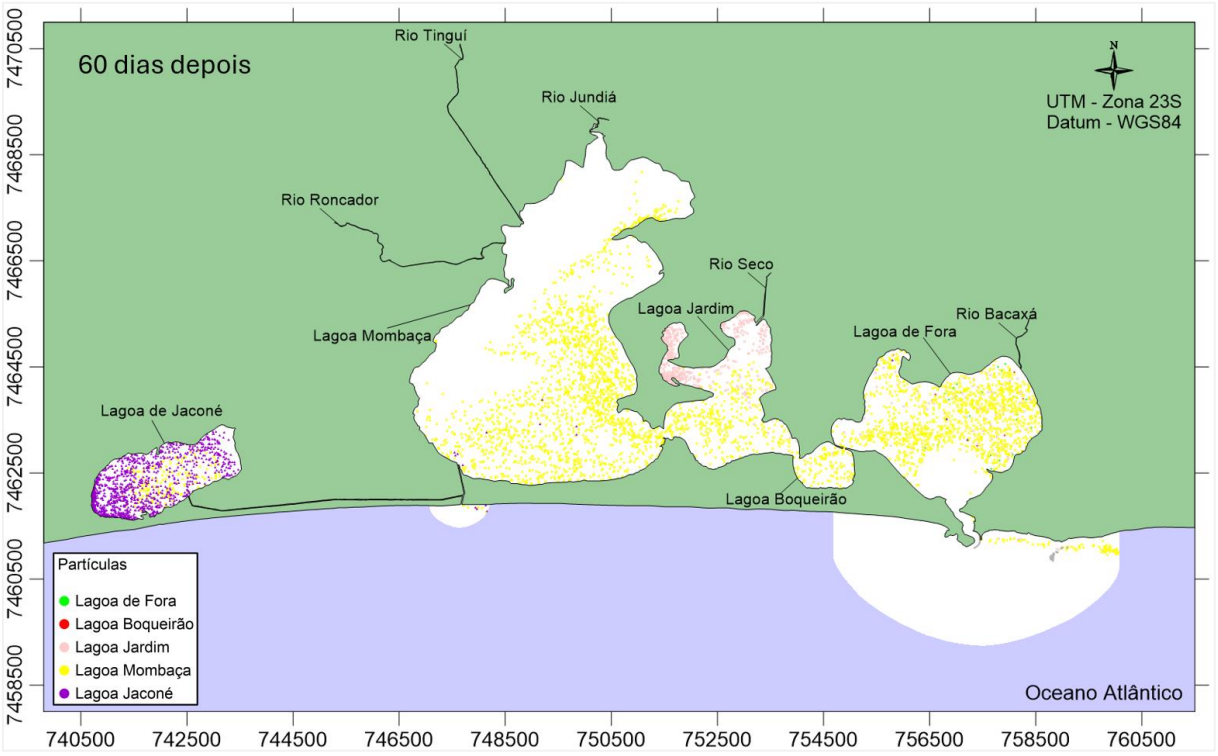
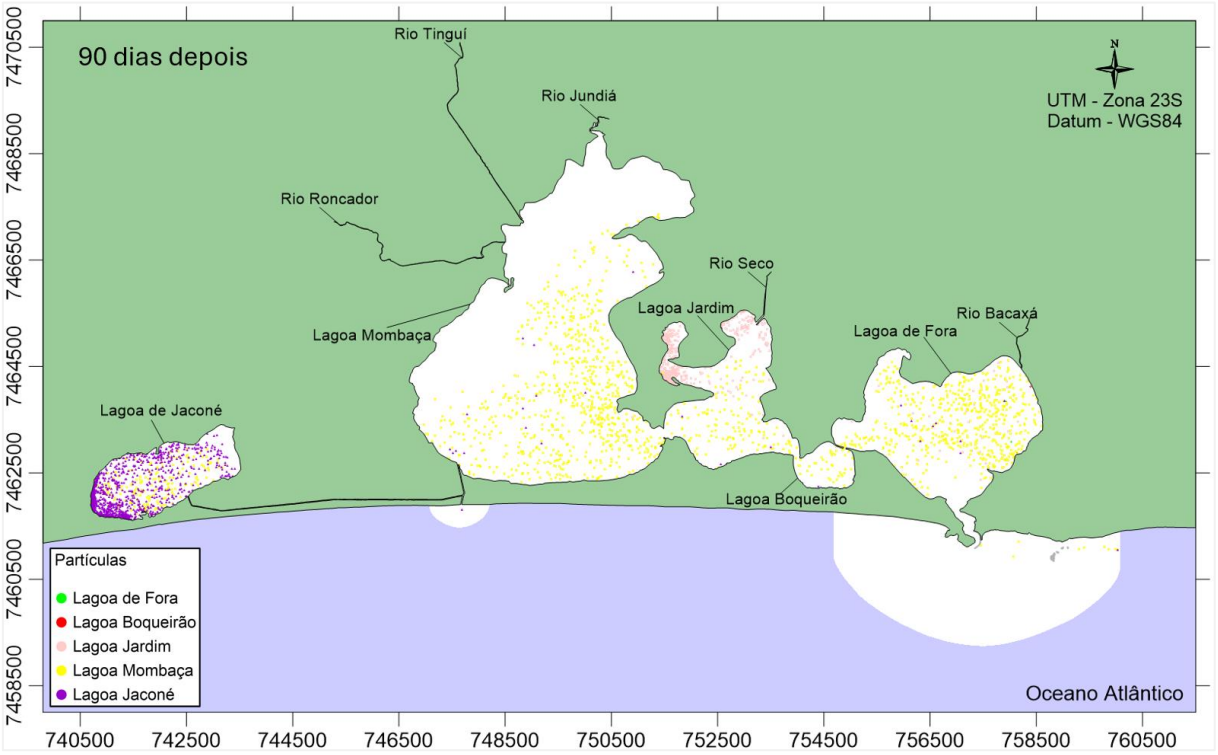


Figura 60 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 2 depois de 90 dias do instante inicial.



Neste cenário de projeto pode-se observar uma mudança na lagoa Mombaça gerada pela troca de água com o oceano ocasionada pela nova conexão com o mar. Aqui a nova conexão permite uma troca d'água com o oceano para praticamente todas as lagoas do sistema.

A lagoa Boqueirão segue escoando praticamente toda sua massa de água, enquanto a lagoa Jardim, possui pontos de estagnação, principalmente na região do braço próximo a lagoa Mombaça.

Há inclusive uma modesta melhora para a lagoa Jaconé, pode-se observar que sua massa de água é dispersa pela nova abertura, propiciando uma renovação mais eficiente de suas águas.

5.3.3 Taxa de Renovação e Idade da Água

A Figura 61 apresenta os resultados de taxa de renovação das águas para pontos apresentados na Figura 34 para um período de 6 meses, onde é possível observar uma evidente melhora nas taxas de renovação de água para as lagoas de Mombaça e Jaconé.

Já a Figura 62 mostra resultados para idade da água do sistema, para o mesmo período, onde é possível observar uma melhora evidente na idade das massas d'água do sistema lagunar, o único ponto do sistema com água ainda estagnada é em uma região da lagoa Jardim, com uma idade da água de 55 dias.

Figura 61 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 2 em um período de 6 meses.

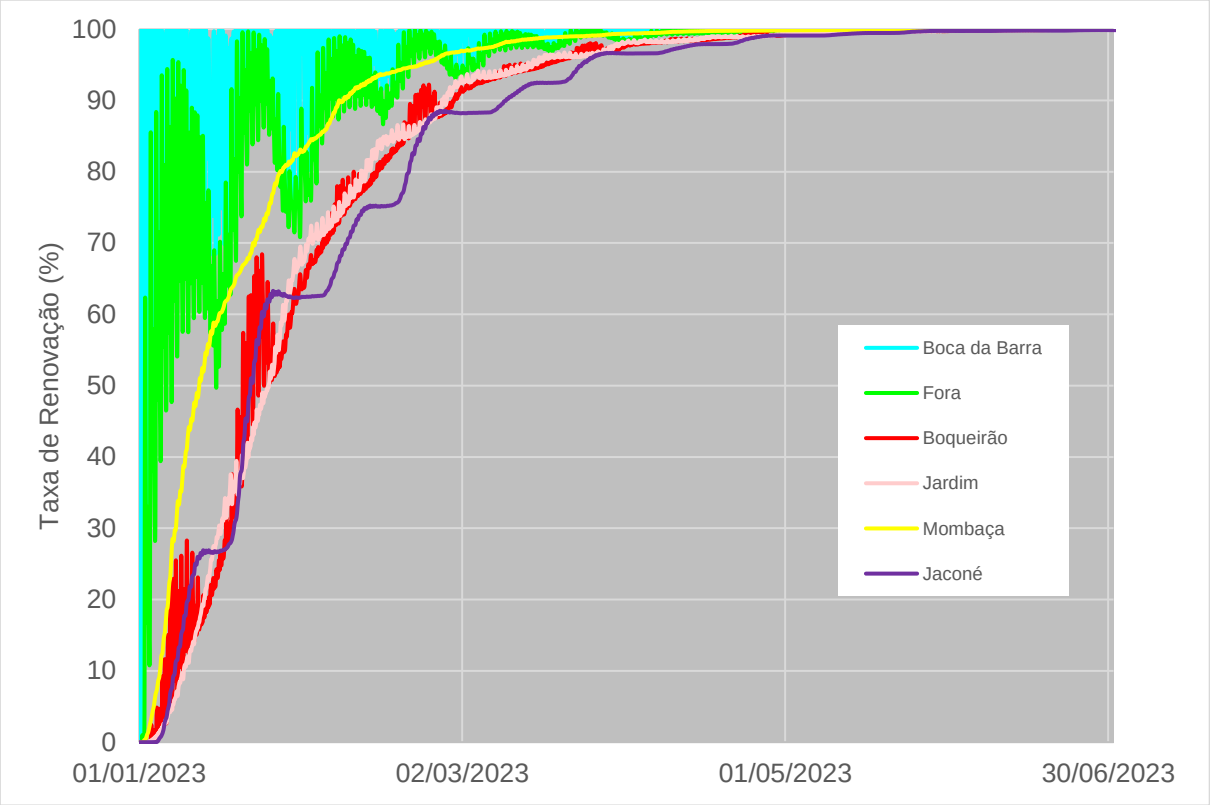
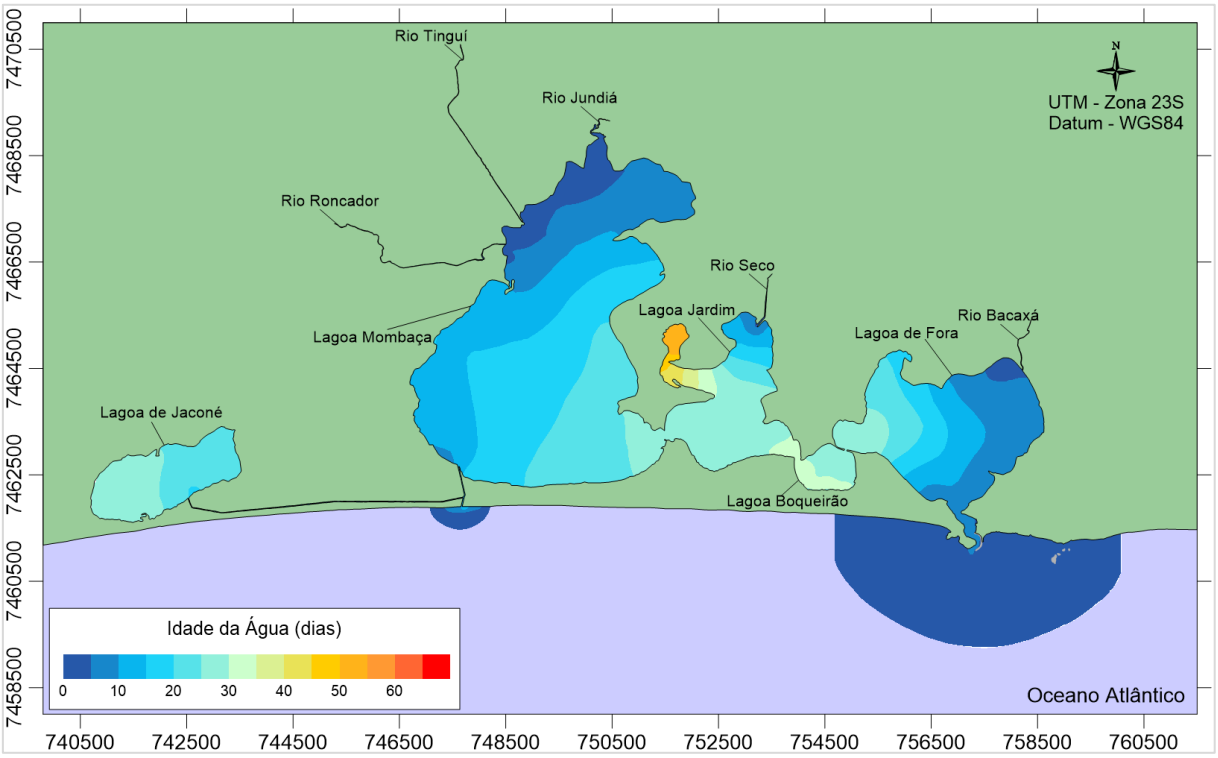


Figura 62 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 2 em um período de 6 meses.



5.4 CENÁRIO DE PROJETO 3

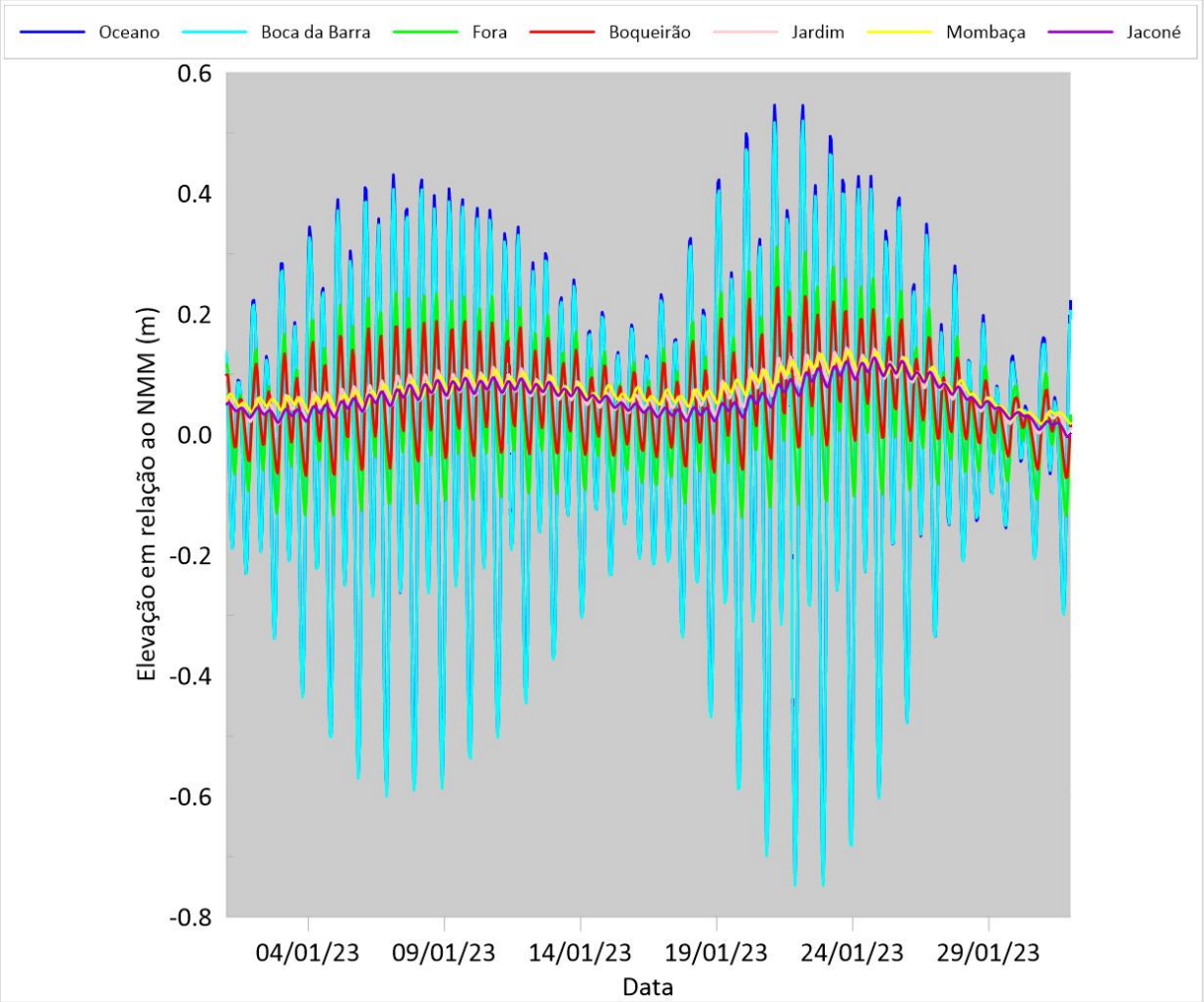
Este item apresenta os resultados obtidos para o cenário de projeto 3, onde é implementada uma nova conexão com o oceano, próximo a lagoa Jaconé, além de manter as intervenções apresentadas no cenário de projeto 1.

5.4.1 Resultados Hidrodinâmicos

A Figura 63 mostra uma série de nível em relação ao NMM para os pontos destacados na Figura 34, é possível observar para a região oceânica cotas de sizígia de 0.55 m na preamar e de -0.74 m na baixa-mar em relação ao NMM.

Os efeitos de maré, ainda que amortecidos, podem ser observados em todas as lagoas do sistema.

Figura 63 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 3 para o mês de janeiro de 2023.



A Figura 64 e a Figura 65 apresentam respectivamente resultados de velocidade de correntes para os instantes de preamar e baixa-mar destacados na Figura 35.

Pode-se observar novamente uma maior intensidade de correntes na região do Canal da Barra Franca, onde na preamar destacada encontra-se uma corrente máxima de módulo de 1.35 m/s, enquanto na baixa-mar registra-se uma corrente máxima de módulo de 1.47 m/s. Já a nova conexão com o mar apresenta na preamar uma corrente máxima de módulo 0.49 m/s, enquanto na baixa-mar uma corrente máxima de módulo 0.52 m/s.

Figura 64 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 3 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.35 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.49 m/s.

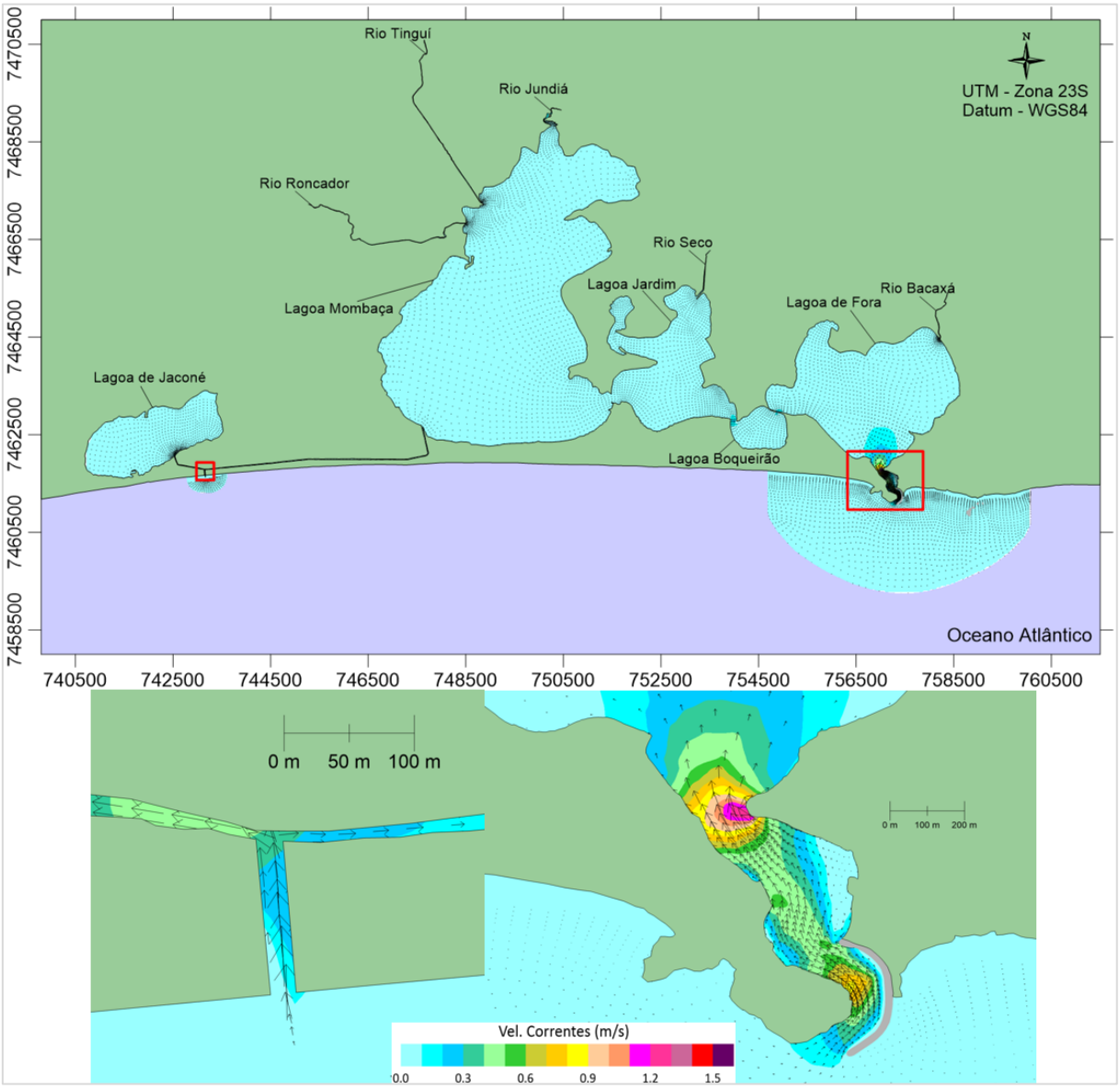
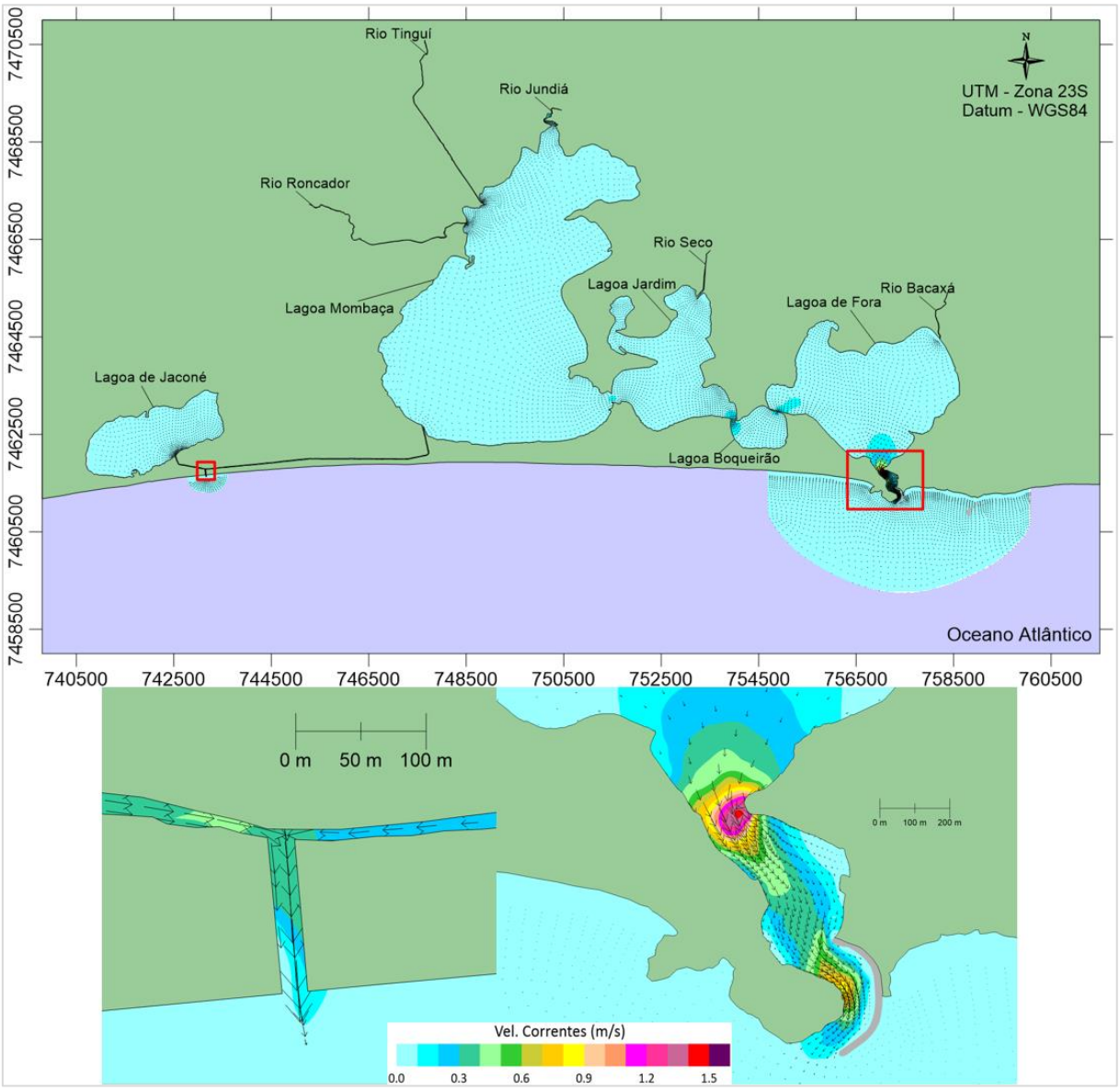


Figura 65 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 3 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.47 m/s, e da nova conexão com o mar, com corrente máxima de 0.52 m/s.



5.4.2 Resultados do modelo de Transporte Lagrangeano

A Figura 66 mostra o instante inicial do modelo de transporte lagrangeano para o cenário de projeto 3. A Figura 67, a Figura 68 e a Figura 69 mostram, respectivamente, resultados do modelo após 30, 60 e 90 dias.

Figura 66 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3.

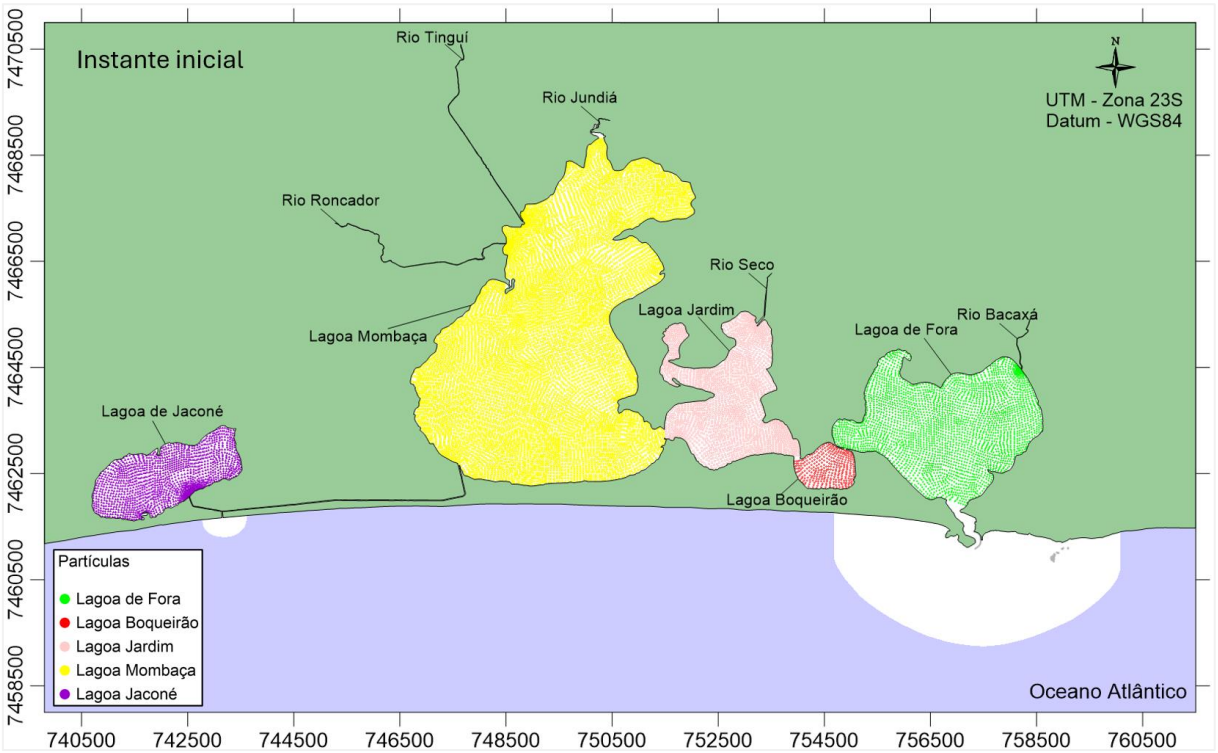


Figura 67 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3 depois de 30 dias do instante inicial.

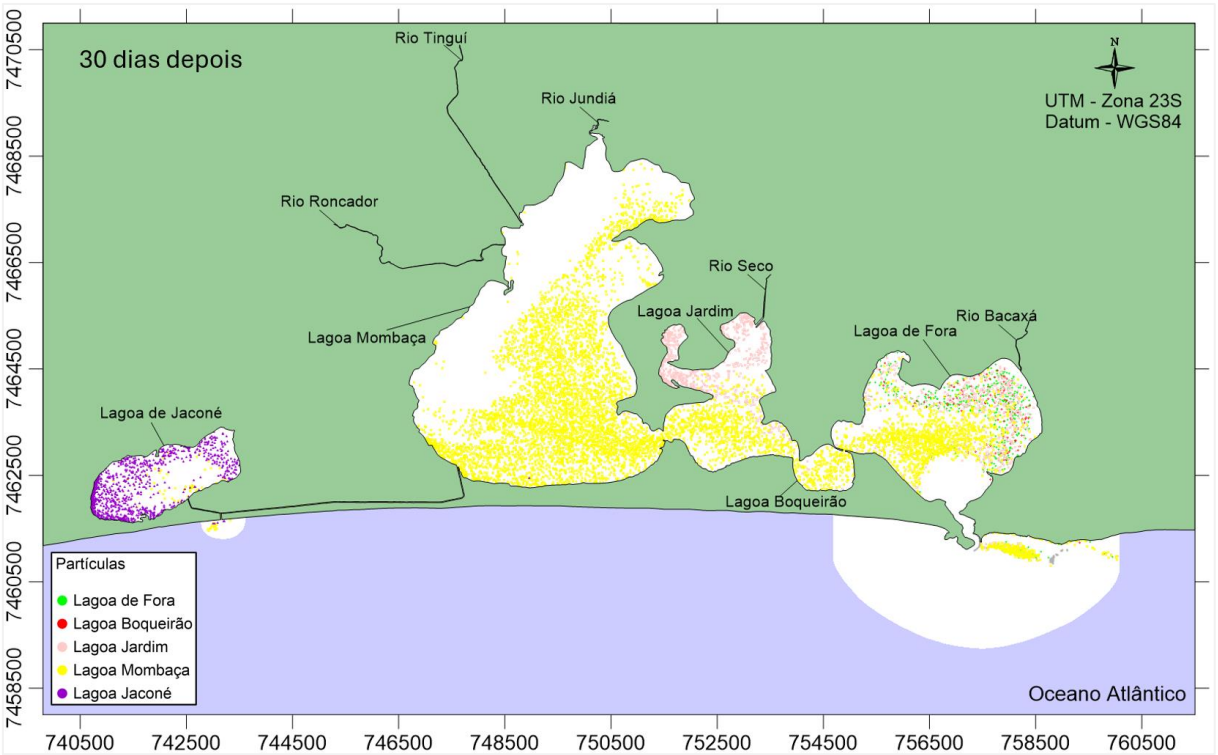


Figura 68 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3 depois de 60 dias do instante inicial.

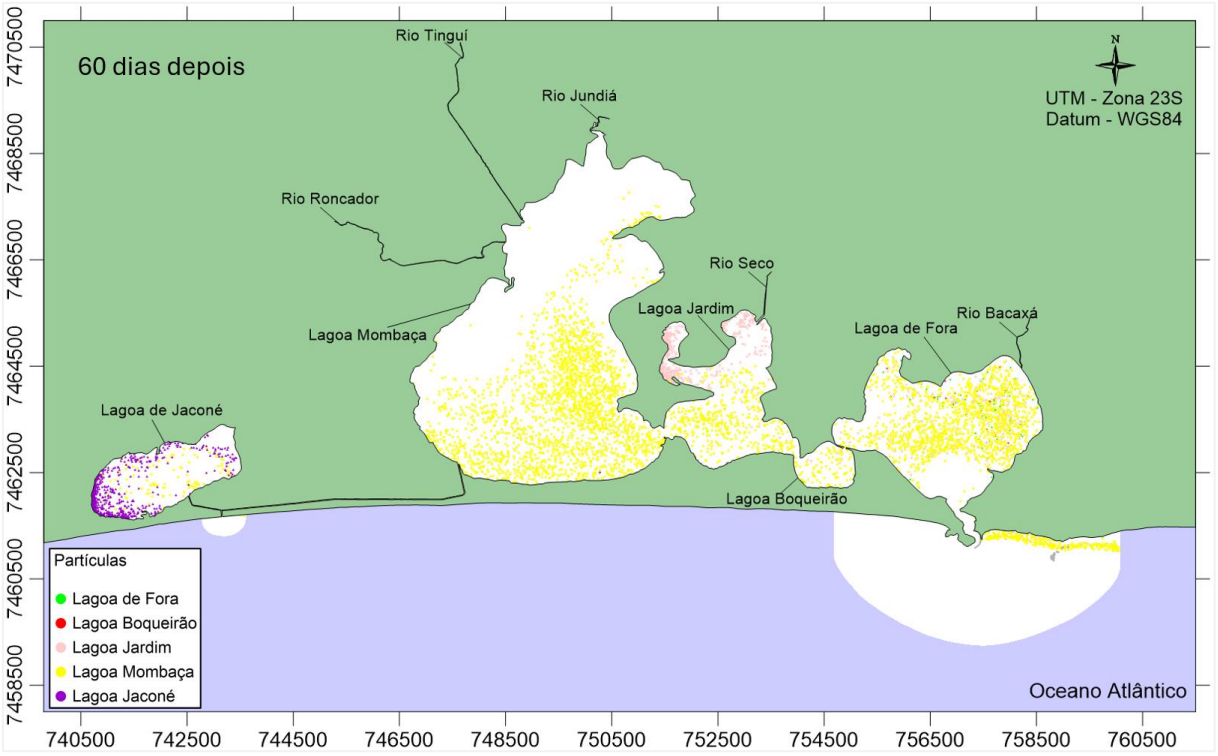
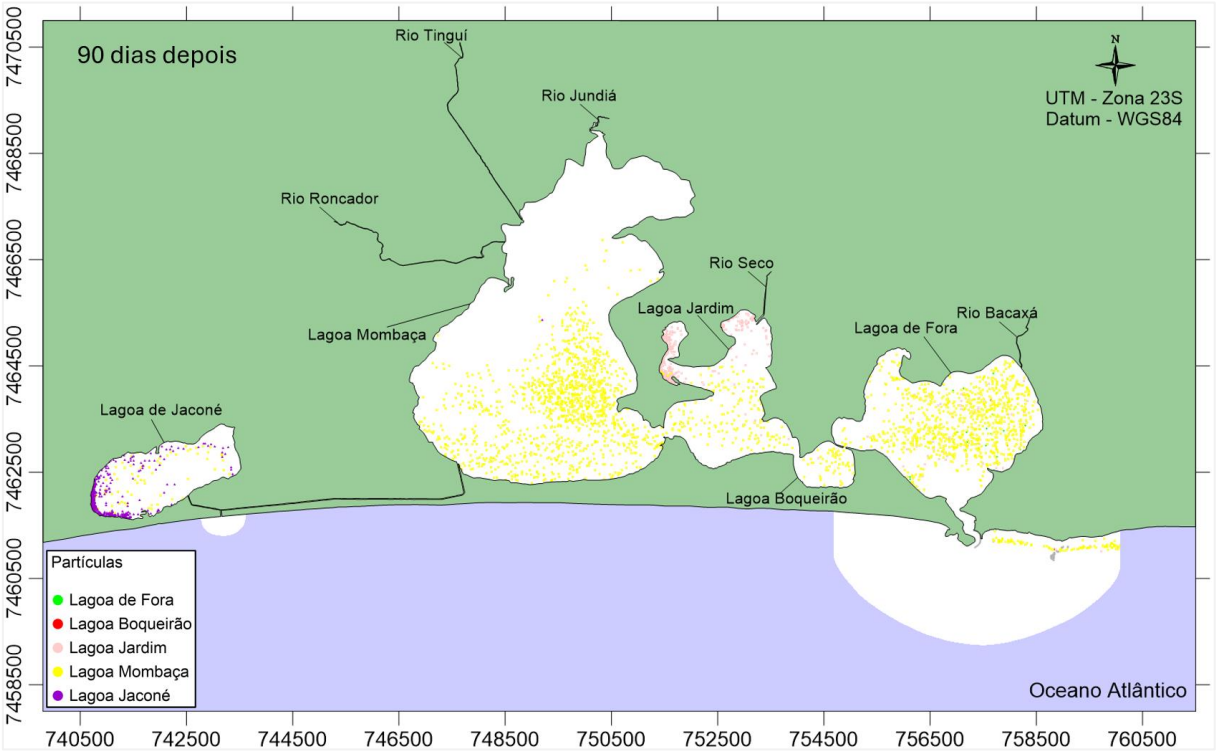


Figura 69 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 3 depois de 90 dias do instante inicial.



Neste cenário de projeto é possível observar um forte movimento das massas de água da lagoa Jaconé, confirmando a expectativa gerada pela nova abertura com o oceano próxima a este corpo d'água. Entretanto, há uma esperada redução no movimento das massas de água da lagoa Mombaça em relação ao cenário de projeto 2, visto que a nova conexão com o mar se encontra mais afastada deste corpo d'água quando comparado com a proposta anterior.

5.4.3 Taxa de Renovação e Idade da Água

A Figura 70 apresenta os resultados de taxa de renovação das águas para pontos apresentados na Figura 34 para um período de 6 meses, onde é possível observar uma melhora expressiva na taxa de renovação de água da lagoa Jaconé, alcançando uma taxa de renovação máxima antes mesmo das outras lagoas do sistema.

Já a Figura 71 mostra resultados para idade da água do sistema, para o mesmo período, onde é possível observar uma redução na idade da água da lagoa de Jaconé.

Figura 70 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 3 em um período de 6 meses.

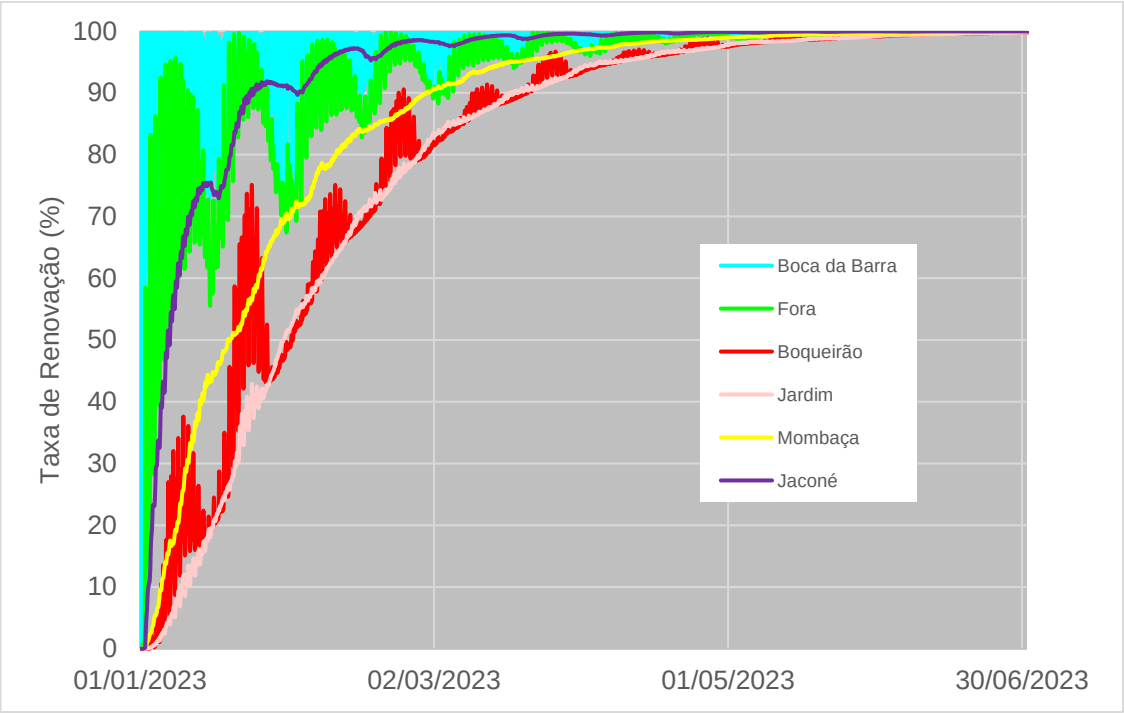
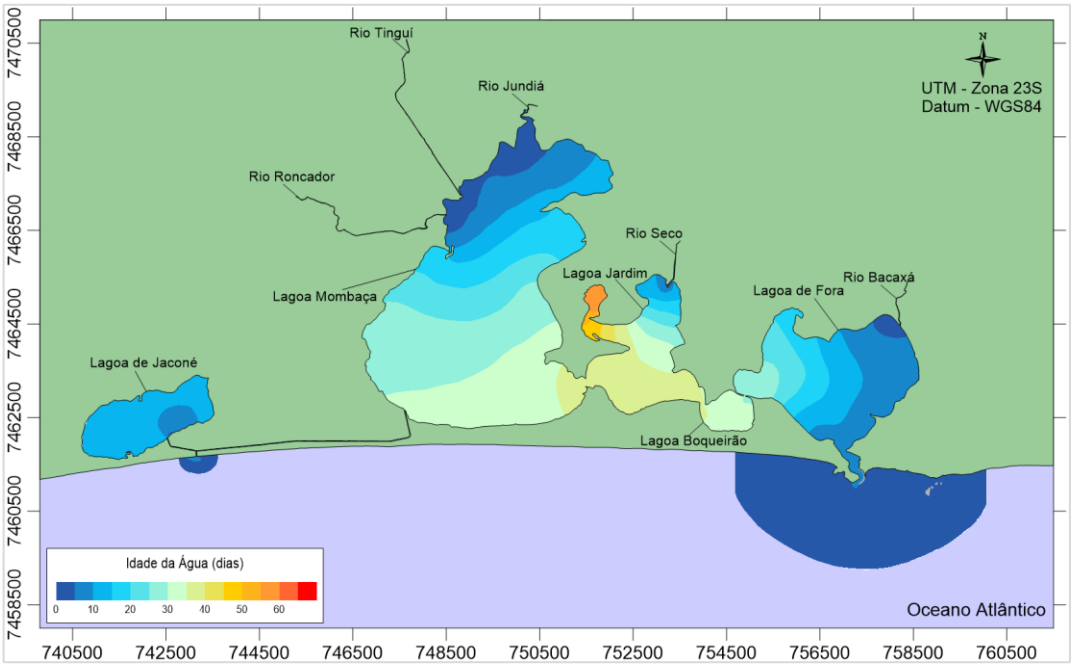


Figura 71 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 3 em um período de 6 meses.



5.5 CENÁRIO DE PROJETO 4

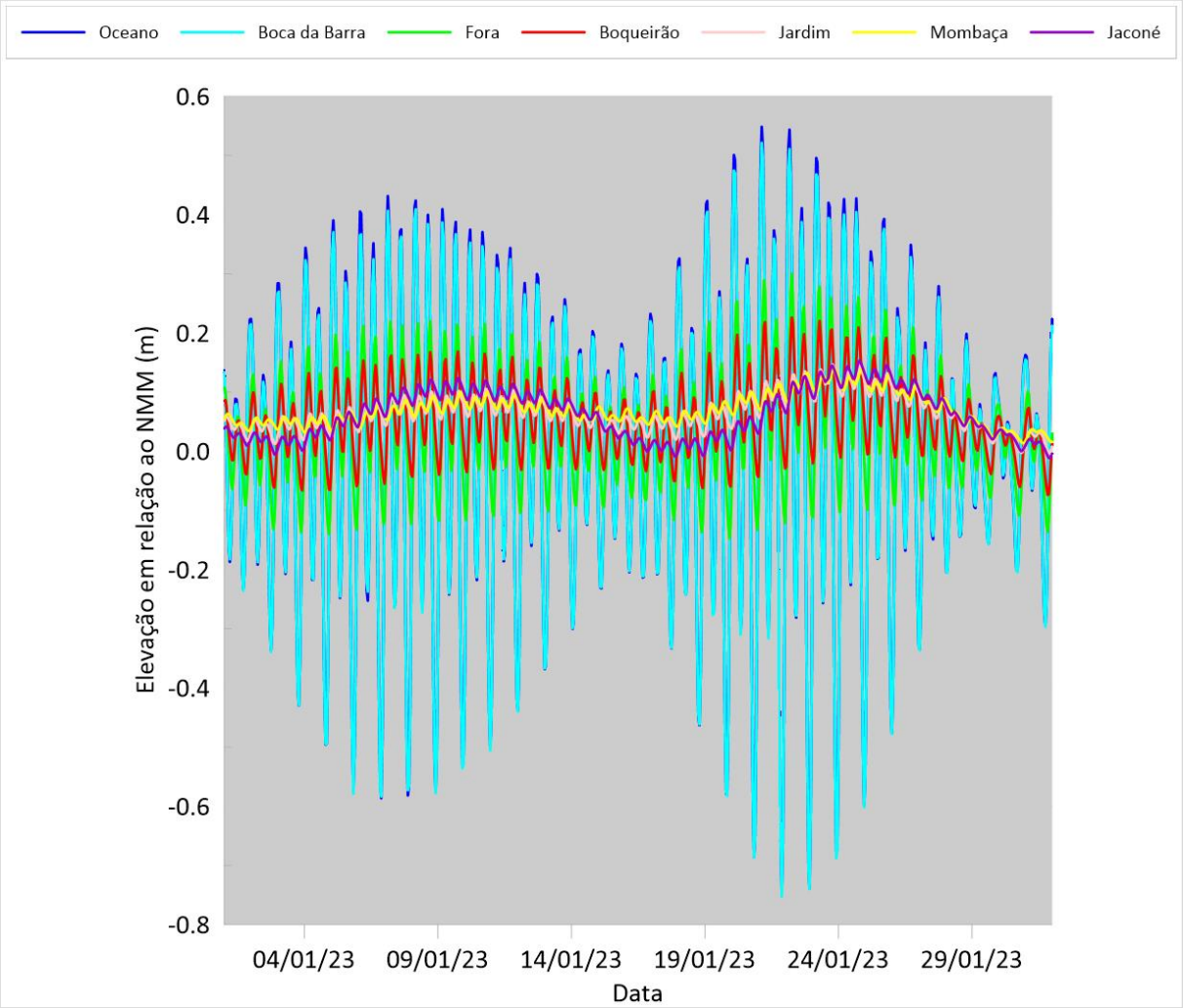
Este item apresenta os resultados obtidos para o cenário de projeto 4, onde são realizadas todas as intervenções propostas nos cenários de projeto anteriores.

5.5.1 Resultados Hidrodinâmicos

A Figura 72 mostra uma série de nível em relação ao NMM para os pontos destacados na Figura 34, é possível observar para a região oceânica cotas de sizígia de 0.55 m na preamar e de -0.74 m na baixa-mar em relação ao NMM.

Os efeitos de maré, ainda que amortecidos, podem ser observados em todas as lagoas do sistema, inclusive na lagoa de Jaconé, que na situação atual é aquela mais afastada da ligação com o mar.

Figura 72 - Séries de Nível para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 4 para o mês de janeiro de 2023.



A Figura 73 e a Figura 74 apresentam respectivamente resultados de velocidade de correntes para os instantes de preamar e baixa-mar destacados na Figura 35.

Pode-se observar novamente uma maior intensidade de correntes na região do Canal da Barra Franca, onde na preamar destacada encontra-se uma corrente máxima de módulo de 1.17 m/s, enquanto na baixa-mar registra-se uma corrente máxima de módulo de 1.32 m/s. A nova conexão com o mar próxima a lagoa Mombaça apresenta na preamar uma corrente máxima de módulo 0.44 m/s, enquanto na baixa-mar uma corrente máxima de módulo 0.37 m/s. Por fim, a nova conexão próxima a lagoa Jaconé gerou na preamar uma corrente máxima de módulo 0.33 m/s, e na baixa-mar uma corrente máxima de 0.41 m/s.

Figura 73 - Resultado de Corrente durante uma preamar de sizígia no dia 03/01/23 para o cenário de projeto 4 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.17 m/s, e das novas conexões com o mar próximas a lagoa Mombaça e a lagoa de Jaconé, com correntes máximas de 0.44 m/s e 0.33 m/s respectivamente.

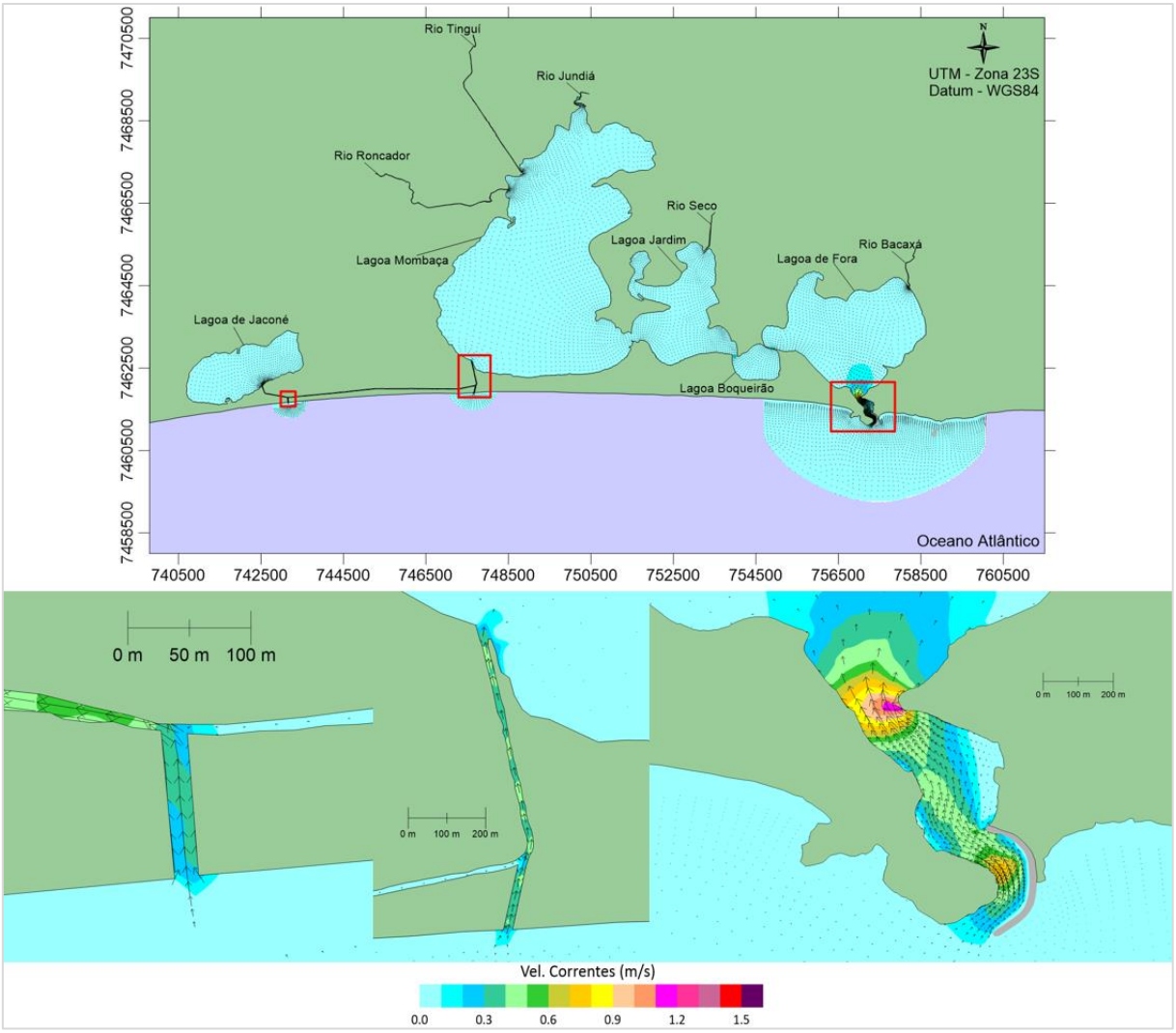
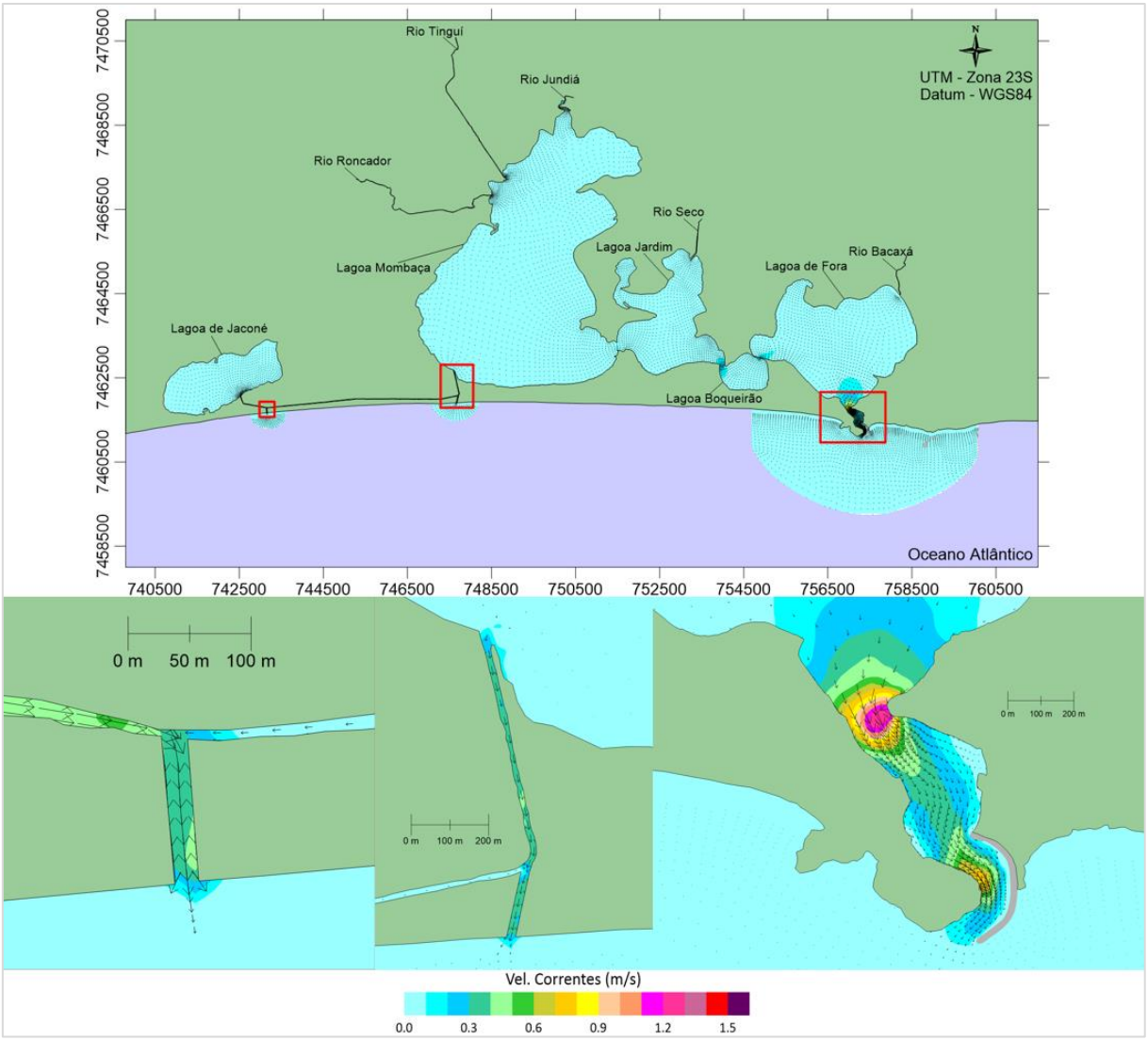


Figura 74 - Resultado de Corrente durante uma baixa-mar de sizígia no dia 13/01/23 para o cenário de projeto 4 com destaque para a região do Canal da Barra Franca, com corrente máxima de 1.32 m/s, e das novas conexões com o mar próximas a lagoa Mombaça e a lagoa de Jaconé, com correntes máximas de 0.37 m/s e 0.41 m/s respectivamente.



5.5.2 Resultados do Modelo de Transporte Lagrangeano

A Figura 75 mostra o instante inicial do modelo de transporte lagrangeano para o cenário de projeto 4. A Figura 76, a Figura 77 e a Figura 78 mostram, respectivamente, resultados do modelo após 30, 60 e 90 dias.

Figura 75 - Instante inicial para o modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4.

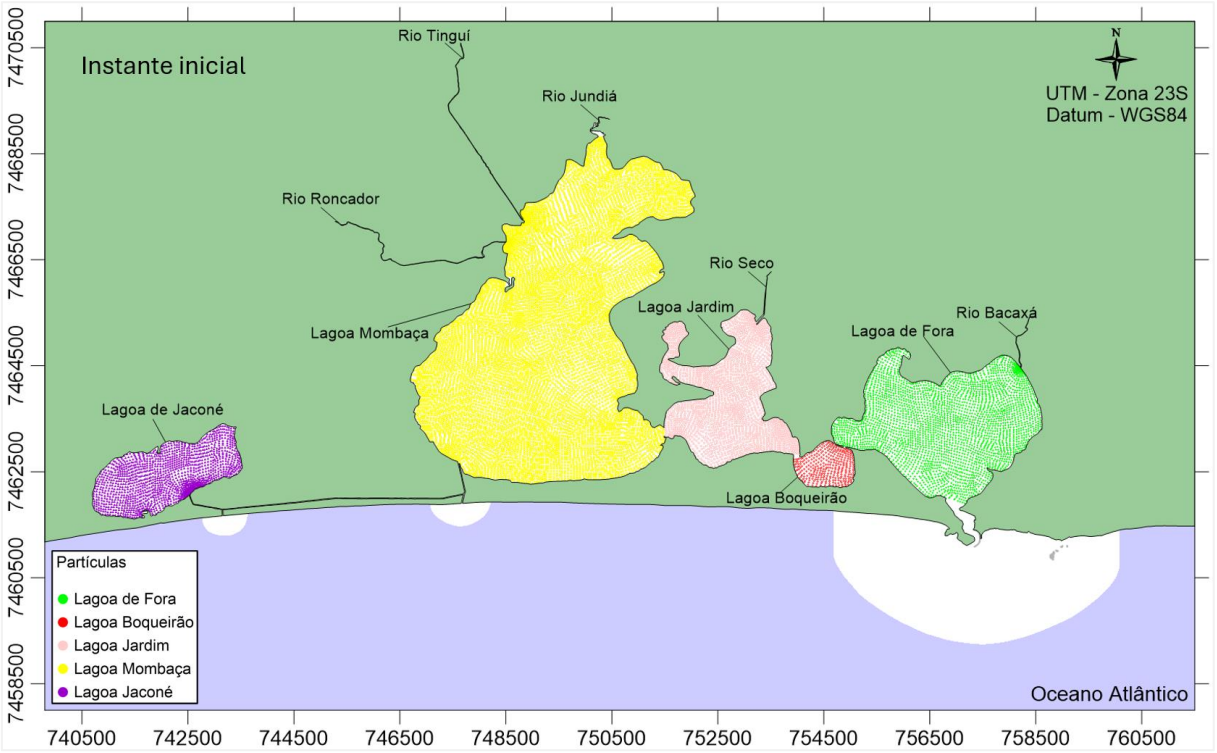


Figura 76 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4 depois de 30 dias do instante inicial.

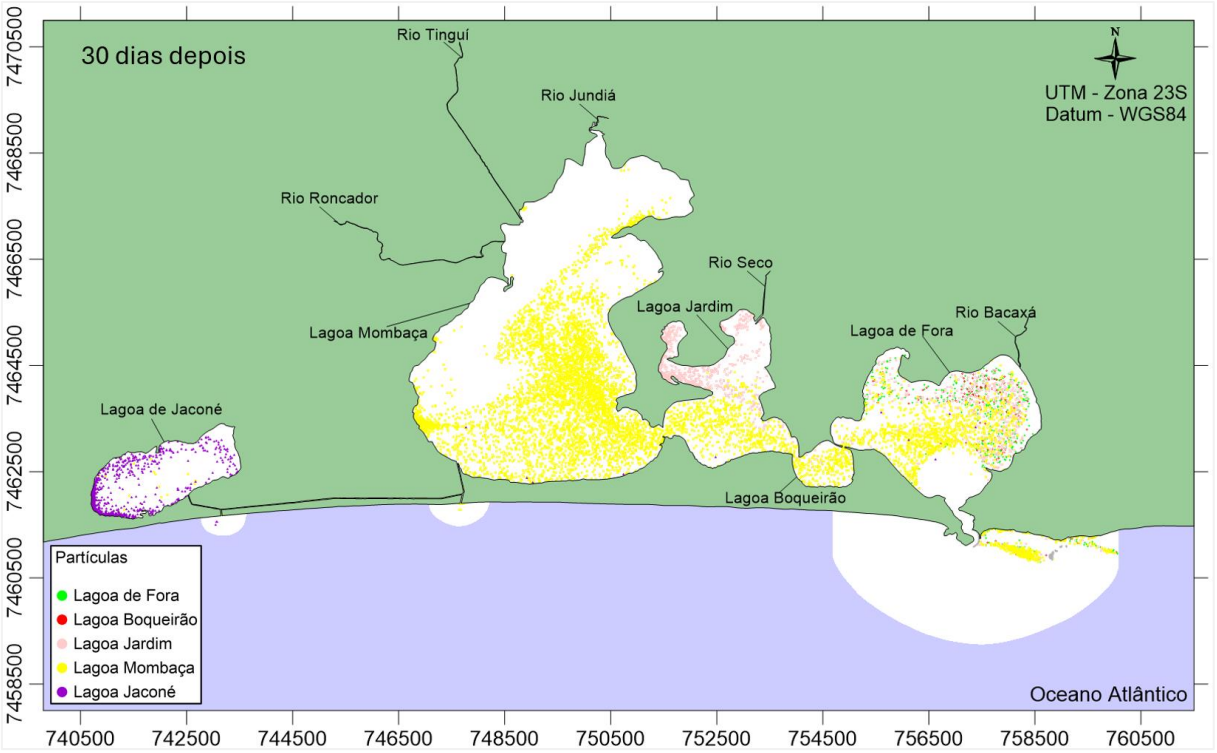


Figura 77 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4 depois de 60 dias do instante inicial.

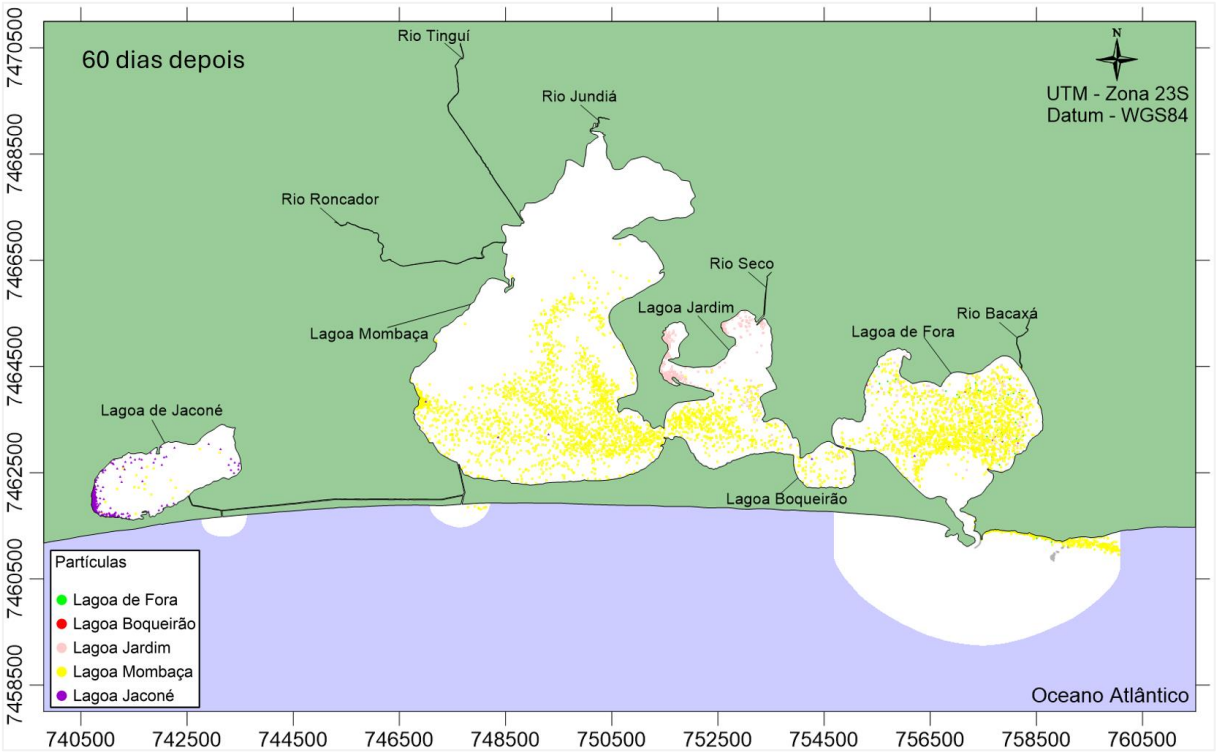
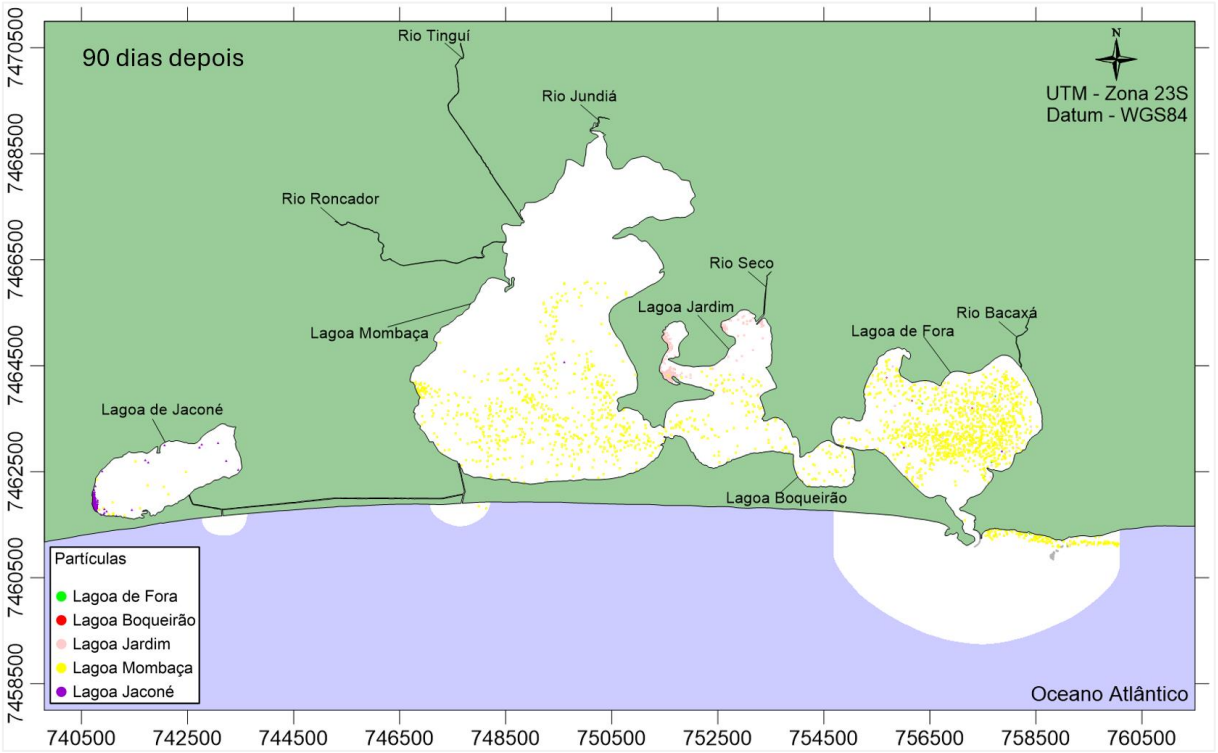


Figura 78 - Resultado do modelo de transporte lagrangeano do cenário de projeto 4 depois de 90 dias do instante inicial.



O fator em destaque neste cenário é um deslocamento das massas d’água ainda mais intenso na lagoa de Jaconé, representando uma melhora em relação ao cenário de projeto em que há apenas uma nova abertura próxima a essa lagoa.

É possível observar ao final do período de simulação que todas as lagoas do sistema passam a ter uma alta troca de massas de água.

5.5.3 Taxa de Renovação e Idade da Água

A Figura 79 apresenta os resultados de taxa de renovação das águas para pontos apresentados na Figura 34 para um período de 6 meses, onde é possível observar novamente uma melhora expressiva na taxa de renovação de água da lagoa Jaconé, além disso há também uma boa melhora da taxa de renovação da lagoa Mombaça.

Já a Figura 80 mostra resultados para idade da água do sistema, para o mesmo período, onde é possível observar uma melhora evidente na idade das massas d’água de todo o sistema lagunar, mesmo no ponto da lagoa Jardim que apresentou pior resultado em todos os cenários, houve uma leve melhora neste.

Figura 79 - Percentuais de Renovação das Águas para alguns pontos do Sistema Lagunar de Saquarema no cenário de projeto 4 em um período de 6 meses.

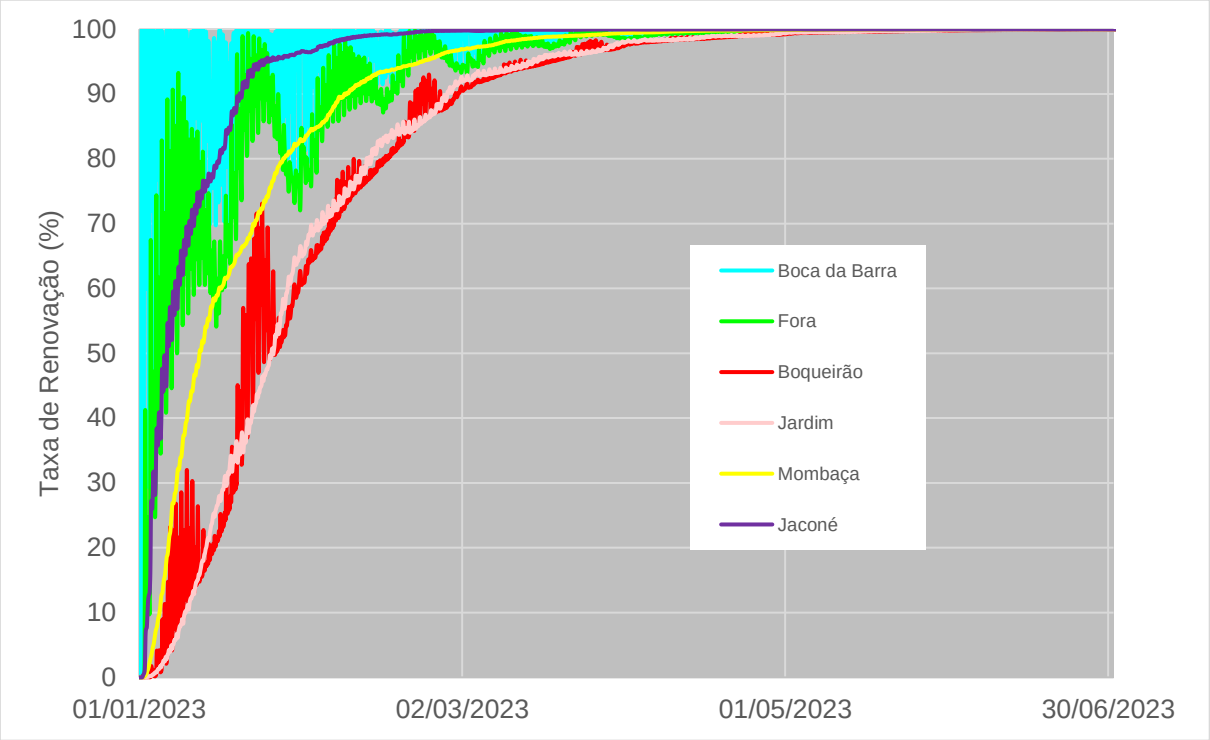
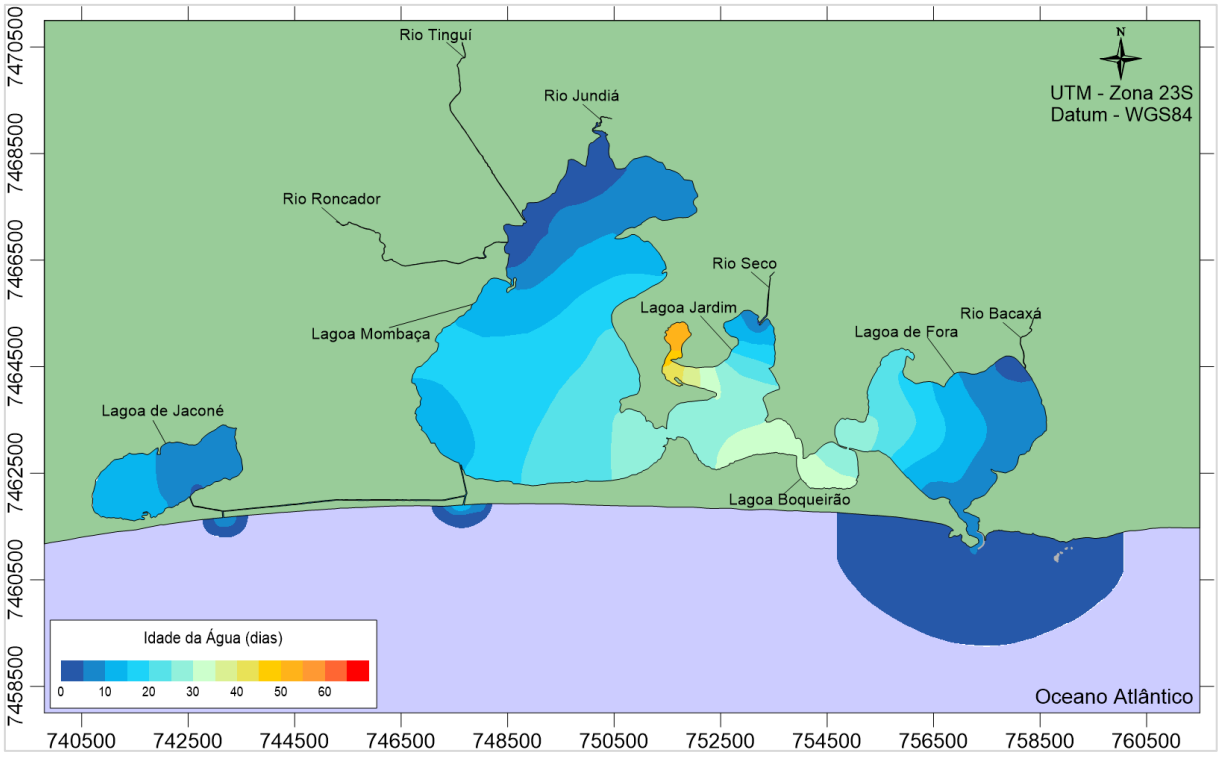


Figura 80 - Mapa de Idade da Água, em dias, para o Sistema Lagunar de Saquarema para o cenário de projeto 4 em um período de 6 meses.



5.6 ANÁLISE DAS TAXAS DE RENOVAÇÃO DE ÁGUA POR LAGOA

Nesta seção serão expostos os resultados sobre taxas de renovação aglutinados por cada lagoa estudada de modo a possibilitar uma melhor análise comparativa dos dados gerados. Os padrões de cor seguem o exposto na Tabela 4.

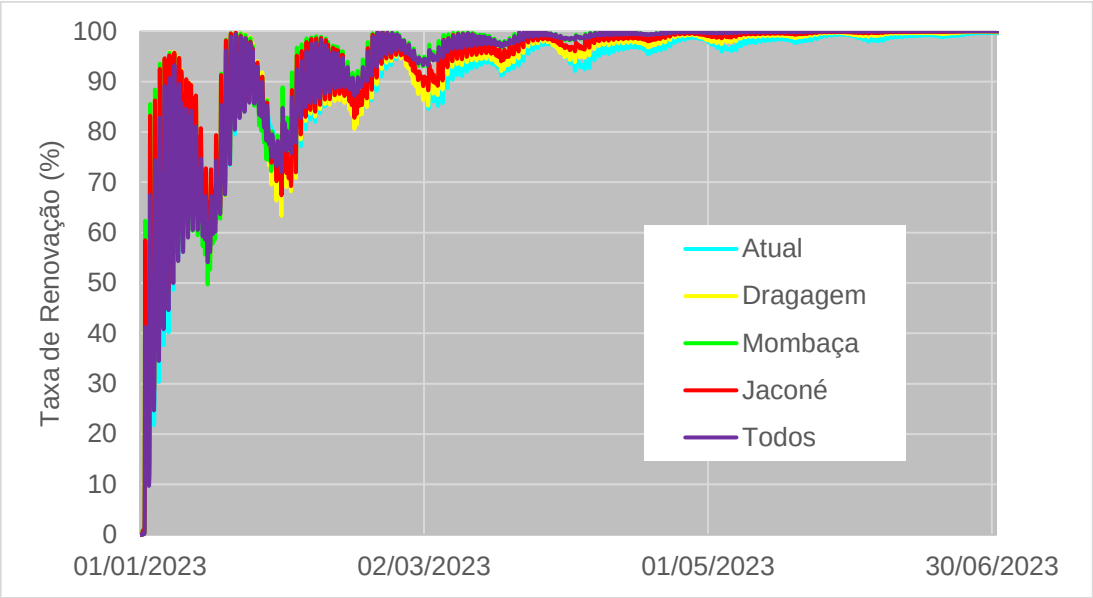
Tabela 4 - Padrão de cor utilizado para exposição dos resultados de taxa de renovação de água referentes a cada lagoa.

Cenário Modelado	Abreviação Adotada	Cor Utilizada
Situação Atual	SA	
Cenário de Projeto 1	CP1	
Cenário de Projeto 2	CP2	
Cenário de Projeto 3	CP3	
Cenário de Projeto 4	CP4	

5.6.1 Lagoa de Fora

A Figura 81 apresenta os resultados de cada um dos cenários modelados para a lagoa de Fora. Observa-se que mesmo no cenário de situação atual, este corpo d'água já apresenta altas taxas de renovação de suas águas, com isso os cenários de projeto não apresentam mudanças significativas.

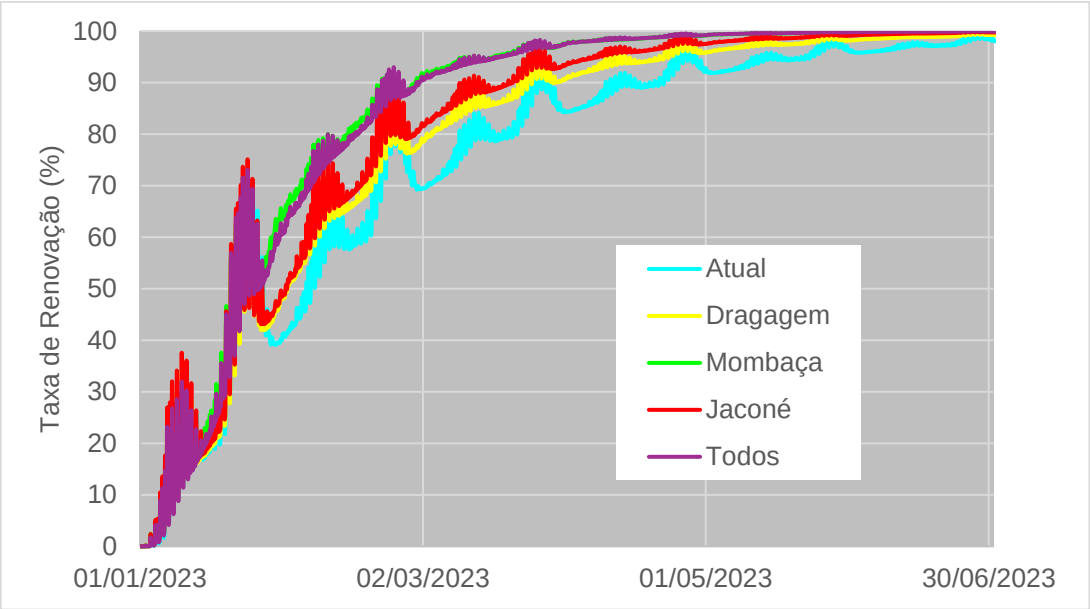
Figura 81 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa de Fora para os cenários modelados em um período de 6 meses.



5.6.2 Lagoa Boqueirão

A Figura 82 apresenta os resultados de cada um dos cenários modelados para a lagoa Boqueirão. Os cenários de projeto apresentam melhora nas taxas de renovação de água se comparados com o cenário de situação atual.

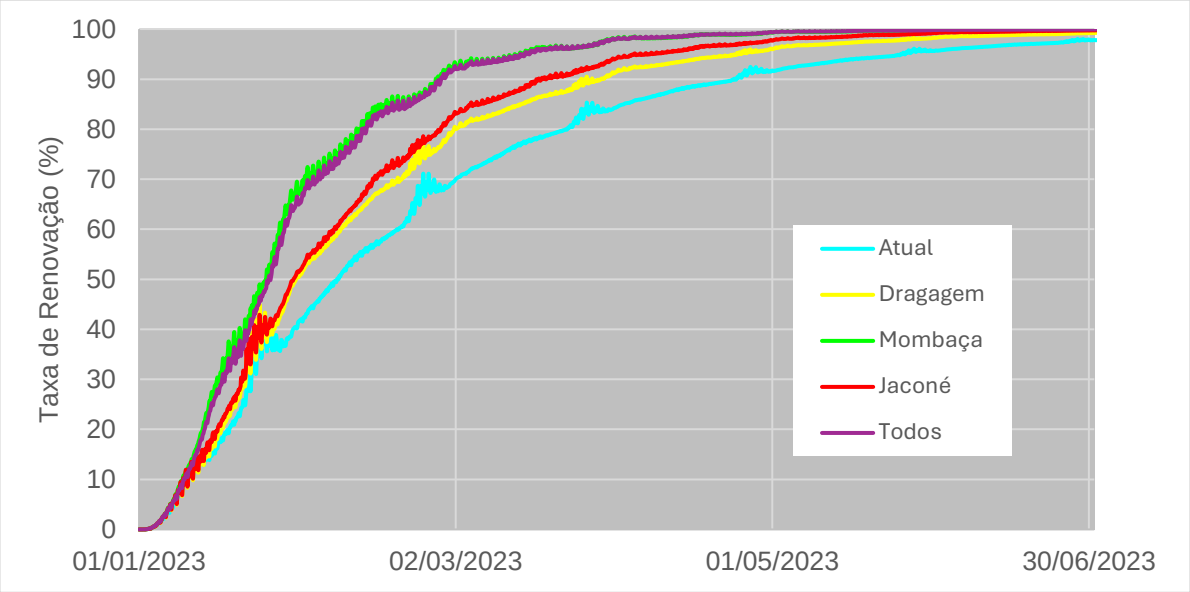
Figura 82 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Boqueirão para os cenários modelados em um período de 6 meses.



5.6.3 Lagoa Jardim

A Figura 83 apresenta os resultados para a lagoa Jardim. Observa-se melhoras expressivas nas taxas de renovação com os cenários projetados, sendo os cenários de projeto 2 e 4 os que apresentaram melhores valores, alcançando taxas superiores a 20% para alguns pontos quando comparados com a situação atual.

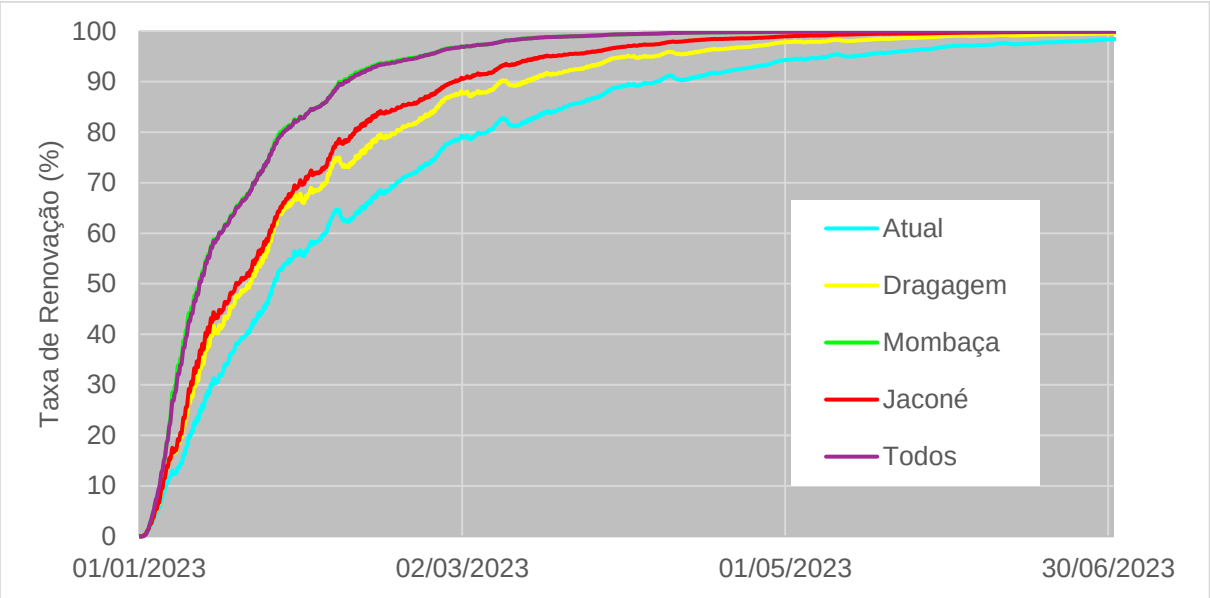
Figura 83 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Jardim para os cenários modelados em um período de 6 meses.



5.6.4 Lagoa Mombaça

A Figura 84 apresenta os resultados de cada um dos cenários modelados para a lagoa Mombaça. Observa-se melhoras expressivas nas taxas de renovação com os cenários projetados, novamente os cenários de projeto 2 e 4 apresentaram melhores valores.

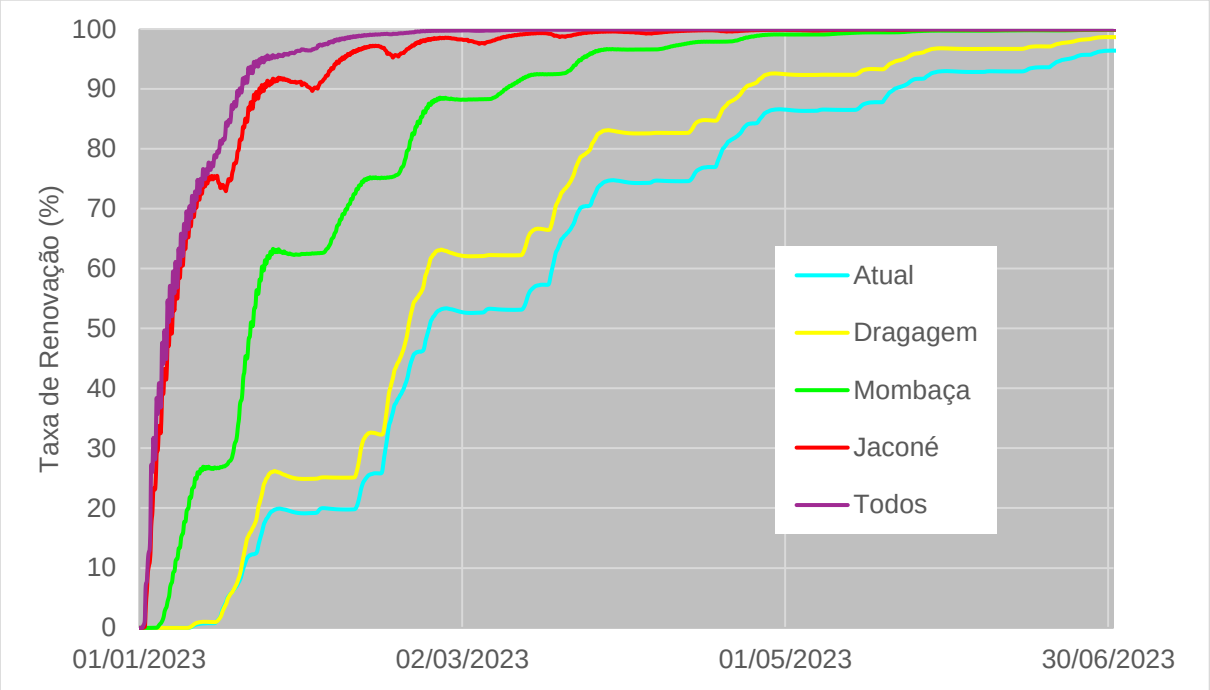
Figura 84 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Mombaça para os cenários modelados em um período de 6 meses.



5.6.5 Lagoa Jaconé

A Figura 85 apresenta os resultados de cada um dos cenários modelados para a lagoa Jaconé. Destaca-se que este foi o único corpo d'água, como esperado, que apresentou melhor resultado para o cenário de projeto 3 em comparação com o cenário de projeto 2.

Figura 85 - Percentuais de Renovação das Águas na Lagoa Jaconé para os cenários modelados em um período de 6 meses.



5.7 DISCUSSÕES

A análise da situação atual revelou que o Sistema Lagunar de Saquarema sofre com uma renovação hídrica insuficiente, especialmente em lagoas mais afastadas da conexão com o oceano, como a lagoa de Jaconé. A baixa circulação é agravada pelo assoreamento do canal da Barra Franca devido ao transporte litorâneo de sedimentos, pela construção fora dos padrões de projeto do guia-corrente, além de um alto estrangulamento entre seus canais de ligação, fatores que limitam significativamente a entrada de água marinha e a remoção de massas d'água estagnadas. Destaca-se aqui a necessidade de atenção para a lagoa Jaconé, que apresenta massas de água com idade superior a 50 dias, com alguns pontos superando a faixa dos 60 dias, como na região do extremo oeste deste corpo d'água.

Ao observar os prismas de maré de sizígia dos cenários, pode-se observar que todos os cenários projetados geraram um aumento de volume de mais de 60% em relação a situação atual. Ao comparar os cenários projetados entre si, pode-se

observar que as diferenças no prisma de maré destes chegam a no máximo 3%, isso demonstra que as novas conexões não geram reduções expressivas no prisma de maré do canal da Barra Franca, não afetando a estabilidade deste canal de maré. A Tabela 5 apresenta os prismas de maré de sizígia de cada um dos cenários para o canal da Barra Franca.

Tabela 5 - Prismas de maré de sizígia dos cenários modelados com o valor de seu aumento percentual em relação ao cenário de situação atual.

Prisma de Maré		
Cenário	Volume	Aumento percentual em relação ao cenário atual
Atual	1.66E+06 m^3	-
Dragagem	2.77E+06 m^3	67%
Mombaça	2.76E+06 m^3	66%
Jaconé	2.78E+06 m^3	67%
Todos	2.72E+06 m^3	64%

No cenário de projeto 1, que incluiu a dragagem do canal da Barra Franca e a implantação de um guia-corrente adequado, observou-se uma melhoria modesta e pontuais na renovação hídrica, mas insuficientes para atender às lagoas mais distantes da conexão com o mar. A lagoa de Fora, que já apresentava boa renovação, manteve esse padrão, enquanto a lagoa Boqueirão exibiu uma leve melhora, em relação a idade da água, com alguns pontos apresentando uma melhora de cerca de 5 dias. No entanto, lagoas como Mombaça e Jaconé permaneceram praticamente inalteradas, destacando a limitação desse cenário para o sistema como um todo. Essa limitação torna-se ainda mais evidente ao observar os resultados de modelos de transporte lagrangeano, que revelam a relevância da lagoa Mombaça para o sistema lagunar como um todo.

O cenário de projeto 2, com a abertura de uma nova conexão com o mar próxima à lagoa Mombaça, mostrou-se eficaz em aumentar a taxa de renovação nesse corpo d'água, além de melhorar a dinâmica das águas nas lagoas conectadas, mesmo a lagoa de Jaconé, que apresentou maior estagnação de águas para a situação atual, obteve uma melhora expressiva onde todos os pontos de seu domínio

ficaram abaixo dos 30 dias. Esse foi o cenário de projeto que demonstrou um melhor resultado para as lagoas centrais do sistema (Boqueirão, Jardim e Mombaça), mostrando ser uma boa alternativa para a renovação das massas de água do sistema lagunar. Pode-se observar que não há um resultado significativo para a lagoa de Fora, sendo muito semelhante a todos os outros cenários.

No cenário de projeto 3, a criação de uma nova abertura próxima à lagoa de Jaconé gerou uma renovação expressiva para esse corpo d'água, com a idade de suas águas ficando abaixo dos 20 dias, porém não teve um desempenho tão bom quanto o cenário de projeto 2 para a idade das águas em outras regiões, como por exemplo na ligação entre a lagoa Jardim e a lagoa Mombaça.

Por fim, o cenário de projeto 4, que combinou as intervenções dos cenários 2 e 3, demonstrou ser a solução mais eficaz para aumentar a renovação de água na lagoa de Jaconé, porém para as lagoas centrais do sistema (Boqueirão, Jardim e Mombaça) os resultados se mostraram muito semelhantes ao apresentado no cenário de projeto 2, não apresentando alterações significativas em relação a este.

É importante destacar que a lagoa Mombaça, que possui o maior espelho d'água e ao mesmo tempo é uma das lagoas mais afastadas do sistema possui uma alta relevância para o sistema lagunar de Saquarema visto que em todos os resultados dos modelos lagrangeanos as massas de água existentes em seu domínio no instante inicial da simulação alimentam todas as lagoas do sistema. Isso ocorre possivelmente em virtude do grande aporte fluvial que recebe em comparação com o restante do sistema. Os rios Jundiá, Tinguí e Roncador, que desaguam na lagoa Mombaça, representam juntos cerca de 80% dos aportes fluviais recebidos por todo o sistema. Deve-se considerar que melhores resultados podem ser obtidos através da utilização de hidrogramas para esses afluentes.

Considerando essa grande influência da lagoa Mombaça para o sistema lagunar, observando a equivalência dos resultados dos cenários de projeto 2 e 4 para esta lagoa e levando em consideração a complexidade da implementação de novas conexões com o mar, tem-se que o cenário de projeto 2, com a nova ligação próxima a lagoa Mombaça, tem uma relação complexidade-benefício melhor que o cenário de projeto 4, com as duas novas conexões simultâneas, tornando a abertura próxima a lagoa Mombaça uma melhor proposta de melhoria de mistura de massas d'água para o sistema.

É importante destacar que os resultados de idade da água e taxa de renovação das águas não estão necessariamente associados a resultados de qualidade de água. Os resultados de idade da água demonstram, por exemplo, massas de água com idade baixa nas regiões próximas aos afluentes do sistema lagunar, demonstrando que as águas naquela região do domínio são novas para o modelo, porém não indicando que aquela água possui boa qualidade, como de fato ocorre para a região de estudo, onde alguns afluentes possuem níveis de contaminação. Para análise de qualidade de água é necessário que seja rodado o modelo de qualidade da água, porém este foge do escopo deste trabalho.

Por fim, nota-se que existem alguns pontos do sistema em que não há uma melhora expressiva na renovação de suas águas independentemente do cenário de projeto adotado, e aqui destaca-se a região do braço existente na lagoa Jardim, onde a idade de suas águas para um período de 6 meses fica em torno de 50 dias, ou mesmo para a região da lagoa de Fora, onde mesmo na situação atual havia bons resultados de taxa de renovação e idade da água.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo abordou a hidrodinâmica do Sistema Lagunar de Saquarema, utilizando modelagem computacional para analisar cenários e propor soluções que visem a melhoria da taxa de renovação de águas. A pesquisa foi norteada por uma compreensão detalhada dos processos hidrodinâmicos, além de uma análise comparativa entre a situação atual e os cenários projetados. Os resultados alcançados reforçam a importância de intervenções estruturais no sistema lagunar para mitigar problemas de qualidade da água e promover uma renovação mais eficiente.

A presente dissertação buscou contribuir com o entendimento da hidrodinâmica do Sistema Lagunar de Saquarema, especialmente das lagoas menos valorizadas em ações de gestão, aquelas mais afastadas da ligação com o mar como a lagoa Mombaça, propondo soluções sustentadas por modelagem numérica para o aumento da renovação de suas águas. Considerando a importância ecológica, social e econômica desse sistema lagunar, a pesquisa destacou a necessidade de uma abordagem mais integrada e equitativa entre os diferentes corpos d'água que o compõem. Ao explorar cenários projetados de intervenção, mesmo sem a previsão de grandes obras estruturais, os resultados obtidos reforçam a urgência de ações concretas para mitigar a degradação ambiental e fomentar a sustentabilidade da região.

Os resultados obtidos evidenciam que a implementação de soluções como as novas aberturas propostas neste trabalho é essencial para mitigar a degradação ambiental do Sistema Lagunar de Saquarema. Contudo, recomenda-se a análise dos impactos ambientais destas intervenções, como alterações na dinâmica sedimentar e na biota. Portanto, é recomendável que futuras pesquisas incluam estudos sobre a viabilidade ambiental e econômica dessas ações, como EIA e Estudo de Impacto de Vizinhança (EIV).

Pode-se observar que os resultados inferem uma melhoria na renovação e idade da água, porém a implementação de um modelo de qualidade de água, somado aos que foram desenvolvidos, apresentará um resultado importante, visto que boa parte dos afluentes trazem água renovada para o sistema lagunar, porém com forte degradação em sua qualidade. Com isso os modelos de qualidade de água atuam

como ferramenta para apoiar decisões que visem a melhoria da qualidade de água desses afluentes, como aumento do sistema de coleta e tratamento de esgoto.

As soluções propostas não apenas melhoram a renovação das águas, oferecendo subsídios importantes para a tomada de decisão, mas também promovem a conservação do ecossistema, altamente relevante para a qualidade de vida e o bem-estar das comunidades locais, também desempenhando um auxílio para a economia do município, já que muitas das suas atividades, como pesca e turismo, são dependentes da qualidade das águas dessas lagoas. A continuidade dos estudos e a colaboração entre ciência, sociedade e governo são fundamentais para garantir a sustentabilidade do Sistema Lagunar de Saquarema.

No sistema lagunar de Saquarema, a lagoa de Fora frequentemente recebe maior atenção, sendo considerada uma prioridade em termos de monitoramento e gestão devido à sua conexão direta com o mar e à relevância econômica e turística associada. Contudo, as outras lagoas que compõem o sistema, como a lagoa Mombaça, desempenham papéis igualmente importantes no equilíbrio ecológico, na manutenção da biodiversidade e no suporte às comunidades locais. Essas lagoas, porém, tendem a ser negligenciadas em ações de conservação e manejo, o que pode comprometer a integridade do sistema como um todo e perpetuar problemas ambientais e sociais que poderiam ser mitigados com uma abordagem mais integrada e equitativa.

Ainda que não faça parte dos objetivos deste estudo, é importante ponderar a situação de abertura de novas conexões, visto que ainda que os cenários projetados visassem evitar construções, como de fato foi realizado, ainda assim não é possível evitar a Rodovia RJ-102 que fica entre o canal de ligação entre a lagoa Mombaça e a lagoa Jaconé, conhecido como rio Seco, e o mar, no caso da conexão proposta próximo a lagoa Mombaça há ainda a interceptação da mesma pela Rua B. Com isso faz-se necessário a construção de pontes na região de passagem das novas conexões, aumentando a complexidade e o custo das intervenções propostas, além de representar uma alteração no aspecto urbanístico do município de Saquarema.

Outra alteração que precisa ser observada e estudada é a implementação de guia-corrente para as novas conexões também será fundamental para auxiliar na estabilização desses novos canais, ainda que neste estudo eles não tenham sido dimensionados, por não fazerem parte do escopo deste trabalho, destaca-se a importância deles. O acoplamento de um modelo de transporte litorâneo para a região

de interesse se torna uma importante ferramenta para demonstrar a necessidade da implementação dessas estruturas de proteção.

É preciso também levar em conta o custo-benefício das intervenções, por mais que o cenário de projeto 4 apresente os melhores resultados, ele acaba se tornando uma proposta mais complexa do que o cenário de projeto 2, que apresenta também ótimos resultados mesmo para a lagoa Jaconé.

Outros efeitos das novas conexões que merecem estudos e observações são aqueles gerados na região marítima no entorno das aberturas, como por exemplo em relação a balneabilidade das praias.

Outro ponto de destaque é a dependência dos modelos computacionais em relação à qualidade e à resolução dos dados de entrada. Apesar dos esforços para utilizar as melhores informações disponíveis, é possível obter resultados mais precisos à medida que novos dados ambientais sejam aquisitados, propiciando a redução de incertezas associadas e permitindo à calibração dos modelos.

Por fim, destaca-se que a conservação do Sistema Lagunar de Saquarema depende diretamente do compromisso contínuo entre ciência, gestão pública e sociedade civil. O conhecimento gerado por este trabalho poderá subsidiar decisões mais informadas e equilibradas, contribuindo para a construção de políticas públicas que reconheçam a complexidade e a interdependência das lagoas que formam o sistema. Ao adotar uma perspectiva integrada e inclusiva, será possível avançar na direção de um modelo de gestão mais justo, sustentável e eficaz para o Sistema Lagunar de Saquarema.

6.1 RECOMENDAÇÕES

- Atualização dos dados de entrada utilizados nos modelos, visto que a área de estudo apresenta regiões com dinamismo morfológico, espera-se que com a obtenção de dados de campo seja possível a validação dos modelos. A utilização de hidrogramas para os afluentes, importantes forçantes do sistema lagunar, pode gerar resultados mais precisos.

- Integração dos modelos de transporte litorâneo e de qualidade de água para analisar a real efetividade das propostas, onde a necessidade de implementação de enrocamentos para proteção das novas conexões com o mar é alta, por conta do transporte litorâneo, enquanto os modelos de qualidade da água podem apresentar resultados qualitativos de melhoria da água, assim como apontar possíveis vulnerabilidades que as medidas possam causar em relação a balneabilidade das águas das praias no entorno das intervenções.
- Recomenda-se a adoção de medidas para melhoria do saneamento do município de Saquarema, como aumento do alcance de coleta e tratamento de esgoto.
- Recomenda-se a realização de estudos de avaliação de impactos socioambientais e de viabilidade econômica para a implementação de novas aberturas, incluindo estudos de impacto na biota local.
- Recomenda-se a utilização dos sedimentos retirados dos canais de maré na recomposição das praias.
- Por fim, recomenda-se a simulação de cenários climáticos futuros para verificar o comportamento das intervenções perante as mudanças, como por exemplo, o aumento do nível médio do mar.

7 REFERÊNCIAS

ANDRADE, Helena Asmar De Abreu. Evolução sedimentar e cronologia da barreira costeira quaternária de Maçambaba: a influência de ventos de rumos opostos e seu possível significado paleoclimático. 2015. Mestrado em Geotectônica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 28 ago. 2015. DOI 10.11606/D.44.2015.tde-22092015-150237. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-22092015-150237/. Acesso em: 6 nov. 2024.

BOSBOOM, J.; e STIVE, M. J. F. Coastal Dynamics. Delft: TU Delft Open, 2022.

BRUNO, Regina L. M. Aplicabilidade dos foraminíferos bentônicos da restituição paleoambiental e no impacto antrópico da Laguna de Saquarema, Rio de Janeiro. Revista de Geologia, [*s. l.*], v. 26, n. 1, p. 89–101, 2013.

C3S. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. [*S. l.*]: Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2018. DOI 10.24381/CDS.ADBB2D47. Disponível em: https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.adbb2d47. Acesso em: 11 dez. 2024.

CAMERON, W. M.; e PRITCHARD, D. W. The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. New York: [*s. n.*], 1963.

CARMOUZE, J. P.; KNOPPERS, B.; e VASCONCELOS, P. Metabolism of a subtropical Brazilian lagoon. Biogeochemistry, [*s. l.*], v. 14, n. 2, p. 129–148, 1991.

DA SILVA, Valéria Oliveira Borges; e CORRÊA, Roberto Machado. HISTÓRIA E ARQUEOLOGIA DO BAIRRO JACONÉ: SAQUAREMA E MARICÁ. Revista Contemporânea, [*s. l.*], v. 3, n. 8, p. 12356–12366, 21 ago. 2023. ISSN 2447-0961, 2764-7757. DOI 10.56083/RCV3N8-135.

DIAS, J. A. Gestão Integrada das Zonas Costeiras: Mito ou Realidade. II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, [*s. l.*], v. 12, 2003.

DUTRA, Valéria Cristina Silva; SILVA, André Luiz Carvalho Da; PINHEIRO, Ana Beatriz; VASCONCELOS, Sérgio Cadena De; e OLIVEIRA FILHO, Silvio Roberto De. Caracterização morfológica e sedimentar do sistema praia-barreira arenosa e os efeitos das ondas de tempestade no litoral de Jaconé-Saquarema (RJ), Sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia, [*s. l.*], v. 23, n. 2, p. 1435–1455, 6 abr. 2022. ISSN 2236-5664, 1519-1540. DOI 10.20502/rbg.v23i2.2092.

DYER, K. R. Estuaries A Physical Introduction. 2. ed. West Sussex, England: [*s. n.*], 1997.

GARCIA, B. S.; DOURADO, C. S.; MORAES, G. P.; BATISTA, M. L. S.; BITTER, V. S.; e SILVA, W. R. F. Mapeamento de áreas de preservação permanente de topo de morro

e encostas do município de Saquarema, RJ. Revista Cultivando o Saber, [*s. l.*], v. 13, n. 3, p. 58–72, 2020.

GUIMARÃES, R. L. et al. Monitoramento da Qualidade de Água dos Corpos Hídricos da Região Hidrográfica Lagos São João - RH VI. [*S. l.*]: Centro de Biologia experimental OCEANUS, 2023. p. 60. . Disponível em: https://cbhlagossaojoao.org.br/wp-content/uploads/2023/04/Relatorio_Campanha_03_CILSJ_rev01.pdf. Acesso em: 6 nov. 2024.

INEA. Boletim de Balneabilidade das Praias de Saquarema - 2024. [*S. l.*: *s. n.*], 2024.

JARRET, J. T. Tidal Prism-Inlet Area Relationships. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1976. (GITI Report 3).

KJERFVE, Björn. COMPARATIVE OCEANOGRAPHY OF COASTAL LAGOONS. *In*: Estuarine Variability. [*S. l.*]: Elsevier, 1986. p. 63–81. ISBN 978-0-12-761890-6. DOI 10.1016/B978-0-12-761890-6.50009-5. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780127618906500095. Acesso em: 28 nov. 2024.

KNEIP, Lina Maria. A utilização de plantas pelos pescadores, coletores e caçadores pré-históricos da restinga de Saquarema, Rio de Janeiro, Brasil. Rodriguésia, [*s. l.*], v. 60, n. 1, p. 203–210, mar. 2009. ISSN 2175-7860, 0370-6583. DOI 10.1590/2175-7860200960111.

KRAUS, N. C.; LARSON, M.; e WISE, R. A. Depth of closure in beach fill design. Proc. 1999 National Conference on Beach Preservation Technology, [*s. l.*], n. FSBPA, Tallahassee, Florida, 1999.

MAPBIOMAS. Coleção 9.0 da série anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. [*s. l.*], set. 2024. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org. Acesso em: 18 mar. 2025.

MARONE, E. et al. CURVA DE DESCARGA PARA CORRENTES DE MARÉ NA BAÍA DE PARANAGUÁ. Boletim Paranaense de Geociências, [*s. l.*], v. 60–61, p. 55–64, 2007.

MELO FILHO, Eloi. Considerações Sobre a Hidráulica de Canais Fluviais e de Canais de Maré. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [*s. l.*], v. 3, n. 2, p. 95–107, 1998.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; e KJERFVE, B. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo: EdUSP, 2002.

MOTTA, V. F. Processos Sedimentológicos em Estuários. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1978.

NEVES, F. G. R. C.; HAUEISEN, M. P.; SEMPREBOM, T. R.; PEIRÓ, D. F. Ecologia e estrutura de sistemas estuarinos. [*S. l.*], 16 out. 2020. Disponível em: https://www.bioicos.org.br/post/ecologia-estrutura-de-sistemas-estuarinos. Acesso em: 26 nov. 2024.

O'BRIEN, M. P. Equilibrium Areas of Inlets on Sandy Coasts. *In*: Journal of the Waterways and Harbors Division. [*S. l.*]: ASCE, fev. 1969. v. 95, p. 43–52.

OLIVEIRA, M. L. P. Análise da Hidrodinâmica do Sistema Lagunar de Saquarema Frente às Projeções de Aumento do Nível Médio do Mar. 2013. 115 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2013. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl//THESIS/6000228/2013_mestrando_mariana_lanzuolo_de_paula_oliveira_20200405202957321.pdf. Acesso em: 7 nov. 2023.

PERILLO, G. M. E.; PICCOLO, M. C.; e PINO-QUIVIRA, M. Estuaries of South America: Their Geomorphology and Dynamics. 1. ed. Berlin: [*s. n.*], 1999.

PINTO, L. R. C. et al. Estimativa do Tempo de Renovação da Água do Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá Através de Modelagem Numérica. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, [*s. l.*], 2019.

PREFEITURA DE SAQUAREMA. Diário Oficial do Município de Saquarema. Saquarema: [*s. n.*], 26 ago. 2022. Disponível em: https://dos.saquarema.rj.gov.br/wp-content/uploads/2022/08/D.O.S.-975-4-Assinado.pdf. Acesso em: 12 dez. 2024.

REIS, R. C. S.; ROSA, A. S.; e SILVA, R. A. G. INFLUÊNCIA DO TÚNEL DO TIBAU NA RENOVAÇÃO DE MASSAS D'ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA – ITAIPU, RJ. XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, [*s. l.*], 2023.

ROSMAN, P. C. C. Solução Conjunta dos Problemas de Erosão na Praia de Ipanema-Leblon e Qualidade da Água na Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ: Relatório COPPETEC-ET-170173. COPPE/UFRJ: [*s. n.*], 1992.

ROSMAN, P. C. C. Aspectos morfológicos de rios e estabilidade de canais de maré. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2010.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA. [*S. l.*: *s. n.*], 2024.

ROVERSI, Fernando; ROSMAN, Paulo Cesar Colonna; e HARARI, Joseph. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, [*s. l.*], v. 11, n. 3, p. 566, 23 jun. 2016. ISSN 1980-993X. DOI 10.4136/ambi-agua.1770.

SERENCO. Plano Municipal de Saneamento Básico de Saquarema - RJ. [*S. l.*]: SERENCO, 2013. p. 188. . Disponível em: https://pmsblsj.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/10/8c2ba-produto-saquarema-r2.pdf. Acesso em: 6 nov. 2024.

SILVA, Eliézer Cláudio Ribeiro; ALVES, Fiamma Buchinger; SOUZA, Marcelo José Raiol; PROGÊNIO, Mayke Feitosa; e COSTA, Carlos Eduardo Aguiar De Souza. MODELAGEM HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO HÍDRICA DO RIO TAPAJÓS. Revista Brasileira de Geomorfologia, [*s. l.*], v. 22, n. 2, 1 abr. 2021. ISSN 2236-5664, 1519-1540. DOI 10.20502/rbg.v22i2.1975. Disponível em: https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1975. Acesso em: 14 abr. 2025.

SILVA, R. A. G.; e ROSMAN, P. C. C. Viabilidade hidro-sedimentológica de um canal de maré projetado no oeste da Lagoa de Araruama - RJ. Revista Brasileira de

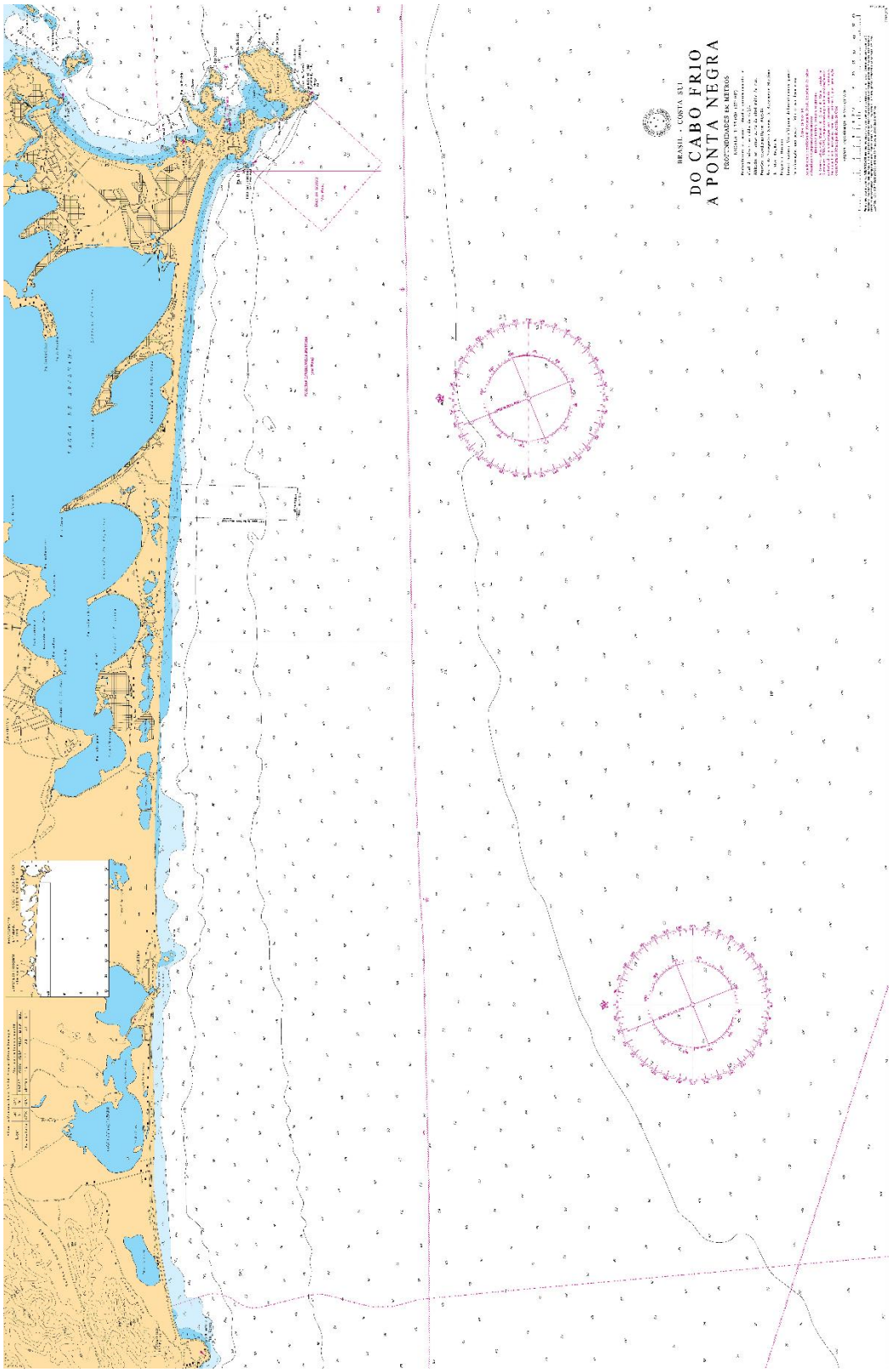
Recursos Hídricos, [*s. l.*], v. 21, n. 1, p. 25–35, 2016. ISSN 23180331. DOI 10.21168/rbrh.v21n1.p25-35.

SILVAR, L. M. D.; ANDRADE, V. S.; e ROSMAN, P. C. C. Efeitos da Desobstrução de Canais por Dragagem na Hidrodinâmica e na Idade da Água do Complexo Lagunar de Jacarepaguá. XVI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, [*s. l.*], 2024.

USACE. Coastal Engineering Manual. [*S. l.*: *s. n.*], 2011.

VALADÃO, Lívia Capecchi; CANDELLA, Rogério Neder; e MINELLO, Murilo. A abertura da barra da Lagoa de Saquarema: evolução histórica e impactos ambientais. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, [*s. l.*], v. 14, n. 2, p. 184–208, 27 dez. 2020. ISSN 2177-4560, 1981-6197. DOI 10.19180/2177-4560.v14n22020p184-208.

WASSERMAN, J. C. F. A. et al. ESTUDO DO IMPACTO AMBIENTAL DA BARRA FRANCA NA LAGOA DE SAQUAREMA - RJ. [*S. l.*: *s. n.*], 2000.

WRIGHT, J.; COLLING, A.; e PARK, D. Waves, Tides and Shallow-Water Processes. 2. ed. UK: The Open University, 1999.

Anexo A - Carta Náutica do Cabo Frio a Ponta Negra (150801) NR: baixa-mar média de sizígia.