UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

ROBERTA CALDAS SALCEDO REIS

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA AUMENTO DA RENOVAÇÃO DE ÁGUAS NO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - RJ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Dinâmica dos Oceanos e da Terra.

Orientador: Prof. Rodrigo Amado Garcia Silva.

Niterói
2025

ROBERTA CALDAS SALCEDO REIS

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA AUMENTO DA RENOVAÇÃO DE ÁGUAS NO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - RJ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Dinâmica dos Oceanos e da Terra.

Aprovado em: 20/02/2025

Comissão examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
RODRIGO AMADO GARCIA SILVA
Data: 14/03/2025 18:07:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Rodrigo Amado Garcia Silva, D. Sc. (UFF)

gov.br Documento assinado digitalmente
PAULO CESAR COLONNA ROSMAN
Data: 15/03/2025 20:29:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D. (UFRJ)

gov.br Documento assinado digitalmente
PATRICIA DALSOGLIO GARCIA
Data: 17/03/2025 17:04:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Patrícia Dalsoglio Garcia, D. Sc. (UNICAMP)

gov.br Documento assinado digitalmente
FABIO FERREIRA DIAS
Data: 17/03/2025 13:01:57-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Fabio Ferreira Dias, D. Sc. (UFF)

Niterói
2025

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

R375a Reis, Roberta Caldas Salcedo
ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA AUMENTO DA RENOVAÇÃO DE ÁGUAS NO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - RJ / Roberta Caldas Salcedo Reis. - 2025.
109 f.: il.

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

1. Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu. 2. Renovação das Águas. 3. Túnel do Tibau. 4. Canal de Itaipu. 5. Produção intelectual. I. Amado Garcia Silva, Rodrigo, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. III. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

Dedicatória

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida:
minha amada mãe Marcia pelo eterno apoio,
meus pais de sangue e coração (in memoriam) Ronaldo e Luís pelos aprendizados,
minha incansável e admirável avó Zoelia e
meus queridos familiares e amigos por todo carinho.

Agradecimentos

Ao financiamento da FAPERJ – Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Processo SEI E-26/200.239/2023.

Ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, pela minha formação e pelas oportunidades concedidas.

À Universidade Federal Fluminense, pelo investimento na minha formação como Engenheira Ambiental.

Ao meu orientador Prof. Rodrigo Amado, por todo ensinamento, paciência e pelas oportunidades. Agradeço muito por toda ajuda.

Ao Prof. Rosman, por todo apoio e suporte que fornece aos usuários dos SisBaHiA®, ferramenta que foi fundamental a este trabalho.

Aos meus amigos e colegas presentes no LABCOST: Augusto, Daniel, Mel e Gabriel, pelo conhecimento compartilhado e por criarem um ambiente prazeroso de se trabalhar.

À Prof. Patrícia e ao Prof. Fabio, por disponibilizarem um pouco de seu tempo para participar da banca avaliadora deste trabalho.

Resumo

O município de Niterói, localizado na porção leste da Baía de Guanabara, no estado do Rio de Janeiro, é conhecido por sua região costeira e pelo sistema lagunar adjacente que possuem grande importância social, econômica e ambiental para região. Este estudo analisou os padrões hidrodinâmicos e a renovação de massas d'água do sistema lagunar Piratininga-Itaipu, localizado na região oceânica deste município e composto por duas lagunas costeiras, Piratininga e Itaipu. O sistema vem sofrendo há décadas com problemas relacionados à qualidade de suas águas e assoreamento dos seus canais de ligação. A abordagem metodológica baseou-se em simulações computacionais realizadas com diferentes cenários, incluindo a dragagem do canal responsável pela comunicação entre as lagunas (Canal de Camboatá), dragagem do canal que conecta Itaipu ao mar (Canal de Itaipu) e a desobstrução do Túnel do Tibau, responsável por conectar Piratininga ao mar, visando explorar soluções para melhorar a renovação das águas e a conectividade hidrodinâmica do sistema. Os estudos indicaram que os aportes fluviais representam a principal forma de renovação hídrica da Laguna de Piratininga, evidenciando a importância desses fluxos para a manutenção da qualidade da água. Constatou-se também a necessidade de manutenção da seção hidráulica do Canal de Camboatá, uma vez que sua condição atual limita significativamente a circulação entre as lagunas e compromete o balanço hídrico do sistema. Por outro lado, o Canal de Itaipu demonstrou ser fundamental para a renovação da Laguna de Itaipu, mas suas alterações não promoveram efeitos significativos sobre a dinâmica da Laguna de Piratininga, reforçando a limitação de fluxo sofrida no Canal de Camboatá. Os resultados obtidos destacam a necessidade de manutenção e melhorias nas estruturas de conectividade, como o Túnel do Tibau e os canais de comunicação, para garantia de um balanço hídrico adequado, minimizando áreas críticas de estagnação e promovendo a sustentabilidade ecológica do sistema lagunar Piratininga-Itaipu.

Palavras-chave: Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, Renovação das Águas, Túnel do Tibau, Canal de Itaipu, Canal de Camboatá.

Abstract

The municipality of Niterói, located on the eastern side of Guanabara Bay in the state of Rio de Janeiro, is known for its coastal region and adjacent lagoon system, which hold great social, economic, and environmental importance. This study analyzed the hydrodynamic patterns and water renewal processes of the Piratininga-Itaipu lagoon system, located in the oceanic region of the municipality and composed of two coastal lagoons: Piratininga and Itaipu. The system has been facing long-standing issues related to water quality and sedimentation in its connecting channels. The methodological approach was based on computational simulations under different scenarios, including dredging of the channel connecting the lagoons (Camboatá Channel), dredging of the channel linking Itaipu Lagoon to the sea (Itaipu Channel), and the removal of obstructions from the Tibau Tunnel, which connects Piratininga Lagoon to the ocean. These interventions were assessed as potential solutions to improve water renewal and hydrodynamic connectivity within the system. The results indicated that fluvial inflows are the primary source of water renewal in the Piratininga Lagoon, underscoring their importance for maintaining water quality. The study also highlighted the need to preserve the hydraulic section of the Camboatá Channel, as its current condition severely restricts circulation between the lagoons and compromises the overall water balance. Conversely, the Itaipu Channel proved essential for the renewal of Itaipu Lagoon; however, changes to this channel did not significantly affect the dynamics of Piratininga Lagoon, reinforcing the critical role of sedimentation in the Camboatá Channel. Overall, the findings underscore the importance of maintaining and improving key connectivity structures—such as the Tibau Tunnel and the system's communication channels—to ensure a proper water balance, minimize stagnation-prone areas, and support the ecological sustainability of the Piratininga-Itaipu lagoon system.

Keywords: Piratininga-Itaipu Lagoon System, Water Renewal, Tibau Tunnel, Itaipu Channel, Camboatá Channel.

Sumário

Dedicatória.....I
Agradecimentos.....II
Resumo.....III
Abstract.....IV
Sumário.....V
Lista de Figuras:.....VII
Lista de Tabelas:.....XV
1 INTRODUÇÃO.....1
2 OBJETIVOS.....3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....4
3.1 Área de Estudo.....4
3.1.1 Laguna de Piratininga.....5
3.1.2 Laguna de Itaipu.....7
3.1.3 Canal de Itaipu.....9
3.1.4 Canal de Camboatá.....12
3.1.5 Túnel do Tibau.....13
3.2 Estuários.....15
3.3 Marés.....19
3.4 Canais de Maré.....24
4 METODOLOGIA.....28
4.1 Modelo Hidrodinâmico (MH).....28
4.1.1 Equações Governantes.....29
4.1.2 Condições de Contorno.....33
4.1.3 Condições Iniciais.....33
4.2 Modelo de Transporte Euleriano (ME).....33
4.2.1 Taxa de Renovação.....34
4.2.2 Idade da Água.....35
4.3 Análises Realizadas.....37
4.4 Condicionantes dos Modelos.....38
4.4.1 Modelo Digital do Terreno.....39
4.4.2 Maré e Variações de Níveis.....42
4.4.3 Ventos.....44
4.4.4 Vazões dos Afluentes e ETEs.....46
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....49
5.1 Calibração e Validação do Modelo.....49
5.2 Modelo Hidrodinâmico.....51

5.2.1 Cenário Base do Sistema Lagunar 51
5.2.2 Situação Projetada Considerando o Túnel do Tibau Fechado 57
5.2.3 Situação Projetada Considerando o Canal de Itaipu Dragado 59
5.2.4 Situação Projetada Considerando o Canal de Camboatá Dragado 61
5.2.5 Situação Projetada Considerando todos os Canais Otimizados 63
5.2.6 Análise Comparativa entre os Níveis D'Água Obtidos 65
5.3 Taxa de Renovação 68
5.3.1 Cenário Base do Sistema Lagunar 69
5.3.2 Situação Projetada Considerando o Túnel do Tibau Fechado 74
5.3.3 Situação Projetada Considerando o Canal de Itaipu Dragado 77
5.3.4 Situação Projetada Considerando o Canal de Camboatá Dragado 80
5.3.5 Situação Projetada Considerando todos os Canais Otimizados 83
5.4 Idade da Água 86
5.4.1 Cenário Base do Sistema Lagunar 87
5.4.2 Situação Projetada Considerando o Túnel do Tibau Fechado 90
5.4.3 Situação Projetada Considerando o Canal de Itaipu Dragado 92
5.4.4 Situação Projetada Considerando o Canal de Camboatá Dragado 95
5.4.5 Situação Projetada Considerando todos os Canais Otimizados 97
5.5 Análise dos Pontos Críticos 99
5.6 Análises Comparativas de Renovação 103
6 CONCLUSÃO 105
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 107

Lista de Figuras:

Figura 1– Imagem do sistema lagunar Piratininga-Itaipu, em destaque as lagunas e canais. Fonte: Adaptado do Google Earth.....1
Figura 2– Localização do sistema lagunar Piratininga-Itaipu. Fonte: CUNHA et al. (2020). 4
Figura 3– Imagem de satélite da Laguna de Piratininga. Fonte: Google Earth. 5
Figura 4– A Laguna de Piratininga apresentando problemas relacionados à qualidade hídrica. Fonte: Acervo pessoal da autora. 6
Figura 5– Jardins filtrantes instalados na Laguna de Piratininga. Na imagem a) pode-se ver os tanques destinados à decantação, na b) e c) os jardins destinados aos momentos de filtragem e na d) o deságue na laguna. Fonte: Acervo pessoal da autora. 7
Figura 6– Imagem de satélite da Laguna de Itaipu. Fonte: Google Earth.....8
Figura 7– Região da Laguna de Itaipu que encontra o canal mostrando partes emersas consequência do assoreamento. Fonte: Acervo pessoal da autora. 9
Figura 8– Momento anterior à abertura do Canal de Itaipu. Fonte: Almiro Baraúna, 1958. LABHOI, UFF. 10
Figura 9– Canal de Itaipu atualmente, na imagem é possível visualizar o assoreamento na região da embocadura e os guia-correntes. Fonte: Leandro Matheus. 11
Figura 10 - Canal de Camboatá com destaque para a) estrutura da antiga comporta, b) acúmulo de sedimentos emersos e c) estrangulamento da seção causado pelo crescimento da vegetação. Fontes: Google Earth e acervo pessoal.....13
Figura 11– Embocadura do Túnel do Tibau. Destaque para a) região pós soleira e b) indicação de parte da soleira. Fonte: Acervo pessoal da autora. 14
Figura 12 – Imagem mostrando a estrutura atual de conexão do túnel com a laguna, com indicação da cota da soleira. a) foto tirada de cima da estrutura, b) foto da mesma estrutura tirada no sentido da laguna. Fonte: Acervo pessoal da autora. 14
Figura 13– Divisão por regiões dos estuários. Adaptado de WRIGHT et al., 1999. 16
Figura 14- Laguna de Piratininga. Fonte: Google Earth. 17
Figura 15- Sistema lagunar Piratininga-Itaipu e porção marítima adjacente. Fonte: Google Earth. 18
Figura 16- A Laguna de Itaipu em primeiro plano e em destaque os rios João Mendes e Vala, dois dos maiores contribuintes em termos de vazão de água doce para o sistema

lagunar estudado. Fonte: Google Earth. 19
Figura 17- Representação de uma onda de maré estacionária. Adaptado de VALENTINI & ROSMAN, 2010. 20
Figura 18- Órbitas simplificadas da Terra ao redor do Sol e da Lua ao redor da Terra geradas pela força de atração dos corpos aos centros de massa de seus sistemas. Adaptado de BOSBOOM & STIVE, 2022. 21
Figura 19-Direção das forças gravitacionais diferenciais atuantes na superfície da Terra. Adaptado de Bosboom & Stive, 2022. 21
Figura 20-Marés resultantes da força gravitacional e do posicionamento dos corpos celestes Lua e Sol em relação ao planeta Terra. Adaptado de Bosboom & Stive, 2022.....22
Figura 21- Variações de maré total ou observada e da maré meteorológica para a região de interesse do estudo durante 35 dias em 2018. PMN, 2018. 24
Figura 22-Esquema de correntes de maré enchente e vazante em um canal de maré. Adaptado de O'BRIEN, 1969 apud USACE, 2012. 24
Figura 23- Canal de maré assoreado que faz a ligação da Laguna de Itaipu com o mar e principal conexão de todo o sistema lagunar com o oceano. Fonte: Google Earth.....26
Figura 24- Relação entre largura e profundidade da menor seção transversal para canais de maré, referentes ao nível médio do mar, obtida através da observação de vários canais de maré estáveis e de resultados de modelos de laboratório. Adaptado de PINTO, 1999.....27
Figura 25- Batimetria utilizada para a modelagem na região de interesse.....40
Figura 26- Mapa das lagunas com a malha sobreposta à região do domínio. 40
Figura 27- Cartas Náuticas 1511e 1501 contendo os dados de batimetria imposta na porção marítima para a realização do estudo. Fonte: DHN. 41
Figura 28- Variações de maré observadas no período observado e impostas ao modelo como condição de contorno.....42
Figura 29- Pontos onde foram realizadas as medições de níveis d'água. Fonte: Google Earth. 43
Figura 30- Variações de níveis d'água nos 3 pontos referenciados na Figura 29. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. 44
Figura 31- Distribuição percentual da ocorrência de ventos utilizados pelos modelos na região do sistema lagunar no período estudado. 45
Figura 32- Localização do ponto de obtenção da série temporal para os dados de vento. Fonte: Google Earth. 46

Figura 33- Localização dos aportes fluviais considerados no estudo. Fonte: Google Earth. 47
Figura 34- Localização das estações de tratamento de esgoto consideradas. Fonte: Google Earth. 48
Figura 35- Comparação entre níveis para a Laguna de Itaipu na calibração. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.....50
Figura 36– Comparação entre níveis para a Laguna de Piratininga na validação. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. 50
Figura 37- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ no cenário base do sistema lagunar. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.....52
Figura 38- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ no cenário base do sistema lagunar. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.....52
Figura 39- Séries temporais das variações de níveis d'água no cenário base do sistema lagunar. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.....53
Figura 40- Velocidades obtidas em momento de PM de SZ. Detalhes da velocidade de corrente e sentido de fluxo na entrada do canal de maré. 54
Figura 41- a) Trajeto percorrido para obtenção do perfil. b) Momentos de BM e PM considerados. c) Perfil da linha d'água entre períodos de BM e PM. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.....56
Figura 42- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.....58
Figura 43- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.....58
Figura 44- Séries temporais das variações de níveis d'água da situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29. 59
Figura 45- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.....60
Figura 46- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.....60
Figura 47- Séries temporais das variações de níveis d'água da situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta

Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29. 61
Figura 48- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. 62
Figura 49- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. 62
Figura 50- Séries temporais das variações de níveis d'água.na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29. 63
Figura 51- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando todos os canais otimizados. 64
Figura 52- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando todos os canais otimizados. 64
Figura 53- Séries temporais das variações de níveis d'água.na situação projetada considerando todos os canais otimizados. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29. 65
Figura 54- Análise Comparativa das simulações para a região central da Laguna de Piratininga. 66
Figura 55- Análise Comparativa das simulações para a região central da Laguna de Itaipu. 66
Figura 56 - Pontos analisados para análise comparativa de níveis d'água entre as simulações. Fonte: Google Earth. 67
Figura 57- Taxas de renovação nos momentos inicias da simulação. 68
Figura 58- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para o cenário base do sistema lagunar. 69
Figura 59- Taxas de renovação após 10 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar. 70
Figura 60- Taxas de renovação após 15 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar. 71
Figura 61- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para o cenário base do sistema lagunar. 72

Figura 62- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, no cenário base do sistema lagunar. 73
Figura 63- Pontos analisados para análise comparativa das taxas de renovação. Fonte: Google Earth. 73
Figura 64- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. 74
Figura 65- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. 75
Figura 66- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. 75
Figura 67- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. 76
Figura 68- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. 76
Figura 69- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. 78
Figura 70- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. 78
Figura 71- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. 79
Figura 72- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. 79
Figura 73- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. 80
Figura 74- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. 81
Figura 75- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. 81
Figura 76- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. 82

Figura 77- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. 82
Figura 78- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.....83
Figura 79- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.....84
Figura 80- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.....84
Figura 81- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.....85
Figura 82- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.....85
Figura 83- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando todos os canais otimizados. 86
Figura 84- Idade da água nos momentos inicias da simulação. 87
Figura 85- Idade da água após 5 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar**.** ..88
Figura 86- Idade da água após 15 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar. 88
Figura 87- Idade da água após 35 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar. 89
Figura 88- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, no cenário base do sistema lagunar.....89
Figura 89- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.....90
Figura 90- Idade da água após 15 dias simulados para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.....91
Figura 91- Idade da água após 35 dias simulados para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.....91
Figura 92- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. 92
Figura 93- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o

Canal de Itaipu dragado.....93
Figura 94- Idade da água após 15 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.....93
Figura 95- Idade da água após 35 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.....94
Figura 96- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. 94
Figura 97- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.....95
Figura 98- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.....96
Figura 99- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.....96
Figura 100- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. 97
Figura 101- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando todos os canais otimizados. 97
Figura 102- Idade da água após 15 dias simulados para a situação projetada considerando todos os canais otimizados. 98
Figura 103- Idade da água após 35 dias simulados para a situação projetada considerando todos os canais otimizados. 98
Figura 104- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando todos os canais otimizados. 99
Figura 105- Análise das profundidades obtidas para a região central da Laguna de Piratininga. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. 100
Figura 106- Resultados obtidos para altura da coluna d'água, em momento de menor profundidade para a região central da Laguna de Piratininga, após dragagem do Canal de Camboatá. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. 101
Figura 107- Localização dos pontos analisados individualmente. Fonte: Google Earth. ..102
Figura 108- Série temporal da coluna d’água no cenário que considera o Canal de

Camboatá dragado. 102
Figura 109- Séries temporais de renovação comparativa entre as simulações analisadas para a região central da Laguna de Piratininga. 103
Figura 110- Séries temporais de renovação comparativa entre as simulações analisadas para a região central da Laguna de Itaipu. 104

Lista de Tabelas:

Tabela 1- Significado dos termos da equação (1) e, analogamente, da equação(2). Fonte: ROSMAN, 2024. 32
Tabela 2 – Significado dos termos da equação (3). Fonte: ROSMAN, 2024. 32
Tabela 3- Valores de rugosidade equivalente do fundo. Adaptado de ROSMAN, 2024..... 41
Tabela 4- Vazões de contribuição para a Laguna de Piratininga. 46
Tabela 5- Vazões de contribuição para a Laguna de Itaipu. 46
Tabela 6- Localização das estações de tratamento de esgoto na região estudada. 47

1 INTRODUÇÃO

O município de Niterói, localizado na porção leste da Baía de Guanabara no estado do Rio de Janeiro, é conhecido por sua região costeira e pelo sistema lagunar adjacente que possuem grande importância social, econômica e ambiental para região.

A região oceânica do município conta com um intenso aumento da sua população e consequente urbanização nos últimos anos. Com cinco praias (Camboinhas, Sossego, Piratininga, Itaipu e Itacoatiara) e duas lagunas costeiras (Piratininga e Itaipu), interligadas pelo Canal de Camboatá (2,15 Km de extensão, 9,50 m de largura e 0,40 m de profundidade, sendo esses valores médios), que acompanham o seu crescimento e sofrem constantemente com os processos de urbanização, modificando assim características locais. Figura 1 mostra a área de estudo com a localização das lagunas e canais. O Canal de Itaipu, faz a ligação da Laguna de Itaipu com o mar, o Túnel do Tibau, que liga o mar com Laguna de Piratininga e o Canal do Camboatá que comunica as duas lagunas entre si.

Figura 1– Imagem do sistema lagunar Piratininga-Itaipu, em destaque as lagunas e canais. Fonte: Adaptado do Google Earth.

Segundo o censo demográfico de 2010 do IBGE, com 459.451 da população total de Niterói, 55.790 eram referentes à região oceânica. Em 2021, o IBGE contabilizou 516.981 habitantes para o município, sendo 102.873 destes só na região oceânica,

simbolizando que, nesse espaço de tempo, houve um significativo crescimento populacional para esta área.

Com o aumento demográfico na região, o sistema lagunar Piratininga-Itaipu, tem sofrido um intenso processo de degradação ambiental. Os níveis tróficos deste sistema são motivo de preocupação, já que a eutrofização pode comprometer as espécies da vida aquática desses corpos d'água. Desde 2009, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) busca implementar medidas no processo de revitalização do sistema lagunar, que vem sofrendo com problemas relacionados à qualidade da água das lagunas e assoreamentos dos canais responsáveis pela comunicação com o mar adjacente.

Em 2008, a SERLA (Secretaria Estadual de Rios e Lagoas) executou o projeto de escavação de um túnel no costão rochoso de Piratininga (Túnel do Tibau), uma tentativa de aumentar o fluxo resultante de água do mar com a Laguna de Piratininga. O objetivo da obra era aumentar a circulação e a taxa de renovação do sistema, mas as instalações encontram-se sem manutenção, com desabamento de rochas dentro e na foz do túnel (PMN, 2018). Nos últimos anos, houve recorrentes episódios de interrupção parcial do fluxo pelo túnel, com posteriores tentativas de restabelecimento do mesmo por parte da prefeitura. Esse fluxo interrompido vem comprometendo a qualidade da água na região.

Dentro deste contexto, o presente estudo traz simulações obtidas através da modelagem computacional de circulação hidrodinâmica, renovação de águas e idade da água das lagunas, de forma a verificar a renovação de massas de água do sistema lagunar. A abordagem prévia de SILVA et al. (2013) para a modelagem ambiental deste corpo hídrico serviu como subsídio para realização das simulações aqui presentes.

O uso de modelos é importante por ser uma ferramenta que possibilita entender a dinâmica de um sistema natural, computando assim dados medidos em pontos isolados para emular uma situação de estudo (ROSMAN, 2024).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise abrangente dos padrões de circulação hidrodinâmica e das trocas de massa d'água entre as lagunas de Piratininga e Itaipu, bem como entre essas lagunas e o mar adjacente. Este estudo tem como objetivo avaliar a influência dos canais de ligação no sistema lagunar, buscando identificar os cenários que promovem uma renovação melhorada das águas.

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Calibrar e validar um modelo hidrodinâmico, para cálculo dos padrões da circulação hidrodinâmica presentes na área de estudo e subsídio para o modelo de transporte euleriano;
- Analisar a influência do Túnel do Tibau na renovação das massas d'água da Laguna de Piratininga, considerando a obstrução existente e em como isso impacta na renovação do sistema como um todo;
- Analisar a influência Canal de Itaipu, traçando uma análise comparativa da renovação entre o canal assoreado e dragado, podendo assim entender melhor a forma como a principal fonte de fluxo do sistema lagunar com o mar pode ser melhorada;
- De forma semelhante, traçar a análise comparativa da renovação com destaque para o Canal de Camboatá, entendendo melhor o papel do canal de ligação entre as lagunas e a renovação do sistema;
- Analisar o comportamento das massas d'água com a execução de todas as melhorias propostas ao sistema sendo executadas de forma simultânea.

Para isto foram feitas análises executando modelos computacionais hidrodinâmicos e de transporte eulerianos do SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Todos os modelos considerados neste estudo serão descritos melhor no decorrer do trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo apresenta a área estudada seguida de uma revisão da literatura sobre conceitos e aspectos relevantes a este estudo. Discute-se inicialmente características físicas dos sistemas lagunares, na sequência aborda-se alguns aspectos representativos de maré e por fim discute-se alguns pontos de canal de maré.

3.1 Área de Estudo

Esta seção apresenta, em maiores detalhes, a área de estudo que engloba toda a região do sistema lagunar Piratininga-Itaipu e traz também o canal responsável pela ligação entre as lagunas e suas ligações marítimas, todos mostrados na Figura 2. No decorrer do capítulo, apresentam-se também as motivações para as melhorias propostas.

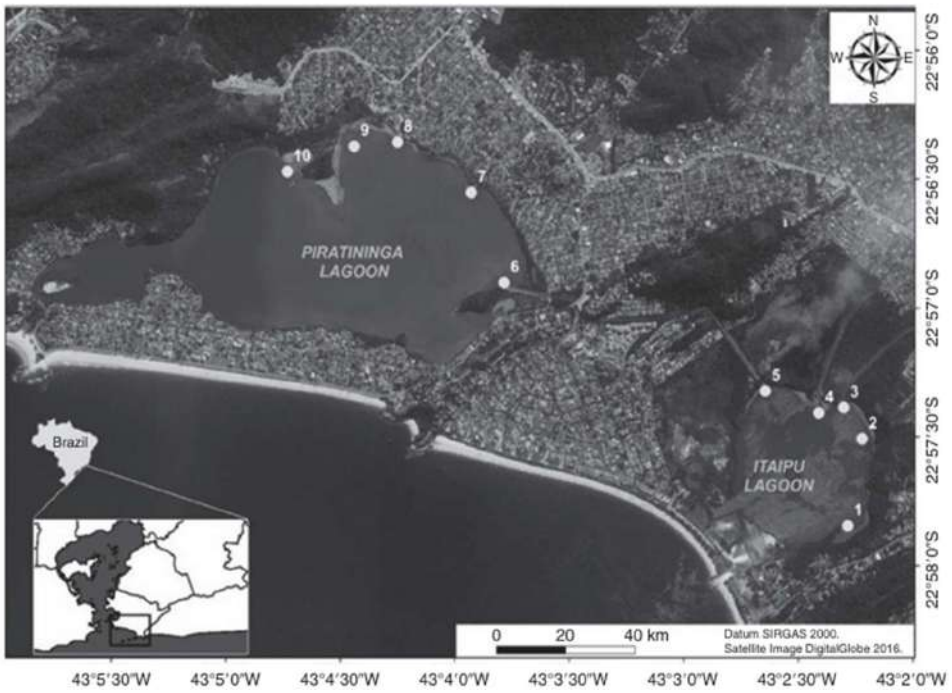

Figura 2– Localização do sistema lagunar Piratininga-Itaipu. Fonte: CUNHA et al. (2020).

A área de abrangência do sistema lagunar coincide com a delimitação político-administrativa do Subcomitê Lagoas de Itaipu e Piratininga, parte integrante do Comitê de Bacia da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara.

3.1.1 Laguna de Piratininga

A maior laguna do sistema lagunar, mostrada na Figura 3, possui uma área aproximada de 2,87 km² com uma profundidade média de 0,5 m segundo CBH (2024). Possui também características típicas de ambientes costeiros tropicais, alta biodiversidade e importância para a pesca artesanal.

Figura 3– Imagem de satélite da Laguna de Piratininga. Fonte: Google Earth.

Nas últimas décadas, Piratininga tem enfrentado sérios problemas ambientais que comprometem sua qualidade e sustentabilidade ecológica. O acúmulo de sedimentos resultante de atividades antrópicas e de processos naturais reduzem a profundidade e dificultam a troca de água com a laguna vizinha, limitando a renovação hídrica e promovendo a estagnação, fato agravado pela obstrução do Túnel do Tibau.

Segundo RIBEIRO et al. (2021), a principal fonte de contaminação do sistema lagunar é o despejo de efluentes não tratados diretamente na laguna e em seus contribuintes, resultante da ocupação desregular que a região apresentou nas últimas décadas. Sendo assim, o aporte excessivo de nutrientes tem intensificado a eutrofização — fenômeno caracterizado pelo crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, que decompõem o oxigênio disponível, resultando em um ambiente menos favorável à vida aquática, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4– A Laguna de Piratininga apresentando problemas relacionados à qualidade hídrica. Fonte: Acervo pessoal da autora.

Nos últimos anos, a prefeitura municipal de Niterói promoveu um programa com vertentes em urbanização, infraestrutura e sustentabilidade ambiental que norteou o projeto dos jardins filtrantes, que são tratamentos baseados na natureza para efluentes e lodo, localizados na porção norte da laguna e que capta águas dos aportes fluviais que antes eram destinados sem receber tratamento prévio. Apesar de ter sido implantando a pouco tempo, o programa prevê tratamento das águas fluviais que passam pela maior parte da comunidade localizada no entorno da laguna. O programa e os detalhes técnicos são disponibilizados pela própria prefeitura através do portal: ***https://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br/.*** A região onde estão instalados os jardins filtrantes pode ser vista na Figura 5.

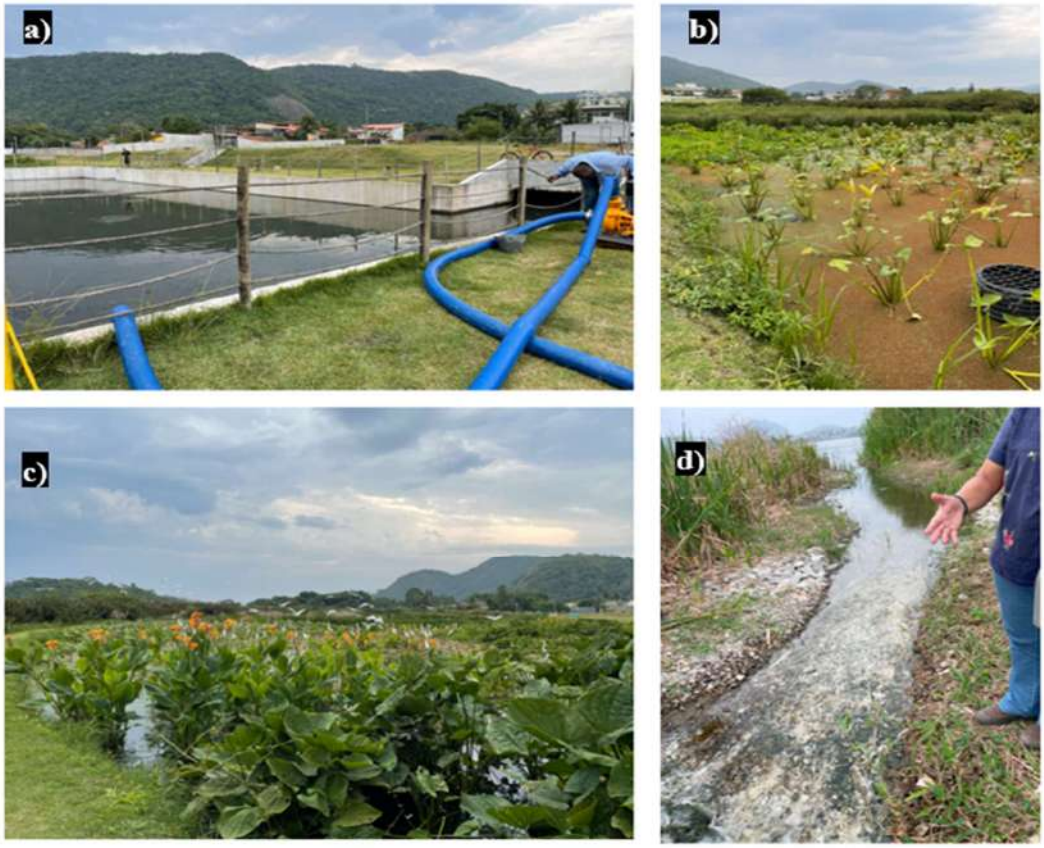

Figura 5– Jardins filtrantes instalados na Laguna de Piratininga. Na imagem a) pode-se ver os tanques destinados à decantação, na b) e c) os jardins destinados aos momentos de filtragem e na d) o deságue na laguna. Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.1.2 Laguna de Itaipu

A Laguna de Itaipu, mostrada na Figura 6 e situada ao lado de Piratininga, possui uma área total de aproximadamente 1,0 km² com o dobro desta área em alagadiço no entorno, sua profundidade média é superior, variando em torno de 1,3 m segundo o Comitê, o que proporciona características hidrodinâmicas diferentes dentro do sistema lagunar. Itaipu tem importância ecológica e econômica, abrigando várias espécies de peixes e vegetação aquática que sustentam atividades de pesca e lazer para a comunidade local.

A renovação das águas de Itaipu com o mar impede a ocorrência de estágios mais críticos de eutrofização, apesar desta laguna receber uma carga de esgoto maior que a de Piratininga.

Figura 6– Imagem de satélite da Laguna de Itaipu. Fonte: Google Earth.

Assim como Piratininga, a Laguna de Itaipu enfrenta desafios ambientais que comprometem sua integridade ecológica. O assoreamento do seu canal, causado pelo depósito de sedimentos provenientes das correntes litorâneas, e a limitada conexão com o oceano têm reduzido a renovação de suas águas, o que, por sua vez, favorece a estagnação e contribui para problemas de qualidade da água.

Figura 7 mostra regiões emersas localizada no trecho em que a laguna encontra o Canal de Itaipu, responsável por sua conexão com o mar.

Figura 7– Região da Laguna de Itaipu que encontra o canal mostrando partes emersas consequência do assoreamento. Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.1.3 Canal de Itaipu

O Canal de Itaipu é a principal conexão do sistema lagunar com o oceano, possuindo assim papel fundamental na troca de massas d'água e manutenção da qualidade ambiental do sistema, contribuindo para a estabilidade ecológica e ajudando a mitigar os efeitos da eutrofização, favorecendo assim a biodiversidade aquática e as atividades de pesca locais.

Segundo MACH & LONGO (1998), originalmente a Laguna de Itaipu possuía uma conexão mais natural sendo uma lagoa em regime de cheias. Sua conexão com o mar ocorria apenas com o rompimento da barra do canal natural, que em outros momentos se fechava, mostrado na Figura 8.

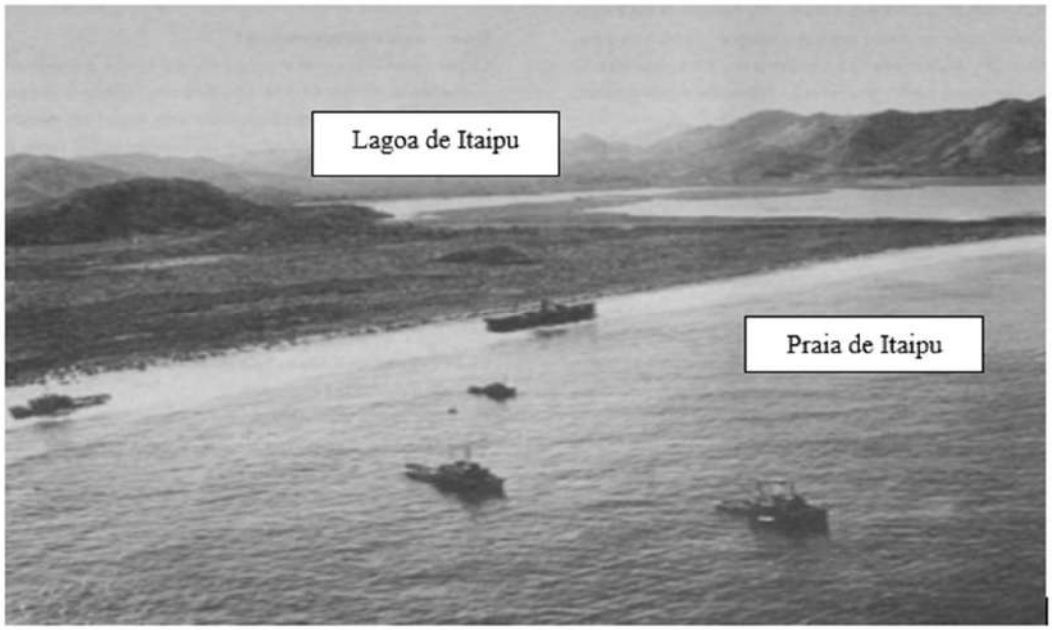

Figura 8– Momento anterior à abertura do Canal de Itaipu. Fonte: Almiro Baraúna, 1958. LABHOI, UFF.

Com o aumento da ocupação urbana, o canal passou a sofrer intervenções para manter sua funcionalidade. Dentre essas, destacam-se a tentativa de estabilização da embocadura, ocorrida na década de 70, com a instalação de guia-correntes e algumas ações de dragagem para promover navegabilidade.

Essas estruturas rígidas ligadas à costa têm como objetivo guiar as correntes litorâneas de forma ordenada no interior do canal de maré, promovendo a proteção da embocadura da deposição excessiva de sedimentos. Segundo REIS et al. (2024), tais estruturas são demasiadamente curtas, não cumprem efetivamente sua função e não evitam que o assoreamento na região ocorra, como pode ser visto na Figura 9.

Para o Canal de Itaipu ser considerado hidro-sedimentologicamente estável, ou seja, quando os fluxos de maré enchente e vazante são capazes de expelir o excesso de sedimentos depositados (SILVA & ROSMAN, 2016), as estruturas deveriam ser prolongadas até a profundidade de fechamento.

Com fluxo constantemente prejudicado na região, as amplitudes de maré são bem amortecidas e a renovação ocorre mais lentamente, ainda assim a qualidade das águas de Itaipu são superiores se comparadas à sua vizinha.

Figura 9– Canal de Itaipu atualmente, na imagem é possível visualizar o assoreamento na região da embocadura e os guia-correntes. Fonte: Leandro Matheus.

Segundo SIQUEIRA & QUEIROZ (2012), a dragagem do canal de maré traria um significativo aumento na comunicação com o mar, o que intensificaria as suas amplitudes de oscilação de nível médio e permitiria a entrada de vazões bem maiores do que as registradas atualmente. Para que se determine até que distância o guia-correntes deve ser prolongado, deve-se conhecer o clima de ondas local, para então se tomar conhecimento de em que profundidade ocorre a sua zona de arrebentação.

Ainda segundo SIQUEIRA & QUEIROZ (2012), a profundidade de fechamento do guia-correntes do canal, ou seja, a profundidade até a qual ele deve se estender, seria de aproximadamente 6 m.

3.1.4 Canal de Camboatá

Historicamente, as lagunas de Piratininga e Itaipu eram sistemas independentes. Contudo, em 1946, foi aberta a ligação pelo Canal de Camboatá, que permitiu a comunicação entre as duas lagunas. A obra foi feita com o intuído de evitar as enchentes que ocorriam com frequência na época. No entanto, tal fato causou alteração do nível de água em Piratininga, ocasionando transformações nas condições hidráulicas e ambientais do sistema (MACH & LONGO, 1998).

Desde sua abertura, em 1946, o canal desempenha um papel importante na hidrodinâmica do sistema, influenciando o transporte de sedimentos e a renovação da água nas duas lagunas. Essa conexão entre Piratininga e Itaipu contribui para a distribuição de nutrientes e, em certos momentos, para a troca de organismos entre os dois ambientes, favorecendo a biodiversidade e o equilíbrio ecológico do sistema lagunar.

Originalmente, as lagunas de Piratininga e Itaipu eram ecossistemas independentes e com dinâmicas distintas, mas em 1946 ocorreu a abertura desse canal que proporcionou comunicação permanente entre as duas lagunas. Segundo MACH & LONGO (1998), houve a instalação de comportas objetivando regulação de nível de água para a Laguna de Piratininga. No entanto, essas comportas foram desativadas e as estruturas ficaram abandonadas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), contribuindo para a perda de carga hidráulica na região, agravando a deposição de sedimentos na área.

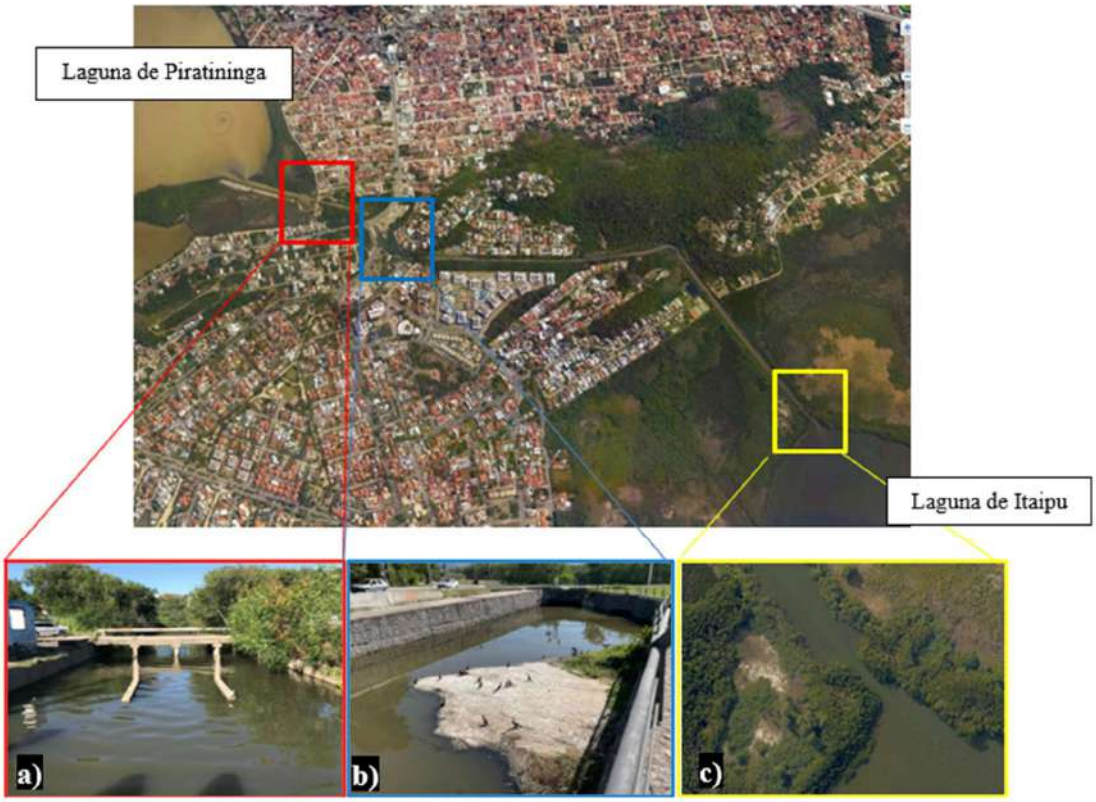

Figura 10 - Canal de Camboatá com destaque para a) estrutura da antiga comporta, b) acúmulo de sedimentos emersos e c) estrangulamento da seção causado pelo crescimento da vegetação. Fontes: Google Earth e acervo pessoal.

Outro agravante encontrado foi a presença de bancos de sedimentos emersos e seções hidráulicas estranguladas pela vegetação, o que igualmente contribui negativamente para o fluxo da região.

3.1.5 Túnel do Tibau

Inaugurado em 2008, o Túnel do Tibau que foi projetado sendo escavado em rocha e que liga a parte marítima adjacente à Laguna de Piratininga, vem apresentando um histórico de desmoronamento de rochas no seu interior e obstrução parcial do fluxo. Segundo noticiários locais e confirmado pela própria prefeitura, foram registrados três desmoronamentos e duas intervenções para restauração do fluxo, que atualmente encontra-se obstruído. Sendo assim, a estrutura não promove a renovação esperada e, como o Canal de Camboatá vem apresentando problemas de assoreamento, a Laguna de

Piratininga não possui nenhuma das duas ligações funcionando plenamente.

O túnel conta com um sistema de comportas e também com soleira responsável pela regularização do nível da laguna (Figura 11 e Figura 12), que possui histórico de níveis d'água tão baixos que seu fundo ficava exposto gerando mau cheiro para a região. As comporta não se encontram em funcionamento atualmente, possivelmente por falta de manutenção.

Figura 11– Embocadura do Túnel do Tibau. Destaque para a) região pós soleira e b) indicação de parte da soleira. Fonte: Acervo pessoal da autora.

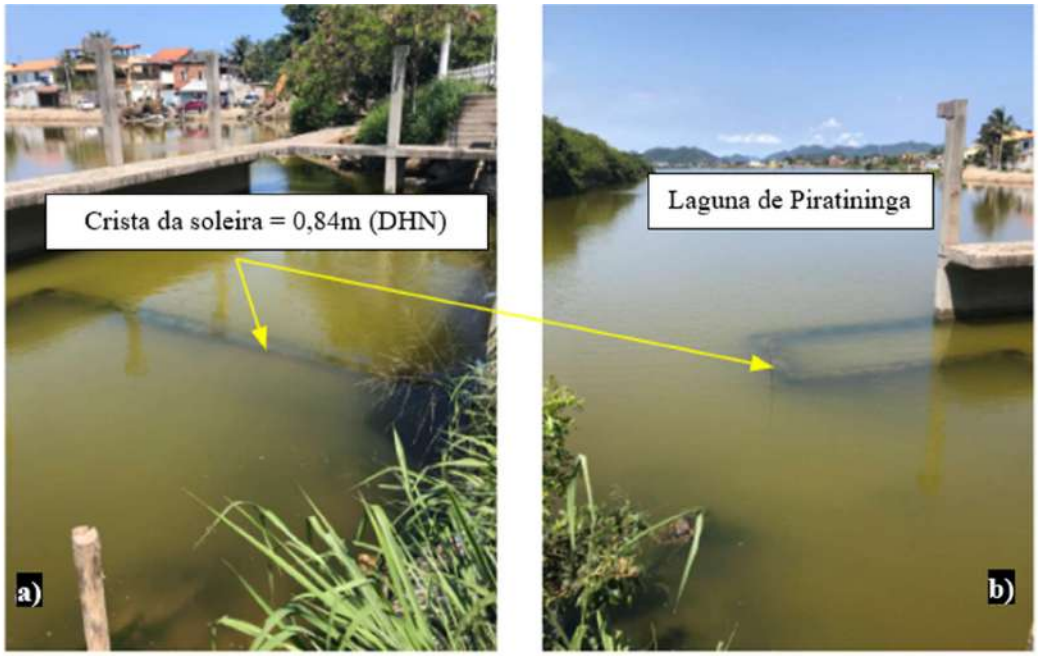

Figura 12 – Imagem mostrando a estrutura atual de conexão do túnel com a laguna, com indicação da cota da soleira. a) foto tirada de cima da estrutura, b) foto da mesma estrutura tirada no sentido da laguna. Fonte: Acervo pessoal da autora.

A soleira funciona como uma reguladora de nível, exercendo importante função na manutenção dos níveis d'água na Laguna de Piratininga. A estrutura impede que a passagem de água da laguna para o mar quando o nível se encontra abaixo da cota da crista, evitando que o fundo da laguna fique exposto. Considerando como referência de nível o nível de redução da carta náutica 1511 - Barra do Rio de Janeiro, da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), onde o nível médio do mar está na cota 0,7 m.

A porção oeste da laguna, região na qual o túnel se conecta ao sistema, é tida como ponto crítico do sistema lagunar, com maior ocorrência de mortandade de peixes e maior índice de águas estagnadas (REIS et al., 2023). Sendo assim, a obstrução mesmo que parcial do fluxo pelo túnel, prejudica e muito a qualidade das águas da laguna.

3.2 Estuários

DYER (1997) fez uma adaptação da definição de estuários feita por CAMERON & PRITCHARD (1963) apresentando estuários como sendo um corpo de água costeiro com livre conexão com o oceano aberto, estendendo-se no rio até o limite da influência da maré, onde a água salgada é diluída com água doce proveniente da drenagem terrestre, ou seja, estuários são ambientes de transição entre rio e mar.

Segundo WRIGHT et al. (1999), estuários geralmente podem ser divididos em três seções:

- estuário inferior ou marinho: onde há conexão com o mar aberto;
- estuário médio: onde ocorre a maior parte da mistura entre a água do mar e a água do rio;
- estuário superior ou fluvial: dominado pela influência da água doce, mas com variação da maré ainda presente.

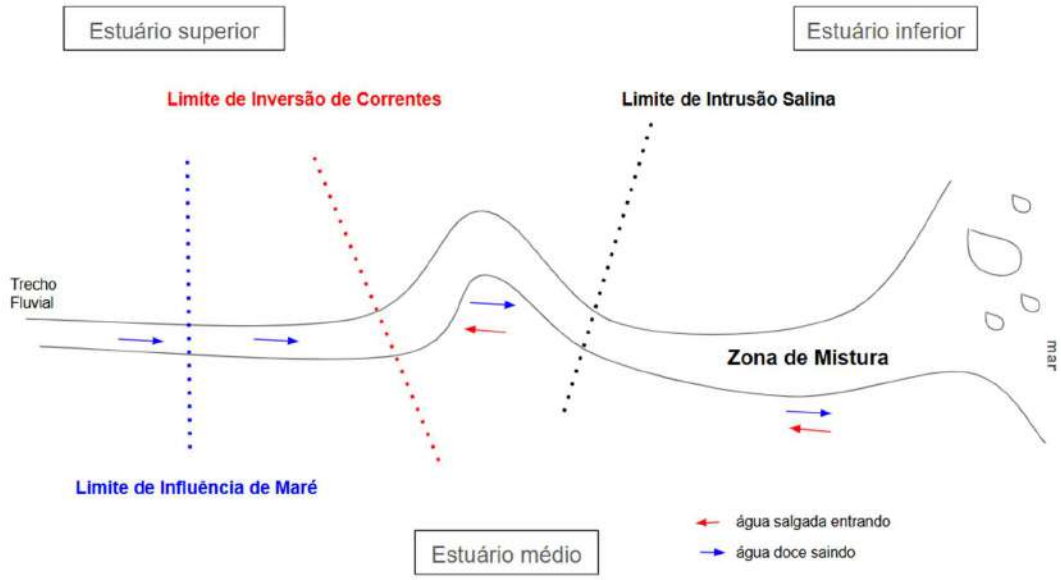

Figura 13– Divisão por regiões dos estuários. Adaptado de WRIGHT et al., 1999.

O limite de influência de maré é um limite do rio propriamente dito, no qual não existem variações de nível de água em função da maré, poderia ser dita como a região onde o estuário acaba. O limite de inversão de correntes é o limite onde se para de observar a inversão de correntes devido à maré. O fluxo segue de montante para a jusante, isto é, na Figura 13, da esquerda para a direita. Já o limite de intrusão salina é o limite da mistura entre água a doce e salgada, ou seja, a montante a água é doce e não mistura com a salgada. Todos esses limites podem variar de acordo com ciclos hidrológico e lunar.

Segundo Dyer (1997), os estuários se formam na estreita zona de fronteira entre o mar e a terra, nas desembocaduras dos rios. Sua forma e extensão são constantemente alteradas pela erosão e deposição de sedimentos, e efeitos drásticos são causados por pequenas elevações ou quedas no nível do mar. Em linhas gerais, estuários são ambientes de transição entre rio e mar e têm como exemplo as lagunas, lagoas, baías e deltas.

Lagunas são corpos d'água orientados paralelamente à região costeira, protegidas por uma faixa de areia em forma de barreira que as separa do oceano. Normalmente apresentam pouca movimentação de fluxo de água e profundidades relativamente baixas (PHLEGER, 1969). Diferentemente das lagunas, os lagos costeiros tiveram seus canais de conexão com o mar fechados. Na Figura 14, a Laguna de Piratininga que é a maior e mais problemática do sistema lagunar estudado.

Figura 14- Laguna de Piratininga. Fonte: Google Earth.

Segundo DA COSTA et al. (2021), lagunas costeiras são ambientes importantes sob os pontos de vista geológico, biológico e ecossistêmico, pois fornecem diversos serviços ambientais as populações humanas. Situados na interface entre o continente e o mar, estes ambientes atuam como filtros naturais, retendo grande parte dos sedimentos e nutrientes provenientes da drenagem continental, o que aumenta a produtividade biológica destes ecossistemas.

Os sistemas lagunares são ecossistemas costeiros complexos que desempenham um papel crucial na manutenção da biodiversidade marinha, na proteção costeira e no fornecimento de serviços ecossistêmicos essenciais para as comunidades humanas adjacentes. Por estes motivos, compreender os padrões de circulação hidrodinâmica dentro desses sistemas é fundamental para o manejo sustentável e a conservação eficaz desses ambientes frágeis.

No contexto do presente estudo, aparece o Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu (Figura 15), localizado no município de Niterói, litoral do Rio de Janeiro, Brasil. Esta área é caracterizada pela interação dinâmica entre as lagunas costeiras e o oceano adjacente, influenciada por uma série de fatores físicos, geográficos e antropogênicos. A compreensão dos padrões de circulação hidrodinâmica neste sistema é crucial para a gestão integrada dos recursos hídricos e ecossistemas associados.

Figura 15- Sistema lagunar Piratininga-Itaipu e porção marítima adjacente. Fonte: Google Earth.

Os aportes fluviais têm um impacto profundo na viabilidade ecológica das lagunas costeiras, controlando a salinidade e aumentando o nível da água da laguna, o que ajuda a manter o fluxo pelo canal de entrada. Segundo KJERFVE et al. (1990), algumas lagunas costeiras menores no Brasil, em especial ao longo das costas do Rio de Janeiro, perto de Macaé e do Rio Grande do Sul, fecham-se intermitentemente, isolando a laguna do mar em resultado do enchimento ativo do canal durante períodos de baixo escoamento. Em média, o fluxo da laguna é por efeito gravitacional e costuma ser em uma ordem de magnitude maior do que a vazão dos aportes fluviais que acessam ela, resultando em um mecanismo eficaz para garantir a troca de água.

A Figura 16 mostra os principais aportes fluviais de Itaipu e a região de encontro destes rios com a Laguna de Itaipu.

Figura 16- A Laguna de Itaipu em primeiro plano e em destaque os rios João Mendes e Vala, dois dos maiores contribuintes em termos de vazão de água doce para o sistema lagunar estudado. Fonte: Google Earth.

A precipitação e o escoamento de água doce têm impactos profundos nas lagunas costeiras. Durante períodos chuvosos, o nível da água pode aumentar rapidamente e causar extensas inundações de terras adjacentes. Este efeito é mais pronunciado em lagunas com a barra fechada, onde o nível da água pode subir um ou mais metros sazonalmente ou em resposta a tempestades (KJERFVE et al., 1990). As inundações também causam grandes mudanças na salinidade em sistemas lagunares congestionados. À medida que o escoamento da bacia de drenagem atinge a crista na laguna, a massa de água residente é rapidamente direcionada para fora do sistema, mas quando a crista do escoamento recua, a salinidade na lagoa retorna gradualmente à salinidade anterior como resultado da dispersão das águas costeiras em direção à laguna (SIKORA & KJERFVE,1985). Em regiões costeiras áridas, as lagunas sufocadas às vezes se tornam hipersalinas, pelo menos sazonalmente, devido à maior evaporação do que ao escoamento. Um bom exemplo de laguna costeira hipersalina é a Lagoa de Araruama (KJERFVE et al., 1996).

3.3 Marés

As marés são na verdade ondas longas e como tal, possuem períodos característicos, aquelas que possuem um período de aproximadamente 12 horas são conhecidas como marés semidiurnas e as que possuem um período em torno de 24 horas são as marés

diurnas. Cada período completo de uma maré é denominado ciclo e estes apresentam fases, quando o nível de água está subindo tem-se a fase de cheia, já quando há a redução do nível de água a maré se encontra na fase de vazante.

O momento que marca a passagem da fase de cheia para a vazante é aquele onde há o nível máximo de água e este é chamado de preamar, já quando há a troca da fase de vazante para a de cheia o nível de água está em sua cota mínima e é conhecido como baixa-mar (VALENTINI & ROSMAN, 2010). A Figura 17 mostra esquematicamente os conceitos até agora apresentados.

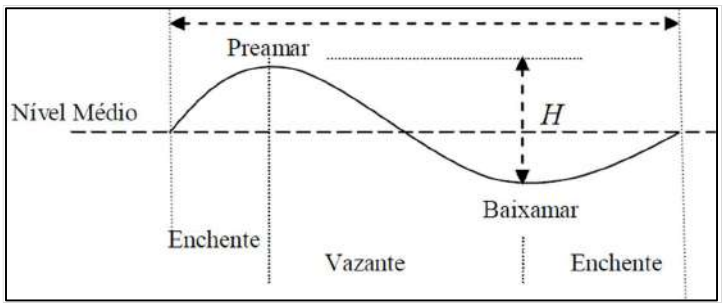

Figura 17- Representação de uma onda de maré estacionária. Adaptado de VALENTINI & ROSMAN, 2010.

A Terra e o Sol giram em torno de um centro de massa comum e se atraem por uma força proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Devido à grande diferença de massa entre o Sol e a Terra, o centro de massa do sistema encontra-se dentro do Sol. Simultaneamente ocorre a mesma situação entre a Terra e a Lua só que nesse caso como a massa da Terra é muito maior que a massa da Lua, o centro de massa desse sistema acaba se encontrando dentro da Terra. Dessa forma, a Lua orbita em torno da Terra, enquanto a Terra orbita em torno do Sol (BOSBOOM & STIVE, 2022). A Figura 18 mostra um esquema simplificado das órbitas apresentadas.

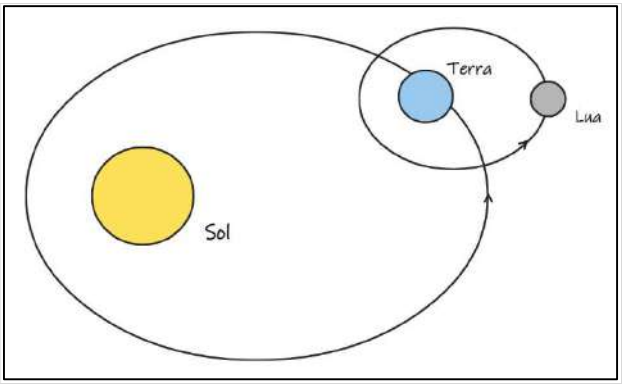

Figura 18- Órbitas simplificadas da Terra ao redor do Sol e da Lua ao redor da Terra geradas pela força de atração dos corpos aos centros de massa de seus sistemas. Adaptado de BOSBOOM & STIVE, 2022.

A força gerada pelo Sol é duas ordens de grandeza maior que a provocada pela Lua, porém a Lua é responsável por cerca de 70% das diferenças de amplitude de marés, por esse motivo chega-se à conclusão de que a atração gravitacional não é por si só responsável pelos efeitos de maré (BOSBOOM & STIVE, 2022).

Na verdade, as marés são geradas pela diferença de atração gravitacional atuando nas águas em diferentes pontos da Terra. Essa força é considerada uma força gravitacional diferencial, que é aquela que surge em um corpo extenso, ou seja, não pontual, fazendo com que cada ponto do corpo, no caso a Terra esteja em uma distância diferente em relação ao outro corpo, nestes casos a força gravitacional em cada ponto é obtida pela diferença entre a força gravitacional obtida naquele ponto e a força gravitacional que atua no centro de massa do corpo extenso (GERKEMA, 2019). A Figura 19 mostra a direção dessas forças na Terra, nela é possível perceber que as forças diferenciais possuem tanto componentes normais quanto tangenciais em relação à superfície.

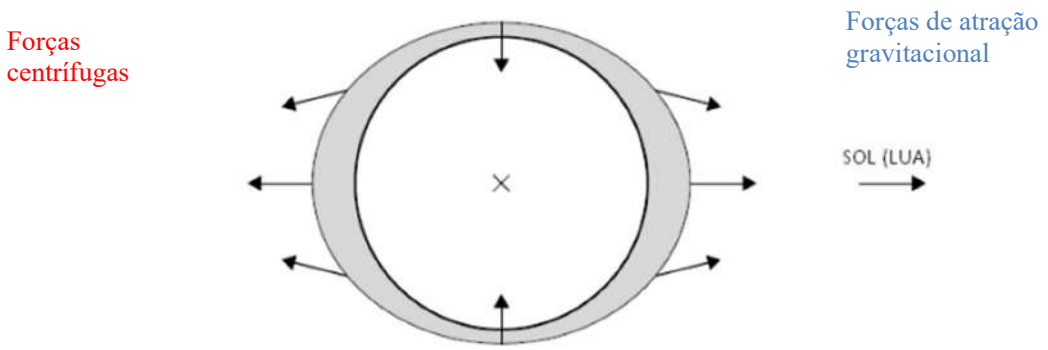

Figura 19-Direção das forças gravitacionais diferenciais atuantes na superfície da Terra. Adaptado de Bosboom & Stive, 2022.

As marés astronômicas são causadas principalmente pela força gravitacional exercida pela Lua e, em menor escala, pelo Sol sobre os oceanos da Terra. A força gravitacional atrai a massa de água na direção do astro (Lua ou Sol), criando uma maré alta no lado da Terra voltado para esse corpo celeste. A maré alta no lado oposto da Terra, no ponto mais afastado da Lua ou do Sol, ocorre devido à força centrífuga gerada pelo movimento do sistema Terra-Lua (ou Terra-Sol) em torno de um centro de massa comum, conhecido como baricentro. No caso da Terra e da Lua, esse ponto não está no centro da Terra, mas um pouco deslocado em seu interior. À medida que a Terra gira em torno desse baricentro, todos os pontos do planeta experimentam uma força centrífuga. Essa força empurra a água para longe do centro de rotação, ou seja, na direção oposta à Lua ou ao Sol, o que gera uma segunda maré alta nesse lado do planeta.

Na situação em que há o alinhamento dos três, mais especificamente no período em que a Lua se encontra em suas fases nova e cheia, que os efeitos gerados pelo Sol e pela Lua se somam, e com isso as preamares serão mais altas e as baixa-mares mais baixas, em tais situações a maré é conhecida como maré de sizígia. Já nos casos em que a Lua se encontra nas fases crescente e minguante, esta formará um ângulo próximo a 90 graus com o Sol em relação a Terra, fazendo com que suas influências não sejam somadas, nessas condições as marés são conhecidas como maré de quadratura, com preamares e baixa-mares menos acentuadas que na maré de sizígia (VALENTINI & ROSMAN, 2010). Essas diferenças de alinhamento podem ser observadas na Figura 20.

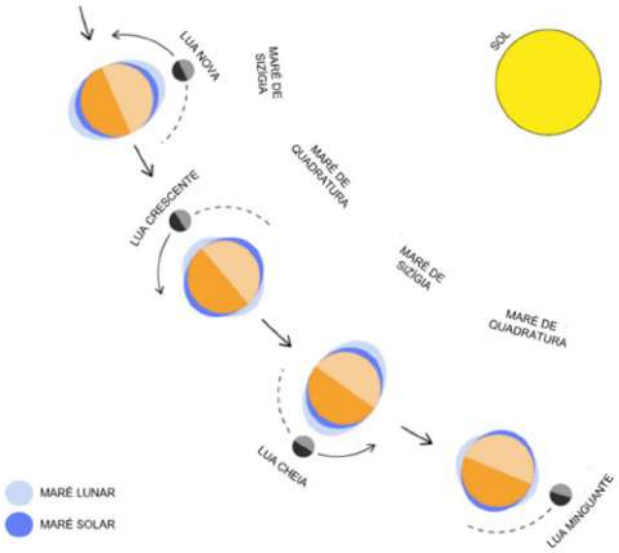

Figura 20-Marés resultantes da força gravitacional e do posicionamento dos corpos celestes Lua e Sol em relação ao planeta Terra. Adaptado de Bosboom & Stive, 2022.

Mas segundo VALENTINI & ROSMAN (2010), a variação da maré não é influenciada apenas por fatores astronômicos. As oscilações no nível do mar também são afetadas por fenômenos meteorológicos, conhecidos como maré meteorológica. Devido a esses efeitos, o nível do mar registrado em um ponto da costa geralmente difere do previsto pela maré astronômica. Essas variações são causadas por mudanças na pressão atmosférica, pelo empilhamento ou afastamento de massas d'água próximo à costa devido à ação dos ventos, além do acúmulo de água gerado pelas ondas. Essas condições podem resultar em elevações significativas do nível do mar, muitas vezes causando inundações e prejudicando a navegação.

Ainda segundo VALENTINI & ROSMAN (2010), no Rio de Janeiro, por exemplo, a maré meteorológica chega a ser da mesma ordem de grandeza da maré astronômica, significando que pode acontecer do nível observado alcançar até o dobro do previsto pela maré astronômica. O maior problema reside no fato que os agentes responsáveis pela maré meteorológica não são determinísticos, ou previsíveis no médio e longo prazo.

O vento é capaz de causar transferência de energia resultando em um movimento de deslocamento da água por oscilações das partículas na superfície do oceano. Essa transferência é conhecida como onda.

O efeito do vento consiste tanto na energia do vento local quanto no remoto, ambos contribuem para o enchimento e esvaziamento das lagunas, tendo como variáveis a força e direção. A energia do vento local causa fluxo de correntes, mas devido às alterações na velocidade e direção, as correntes resultantes são geralmente variáveis e intermitentes contribuindo pouco. Os efeitos do vento remoto geram a maré meteorológica, que aumenta ou reduz o nível das lagunas, quando as oscilações no nível do mar costeiro e resultam em gradientes de pressão em direção à terra ou ao mar para ajudar no enchimento e esvaziamento das lagunas.

As marés desempenham um papel essencial na hidrodinâmica dos estuários, no transporte de sedimentos e na troca dos nutrientes entre a região e o oceano. Na Figura 21, é possível visualizar um exemplo da variação meteorológica acontecendo no sistema lagunar de Piratininga-Itaipu durante 35 dias, entre setembro e outubro de 2018, variações acima do nível médio do mar indicam maré meteorológica positiva e variações abaixo, negativas. Essa variação, fruto de eventos meteorológicos, é acrescentada as variações previstas na maré astronômica, causando aumento significativo nas variações de nível de

água na região.

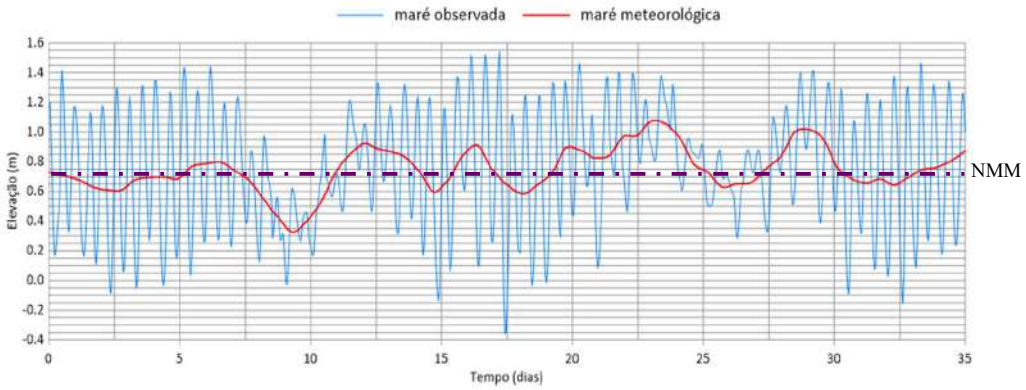

Figura 21- Variações de maré total ou observada e da maré meteorológica para a região de interesse do estudo durante 35 dias em 2018. PMN, 2018.

3.4 Canais de Maré

Trata-se de canais de maré são canais relativamente estreitos, que fazem a ligação de um corpo hídrico com o mar e que estão sujeitos à dinâmica da maré são chamados de canais de maré. Na maioria dos casos, os fluxos de maré para dentro e para fora das lagunas são equilibrados ao longo de um período de maré. A Figura 22 mostra o esquema de fluxo de maré entrando e saindo de uma laguna.

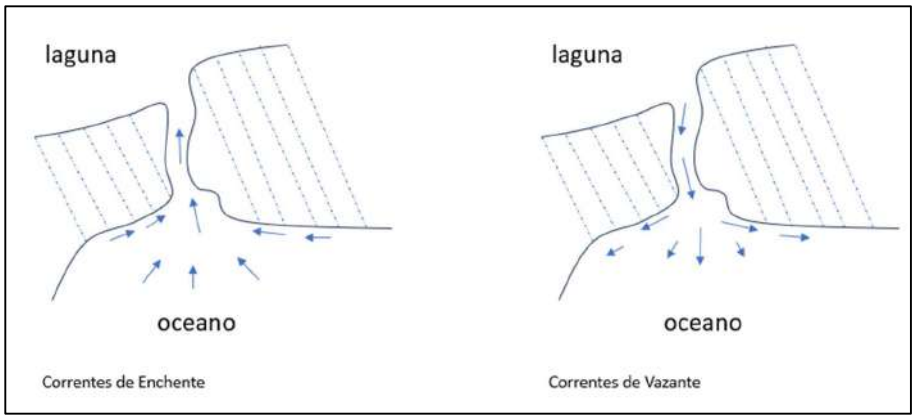

Figura 22-Esquema de correntes de maré enchente e vazante em um canal de maré. Adaptado de O'BRIEN, 1969 apud *USACE, 2012.*

Normalmente, estes tipos de canais passam entre dois cordões arenosos, mas sua morfologia varia bastante. Basicamente em função da ação combinada entre o suprimento de sedimento ou as características de transporte, as características de ondas e o fluxo da maré (DEAN & DALRYMPLE, 2002). A própria configuração de um canal pode mudar significativamente temporalmente por conta das peculiaridades geológicas do local, juntamente com o equilíbrio de sedimento e da hidrodinâmica (CEM, 2002).

Segundo SILVA & ROSMAN (2016), um canal de maré é considerado estável do ponto de vista hidro-sedimentológico quando as correntes de enchente e vazante são suficientemente fortes para remover o excesso de sedimentos acumulados em seu leito. Durante eventos severos, como ressacas, é comum que grandes quantidades de sedimentos sejam depositadas dentro do canal. Após o término do evento, as correntes de maré entram em ação, mobilizando e transportando esses sedimentos para fora. Assim, canais de maré estáveis permanecem naturalmente desobstruídos, com pouca variação em sua geometria média e características morfológicas.

Ainda segundo SILVA & ROSMAN (2016), a estabilidade de um canal de maré resulta de um equilíbrio entre forças estabilizadoras e desestabilizadoras. As forças desestabilizadoras favorecem o acúmulo de sedimentos na embocadura, podendo levar ao seu fechamento, enquanto as forças estabilizadoras promovem a mobilização e remoção dos sedimentos, mantendo o canal aberto. Os principais agentes estabilizadores são as velocidades das correntes de maré no canal e o volume de água escoado a cada ciclo de maré, conhecido com prima de maré. Por outro lado, os agentes desestabilizadores estão relacionados aos processos sedimentológicos, que dependem da geometria do canal e da taxa de transporte de sedimentos.

De um modo geral, a estabilidade da embocadura depende do balanço dos agentes desestabilizadores, que depositam sedimentos, e estabilizadores, que expelem os sedimentos depositados (MOTTA, 1978).

No contexto do Canal de Itaipu (Figura 23), a importância deste canal de maré é grande justamente por ser a principal conexão do sistema lagunar com o mar, e sua instabilidade é algo indiscutível, uma vez que apresenta características morfológicas altamente variáveis e problemas recorrentes de assoreamento na região da embocadura. Problemas estes que interferem diretamente na taxa de renovação das massas de água e na qualidade do sistema como um todo, o que é justamente o objetivo da análise realizada no presente estudo.

Figura 23- Canal de maré assoreado que faz a ligação da Laguna de Itaipu com o mar e principal conexão de todo o sistema lagunar com o oceano. Fonte: Google Earth.

Para fins desta pesquisa, foi considerada uma comparação direta entre o canal com a batimetria atual, apresentando uma morfologia bem heterogênea e com a presença de diversos trechos de baixa profundidade, alguns bancos sedimentares emersos, e o canal dragado em uma profundidade que proporcione estabilidade ao canal.

Como o Canal de Itaipu possui batimetria altamente variável, apresentando alterações frequentes em sua morfologia de fundo, para uma melhor análise o canal foi dragado até a cota batimétrica 1,7 m. A consideração feita para que se chegasse nesta profundidade foi respaldada na relação obtida por METHA (1976) e adaptada de SILVA & ROSMAN (2016), Figura 24, por meio de observações de campo para uma variedade de canais de maré estáveis com um ou dois guia-correntes. Resultados de modelos de laboratório também confirmam esta relação.

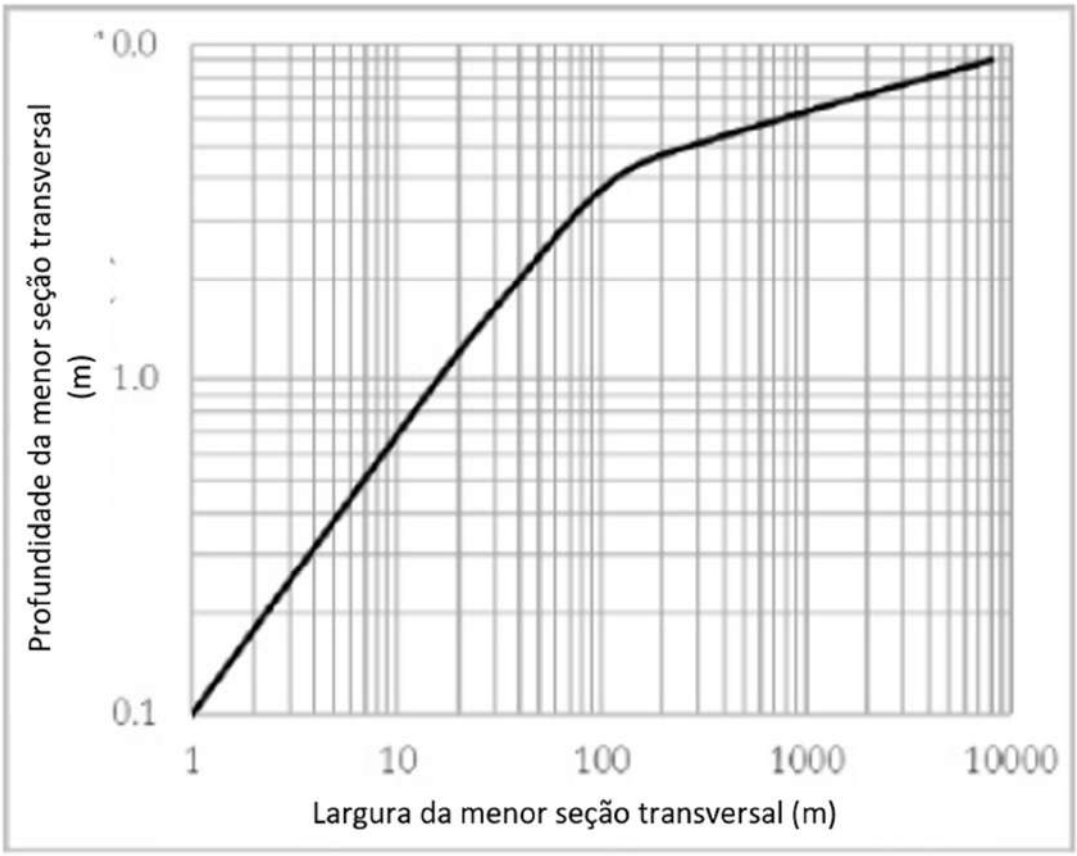

Figura 24- Relação entre largura e profundidade da menor seção transversal para canais de maré, referentes ao nível médio do mar, obtida através da observação de vários canais de maré estáveis e de resultados de modelos de laboratório. Adaptado de PINTO, 1999.

4 METODOLOGIA

Para as análises realizadas neste estudo utilizou-se modelos do SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. O SisBaHiA® é um sistema de modelos computacionais destinados à análise da dinâmica ambiental de corpos d'água naturais com superfície livre. Este sistema de modelagem foi concebido e é suportado na COPPE/UFRJ.

Nesta pesquisa foram utilizados modelos hidrodinâmicos bidimensionais calculados na vertical (2DH) e modelos de transporte euleriano.

Modelos hidrodinâmicos foram rodados para obtenção de padrões de circulação hidrodinâmica no sistema lagunar como um todo e dele com o oceano adjacente. Já os modelos de transporte euleriano, como o da taxa de renovação e idade da água, são rodados à partir dos resultados obtidos pelo hidrodinâmicos, objetivando padrões de movimentações de massas d'água do mar para as lagunas e vice-versa, permitindo uma análise das parcelas de água em diferentes locais ao longo do tempo.

A seguir estão descritos, de forma resumida, alguns aspectos técnicos sobre os modelos do SisBaHiA® utilizados. O texto foi baseado na Referência Técnica do SisBaHiA® (ROSMAN, 2024), disponível em ***www.sisbahia.coppe.ufrj.br***.

4.1 Modelo Hidrodinâmico (MH)

O modelo promove análises de circulação hidrodinâmica sem efeitos de gradientes de densidade e sem evolução morfodinâmica de batimetria. Neste caso, o MH definido roda apenas para gerar padrões de circulação hidrodinâmica.

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA® é da linhagem FIST (Filtered in Time and Space), um eficiente sistema de modelos numéricos que utiliza o método de elementos finitos para calcular escoamentos de grande escala. O FIST é um sistema de modelagem de corpos d'água com superfície livre, no qual a modelagem de turbulência é baseada em técnicas de filtragem. Este modelo é otimizado para a modelagem de corpos d'água naturais.

Para os estudos tratados neste trabalho foi utilizado o módulo 2DH, no qual as velocidades de corrente são calculadas na vertical. A seguir são mostradas as equações governantes do MH 2DH.

4.1.1 Equações Governantes

A cada passo de tempo o modelo hidrodinâmico 2DH calcula as componentes das velocidades médias na vertical, U(x,y,t) na direção x, e V(x,y,t) na direção y, e as elevações da superfície livre, z = ζ (x,y,t). No entanto, para se determinar estas três incógnitas é necessário que haja pelo menos três equações, que são as equações da quantidade de movimento integradas na vertical, nas direções x e y, considerando a aproximação de águas rasas, e a equação da continuidade, também integrada na vertical.

Equação (1) de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção *x*:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} = -g\frac{\partial \zeta}{\partial x} - g\frac{(\zeta + \mathrm{h})}{2}\frac{\partial(\hat{\rho}/\rho_0)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0(\zeta + h)}\left\{\frac{\partial[(\zeta + h)\hat{\tau}_{xx}\ ]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta + h)\hat{\tau}_{xy}\ ]}{\partial y}\right\} + \frac{1}{\rho_0(\zeta + h)}(\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_0(\zeta + h)}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) + 2\Omega sen\Phi V - \frac{U}{(\zeta + h)}\Sigma q \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} = -g\frac{\partial \zeta}{\partial y} - g\frac{(\zeta + \mathrm{h})}{2}\frac{\partial(\hat{\rho}/\rho_0)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0(\zeta + h)}\left\{\frac{\partial[(\zeta + h)\hat{\tau}_{xy}\ ]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta + h)\hat{\tau}_{yy}\ ]}{\partial y}\right\} + \frac{1}{\rho_0(\zeta + h)}(\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_0(\zeta + h)}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) - 2\Omega sen\Phi U - \frac{V}{(\zeta + h)}\Sigma q \quad (2)$$

Os termos semelhantes na equação de quantidade de movimento na direção y tem, evidentemente, o mesmo significado dos termos da equação na direção x. Na equação (2) o termo Σq representa os fluxos de precipitação (q_P), evaporação (q_E) e infiltração (q_I) por unidade de área.

Equação (3) da continuidade integrada na vertical:

$$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} + \frac{\partial(\zeta + h)}{\partial x} + \frac{\partial(\zeta + h)}{\partial y} = \sum q \qquad (3)$$

Para os propósitos desta pesquisa, adotou-se a opção de um modelo hidrodinâmico que resolve as equações de conservação de momento em águas rasas 2DH, (1) e (2), e a equação de conservação de massa, (3), para fluxo incompressível com densidade homogênea em um esquema de discretização por elementos finitos, sendo $\sum q = 0$.

Nas equações (1), (2) e (3), temos as seguintes variáveis: g é a aceleração da gravidade; $z = \zeta(x, y, t)$ e h são a superfície livre e a batimetria, respectivamente, referenciadas ao nível médio da maré baixa; ρ_0 é a densidade da água; $\hat{\tau}_{xx}, \hat{\tau}_{xy}\ e\ \hat{\tau}_{yy}$ são as tensões de cisalhamento turbulentas; $\tau_x^S, \tau_x^B, \tau_x^E$ são as tensões de atrito na superfície livre, no fundo e devido a efeito de estruturas inseridas no campo de escoamento, respectivamente.

Utilizando a equação de quantidade de movimento na direção x como exemplo, a Tabela 1 explica o significado de cada termo em (1). De form a análoga, se aplica o mesmo para os termos da equação em y.

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento 2DH, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, i.e., em um determinado instante, representa o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.

$-g\frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção *x* (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção *x*. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.
$-g\frac{(\zeta+\mathrm{h})}{2}\frac{\partial(\hat{\rho}/\rho_0)}{\partial x}$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção *x* (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade $\frac{\hat{\rho}}{\rho_0}$ da água na direção *x*. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força o escoamento de lugares com maior densidade para locais com menor a densidade. Para o presente estudo, gradiente de densidade não foi considerado e, com isso, teve valor atribuído igual a zero.
$\frac{1}{\rho_0(\zeta+h)}\left\{\frac{\partial[(\zeta+h)\hat{\tau}_{xx}\ ]}{\partial x}+\frac{\partial[(\zeta+h)\hat{\tau}_{xy}\ ]}{\partial y}\right\}$	Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, i.e., em um determinado instante, representa o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção *x*, por unidade de massa. Por exemplo, esses termos são responsáveis pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.
$\frac{1}{\rho_0(\zeta+h)}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)$	Representa o efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. Tais termos só tem efeito relevante quando as ondas estão em águas relativamente rasas, e.g., quando a profundidade local é inferior a 10% do comprimento da onda. Para o presente estudo, não foram considerados efeito de onda e, com isso, a variável teve valor atribuído igual a zero.
$2\Omega sen\Phi V$	Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a Baía de Guanabara, por exemplo. Para o presente estudo este termo não foi utilizado e teve valor atribuído igual a zero. Uma vez que o corpo d'não é suficientemente grande para haver influência significativa das acelerações de coriolis.
$\frac{1}{\rho_0(\zeta+h)}(\tau_x^S)$	Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.
$\frac{1}{\rho_0(\zeta+h)}(-\tau_x^B)$	Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.
$\frac{1}{\rho_0(\zeta+h)}(-\tau_x^E)$	Representa a tensão de atrito devido a efeito de estruturas inseridas no campo de escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$\frac{U}{(\zeta + h)}(q_P - q_E + q_I)$ *Sendo que*: $(q_P - q_E + q_I) = \sum q$	Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação q_P, evaporação q_E, e infiltração q_I.

Tabela 1- Significado dos termos da equação (1) e, analogamente, da equação(2). Fonte: ROSMAN, 2024.

Para a equação da continuidade 2DH:

$\frac{\partial(\zeta+h)}{\partial t} = \frac{\partial U(\zeta+h)}{\partial x}$ $-\frac{\partial V(\zeta + h)}{\partial y} + q_P - q_E + q_I$ *Sendo que*: $(q_P - q_E + q_I) = \sum q$	Da forma que está escrita à esquerda, pode-se observar que a altura da coluna de água (ζ+h) varia no tempo como resultado dos fluxos efetivos através da coluna de água nas direções x e y respectivamente, e do balanço dos fluxos de precipitação (q_P), evaporação (q_E) e infiltração (q_I), por unidade de área. Para este estudo, $\sum q = 0$.

Tabela 2 – Significado dos termos da equação (3). Fonte: ROSMAN, 2024.

A seguir se encontram as equações que determinam as tensões de atrito devido ao vento na superfície livre (4) e as tensões de atrito no fundo (5).

$$\tau_i^S = \rho_{ar} \,.\, C_D \,.\, W_{10}^2 \,.\, cos\phi_i \,;\; [i = 1{,}2] \tag{4}$$

Onde ρ_{ar} é a massa específica do ar, C_D é o coeficiente de arrasto do vento, determinado em função da velocidade do vento medida a dez metros da superfície livre, W_{10}, e ϕ_i é o ângulo entre o vetor velocidade e a direção $x_i (x_1 = x \; e \; x_2 = y)$.

$$\tau_i^B = \rho_0 \,.\, B \,.\, U_i \tag{5}$$

Onde ρ_0 é a massa específica da água, U_i é a velocidade média na coluna d'água e B será (6):

$$B = \frac{g}{C_h^2} \,.\sqrt{U^2 + V^2} \tag{6}$$

Na equação (6), o C_h é o coeficiente de Chézy, dado pela seguinte expressão (7):

$$C_h = 18 \,.\, log_{10} \frac{6(\zeta + h)}{\varepsilon} \tag{7}$$

Onde ε é a amplitude da rugosidade equivalente do fundo.

A resolução das equações acima é condicionada ao conhecimento das condições iniciais e de contorno.

4.1.2 Condições de Contorno

As condições de contorno necessárias ao modelo são do tipo horizontal e vertical. As verticais são: velocidade zero no fundo e a tensão de atrito do vento na superfície livre, calculada a partir das velocidades de vento dadas. Quanto aos contornos horizontais, existem dois tipos: contornos de terra e contornos abertos.

Contornos de terra normalmente representam as margens do corpo de água e possíveis pontos com afluxos ou efluxos como, por exemplo, rios, estuários, entre outros. Contornos abertos geralmente representam os limites do domínio de água modelado, e não uma fronteira física. A prescrição de fluxos ou velocidades normais é usualmente associada a contornos terrestres, enquanto a prescrição de elevações da superfície livre é geralmente associada a contornos abertos. Frequentemente, os contornos de terra não possuem contribuição externa e um valor de fluxo ou de velocidade normal nulo é imposto.

4.1.3 Condições Iniciais

Para o instante inicial de simulação devem ser fornecidos ao programa os valores da elevação da superfície livre ζ e as componentes da velocidade 2DH, U e V, para todos os nós do domínio. Além de satisfazer às equações governantes, os valores adotados para a condição inicial devem ser os mais semelhantes possíveis àqueles adotados para a condição de contorno no primeiro passo de tempo.

4.2 Modelo de Transporte Euleriano (ME)

Segundo ROSMAN (2024), a classe de modelos de transporte mais usados em muitas análises de problemas ambientais em corpos de água naturais é do tipo euleriano, muitas vezes chamado livremente de modelos de dispersão. No SisBaHiA®, os modelos de transporte advectivo-difusivo utilizados para determinar padrões de renovação de

água apresenta características dos modelos eulerianos, tendo resolução definida pelo intervalo entre os pontos de discretização no tempo e no espaço.

Ainda segundo ROSMAN (2024), no caso de estuários e baías, ou sistemas estuarinos, para se estimar o tempo de renovação da zona de mistura de águas doces e salinas, adota-se o tempo de descarga hidráulica, definido como o volume de água doce na zona de mistura dividido pela vazão de água doce afluente. Mas os valores obtidos não teriam significado útil em sistemas estuarinos geometricamente complexos, pois seriam indicativos por demais grosseiros das efetivas taxas de renovação das águas nas diferentes áreas do sistema.

Tradicionalmente, o tempo de residência da água é definido como sendo o quociente do volume de água pela vazão de passagem, sendo um parâmetro que indica indiretamente o tempo requirido para a renovação do volume de água ou a média da idade da água desse volume. Tal parâmetro tem aplicabilidade prática em corpos de água relativamente homogêneos, ou bem misturados. No entanto, por conta da natureza do transporte advectivo difusivo em escoamentos turbulentos, mesmo em corpos de água relativamente homogêneos, a taxa de renovação efetiva pode ser bem diferente da estimada a partir do tempo de residência tradicional.

Para o conhecimento necessário dos padrões de renovação e tendência de estagnação das águas requeridos neste estudo, foram feitas simulações para obtenção da taxa de renovação e idade da água na região de interesse, onde o tempo total de simulação é definido para caracterizar o período estudado, durante o qual as correntes locais transportam todas as partículas ditas em suspensão.

4.2.1 Taxa de Renovação

Para este tipo de análise, foi considerada uma substância genérica fictícia, tratada como passiva e conservativa, mas diferentemente de outros parâmetros de qualidade de água, de forma que esta substância sofrerá apenas o transporte advectivo e difusivo, visto que tais fenômenos são os únicos que ocorrem em situações de trocas de volume de água.

Utilizando uma abordagem euleriana, que permite a análise de parcelas de água em diferentes locais ao longo do tempo, o fluxo de água passa por um volume de controle que é considerado um ponto de observação. Por esse motivo, para analisar o tempo

característico de renovação da água, as águas que se encontram dentro do domínio de interesse no instante inicial de simulação recebem valores de referência de 0% enquanto as águas que entram no domínio pelos limites abertos ou por suas outras afluências, como rios, possuem valores de referência igual a 100%. À medida que as águas ditas novas com valores de 100% se misturam com as iniciais de 0%, valores intermediários são calculados, indicando assim a porcentagem de mistura em um determinado momento.

Os tempos de taxas de renovação são tempos hidráulicos característicos associados ao conceito de renovação, sendo o tempo necessário em relação ao inicial para que uma parcela de água atinja um valor específico.

4.2.2 Idade da Água

Para este estudo, a análise da idade da água nos permite definir o tempo médio que a água permanece no domínio predefinido ao longo do tempo. Segundo ROSMAN (2024), este tempo é estimado a partir do decaimento de uma substância passiva de marcador de idade presente na água. Para determinar o tempo de decaimento, é obrigatória uma reação cinética de decaimento de primeira ordem da substância marcadora de idade, com uma taxa constante de k > 0 e sem outros efeitos de perdas e ganhos de massa.

Para conceituar o cálculo, considere um volume uniforme de água bem misturado em todo o domínio, com concentração inicial C_0 para a substância do marcador de idade. Considerando uma cinética de decaimento de primeira ordem, a variação temporal da concentração da substância marcadora de idade $C(t)$ é dada por (8):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC \tag{8}$$

Cuja solução analítica leva a (9):

$$C(t) = C_0 \exp(-kt) \tag{9}$$

E, portanto (10):

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)}{k}$$

(10)

Uma vez que a concentração inicial C_0 e a concentração posterior $C(t)$ são conhecidas, o tempo de decaimento entre os dois valores de concentração define a idade da água no tempo registrado da concentração posterior.

A variável k é o inverso do tempo e é mais fácil de entender sua magnitude por um tempo equivalente, como o conhecido tempo de meia-vida denotado como T_{50} onde uma determinada concentração levaria um certo tempo para ser reduzida à 50% do valor inicial. Outro tempo equivalente muito útil é o T_{90}, que é o tempo necessário para uma redução de 90% na concentração devido aos processos de decaimento.

A unidade da taxa de decaimento k é inverso de tempo, por isso, é mais fácil interpretar sua magnitude por tempos equivalentes, por exemplo:

• T_{50} = tempo requerido para decaimento de 50%, ou tempo de meia vida, consequentemente $\frac{C}{C_0}$ = 0,5 implicando em k = $\frac{\ln(0,5)}{T_{50}}$.

• T_{90} = tempo requerido para decaimento de 90%, ou tempo de ordem de grandeza, portanto, $\frac{C}{C_0}$ = 0,1 e calcula-se k = $\frac{\ln(0,1)}{T_{90}}$.

Ao considerar um corpo d'água com $C = C_0$ afluentes em vários pontos em diferentes momentos e saídas de água com diferentes períodos de decomposição, torna-se compreensível que a concentração será em função do tempo e do espaço. Portanto, a idade da água (11) também será uma função que varia no espaço e no tempo.

$$I_A(x, y, t) = \frac{-ln\frac{C(x, y, t)}{C_0}}{k}$$

(11)

Para este estudo, uma condição inicial primária de $C = 1$ foi admitida em todo o domínio da malha e, durante o tempo de simulação, as novas águas entram no domínio pelos limites de fronteira aberta ou dos afluentes. À medida que o tempo de simulação passa, as águas de dentro do domínio vão se tornando mais velhas e se misturando com as águas novas. Desta forma, águas com maior dinâmica de renovação ficam menos

velhas, enquanto águas que renovam a taxas inferiores, envelhecem com o avanço do tempo de simulação.

Para o modelo, tanto os rios quanto o oceano adjacente trazem águas novas às lagunas. Na prática, essa água pode não ser necessariamente limpa.

4.3 Análises Realizadas

Com o objetivo de realizar as análises hidro-ambientais propostas neste estudo, as etapas a seguir foram realizadas:

- A 1ª etapa consistiu na calibração do modelo hidrodinâmico responsável pela obtenção de padrões de circulação hidrodinâmica entre as lagunas, os canais de ligação e o oceano adjacente. Para isto, foram feitas comparações diretas entre o os resultados de níveis d'água obtidos pelo modelo numérico e valores medidos na Laguna de Itaipu;
- A 2ª etapa realizada seguiu a metodologia da 1ª, mas a comparação foi feita entre dados obtidos pelo modelo e valores medidos na Laguna de Piratininga. Desta forma, o modelo hidrodinâmico foi considerado validado.
- Para a 3ª etapa, o modelo hidrodinâmico com características atuais do sistema lagunar foi rodado e a partir deste resultado, foram simulados modelos de transporte eulerianos para obtenção de padrões de renovação e idade da água para o sistema como um todo;
- Na 4ª etapa, o objetivo era iniciar as análises dos canais de ligação do sistema lagunar com o mar e para isto a simulação foi feita com o Túnel do Tibau fechado. Esta estrutura é responsável pela ligação da Laguna de Piratininga com o mar, e o objetivo da simulação era analisar a real importância do túnel para o sistema, em especial para Piratininga. Ressaltando que, por problemas estruturais internos, o túnel apresenta obstrução parcial do fluxo e, como Piratininga é a laguna que mais sofre com problemas relacionados à qualidade de água, esta análise se torna de grande relevância. Foi realizada também uma comparação entre os valores obtidos nesta etapa com os da etapa anterior, para que a diferença entre padrões encontrados fosse melhor analisado.

- Para a 5ª etapa, o foco do estudo ficou com o canal de maré responsável pela ligação da Laguna de Itaipu com o mar, sendo a principal forma de conexão com o mar do sistema lagunar, o Canal de Itaipu passa por eventuais intervenções feitas pela prefeitura objetivando interromper, ou ao menos diminuir, o processo de assoreamento que compromete diretamente a renovação do sistema lagunar como um todo. A etapa foi realizada com a comparação entre as simulações do canal estando assoreado e dele dragado, até uma profundidade que o faça ser classificado como estável.

- Durante a 6ª etapa, a análise foi feita no Canal de Camboatá, também assoreado, tendo como objetivo a dragagem deste que é a responsável pela ligação entre as duas lagunas. A comparação entre o canal no estado atual, assoreado e com pontos de fluxo parcialmente comprometido, com o canal regular e mais profundo possibilitou um real entendimento no papel deste no sistema como um todo.

- Já para a 7ª e última etapa, a comparação realizada foi do sistema lagunar no estado atual e deste com todos os seus canais otimizados, ou seja, contando com uma maior capacidade de fluxo de água por eles. Como os canais são indispensáveis para a circulação hídrica, para a dispersão de nutrientes e facilitam a entrada de água marinha rica em oxigênio, otimizando as conexões, seja por meio de dragagem ou por ajuste no dimensionamento, é possível ter um vislumbre do pleno potencial de renovação do sistema, contribuindo para a recuperação e sustentabilidade das lagunas.

A seção 4.4 apresenta as condicionantes ambientais dos modelos comuns às etapas citadas.

4.4 Condicionantes dos Modelos

Esta seção apresenta as condicionantes utilizadas nas modelagens realizadas: contornos batimétricos, maré observada, variações dos níveis d'água, ventos característicos da região, vazões dos rios e das estações de tratamento de esgoto existentes e que desembocam nas lagunas.

4.4.1 Modelo Digital do Terreno

Antes de iniciar as análises de hidrodinâmica ambiental em uma determinada região, o primeiro passo é realizar a modelagem digital do terreno. Esse processo engloba a delimitação do domínio de estudo, a sua subdivisão em elementos discretos e a incorporação de informações topográficas, como dados de profundidade e rugosidade. A batimetria completa da região estudada é mostrada na Figura 25 e a Figura 26 mostra a disposição da malha sobre a região de interesse, ou seja, as lagunas, canais de conexão e parte marítima adjacente.

A malha de elementos finitos utilizada na discretização da região, composta de 1378 elementos totais, sendo 1301 quadrangulares e 77 triangulares, com 6079 nós de cálculo.

Inicialmente, foram obtidos junto à prefeitura de Niterói, PMN (2018), dados batimétricos, da morfologia das lagunas e séries temporais da variação de níveis d'água. O município possui o programa Pró-Sustentável que visa, entre outras coisas, identificar e implantar ações necessárias para a recuperação e estabilização do sistema lagunar como um todo.

Os dados de profundidade utilizados para a região marítima foram obtidos das cartas náuticas da DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, disponíveis para acesso público no site ***https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster***, e podem ser vistos na Figura 27. Foram utilizados dados das cartas náuticas Baía de Guanabara nº 1501 e Barra do Rio de Janeiro nº 1511, ambas produzidas e atualizadas pela DHN. Os contornos batimétricos são referidos ao Nível de Redução (NR) da Carta Náutica 1511.

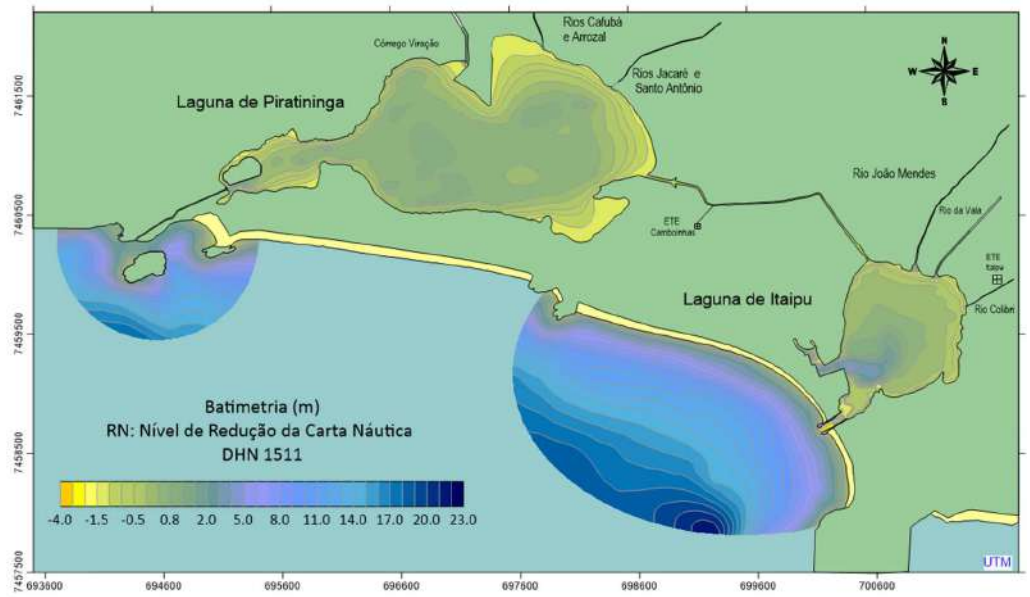

Figura 25- Batimetria utilizada para a modelagem na região de interesse.

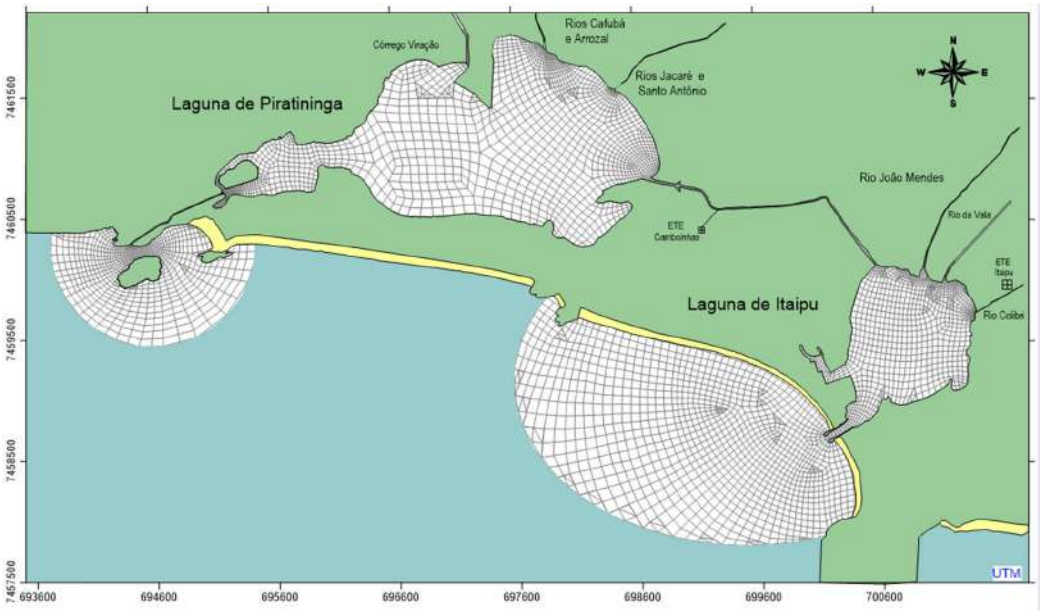

Figura 26- Mapa das lagunas com a malha sobreposta à região do domínio.

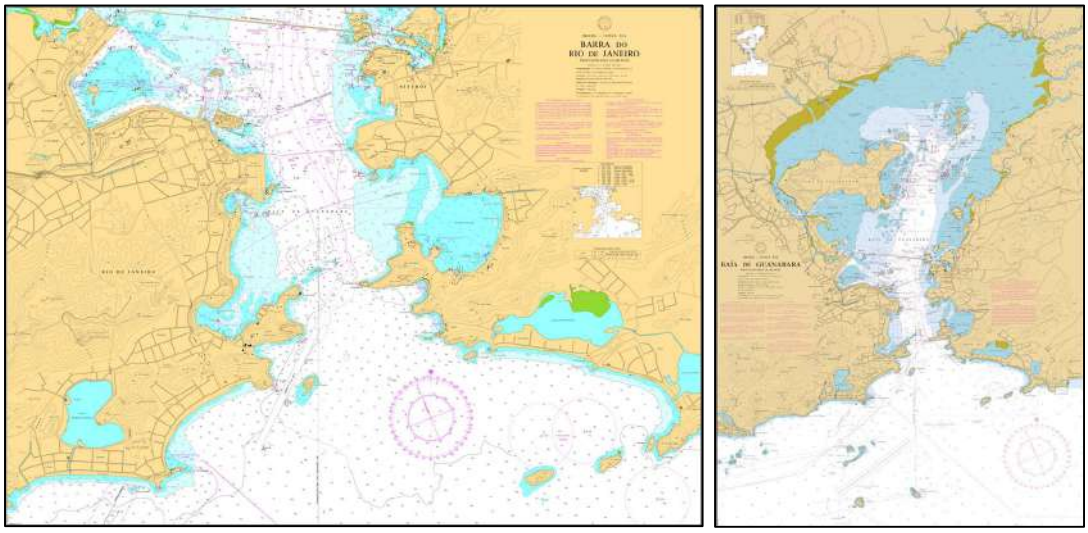

Figura 27- Cartas Náuticas 1511e 1501 contendo os dados de batimetria imposta na porção marítima para a realização do estudo. Fonte: DHN.

Para rugosidade equivalente do fundo, foram considerados cenários semelhantes para todo a região do domínio com ε = 0,02 m, típica de areias médias, como usual em fundos de zonas costeiras. Exceção para o Túnel do Tibau e para o enrocamento presente no Canal de Itaipu que receberam ε = 0,15 m, valor típico de sedimentos com obstáculos, como pedras e troncos. Os valores considerados foram obtidos na referência técnica do SisBaHiA® (ROSMAN, 2024) e estão disponíveis na Tabela 3.

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de lama fluida	1.0E-6m< ε <0.0001m
Predominância de siltes e finos	0.0001m< ε <0.0100m
Predominância de areias finas	0.0070m< ε <0.0150m
Predominância de areias médias	0.0100m< ε <0.0300m
Predominância de areias grossas	0.0250m< ε <0.0500m
Predominância de areias muito grossas	0.0400m< ε <0.0800m
Predominância de areias com cascalho	0.0500m< ε <0.1200m
Sedimentos com vegetação	0.0500m< ε <0.1500m
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	0.1500m< ε <0.4000m
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	0.0003m< ε <0.0010m
Fundo de pedra lisa	0.0010m< ε <0.0030m
Fundo de asfalto ou similar	0.0030m< ε <0.0070m
Fundo com pedregulho (d_{50} < 3 cm)	0.0070m< ε <0.0150m
Fundo com pedras médias (d_{50} < 8 cm)	0.0150m< ε <0.0400m
Fundo com pedras (d_{50} < 20 cm)	0.0400m< ε <0.1000m
Fundo com rochas (d_{50} < 50 cm)	0.1000m< ε <0.2500m
Fundo de Concreto:	
Fundo de concreto liso	0.0001m< ε <0.0005m
Fundo de concreto inacabado	0.0005m< ε <0.0030m
Fundo de concreto antigo	0.0030m< ε <0.0100m

Tabela 3- Valores de rugosidade equivalente do fundo. Adaptado de ROSMAN, 2024.

4.4.2 Maré e Variações de Níveis

A maré observada, também chamada de maré total, corresponde à combinação da maré astronômica e maré meteorológica, resultante de fatores como ventos e variações na pressão atmosférica. Essa soma reflete o nível real das águas em um determinado momento e local, sendo um parâmetro fundamental para o entendimento da dinâmica costeira e estuarina é utilizada como condição de contorno nas fronteiras marítimas do modelo hidrodinâmico. A maré observada influencia diretamente os processos de variação do nível d'água, determinando fluxos de enchente e vazante no sistema lagunar.

A série temporal impostas ao modelo é referente aos dados medidos na região estudada, englobando período de 35 dias, iniciados em 22 de setembro de 2018, e mostra variações de maré de sizígia e quadratura para a região durante a janela temporal estudada. Na Figura 28, podemos notar tais variações.

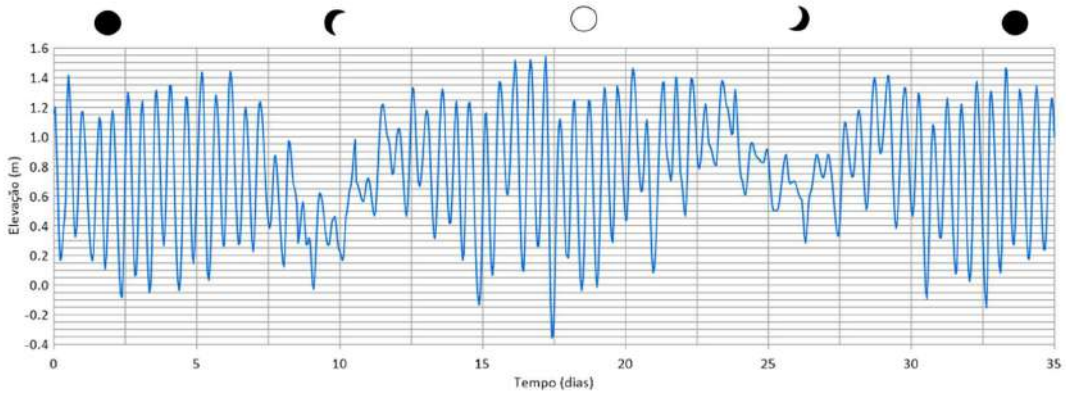

Figura 28- Variações de maré observadas no período observado e impostas ao modelo como condição de contorno.

A Prefeitura de Niterói (PMN, 2018) realizou uma campanha de monitoramento das variações do nível d'água em três pontos na área de estudo. O primeiro ponto de medição foi localizado na porção marítima próxima à Praia de Itaipu, no costão rochoso conhecido como Morro das Andorinhas. O segundo ponto foi situado no interior da Laguna de Itaipu, enquanto o terceiro ponto de medição foi estabelecido dentro da Laguna de Piratininga. Os dados obtidos durante a campanha foram disponibilizados para este estudo e utilizados de forma distinta. Os registros coletados na porção marítima, próxima à Praia de Itaipu, foram empregados como variação da maré imposta

no modelo hidrodinâmico, conforme já mencionado. Por sua vez, os dados medidos nas lagunas de Itaipu e Piratininga foram fundamentais para os processos de calibração e validação do modelo, assegurando sua precisão e representatividade nas simulações realizadas para o sistema lagunar.

Na Figura 29 é mostrada a localização dos pontos de medição, enquanto a Figura 30 mostra as variações consideradas para estes pontos.

Figura 29- Pontos onde foram realizadas as medições de níveis d'água. Fonte: Google Earth.

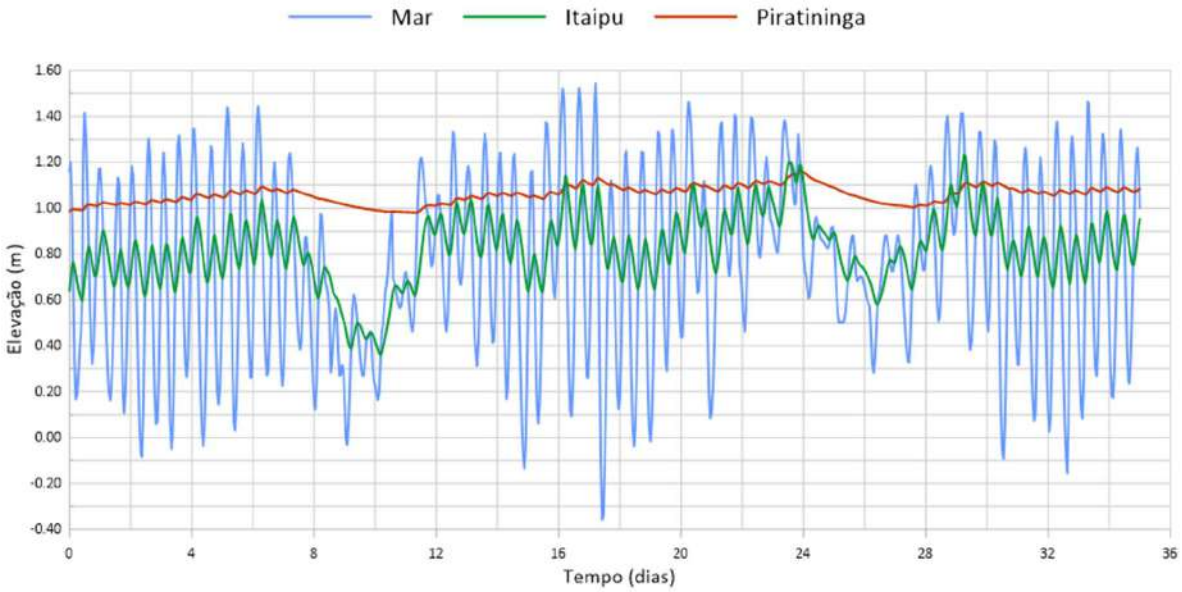

Figura 30- Variações de níveis d'água nos 3 pontos referenciados na Figura 29. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

4.4.3 Ventos

O padrão de ventos observado nas proximidades do sistema lagunar estudado tem direção marcadamente no primeiro quadrante, além de possuírem baixas velocidades. A Figura 31 mostra a distribuição percentual de ocorrência dos ventos que alimentaram os modelos. A rosa dos ventos é referente a série temporal dos 35 dias estudados, iniciados em 22 de setembro de 2018.

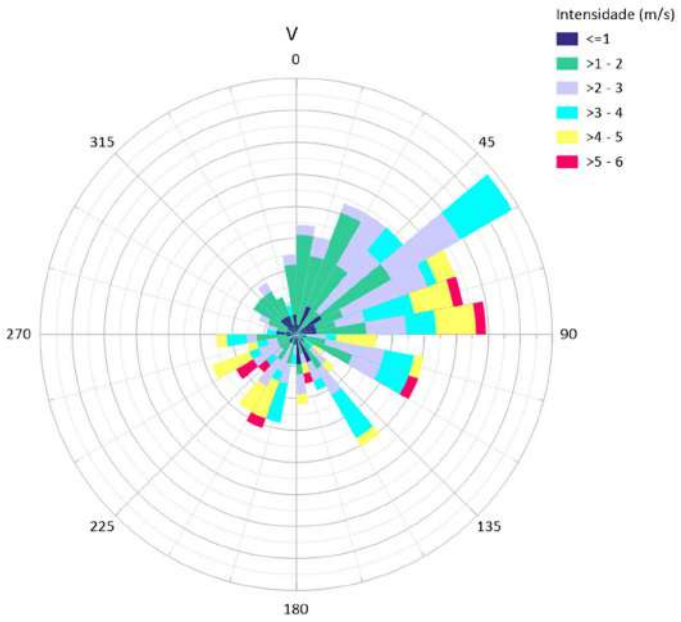

Figura 31- Distribuição percentual da ocorrência de ventos utilizados pelos modelos na região do sistema lagunar no período estudado.

Os dados de reanálise atmosférica disponibilizados pelo ERA5, produzidos pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), foram utilizados neste estudo para fornecer informações sobre o vento necessário para o forçamento do modelo hidrodinâmico. Para o presente trabalho, foi extraída série temporal de velocidade e direção do vento em uma grade próxima à região do sistema lagunar Piratininga-Itaipu. Esses dados foram aplicados ao modelo para representar as condições de vento locais, influenciando diretamente os processos de circulação e mistura hidrodinâmica no sistema estudado. O ERA 5 disponibiliza dados dos seus modelos através do site ***https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview.***

A Figura 32 mostra a localização do ponto V que foi considerado como estação de vento para este estudo.

Figura 32- Localização do ponto de obtenção da série temporal para os dados de vento. Fonte: Google Earth.

4.4.4 Vazões dos Afluentes e ETEs

Os dados hidrológicos referentes aos rios afluentes às lagunas foram obtidos através do Relatório de Hidrologia, Caracterização das Vazões e dos Aportes de Cargas Contribuintes ao Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu (HYDROSCIENCE, 2018). São dados referentes às vazões médias obtidas para o ano de 2018, usados como condição de contorno na modelagem hidrodinâmica. A Tabela 4 mostra os valores das contribuições de Piratininga e, a Tabela 5, os de Itaipu. Já na Figura 33 é possível visualizar as regiões onde estas vazões desaguam nas lagunas.

Aporte	Vazão (m^3/s)
Córrego Viração	0,14
Rio Cafubá + Rio Arrozal	0,26
Rio Santo Antônio + Rio Jacaré	0,46

Tabela 4- Vazões de contribuição para a Laguna de Piratininga.

Aporte	Vazão (m^3/s)
Rio João Mendes	0,78
Rio da Vala	0,16
Rio Colibris	0,08

Tabela 5- Vazões de contribuição para a Laguna de Itaipu.

Figura 33- Localização dos aportes fluviais considerados no estudo. Fonte: Google Earth.

Para o presente estudo, considerou-se que os rios mencionados possuem vazões significativas a serem incorporadas ao sistema lagunar. Por outro lado, os demais afluentes foram desconsiderados devido aos seus valores de vazão extremamente baixos, considerados irrelevantes para a dinâmica hidrológica do sistema. Além das vazões naturais dos rios, o sistema lagunar também recebe contribuições das vazões residuais provenientes das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) da região. A ETE Camboinhas está localizada nas proximidades do Canal de Camboatá, enquanto a ETE Itaipu encontra-se próxima à Laguna de Itaipu. Os valores médios fornecidos pelo relatório técnico são apresentados na Tabela 6, e as localizações dessas ETEs podem ser visualizadas na Figura 34.

Aporte	**Vazão (m^3/s)**
ETE Camboinhas	0,078
ETE Itaipu	0,075

Tabela 6- Localização das estações de tratamento de esgoto na região estudada.

Figura 34- Localização das estações de tratamento de esgoto consideradas. Fonte: Google Earth.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas, começando pelo modelo hidrodinâmico do cenário base do sistema lagunar e, em seguida, foram analisados os resultados do modelo hidrodinâmico para as situações projetadas. Posteriormente, foram abordados os resultados do modelo de transporte euleriano aplicados ao cenário base, seguidos pela análise dos resultados do modelo de transporte euleriano para as situações projetadas. Por fim, foi realizada uma comparação entre os resultados do cenário base e de cada uma das situações projetadas, permitindo avaliar as diferenças nos processos de dispersão e renovação de massa d'água no sistema como um todo. Essa abordagem sequencial tem como objetivo proporcionar uma visão integrada das etapas do estudo, destacando a interação entre os processos hidrodinâmicos e de transporte na dinâmica do sistema lagunar.

Antes da realização das simulações, foi necessária a calibração do modelo hidrodinâmico para garantir a representatividade e fidelidade dos resultados em relação às condições reais do sistema lagunar. Este processo, que será mais bem descrito a seguir, envolveu ajustes nos parâmetros do modelo até que os resultados simulados apresentassem boa concordância com dados medidos.

5.1 Calibração e Validação do Modelo

A calibração foi realizada comparando resultados da modelagem com dados de elevações de níveis de água medidos no interior da Laguna de Itaipu, fornecidos pela prefeitura local e citados no item 5.2. Essa etapa foi crucial para garantir que a simulação reproduzisse com precisão os padrões de circulação hidrodinâmica medidos na área de interesse. A série temporal de dados engloba 35 dias, iniciados em 22 de setembro de 2018.

O processo de calibração adotou a comparação direta dos níveis de água medidos no interior das lagunas e os obtidos pelo modelo. Durante o processo, foram necessários ajustes na batimetria do Canal de Itaipu, que faz a ligação da laguna com a região marítima adjacente. O canal de maré sofre com a deposição de sedimentos em sua embocadura e possui batimetria altamente variável, que precisou ser ajustada durante

modelagem para garantir que a amplitude da maré atingisse valores compatíveis com os dados medidos. Para isso, foram inseridos bancos de areia emersos e trechos mais rasos, com o objetivo de reproduzir uma batimetria mais realista do canal. Foram considerados níveis de água medidos, durante o período descrito, com os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico. Outro ajuste realizado durante o processo foi um pequeno acréscimo nas vazões médias dos aportes que desaguam na laguna. A comparação destes valores se encontra na Figura 35. A localização dos pontos considerados foi apresentada na Figura 29.

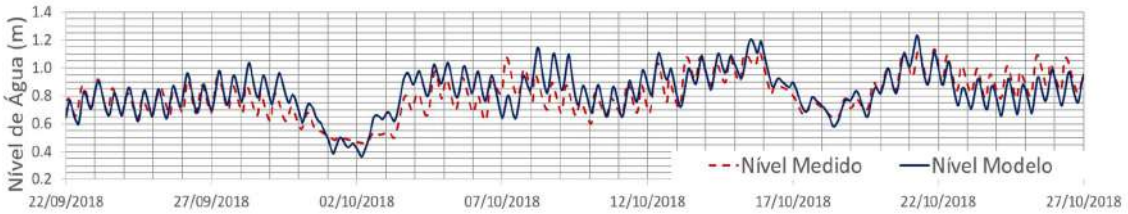

Figura 35- Comparação entre níveis para a Laguna de Itaipu na calibração. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

A validação ocorreu por meio da comparação dos resultados das simulações com os dados medidos na laguna adjacente, Piratininga. Ajustes na batimetria do Canal de Camboatá, que precisou ter a profundidade diminuída devido ao processo de assoreamento, e nas vazões dos aportes fluviais foram necessários. Ressalta-se que os padrões de circulação hidrodinâmica em ambas as lagunas estão diretamente relacionados devido à sua conexão, sendo necessário avaliá-los de forma integrada. Os níveis de água obtidos são mostrados na Figura 36.

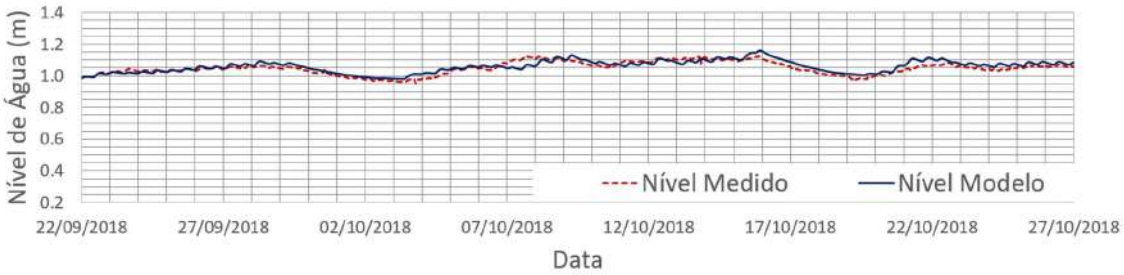

Figura 36– Comparação entre níveis para a Laguna de Piratininga na validação. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

É importante ressaltar que a conexão entre as lagunas se mostra prejudicada pelo assoreamento. Sendo assim, alterações realizadas em Piratininga não ocasionaram mudanças no nível de Itaipu e o processo de validação ocorreu na forma de análises independentes entre as lagunas. Essa abordagem metodológica proporcionou uma base sólida para o estudo dos padrões de circulação hidrodinâmica no sistema lagunar

Piratininga-Itaipu, permitindo a obtenção de resultados confiáveis e significativos para a compreensão e gestão deste ecossistema costeiro.

5.2 Modelo Hidrodinâmico

5.2.1 Cenário Base do Sistema Lagunar

A análise do cenário base do sistema lagunar refere-se às condições observadas em 22 de setembro de 2018, data de início das simulações, representando o estado das lagunas nesse momento específico. Nesse cenário, o Túnel do Tibau encontra-se sem obstruções de fluxo, permitindo a conexão direta entre a Laguna de Piratininga e o oceano adjacente. Por outro lado, tanto o Canal de Itaipu quanto o Canal de Camboatá apresentam níveis significativos de assoreamento, comprometendo sua funcionalidade na troca de água entre as lagunas e destas com o mar.

Os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico permitiram avaliar os padrões de circulação no sistema lagunar, além de evidenciar a limitação existente nos canais de conexão, devido ao assoreamento já citado. Foram observadas variações espaciais e temporais na velocidade das correntes e nos gradientes de nível d'água. Esses resultados fornecem informações essenciais para compreender os processos hidrodinâmicos em operação e para subsidiar etapas posteriores do estudo, como a modelagem de transporte e as avaliações abordadas nas outras etapas.

A Figura 37 e a Figura 38 trazem resultados referentes aos níveis d'água nas lagunas encontrados nas simulações, para o período de baixamar (BM) e preamar (PM) durante maré de sizígia (SZ).

Observou-se uma menor amplitude na variação dos níveis da Laguna de Piratininga, mesmo durante períodos de maré mais acentuada, como as marés de sizígia. Isto pode ser justificado pela existência de problemas de assoreamento no Canal de Camboatá, que faz a ligação da mesma à Laguna de Itaipu, e também pela presença da soleira existente na embocadura do Túnel do Tibau, que evita que o nível da laguna baixe demais e bancos de lama aflorem, trazendo mal cheiro para a região. Já Itaipu demonstrou sofrer influência direta das variações de maré, possuindo uma troca mais efetiva com o mar.

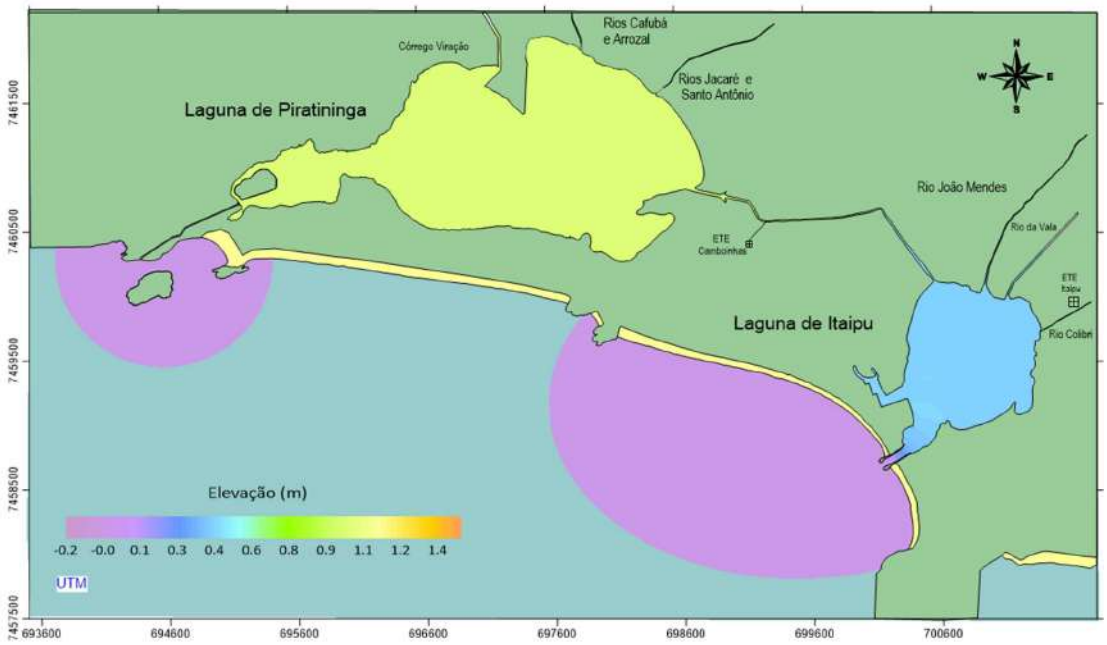

Figura 37- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ no cenário base do sistema lagunar. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

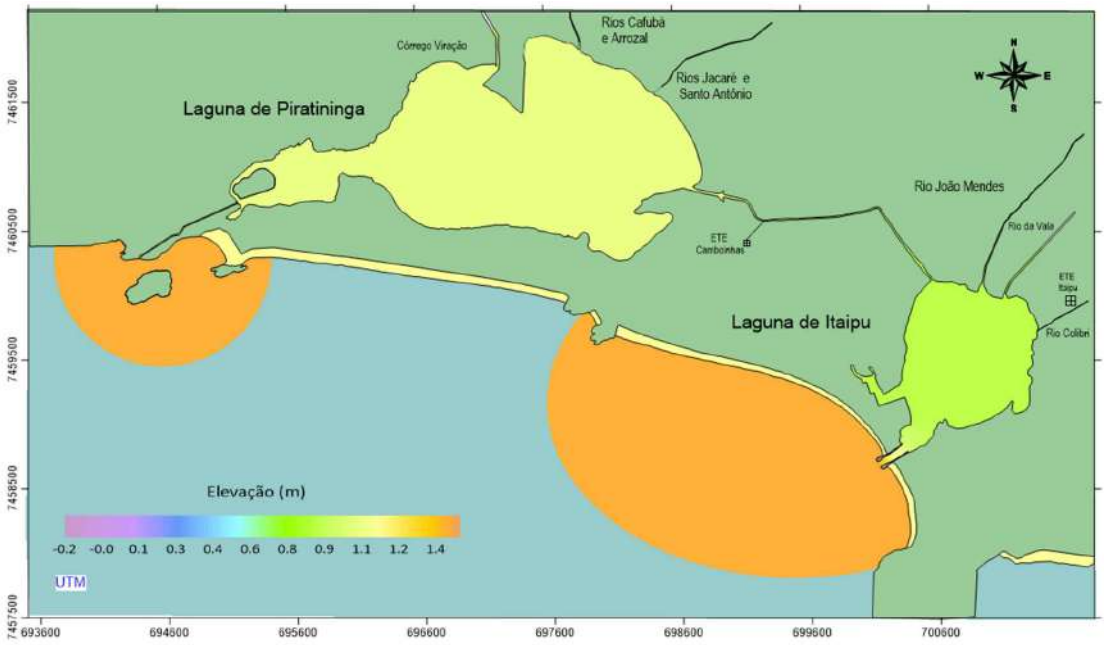

Figura 38- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ no cenário base do sistema lagunar. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

As séries temporais de variações de níveis no interior das lagunas fornecem informações fundamentais para compreender a hidrodinâmica do sistema, permitindo identificar os padrões de oscilação dos níveis d'água, mostrando a influência de fatores

como marés, vento e contribuições fluviais. Nas lagunas, as variações de nível são frequentemente regidas pela conectividade com o oceano e pela eficiência dos canais de comunicação. Além disso, a análise dessas variações é crucial para avaliar processos de troca de água, tempos de renovação e os impactos de cenários projetados no comportamento do sistema lagunar.

Para o presente estudo, o sistema lagunar no cenário base mostrou a Laguna de Piratininga em níveis superiores ao da vizinha Itaipu durante todo o período simulado e, com níveis bem semelhantes na região central da laguna e na região próxima a soleira do túnel, que condiciona que níveis inferiores ao da cota da soleira, isto é, 084 m, não saiam da laguna em períodos de baixamar. Já Itaipu, mesmo que com a variação amortecida pelo assoreamento existente no canal de maré, mostrou níveis acompanhando variações de maré. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29.

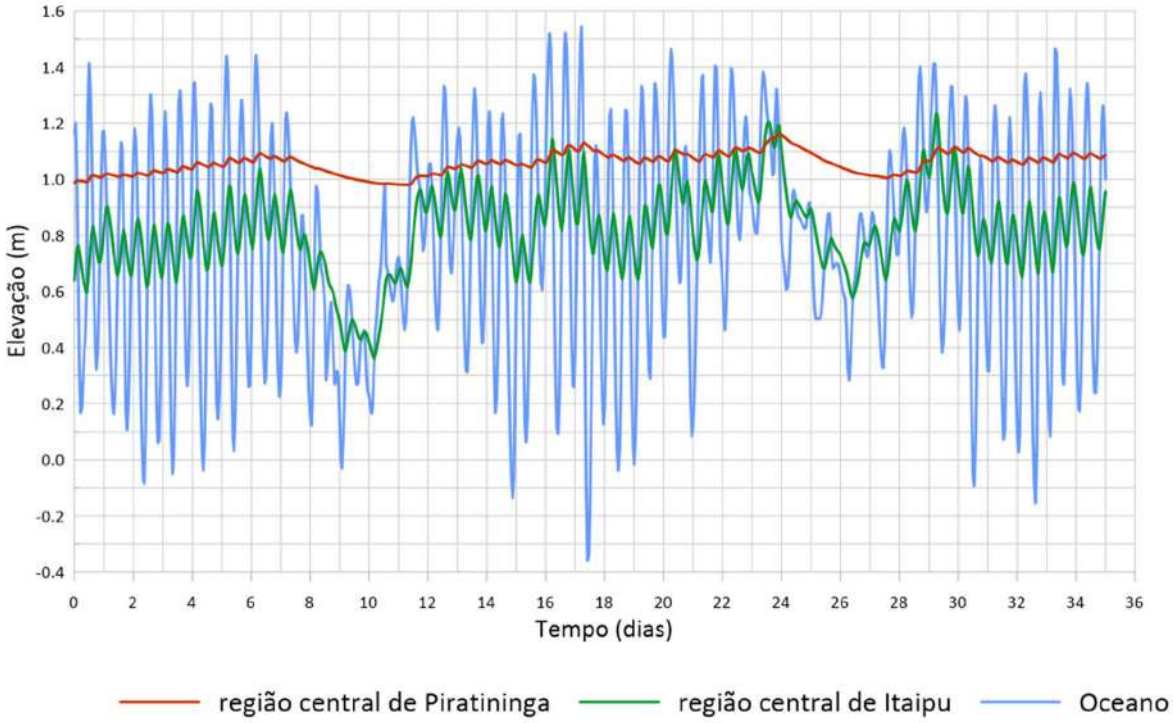

Figura 39- Séries temporais das variações de níveis d'água no cenário base do sistema lagunar. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

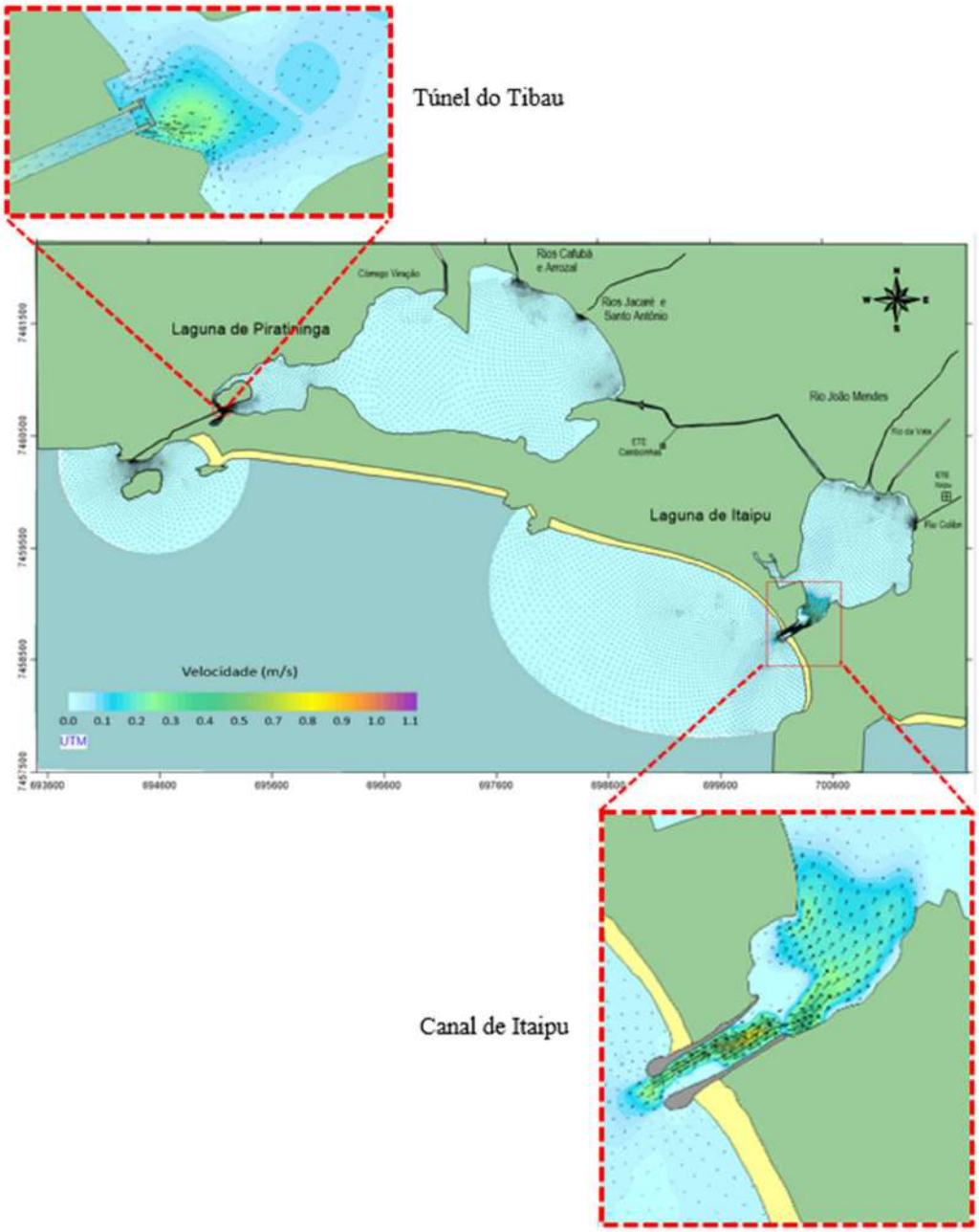

Figura 40- Velocidades obtidas em momento de PM de SZ. Detalhes da velocidade de corrente e sentido de fluxo na entrada do canal de maré.

Em termos de velocidade nas regiões internas das lagunas, tanto na BM quanto na PM, os valores encontrados foram baixos e não chegando a 0,1 m/s, o que é mostrado na Figura 40. Detalhe mostrando o fluxo passando pela soleira do Túnel do Tibau, em momento de PM de SZ, onde é possível observar o fluxo passando do Túnel do Tibau sentido Laguna de Piratininga. Isso só ocorre no período de maré de sizígia, quando os

níveis d’água estão acima da cota da soleira, isto é, 0,84 m.

Um segundo detalhe mostra o canal de maré que liga a Laguna de Itaipu ao mar, esta é a região onde é possível notar as maiores velocidades. O gradiente hidráulico, que se dá pela diferença de nível entre o mar e a laguna, causa a ocorrência de correntes mais intensas neste canal. Em termos gerais, as velocidades obtidas nas situações projetadas não apresentaram variações significativas se comparadas às encontradas no cenário base.

Durante as simulações hidrodinâmicas, foi observado que, para marés de quadratura (QDT), a variação entre BM e PM na Laguna de Itaipu atingiu valor mínimo de 0,34 m e máximo de 1,25 m, enquanto em Piratinga atingiu 0,96 m com variações de altura de maré não ultrapassando 0,15 m. A Figura 41 traz as variações de nível nas regiões de interesse durante maré de SZ e QDT.

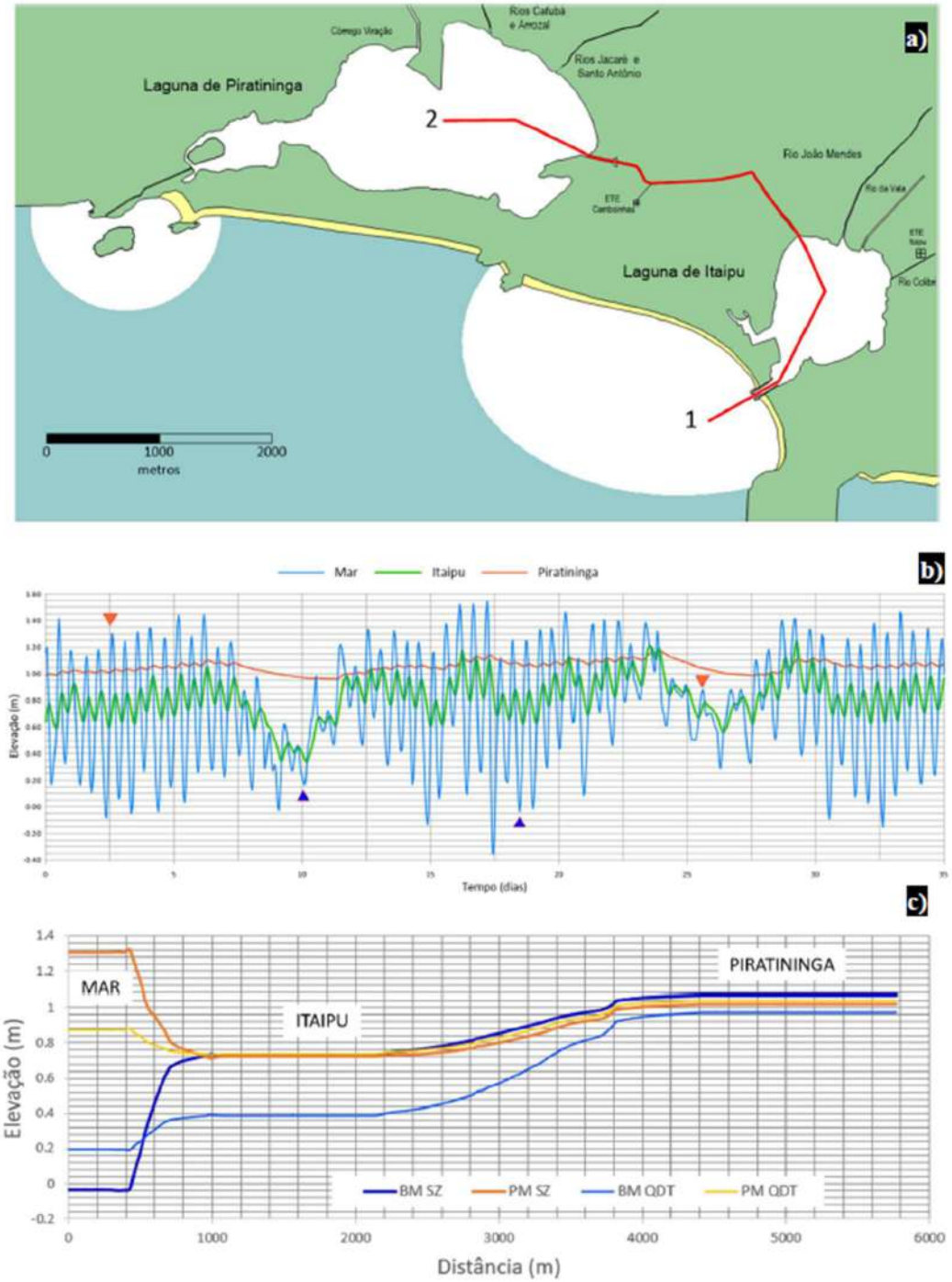

Figura 41- a) Trajeto percorrido para obtenção do perfil. b) Momentos de BM e PM considerados. c) Perfil da linha d'água entre períodos de BM e PM. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

O trajeto percorrido, para a obtenção do perfil de linha d'água, se iniciou na região marítima, passou pelo Canal de Itaipu, porção central da Laguna de Itaipu, Canal de Camboatá e se estendeu até a parte central da Laguna de Piratininga. Desta forma, foi

possível notar as variações de níveis que ocorrem no sistema em diferentes tipos de marés. A subida e descida de nível médio de água nas lagunas ocorre por conta da maré meteorológica.

5.2.2 Situação Projetada Considerando o Túnel do Tibau Fechado

Como já citado anteriormente, este túnel é responsável pela conexão da Laguna de Piratininga com o oceano, mas, desde sua inauguração em 2008, passou grande parte deste tempo parcialmente obstruído por desmoronamento de rochas em seu interior. Este fato pode levar à estagnação das águas, agravando problemas ambientais, como o aumento de processos de eutrofização e o desenvolvimento de condições de baixa oxigenação. Além disso, a obstrução pode impactar negativamente a fauna e flora aquática, que dependem de uma circulação adequada para manter o equilíbrio ecológico.

O objetivo desta simulação em especial era reproduzir o efeito da ausência do túnel para o sistema e, por este motivo, a estrutura foi considerada como fechada, não apresentando assim nenhuma possível contribuição para o sistema. A soleira existente no túnel garante os níveis com cota mínima de 0,84 m mesmo em períodos de BM de SZ, mas a curva encontrada nos resultados sugere que apenas água doce está sendo acrescentadas a laguna.

A Figura 42 e a Figura 43 mostram momentos de BM e PM de SZ respectivamente, ilustrando a baixa variação de nível d'água da Laguna de Piratininga se comparada à sua vizinha Itaipu. Já o gráfico da Figura 44 enfatiza que os níveis da região central de Piratininga já não acompanham as variações de maré, só apresentando um aumento dos níveis d'água, com valores médios entre 10 e 15 cm, causados pela contribuição das vazões acrescentadas à laguna pelos seus aportes fluviais. Outra característica a se ressaltar é que o resultado corrobora a evidência de que o Canal de Camboatá sofre com o assoreamento e o estrangulamento de sua seção hidráulica. Essas condições comprometem significativamente a capacidade do canal de permitir o fluxo de água, restringindo a conectividade hidrodinâmica entre as lagunas e contribuindo para a redução da eficiência na troca de água do sistema lagunar.

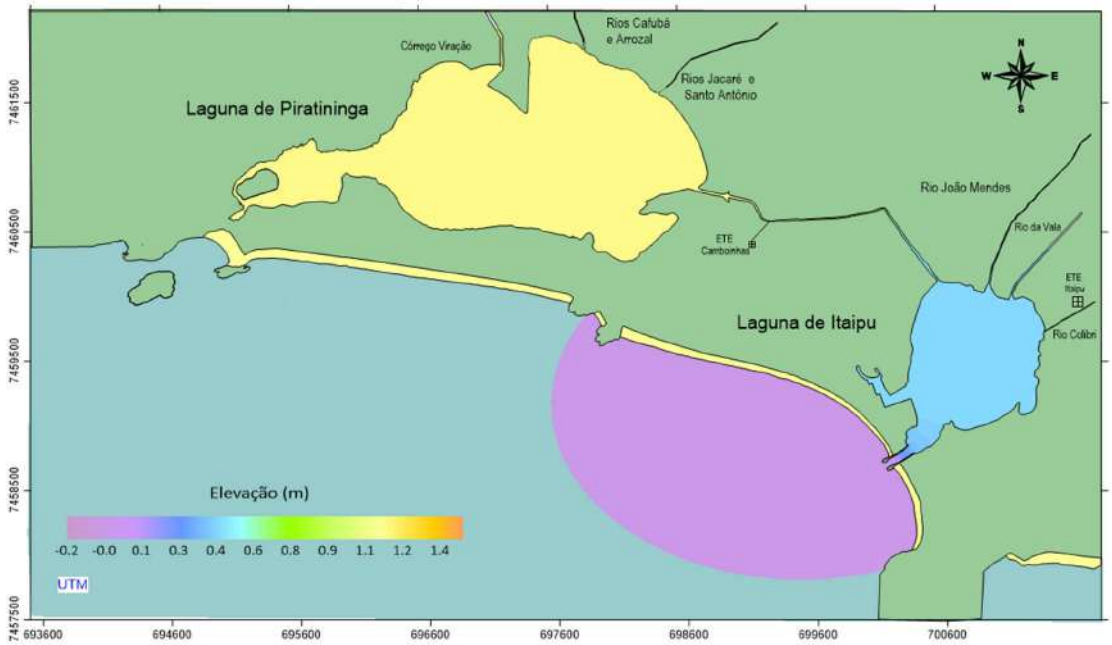

Figura 42- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

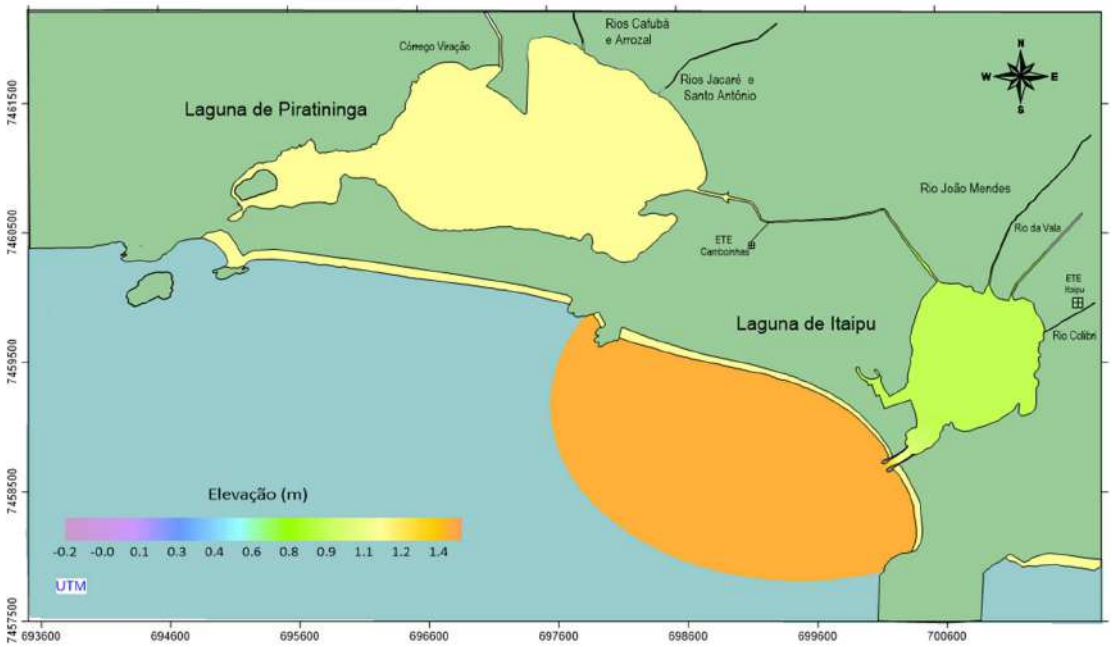

Figura 43- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

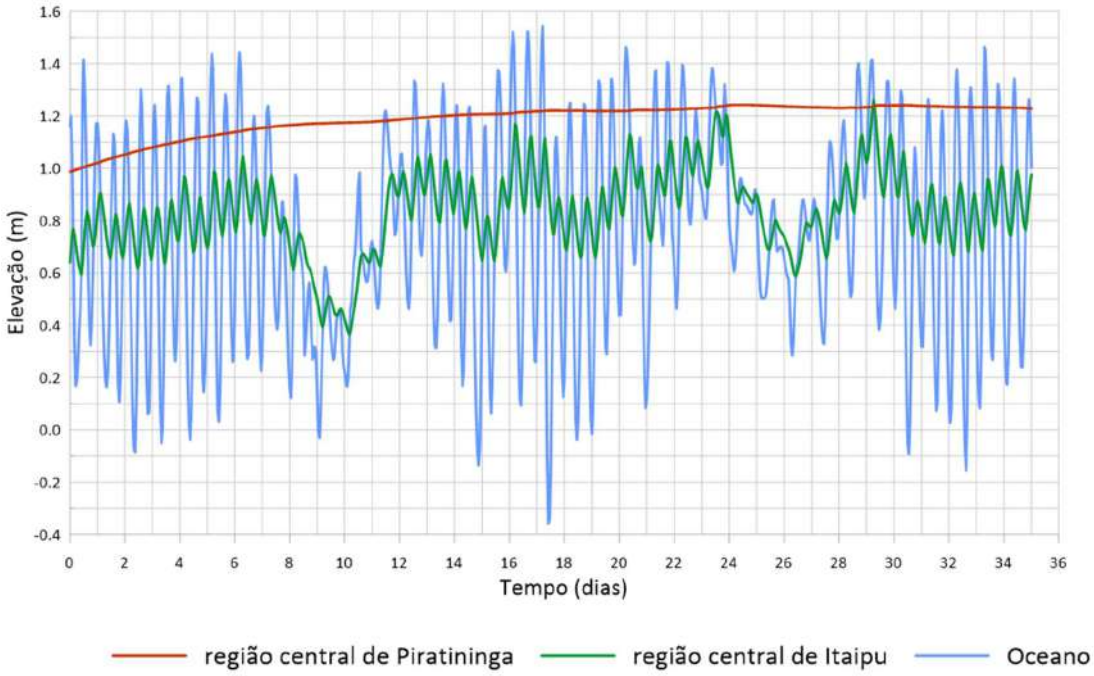

Figura 44- Séries temporais das variações de níveis d'água da situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29.

O fechamento do Túnel do Tibau não trouxe nenhuma diferença de níveis para a Laguna de Itaipu, se comparada ao cenário base que o sistema lagunar se encontra.

5.2.3 Situação Projetada Considerando o Canal de Itaipu Dragado

Contrastando com a situação do túnel fechado, tem se os resultados obtidos para a situação em que o Canal de Itaipu foi dragado.

Os efeitos de BM e PM podem ser vistos na Figura 45 e na Figura 46, neles as variações de maré afetam diretamente toda a região de Itaipu e houve um acréscimo nas variações de níveis entre períodos de BM e PM, que chegaram a apresentar até 0,7 m de diferença entre eles.

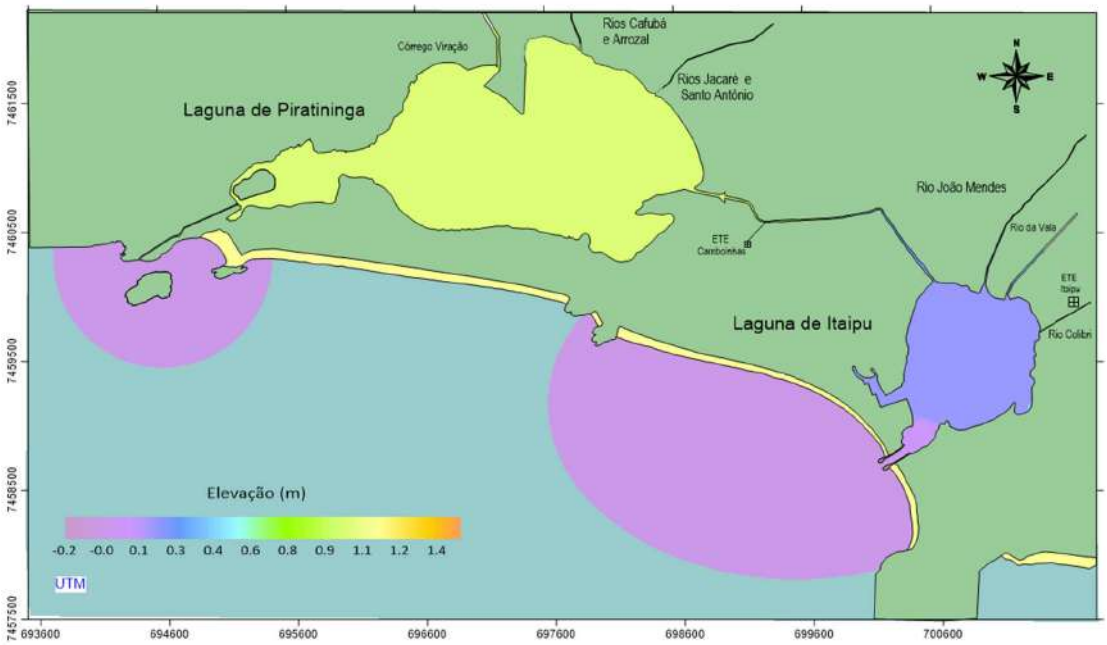

Figura 45- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

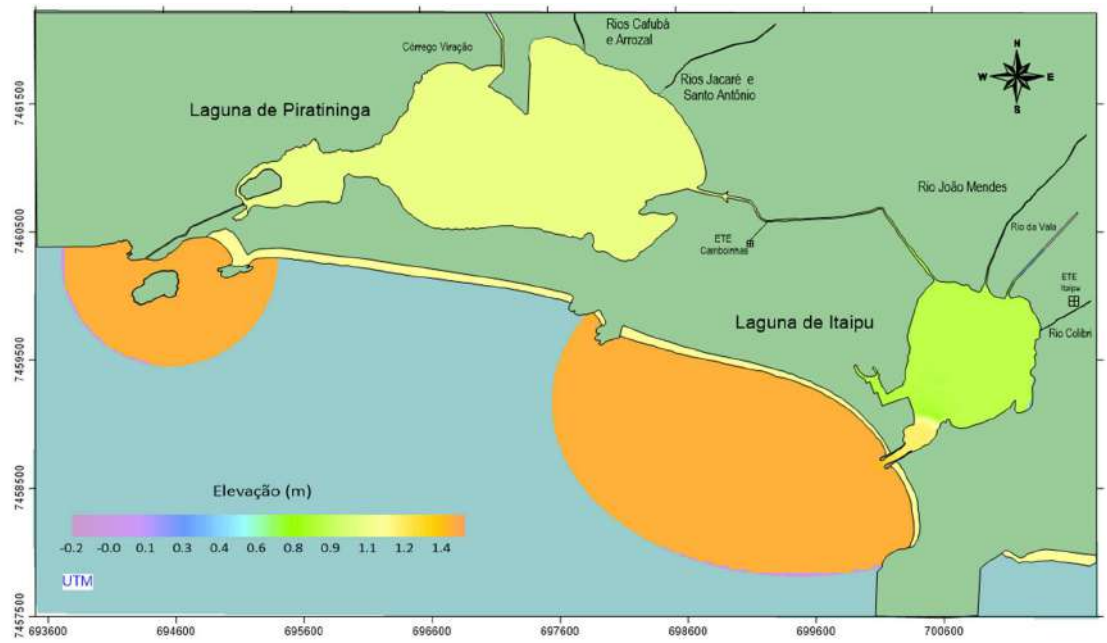

Figura 46- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

A dragagem do Canal em Itaipu em nada alterou a variação do nível da Laguna de Piratininga, o que ressaltou a ideia que as lagunas estão operando como sistemas independentes, uma vez que a ligação entre elas encontra dificuldade de exercer o seu papel.

A Figura 47 mostra as variações obtidas durante a simulação reforçando o que foi citado.

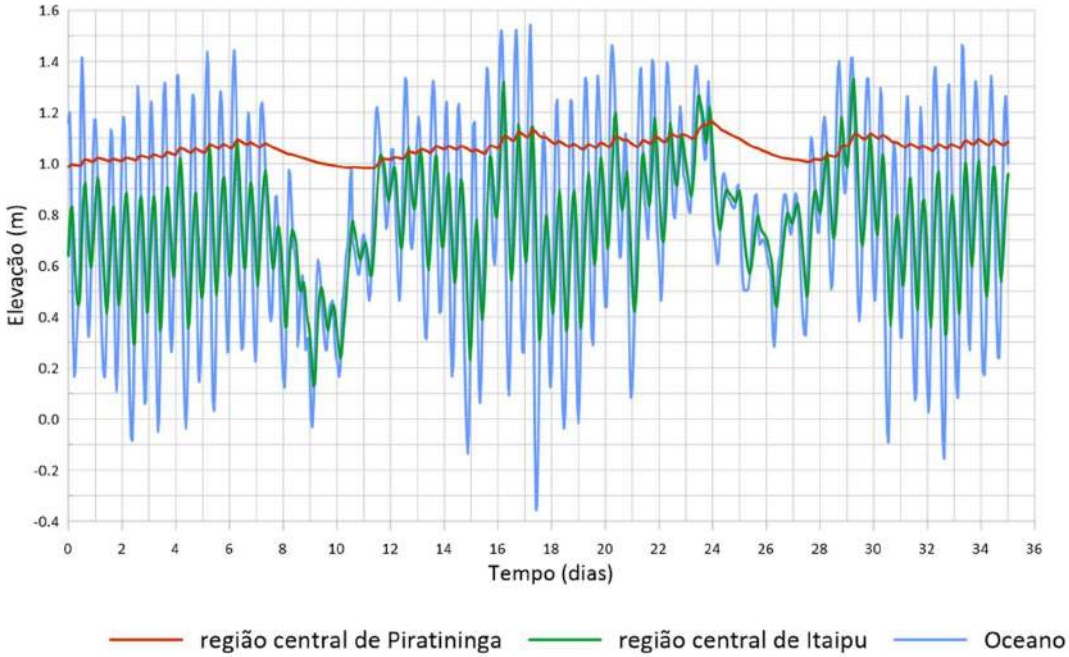

Figura 47- Séries temporais das variações de níveis d'água da situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29.

5.2.4 Situação Projetada Considerando o Canal de Camboatá Dragado

A Figura 48 e a Figura 49 mostram momentos de BM e PM na simulação que consideram o Canal de Camboatá dragado.

Com o canal responsável pela conexão das duas lagunas obtendo um fluxo satisfatório passando por ele, o sistema voltaria a operar de forma integrada. A simulação mostrou a Laguna de Piratininga obtendo variações de níveis acompanhando as de maré e, na PM de SZ, foi observado as lagunas apresentando níveis semelhantes. Já na BM, a Laguna de Itaipu apresentou um acréscimo no nível d'água se comparado ao cenário base.

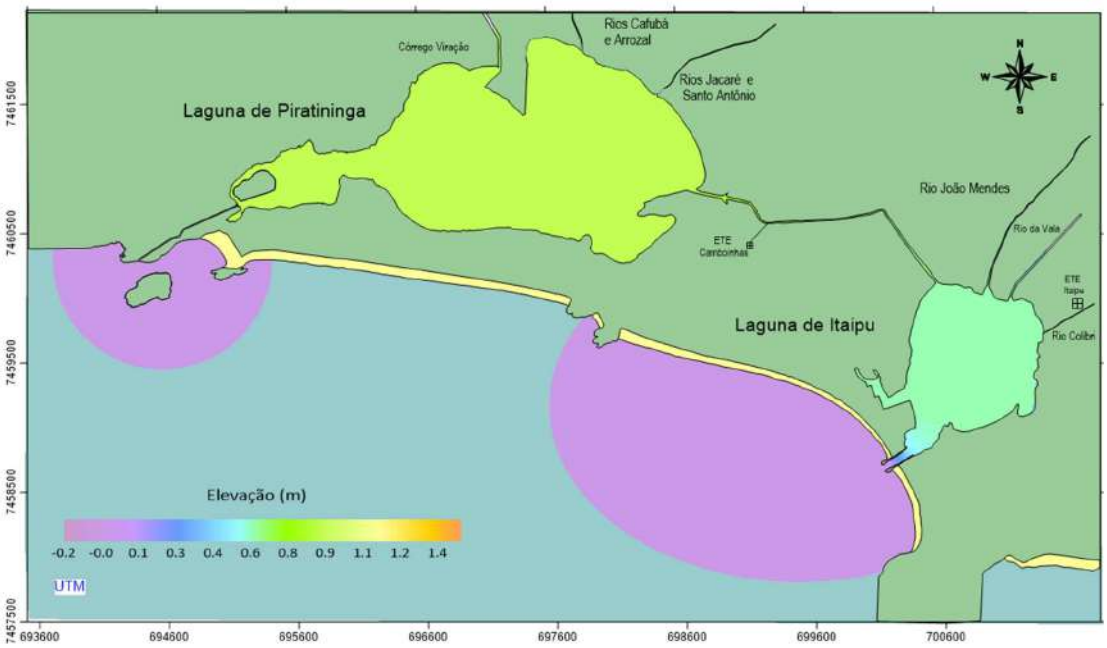

Figura 48- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

Piratininga não demonstrou uma significante variação de nível entre os períodos analisados. Enquanto a variação de Itaipu variou 0,4 m entre marés, Piratininga só variou 0,1 m.

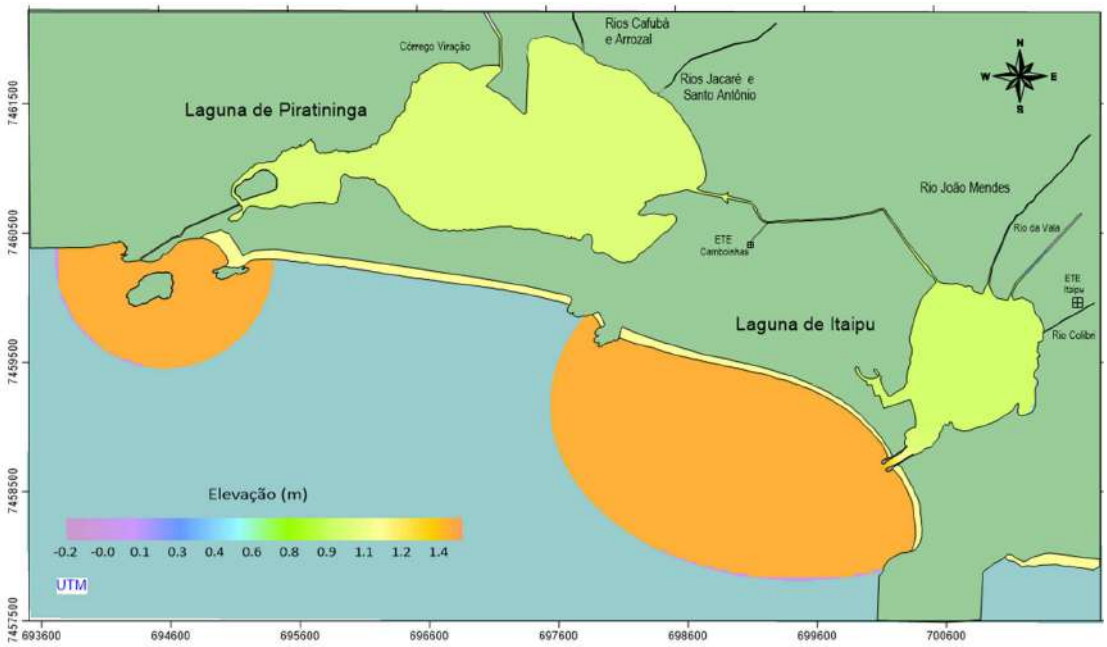

Figura 49- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

A Figura 50 traz as séries temporais onde é possível notar as variações de níveis das duas lagunas ocorrendo de forma integrada e a Laguna de Piratininga não apresentando valores inferiores à da cota da sua soleira.

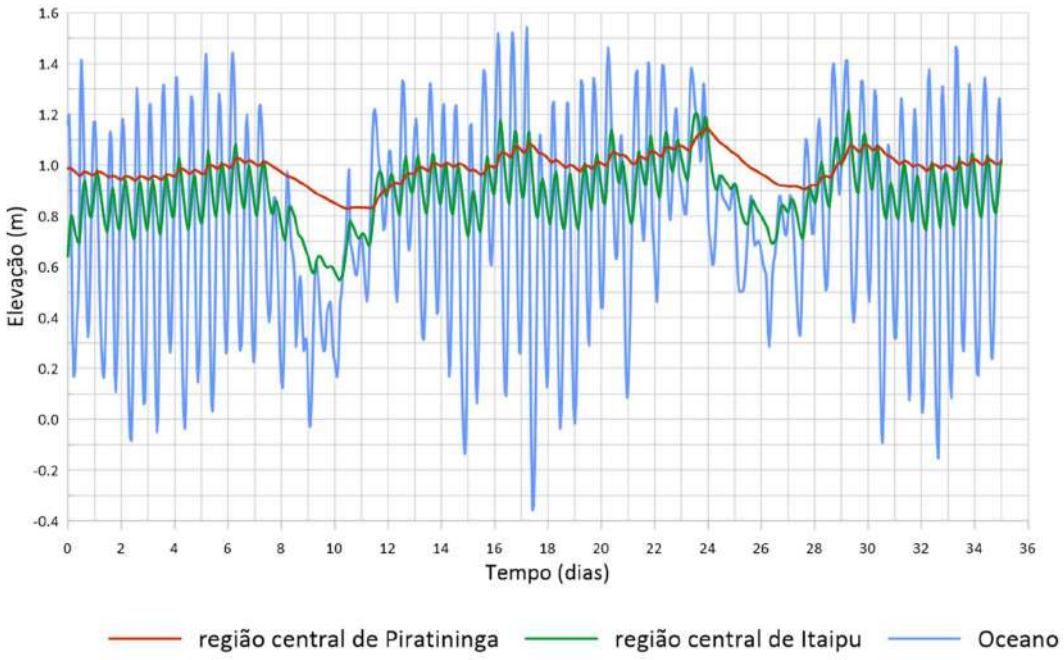

Figura 50- Séries temporais das variações de níveis d'água.na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29.

5.2.5 Situação Projetada Considerando todos os Canais Otimizados

Nesta simulação, foi considerado o sistema lagunar com o Túnel do Tibau desobstruído e os canais de Itaipu e Camboatá dragados. Com a possibilidade do fluxo acontecendo tanto do oceano com as lagunas quanto delas entre si, as variações observadas foram as mais significativas.

Na Figura 51e na Figura 52, os períodos de BM e PM de SZ são mostrados. Durante o período da PM as lagunas apresentaram níveis semelhantes, enquanto na BM ouve uma redução de aproximadamente 36% no nível, se aproximando mais do nível do mar. Já Piratininga se manteve com valores semelhantes.

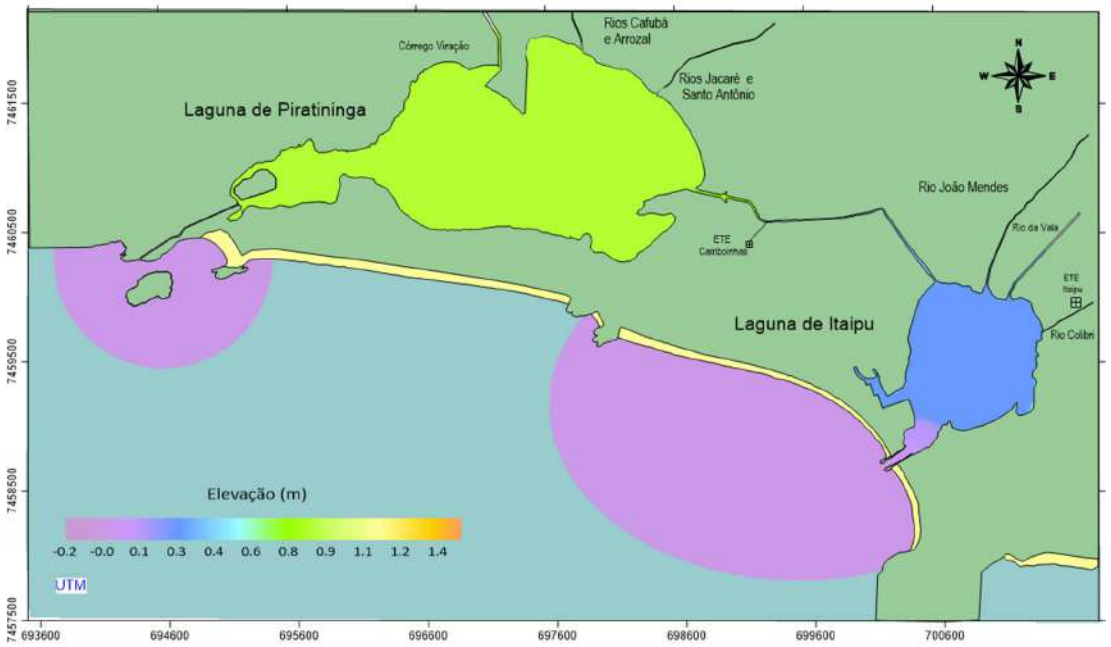

Figura 51- Isolinhas de níveis d'água em BM de SZ na situação projetada considerando todos os canais otimizados.

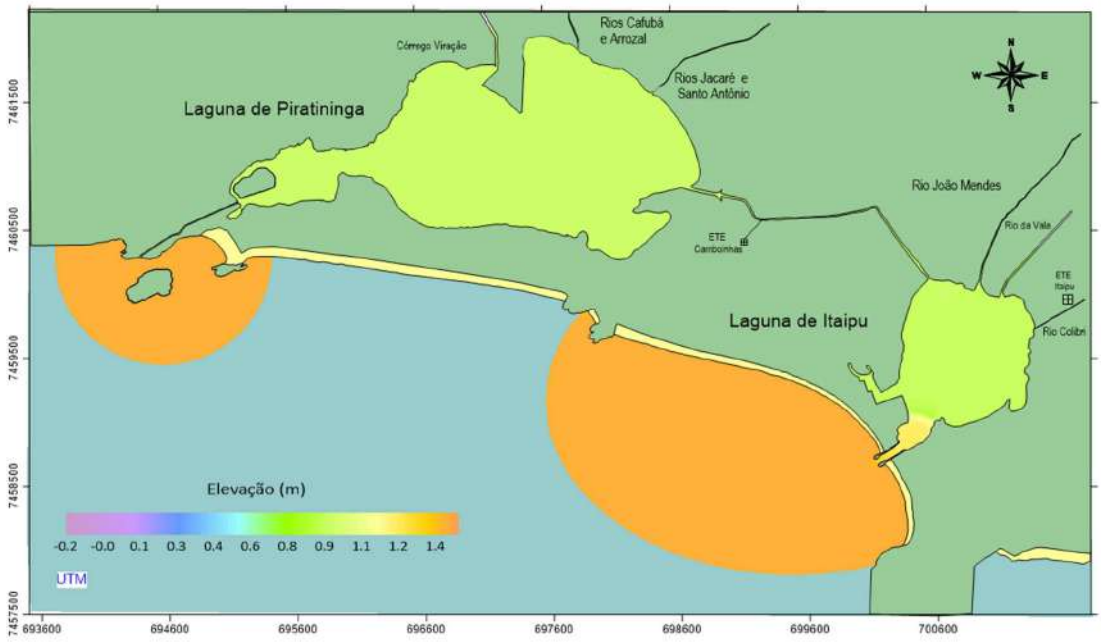

Figura 52- Isolinhas de níveis d'água em PM de SZ na situação projetada considerando todos os canais otimizados.

No gráfico da Figura 53, é possível ver os níveis das lagunas ao longo do período de simulação, observando-se que os níveis médios se tornaram mais próximos entre as lagunas e também em relação ao oceano, tanto durante as marés de sizígia quanto nas de quadratura. Essa análise indicou que o sistema lagunar voltou a apresentar um

comportamento integrado entre as lagunas, com a Laguna de Piratininga mostrando níveis na região central que não atingem valores mínimos preocupantes, enquanto a Laguna de Itaipu apresenta variações que acompanham diretamente as oscilações de maré.

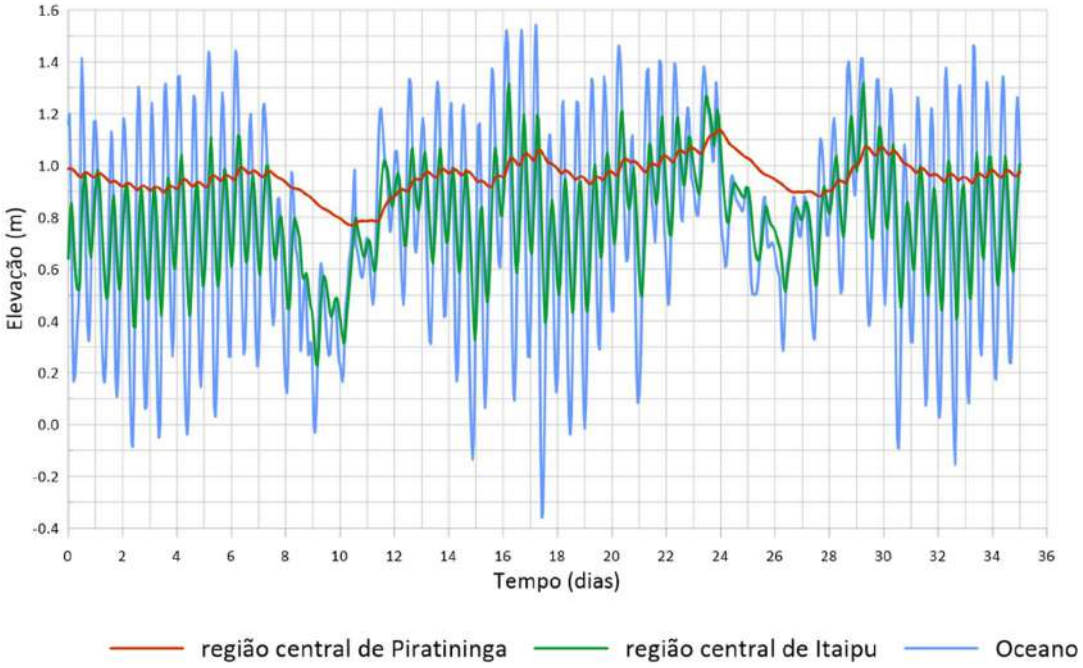

Figura 53- Séries temporais das variações de níveis d'água.na situação projetada considerando todos os canais otimizados. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN. Os pontos referentes à coleta dos dados foram apresentados na Figura 29.

5.2.6 Análise Comparativa entre os Níveis D'Água Obtidos

A Figura 54 e a Figura 55 trazem a comparação entre as simulações realizadas para a região central das lagunas. Os pontos de coleta de dados analisados estão disponíveis na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

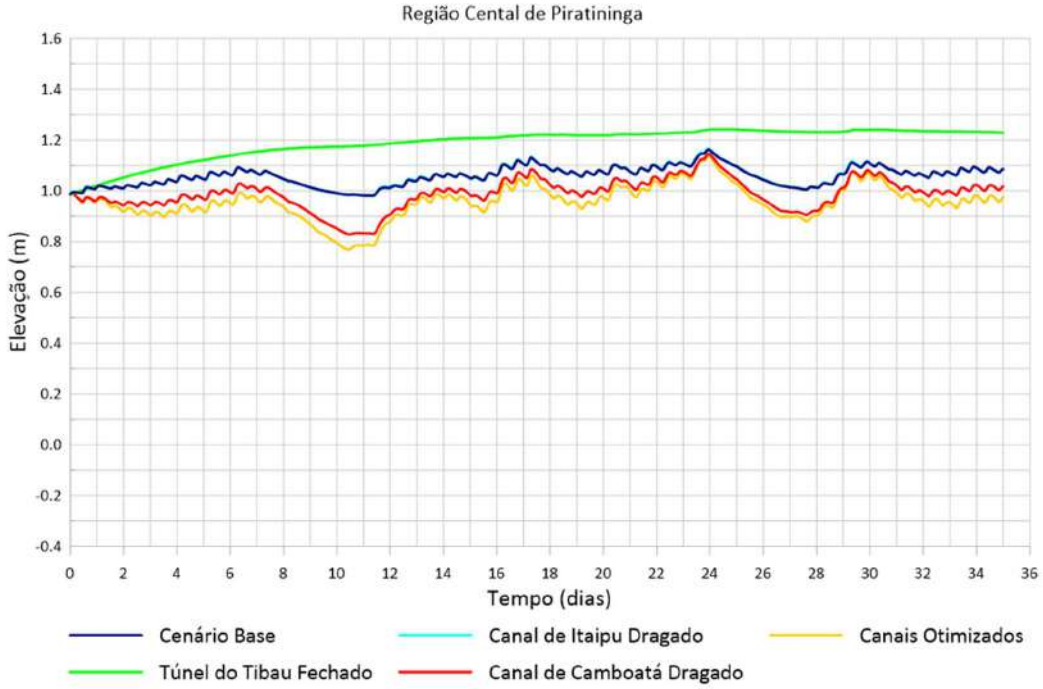

Figura 54- Análise Comparativa das simulações para a região central da Laguna de Piratininga.

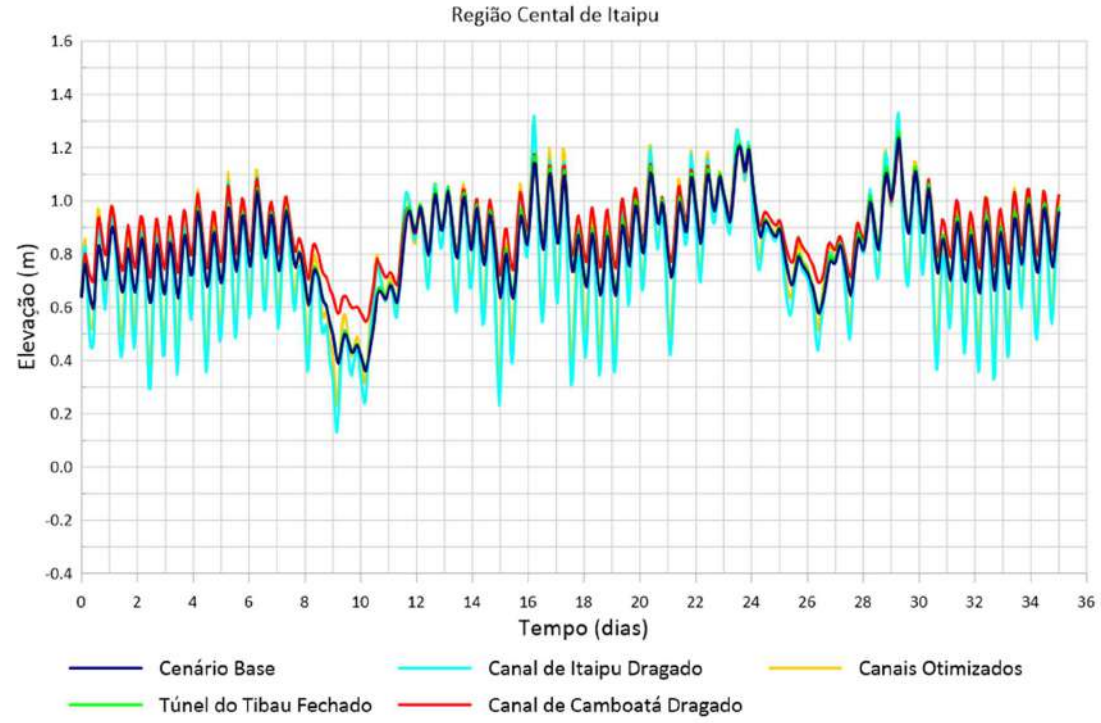

Figura 55- Análise Comparativa das simulações para a região central da Laguna de Itaipu.

Figura 56 - Pontos analisados para análise comparativa de níveis d'água entre as simulações. Fonte: Google Earth.

Para a Laguna de Piratininga, observou-se uma leve redução do nível médio no cenário com os canais otimizados. Essa diminuição é um indicativo da necessidade de uma melhor análise dos possíveis impactos, considerando que a laguna possui profundidades predominantemente rasas. A dragagem do Canal de Camboatá também levou a uma redução do nível médio, enquanto a simulação que considerava apenas a obstrução do Túnel do Tibau resultou em um aumento do nível médio da laguna. O cenário com a dragagem do Canal de Itaipu apresentou resultados semelhantes aos do cenário base.

Para a Laguna de Itaipu, o cenário que considerava a dragagem do Canal de Itaipu aumentou consideravelmente a amplitude maré, evidenciando uma comunicação mais eficiente com o mar. Maiores amplitudes de maré também para o cenário que considerava os canais otimizados, mas com um leve aumento do nível médio se comparado a simulação anterior. Aumento do nível médio da laguna para o cenário eu incluía o Canal de Camboatá, confirmando que a comunicação entre as lagunas foi restabelecida.

5.3 Taxa de Renovação

Como já citado no item 4.2.1, no instante inicial, de tempo igual a zero, as águas do interior das lagunas possuem valor de referência 0%, enquanto as externas possuem valor de referência 100%, sendo estas consideradas águas novas e adicionadas ao sistema de forma gradual ao longo do período simulado.

A Figura 57 ilustra o instante inicial da simulação, mostrando águas no interior da laguna com cores amareladas, sendo estas consideradas como 0% de água nova, e as águas do mar, consideradas como 100% de água nova, se apresentam com a cor azul escuro.

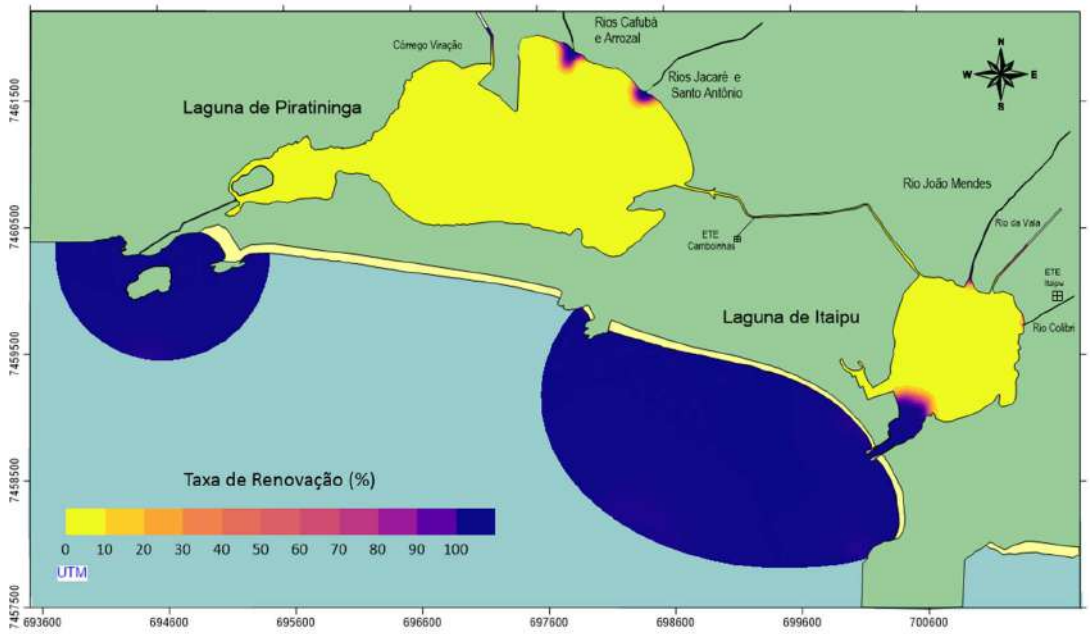

Figura 57- Taxas de renovação nos momentos inicias da simulação.

Nas fronteiras abertas, as águas entram como novas e saem como misturadas. As vazões de afluentes dos rios também são consideradas como águas novas, aumentando assim a renovação do sistema, já que o fluxo de água doce é integrado ao mesmo ao longo da simulação. Cabe ressaltar que, na realidade, águas novas não necessariamente são águas limpas. Entretanto, este trabalho não analisa transporte e dispersão de contaminantes trazidos pelos afluentes.

Durante a simulação, as águas originais vão se misturando às águas novas, resultando para cada instante e em cada local um valor entre 0% e 100% correspondente à porcentagem de água nova. Tendo o modelo corrido por tempo suficiente, toda a água

original deverá ter sido substituída por água nova. Nesta análise, os modelos foram rodados para alcançar a renovação total do sistema, e garantir tal circunstância, foram rodados dois ciclos de simulação, ou seja, um período total de 70 dias.

5.3.1 Cenário Base do Sistema Lagunar

Após 5 dias de simulação, já é possível notar que a renovação de Itaipu acontece de forma mais rápida e eficiente em comparação à vizinha Piratininga, que apresenta uma distribuição irregular ao longo do período simulado. Conforme ilustrado na Figura 58, os afluentes desta laguna representam a principal contribuição para sua renovação hídrica. Já Itaipu demonstrou sofrer influência tanto do oceano quanto dos afluentes.

Outro fato relevante para Piratininga ocorreu na porção oeste da laguna, região próxima da embocadura do Túnel do Tibau, onde uma dificuldade de renovação pode ser observada. Mesmo com o túnel considerado aberto e a conexão com o mar assegurada, a região foi a que se apresentou como ponto crítico, encontrando as menores taxas de todo o sistema.

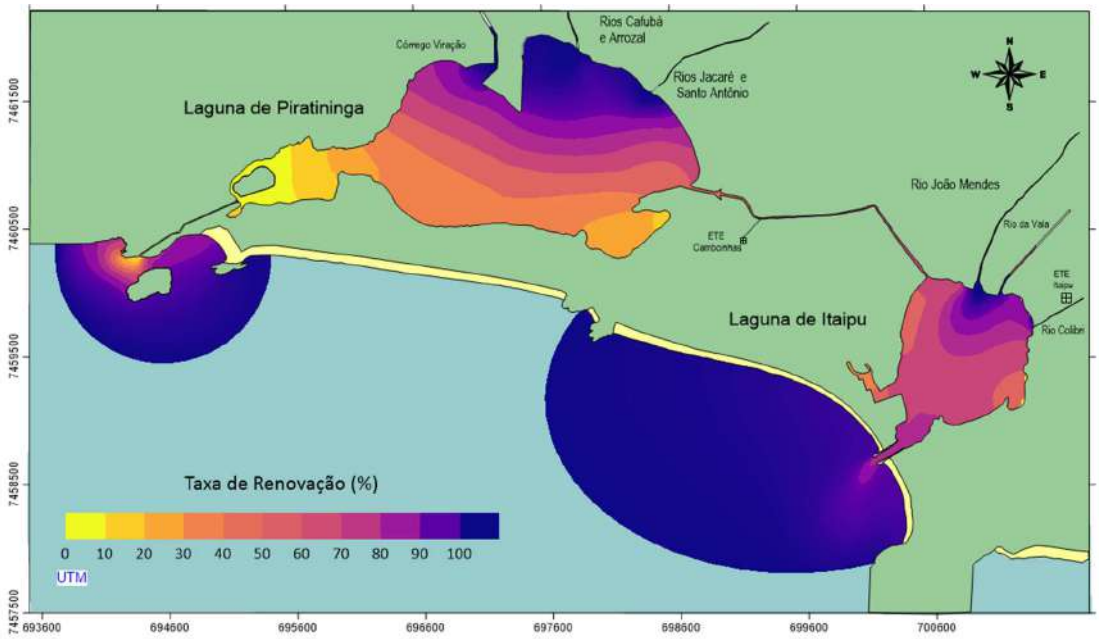

Figura 58- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para o cenário base do sistema lagunar.

Mais um fato a ser destacado, e que pode ser notado tanto na Figura 58 quanto na Figura 59, é a baixa significância mostrada pelo canal responsável pela conexão entre as

duas lagunas, problema este justificado pelo assoreamento já descrito. O Canal de Camboatá não demonstrou nenhum suporte expressivo, em termos de conexão de fluxo d'água durante todo o período simulado e as lagunas atuaram praticamente como sistemas independentes.

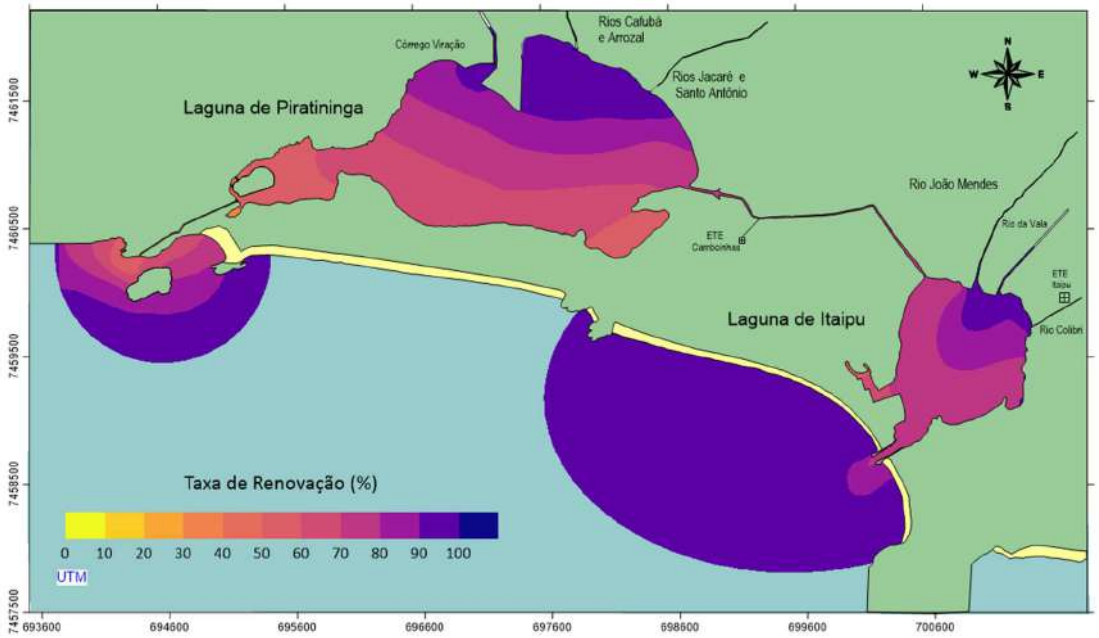

Figura 59- Taxas de renovação após 10 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar.

Após 15 dias de simulação, Figura 60, foi possível notar que Itaipu apresentou renovação das suas águas acontecendo de maneira mais rápida nos primeiros 10 dias da simulação. Depois o processo de mistura continua a acontecer, mas de maneira mais lenta até chegar ao seu limite. Após os primeiros 15 dias de simulação, as taxas encontradas em Itaipu ficam em torno de 80 a 95% e a de Piratininga, que continuou apresentando variação ao longo de sua área e apresentando maior representatividade nas áreas próximas ao desague dos seus afluentes.

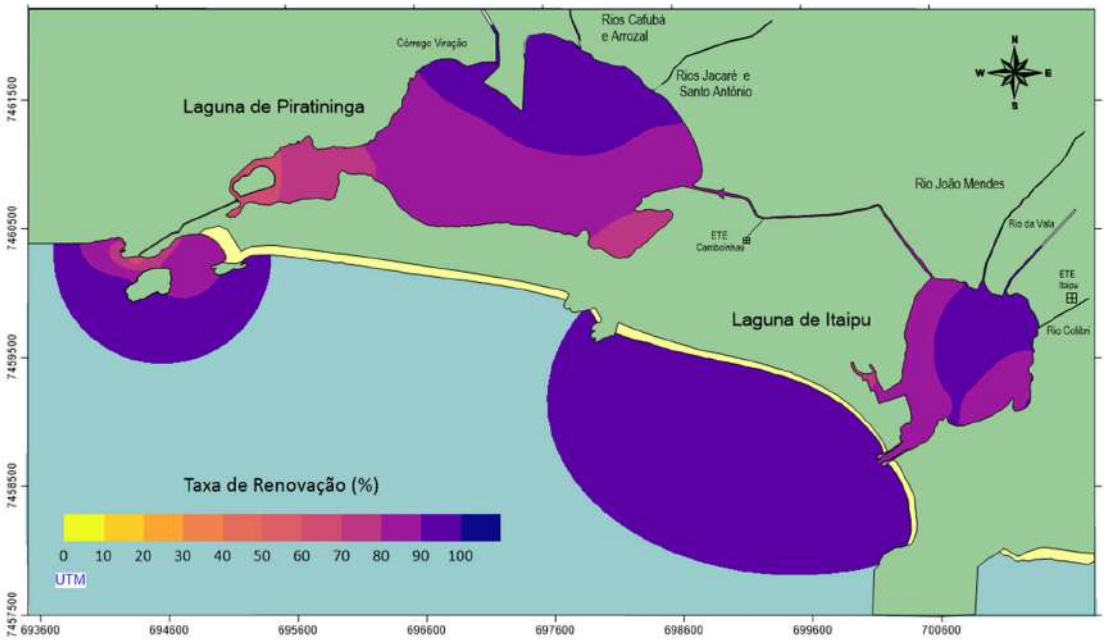

Figura 60- Taxas de renovação após 15 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar.

Com 30 dias de simulação, é possível notar uma estabilização nas taxas de renovação das lagunas. Para a região central, os índices encontrados foram de 95% para Piratininga e aproximadamente 98% para Itaipu. O sistema lagunar apresentando tal estabilização pode ser visto na Figura 61.

Ao longo do período simulado, a renovação da Laguna de Itaipu ocorreu de forma gradual, sendo alimentada tanto pela região marítima quanto pelos aportes fluviais. Por outro lado, na Laguna de Piratininga, os aportes fluviais se destacaram como a principal fonte de renovação das águas.

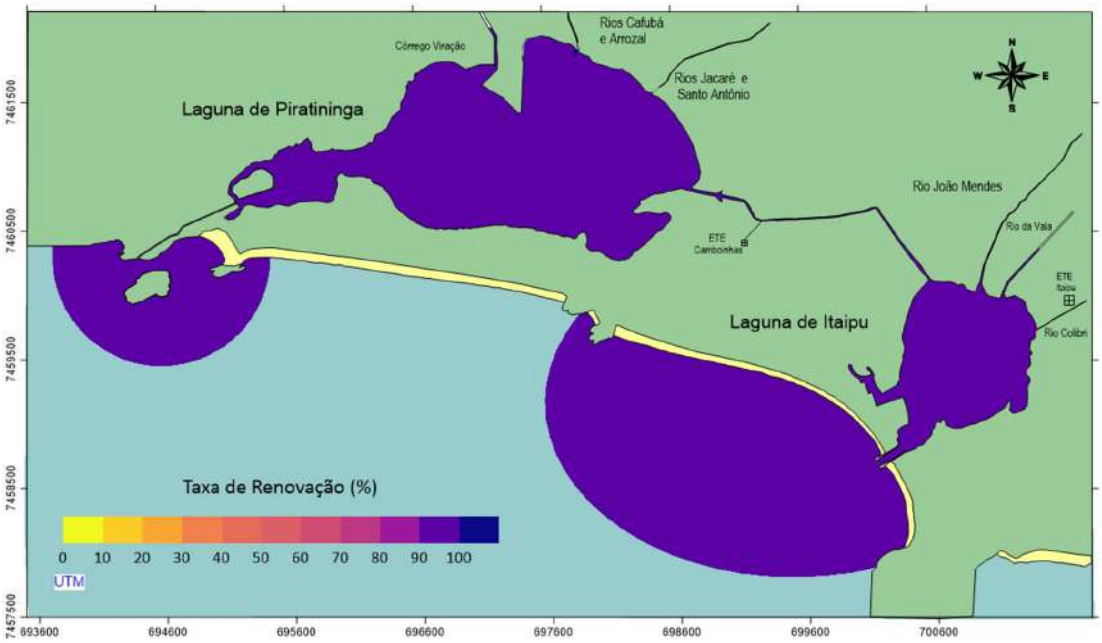

Figura 61- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para o cenário base do sistema lagunar.

No gráfico da Figura 62, é renovação é mostrada por todo período dos 70 dias simulados. A taxa de renovação nas lagunas acontece de forma simultânea e alcança índices próximos, além disso, índices máximos ocorrem por volta de 50 dias com valores de 99,5% para Piratininga e 98,4% para Itaipu.

Um aspecto relevante na análise da região oeste da Laguna de Piratininga, próxima à embocadura do Túnel do Tibau, é a alternância no fluxo de água pelo túnel. Devido à presença da soleira, o túnel verte apenas quando os níveis ultrapassam sua cota, gerando oscilações na curva de renovação. Durante períodos de maré de quadratura, o túnel deixa de verter água, fazendo com que a curva de renovação apresente comportamento mais estável, embora a renovação continue ocorrendo por outras fontes.

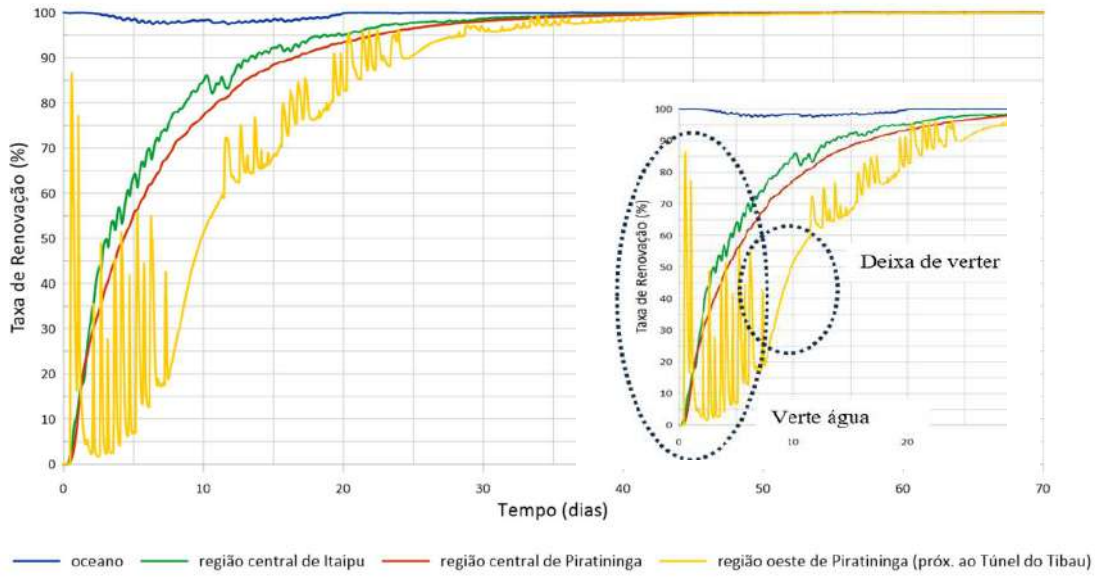

Figura 62- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, no cenário base do sistema lagunar.

A Figura 63 mostra os pontos de análise considerados pelo gráfico.

Figura 63- Pontos analisados para análise comparativa das taxas de renovação. Fonte: Google Earth.

5.3.2 Situação Projetada Considerando o Túnel do Tibau Fechado

Com a ausência do Túnel do Tibau, a renovação das águas na Laguna de Piratininga, especialmente na porção oeste, apresenta comprometimentos significativos desde os primeiros instantes de simulação, como é possível Figura 64. A falta dessa conexão direta com o oceano reduz drasticamente a troca de água nessa região, limitando a circulação hidrodinâmica e promovendo a estagnação.

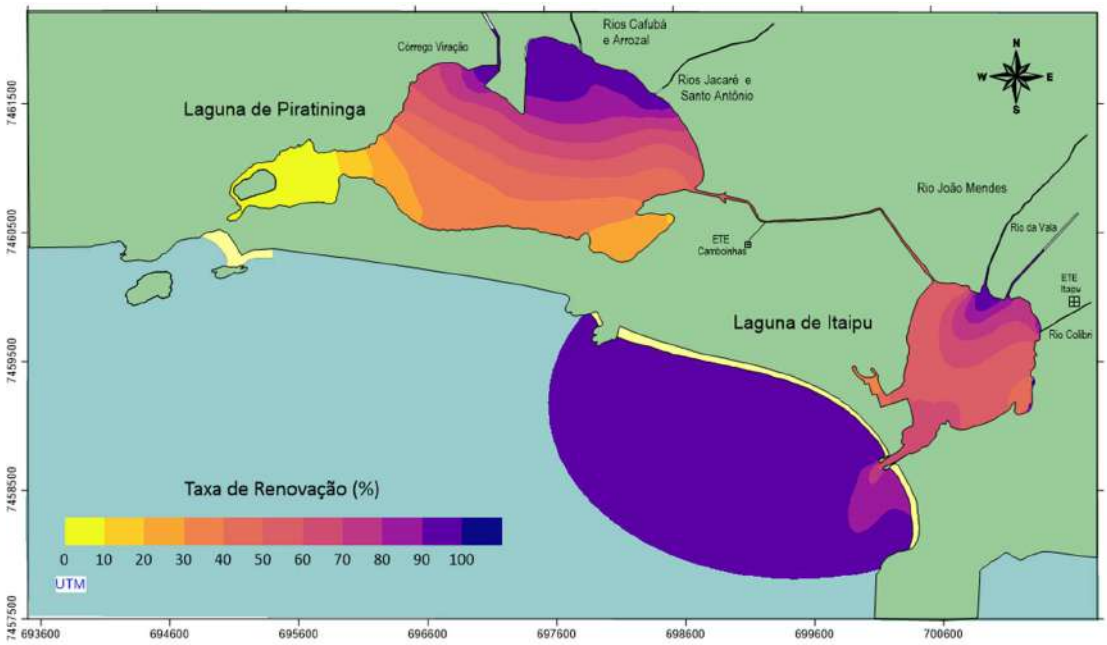

Figura 64- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

Na Figura 65, após 10 dias do início da simulação, a porção oeste de Piratininga seguiu apresentando dificuldade com a renovação, enquanto o restante da laguna foi se renovando gradativamente com águas novas que foram acrescentadas à laguna pelos aportes fluviais. A Laguna de Itaipu seguiu os mesmos padrões de renovação que foram vistos na simulação do cenário base do sistema lagunar.

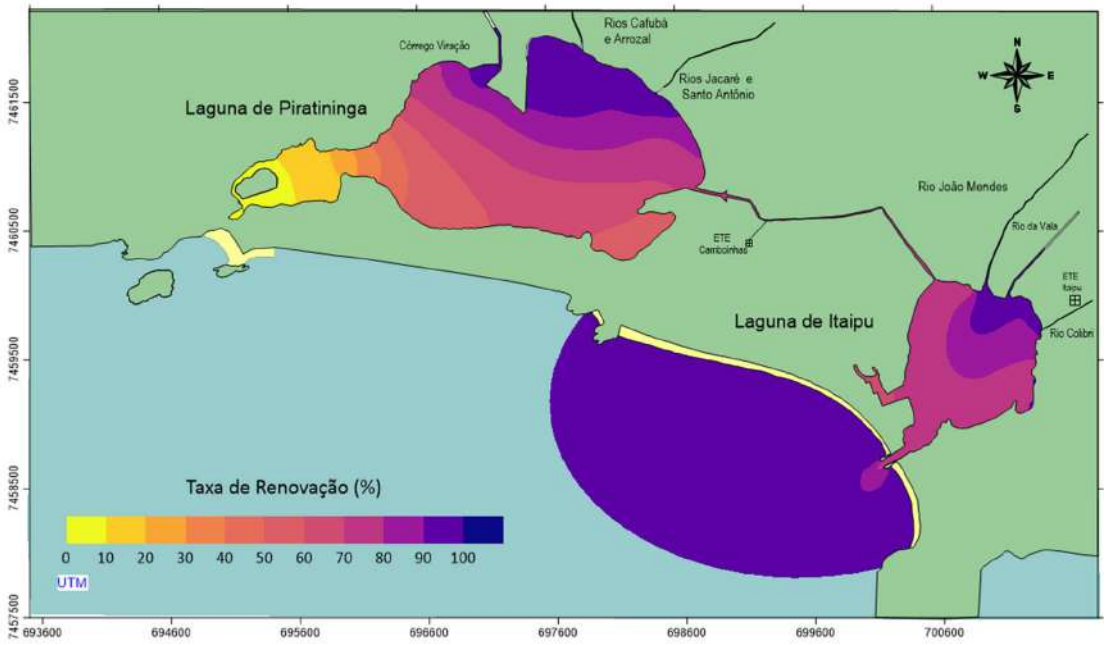

Figura 65- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

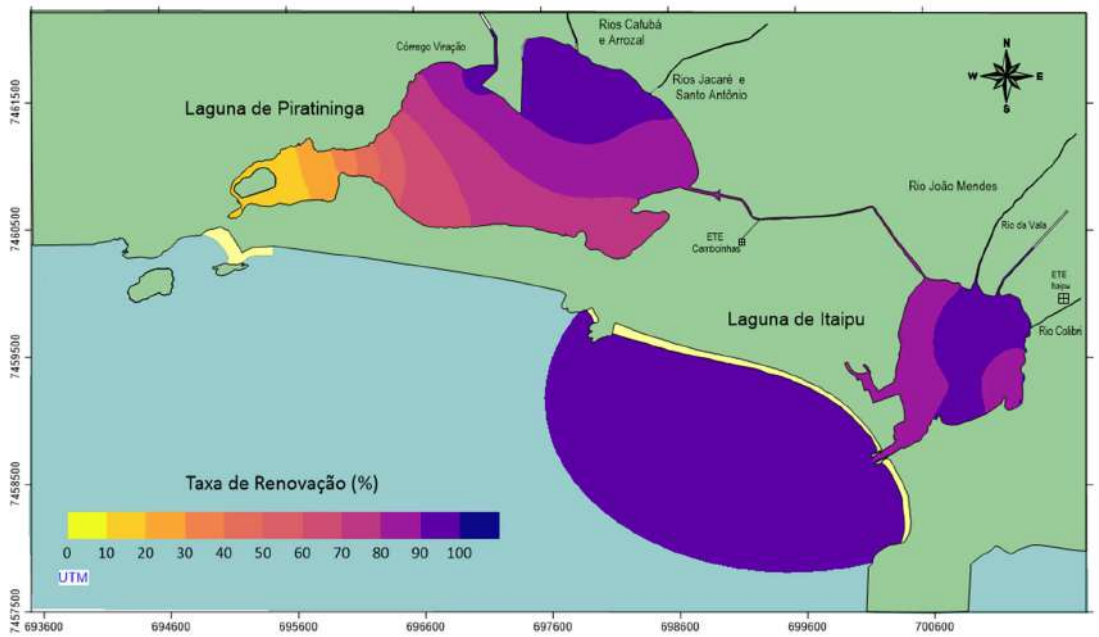

Figura 66- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

A Figura 66 mostra os resultados após 15 dias e a Figura 67 após 30 dias de simulação. A porção oeste da Laguna de Piratininga continuou a apresentar taxas de renovação visivelmente inferiores na ausência do Túnel do Tibau, esse comportamento ressalta a limitação na troca de água nessa região sem a contribuição do túnel,

contrastando com os resultados da simulação em que o Túnel do Tibau apresentava fluxo d'água por ele. O restante da Laguna de Piratininga e da Laguna de Itaipu não sofreram influência significativa com a ausência do túnel.

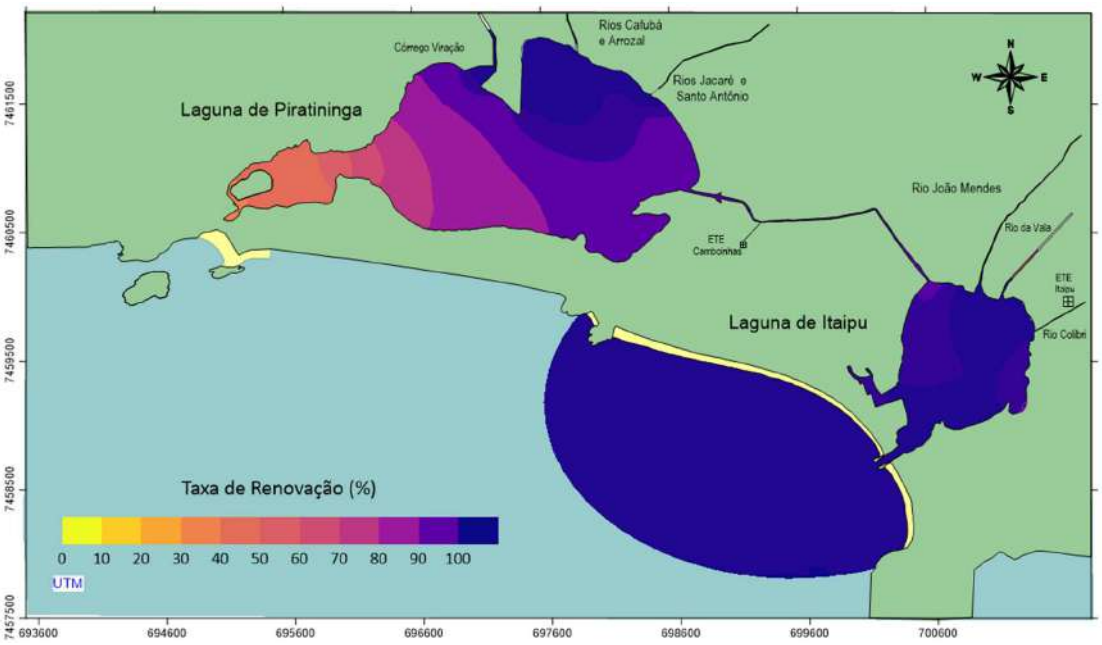

Figura 67- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

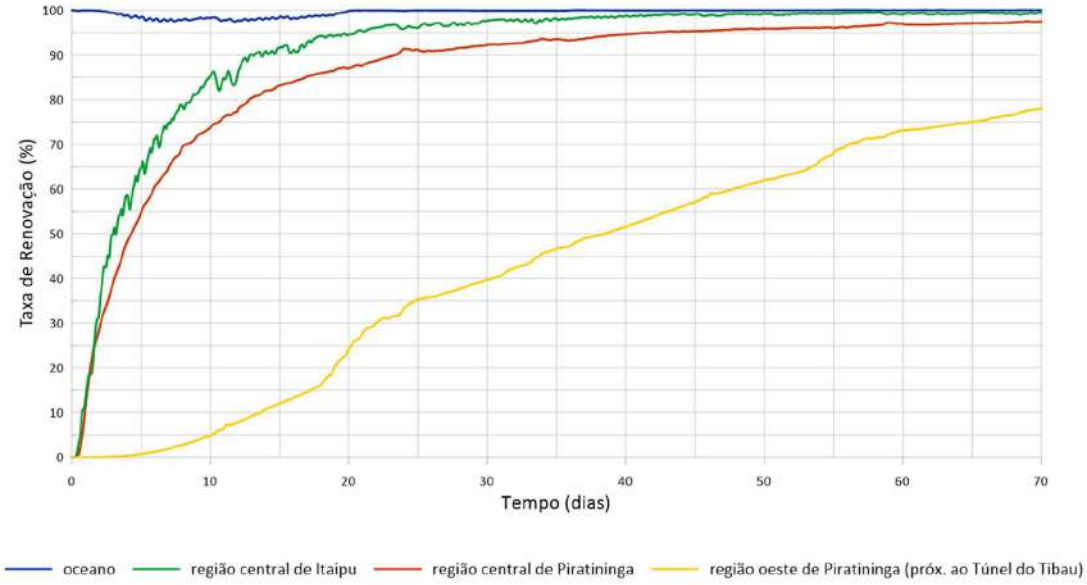

Figura 68- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

Nas séries temporais mostrada na Figura 68, é possível notar uma estabilização dos níveis de concentração ao final da simulação para a região central das lagunas. Os resultados obtidos para a Laguna de Itaipu se equipararam ao do oceano, enquanto Piratininga encontrou uma estabilização em 97,5 %, sinalizando que a ausência da estrutura comprometeu não só a porção oeste da laguna, como a região central também.

A região em que o túnel encontra a laguna apresentou um decréscimo de cerca de 20% na taxa de simulação ao final do período estudado, não encontrando o nível máximo obtido na simulação do cenário base.

5.3.3 Situação Projetada Considerando o Canal de Itaipu Dragado

Na simulação com o Canal de Itaipu dragado, não houve contribuição significativa para o aumento da renovação da Laguna de Piratininga devido às restrições de fluxo existentes no Canal de Camboatá. Por outro lado, a Laguna de Itaipu apresentou uma renovação mais rápida que o cenário base e o processo se propagou gradativamente iniciando na região próxima ao canal, seguindo em direção ao norte e nordeste. A região próxima ao Canal de Camboatá foi a última a ser renovada, evidenciando a influência das condições locais na dinâmica hidrodinâmica da laguna.

Da Figura 69 à Figura 72 é mostrado o processo gradativo da renovação obtido pela simulação.

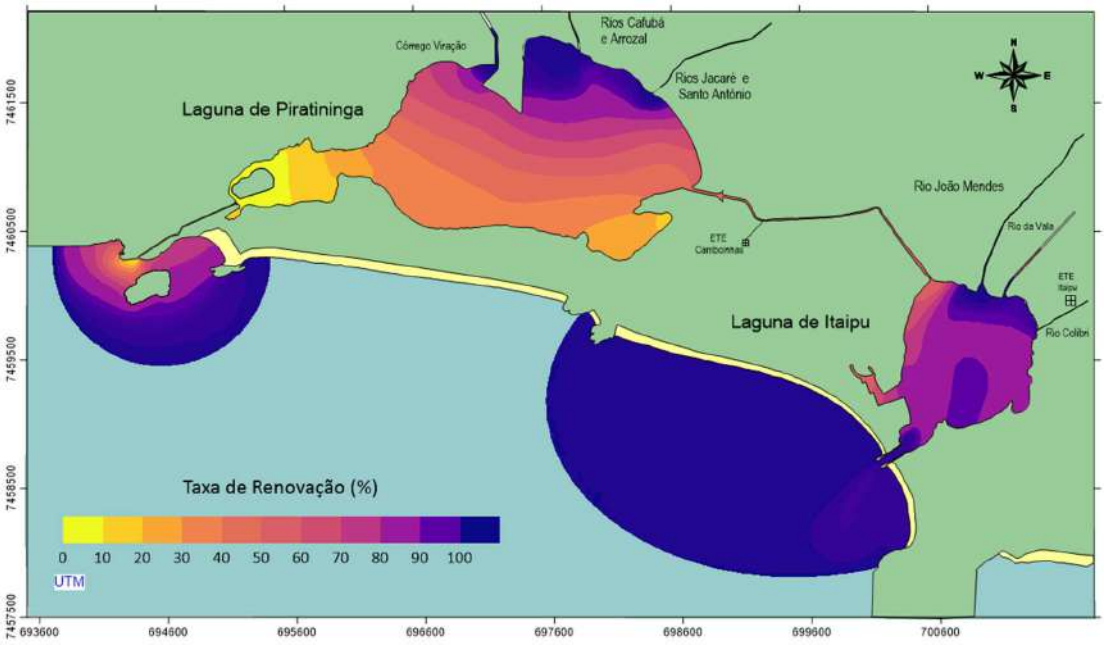

Figura 69- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

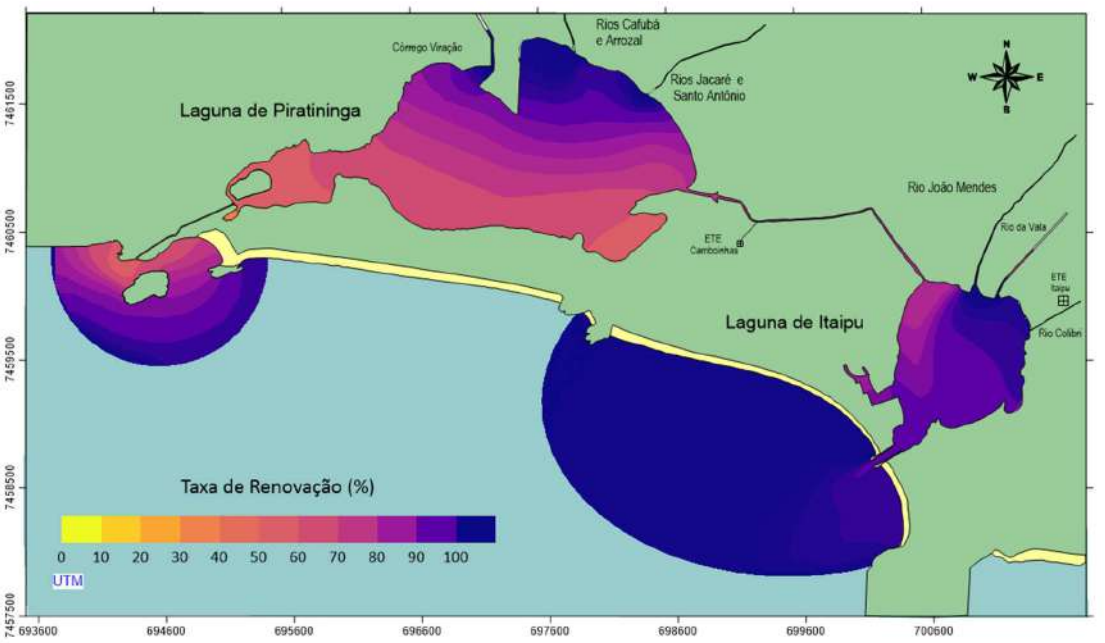

Figura 70- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

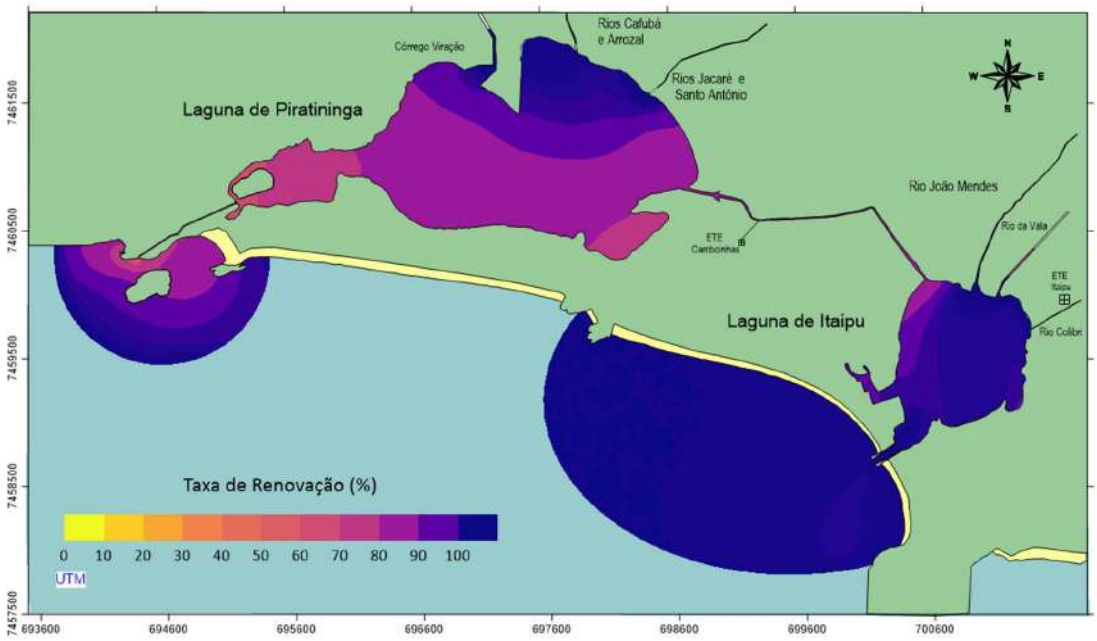

Figura 71- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

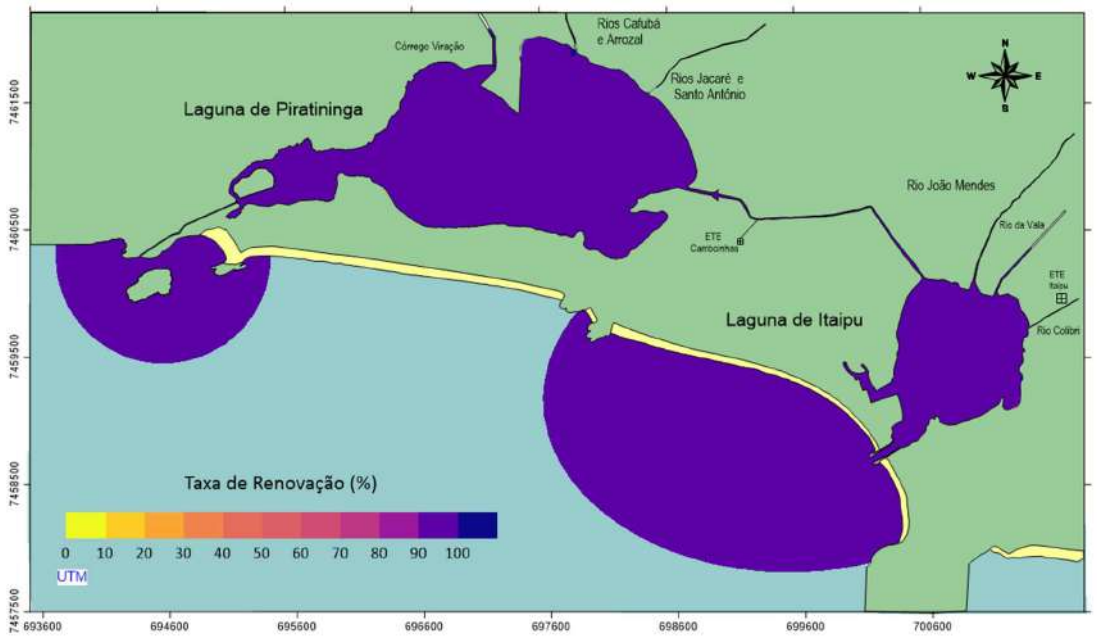

Figura 72- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

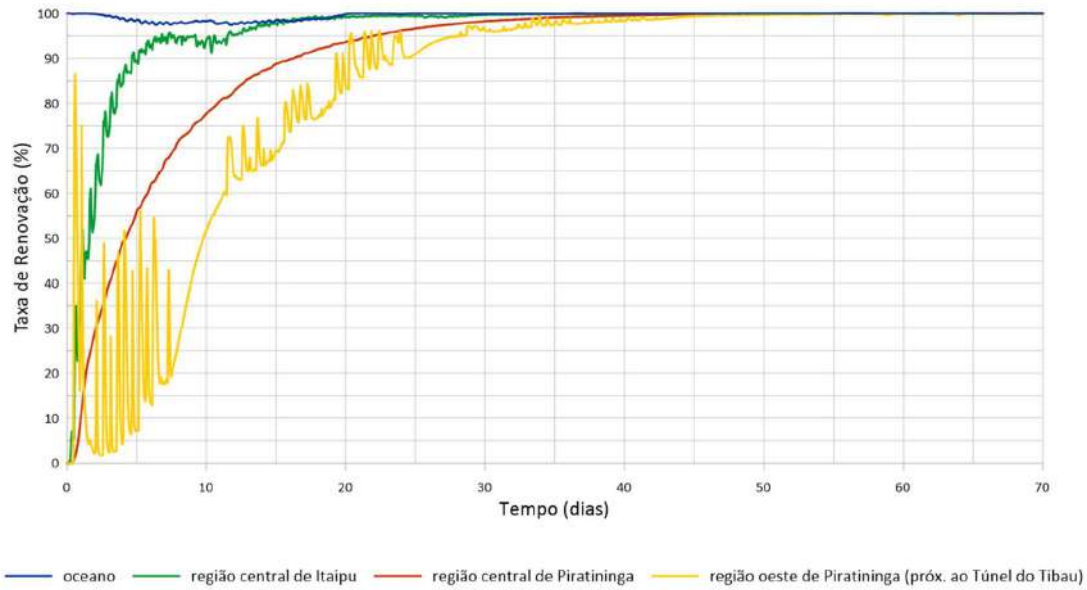

Figura 73- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

A análise das séries temporais (Figura 73) revela que a Laguna de Itaipu apresentou uma renovação 43% mais rápida em comparação ao cenário base do sistema lagunar. Em contrapartida, a Laguna de Piratininga manteve taxas de renovação semelhantes às observadas no cenário base. Esse resultado destaca, mais uma vez, as limitações impostas pelos problemas no Canal de Camboatá, que comprometem a eficiência da troca de água entre as lagunas.

5.3.4 Situação Projetada Considerando o Canal de Camboatá Dragado

Com a dragagem deste canal, a troca de massas d'água entre as lagunas foi restabelecida, permitindo que a Laguna de Itaipu desempenhasse um auxílio nos primeiros momentos na renovação das águas da Laguna de Piratininga. Essa melhoria inicial foi igualada à simulação do cenário base depois de 12 dias. Já Itaipu apresentou uma queda do valor médio da capacidade de renovação nos primeiros 35 dias da simulação.

Da Figura 74 à Figura 77 é mostrado o processo gradativo da renovação de todo sistema.

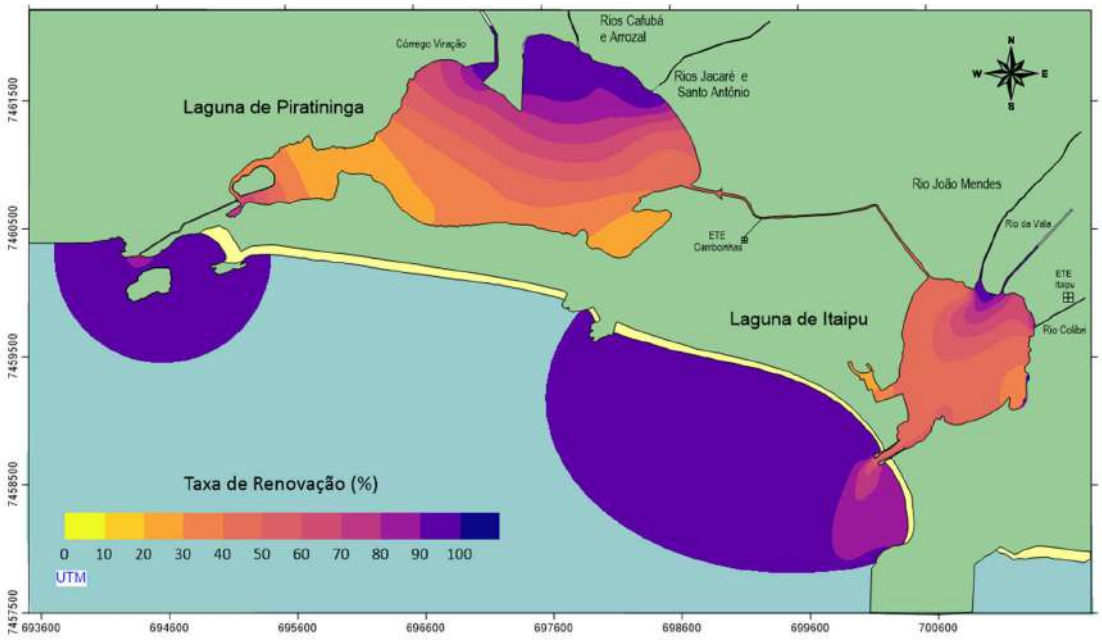

Figura 74- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

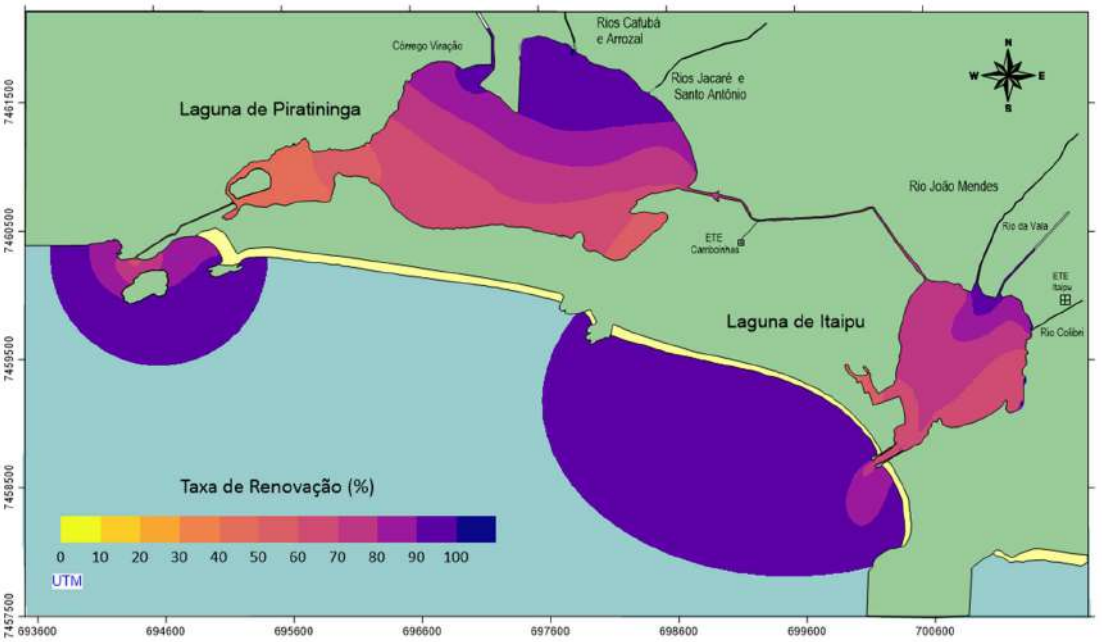

Figura 75- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

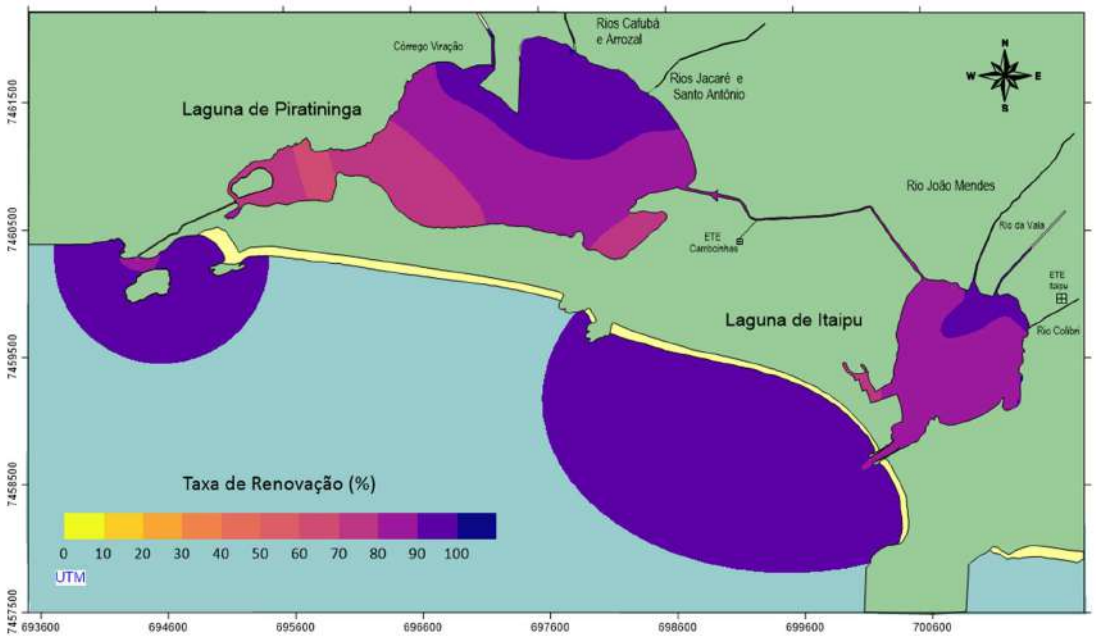

Figura 76- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

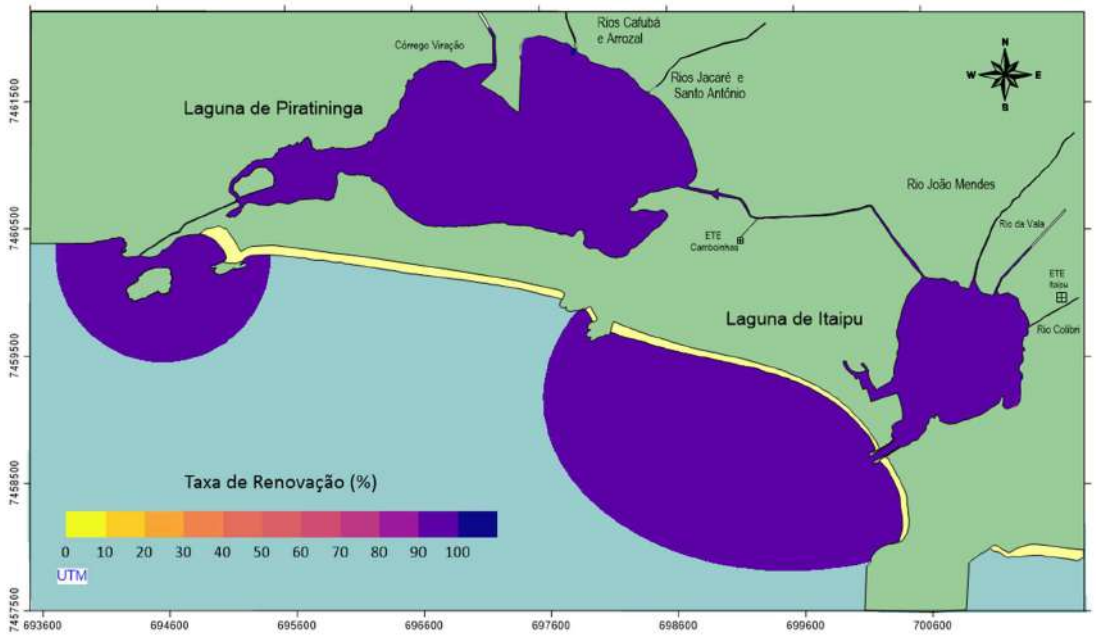

Figura 77- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

As séries temporais apresentada na Figura 78 evidencia taxas de renovação menos elevadas na região central da Laguna de Itaipu durante a metade inicial da simulação, resultado da contribuição ativa desta laguna para o processo de renovação de Piratininga.

Em Itaipu as taxas de renovação apresentaram uma redução média de 5% nos primeiros 35 dias em comparação ao cenário base, mas, posteriormente, retomaram valores semelhantes aos observados anteriormente, demonstrando uma estabilidade no padrão de renovação ao longo do tempo. A porção oeste de Piratininga foi beneficiada nos primeiros 30 dias de simulação, já a região central da laguna não apresentou variação significativa se comparada aos resultados obtidos no cenário base do sistema lagunar.

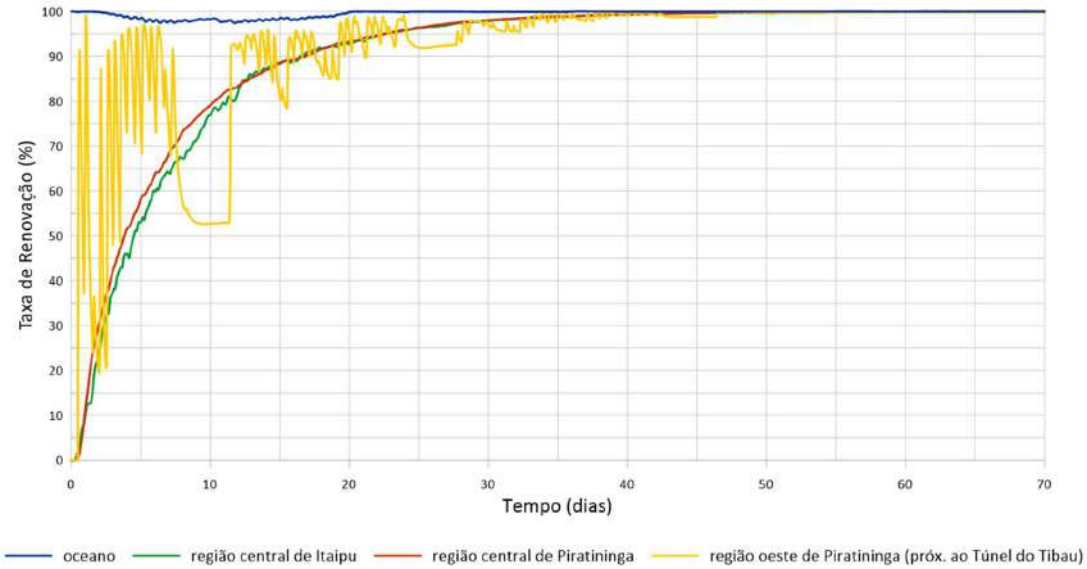

Figura 78- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

5.3.5 Situação Projetada Considerando todos os Canais Otimizados

Com os canais de ligação e o túnel livres de problemas de assoreamento ou obstrução, o sistema lagunar como um todo apresentou um aumento no poder de renovação das suas massas de água. A ausência das restrições hidráulicas citadas anteriormente nos canais permitiu uma maior eficiência na troca de água entre as lagunas e com o oceano, promovendo uma circulação hidrodinâmica mais uniforme e integrada. Isso resultou em uma renovação mais rápida e abrangente. Da Figura 80 à Figura 82, a renovação gradativa e otimizada do sistema lagunar pode ser observada.

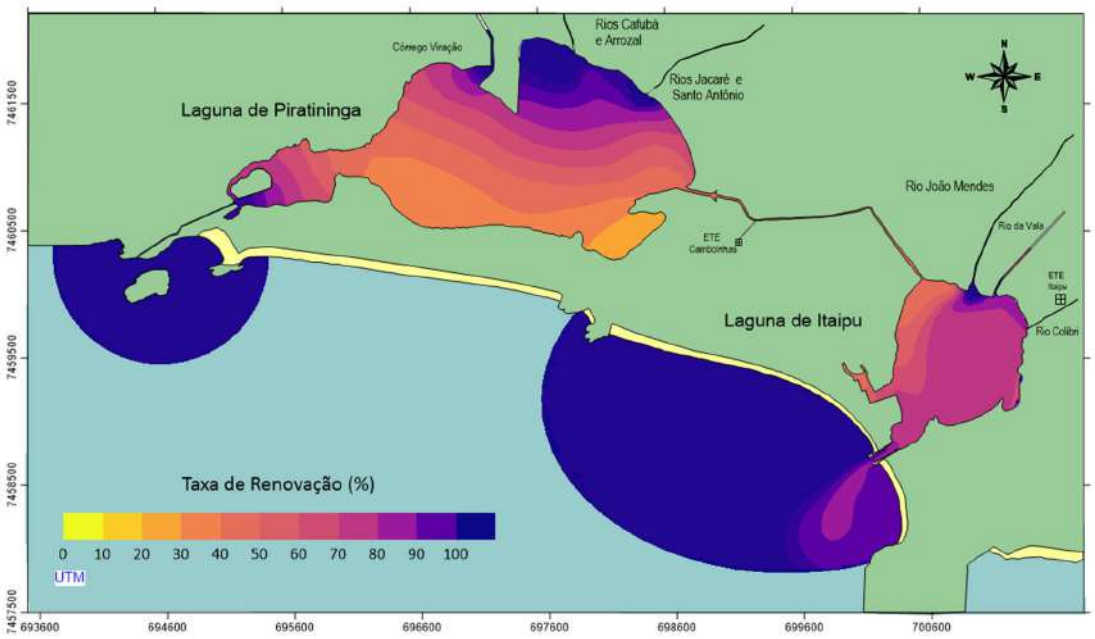

Figura 79- Taxas de renovação após 5 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.

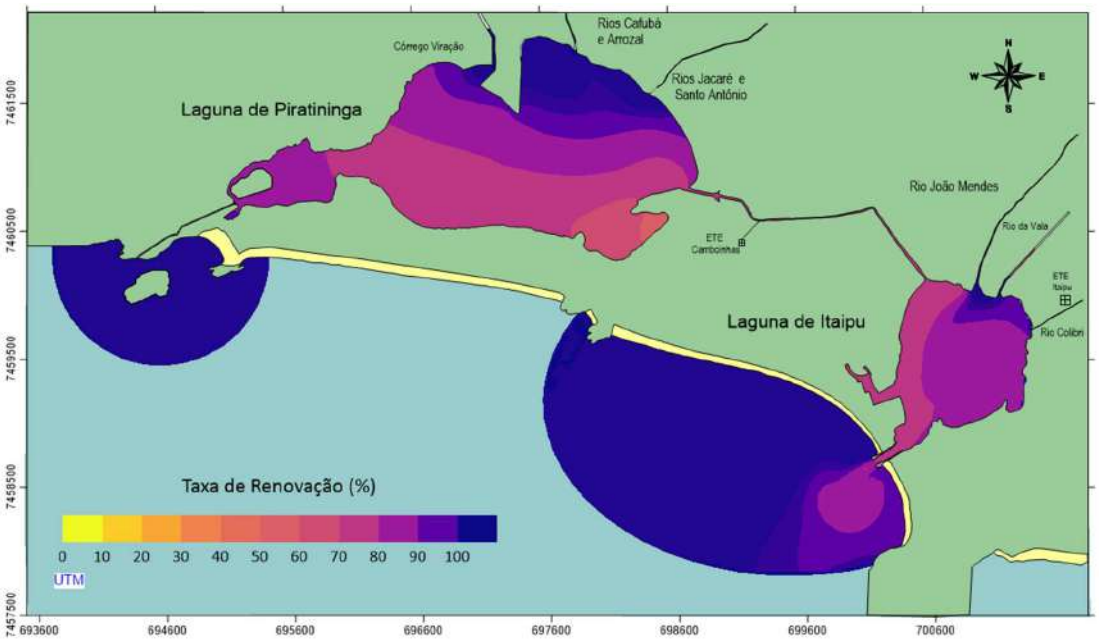

Figura 80- Taxas de renovação após 10 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.

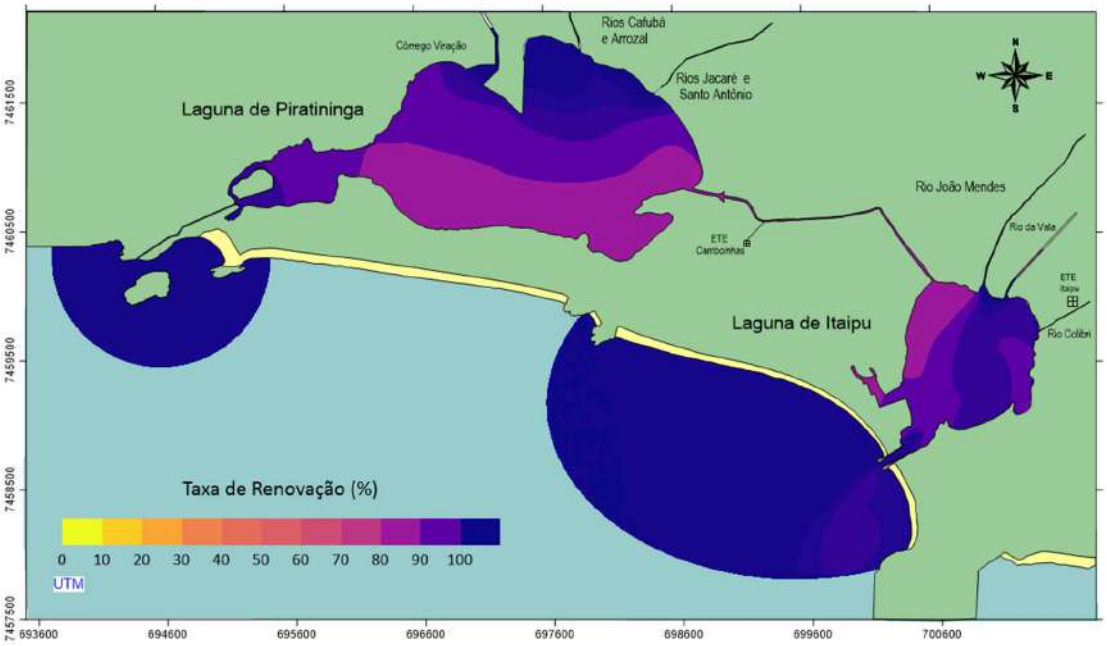

Figura 81- Taxas de renovação após 15 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.

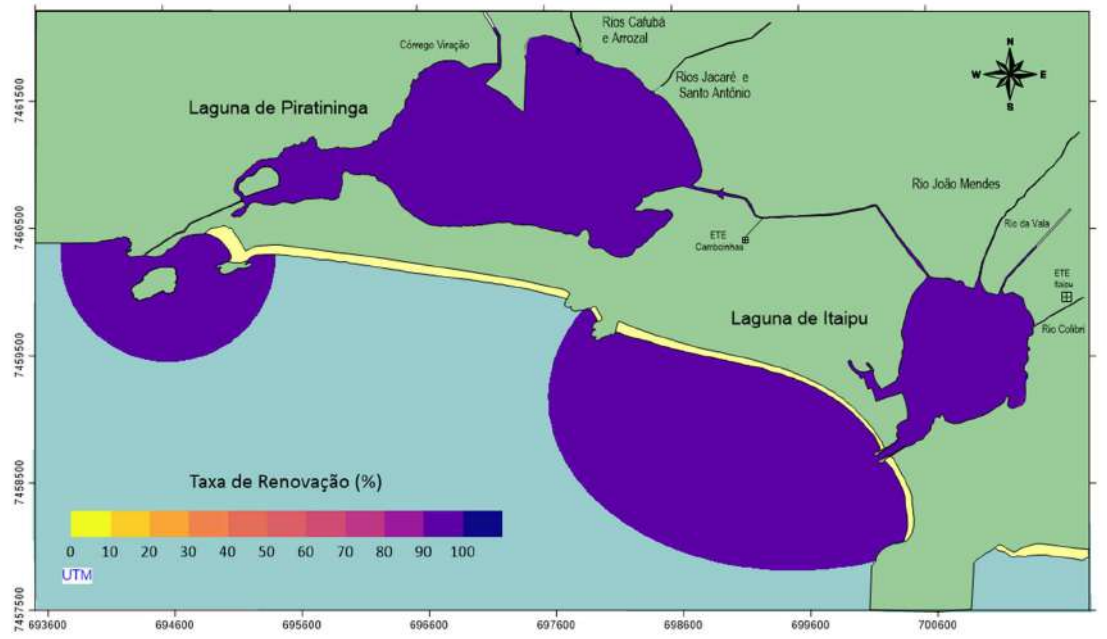

Figura 82- Taxas de renovação após 30 dias de simulação para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.

.

As séries temporais apresentada na Figura 83 revelou ganhos significativos nas taxas de renovação em Itaipu e na porção oeste da Laguna de Piratininga, anteriormente identificada como o ponto crítico do sistema, quando comparados ao cenário base.

Embora o aumento nas taxas de renovação de Piratininga tenha sido modesto, com apenas 3,5% nos primeiros 15 dias, a renovação completa das lagunas foi alcançada 5 dias mais rapidamente em relação à simulação do cenário base, indicando uma melhora geral no desempenho do sistema.

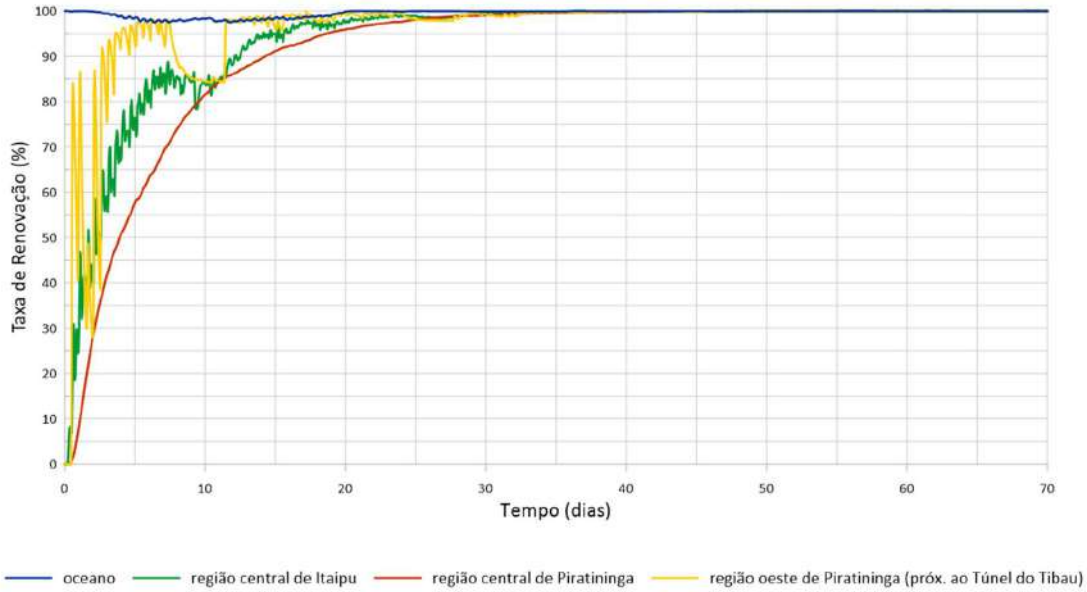

Figura 83- Séries temporais de taxa de renovação de água no oceano, no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando todos os canais otimizados.

5.4 Idade da Água

Como já citado no item 4.2.2, a análise da idade da água nos permite definir o tempo médio que a água permanece na região de interesse do estudo ao longo do tempo.

Inicialmente, a condição inicial adotada foi de que todo o sistema lagunar e a porção marítima adjacente admitiu uma concentração equivalente à C=1 e, durante o tempo de simulação, as novas águas entram no domínio pelos limites de fronteira aberta ou dos afluentes. Desta forma, águas com maior dinâmica de renovação ficam menos velhas, enquanto águas que renovam a taxas inferiores, envelhecem com o avanço do tempo de simulação.

A Figura 84 traz o sistema lagunar no instante inicial da simulação.

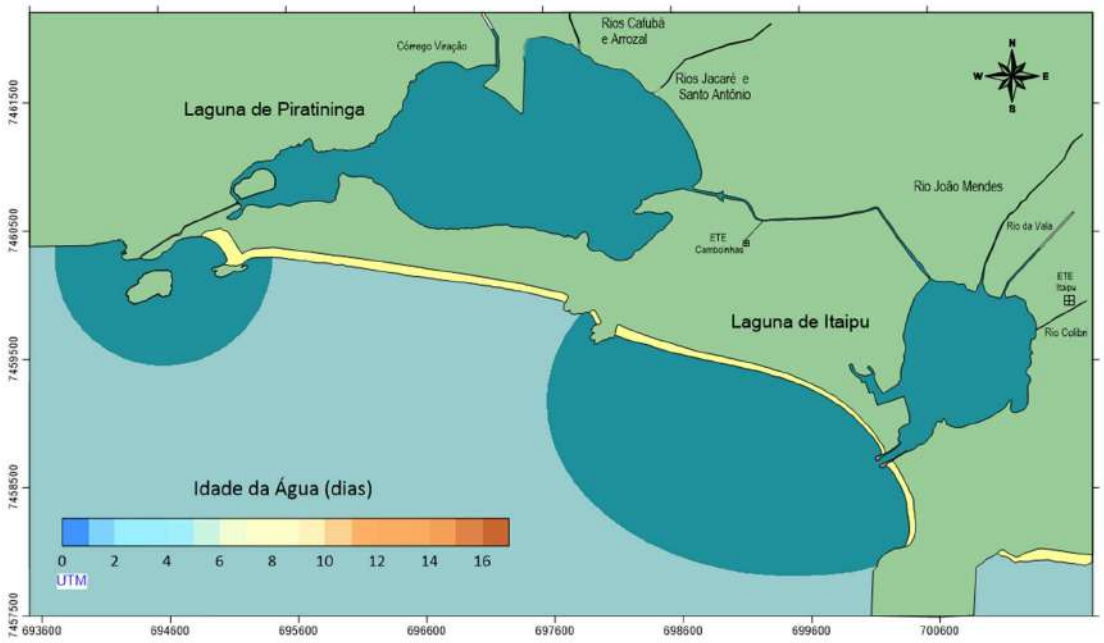

Figura 84- Idade da água nos momentos iniciais da simulação.

O objetivo dessas simulações foi identificar as regiões do sistema lagunar com maior tendência à estagnação das águas, permitindo uma análise mais detalhada e fundamentada sobre as áreas tidas como críticas. Essa abordagem possibilitou mapear os locais com circulação limitada, subsidiando a identificação de pontos críticos que necessitam de maior atenção para a melhoria da dinâmica hidrodinâmica do sistema.

5.4.1 Cenário Base do Sistema Lagunar

Na simulação que representa o cenário base do sistema lagunar, observou-se que as águas com maior idade se concentram na região oeste da Laguna de Piratininga, enquanto as áreas com águas de menor idade estão localizadas próximas aos afluentes e à porção marítima adjacente. Esse resultado reforça a ideia de que o ponto crítico do sistema é a área de junção entre o túnel e Piratininga, evidenciando que, no caso dessa laguna, as águas tidas como novas chegam pela contribuição dos seus afluentes, com limitada influência de trocas diretas com o oceano, mesmo considerando o túnel desobstruído.

A análise referente ao período simulado está apresentada desde a Figura 85 até a Figura 87, detalhando os resultados obtidos ao longo do intervalo estudado.

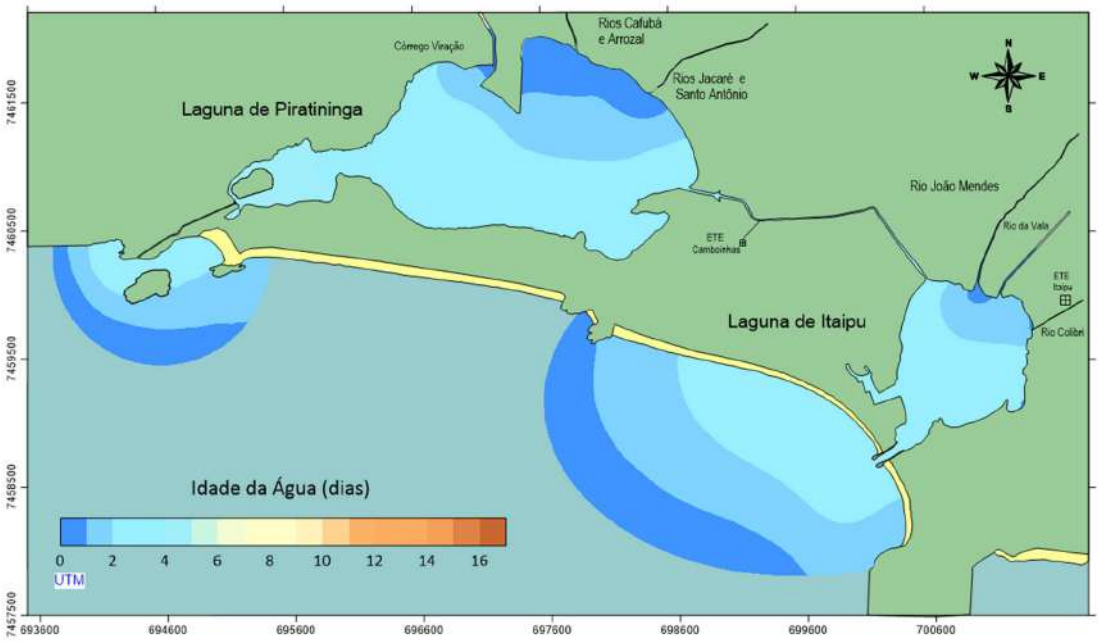

Figura 85- Idade da água após 5 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar.

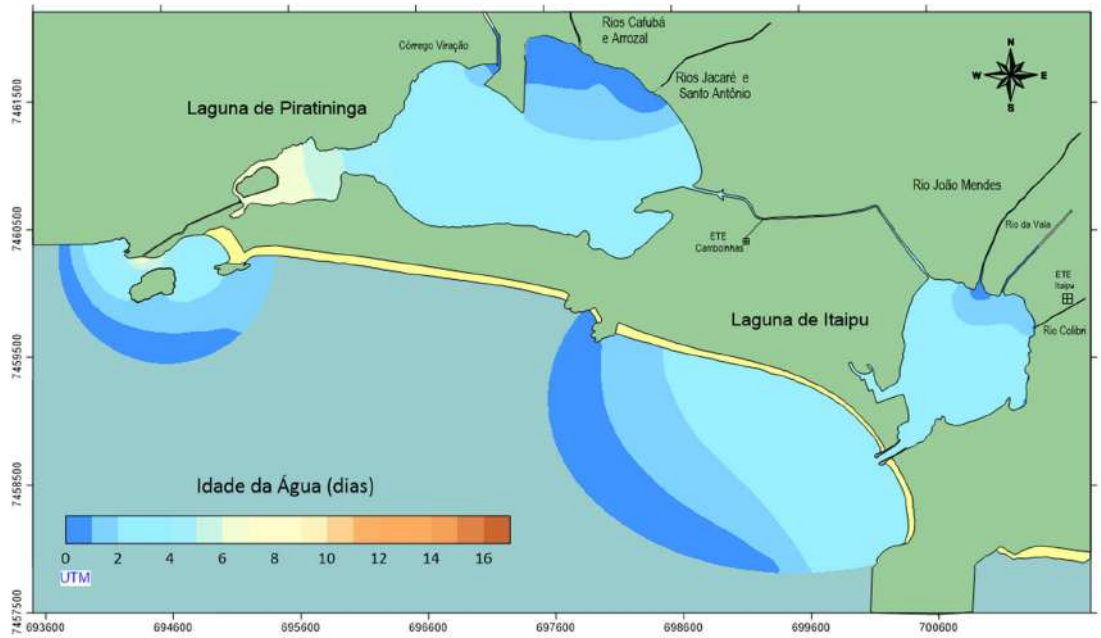

Figura 86- Idade da água após 15 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar.

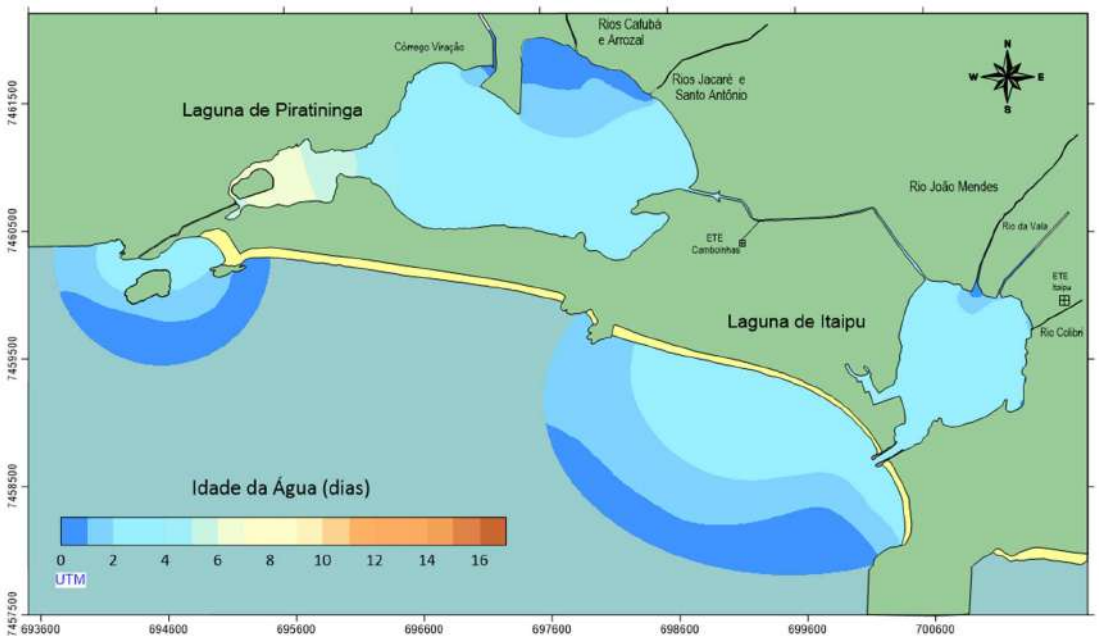

Figura 87- Idade da água após 35 dias simulados para o cenário base do sistema lagunar.

As séries temporais da Figura 88 mostram, ao longo dos 70 dias simulados, valores similares nas regiões centrais das lagunas. Apesar disso, este comportamento apresenta características distintas pois enquanto a Laguna de Piratininga mostrou uma predominância na recepção de águas novas provenientes de seus afluentes, a Laguna de Itaipu foi majoritariamente influenciada pela troca de água com o mar adjacente. Os pontos analisados são os mesmos já apresentados na Figura 63.

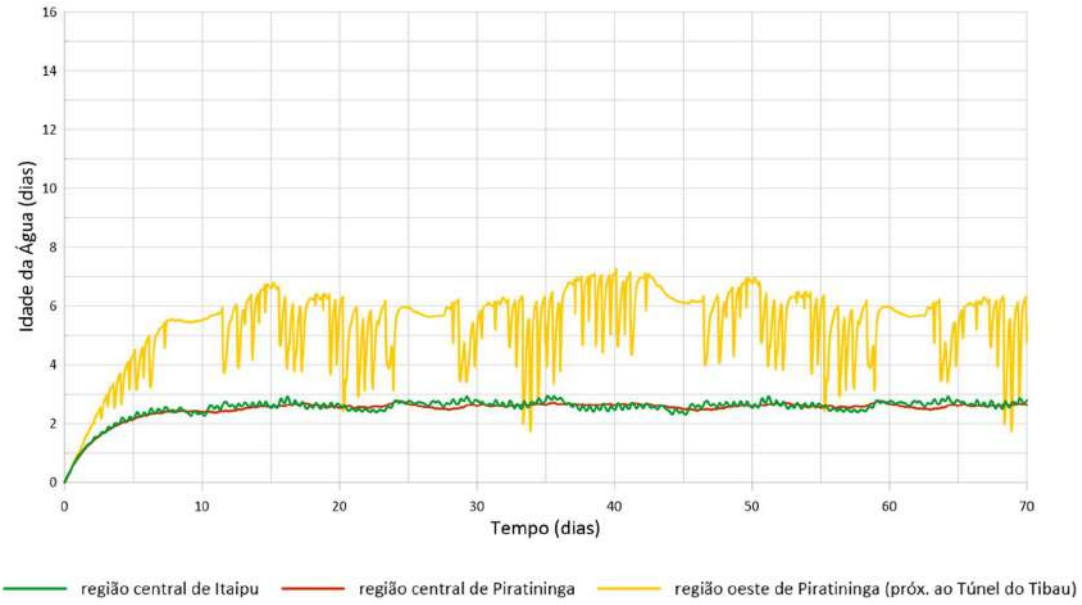

Figura 88- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, no cenário base do sistema lagunar.

5.4.2 Situação Projetada Considerando o Túnel do Tibau Fechado

Quando o sistema lagunar foi simulado sem a presença do Túnel do Tibau, os resultados indicaram que a idade da água na porção oeste da Laguna de Piratininga dobrou, evidenciando uma tendência significativa à estagnação. Além disso, a região central da laguna apresentou maior dificuldade em receber águas novas, intensificando o problema. Em contrapartida, na Laguna de Itaipu, não foram observados efeitos relevantes, indicando que a ausência do túnel impacta de forma mais expressiva a dinâmica hidrodinâmica de Piratininga.

A análise referente a este comportamento está apresentada desde a Figura 89 até a Figura 91, detalhando os resultados obtidos ao longo da simulação.

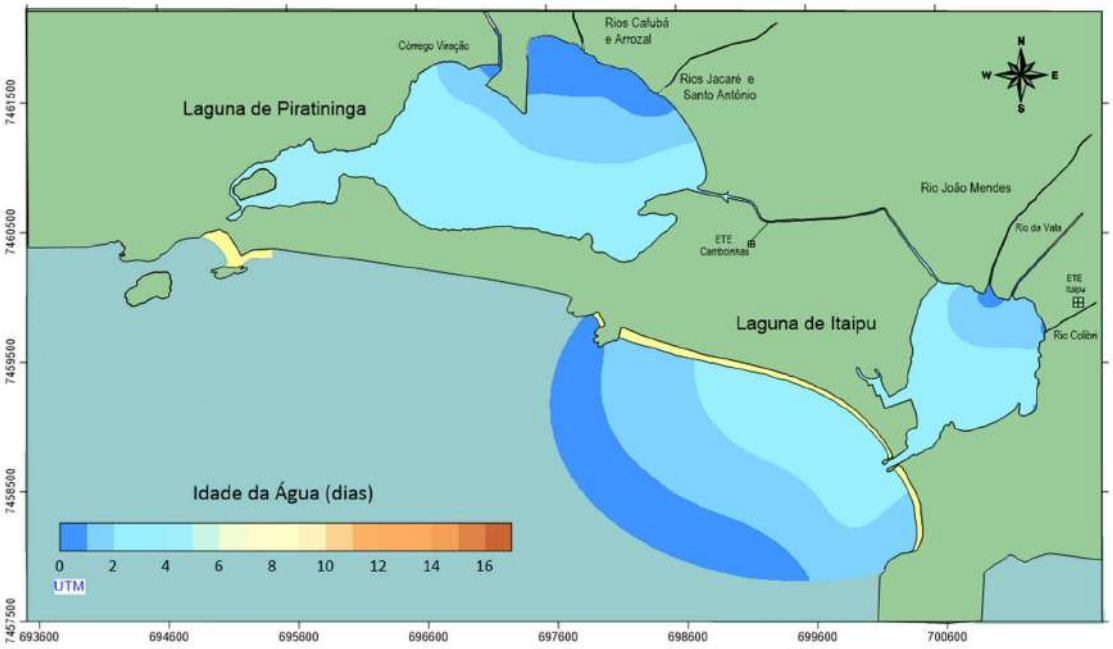

Figura 89- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

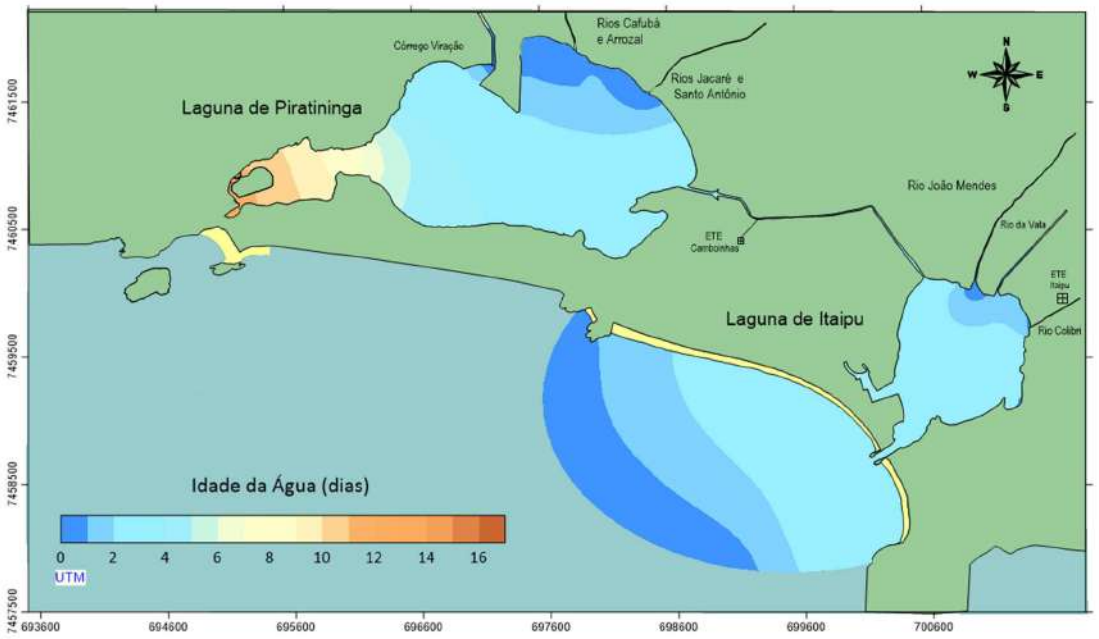

Figura 90- Idade da água após 15 dias simulados para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

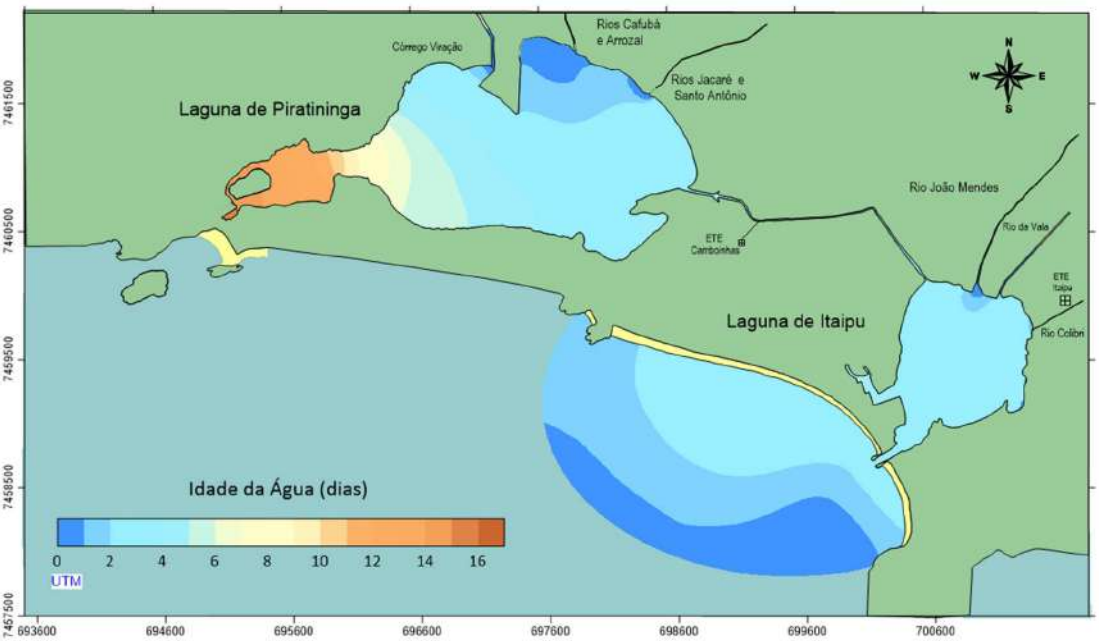

Figura 91- Idade da água após 35 dias simulados para a situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

Já as séries temporais da Figura 92 revelam que a ausência do Túnel do Tibau resultou em um aumento quase 400% na idade da água na região oeste de Piratininga, quando comparada à região central, durante o mesmo período. Para a simulação do cenário base, essa diferença era de aproximadamente 100%, destacando que, mesmo

quando desobstruído, o túnel atua apenas para atenuar a tendência de estagnação na área crítica, sem eliminá-la completamente.

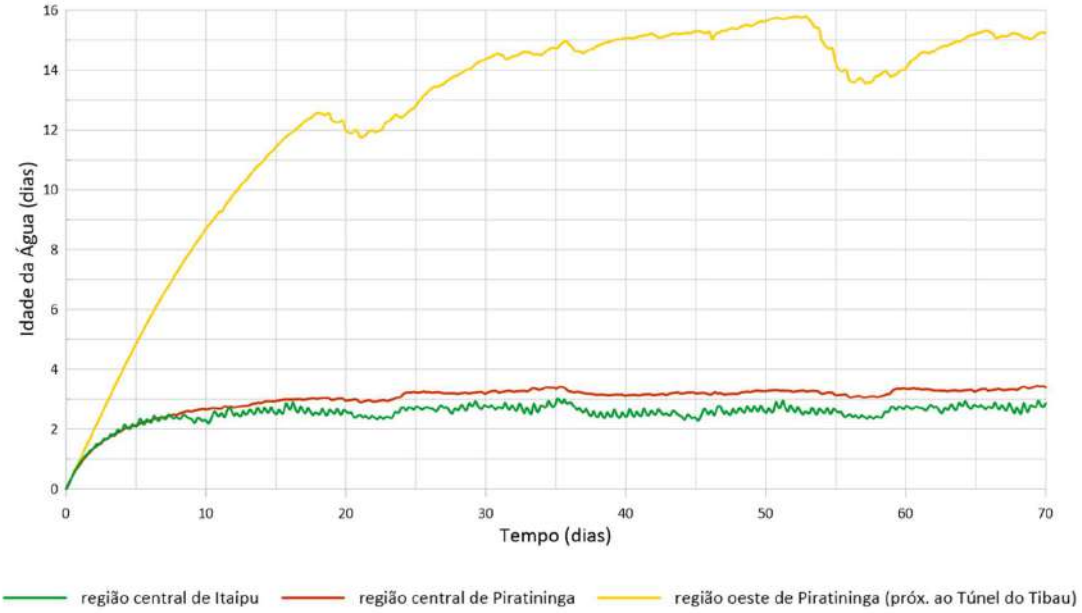

Figura 92- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Túnel do Tibau fechado.

5.4.3 Situação Projetada Considerando o Canal de Itaipu Dragado

Na análise realizada com o Canal de Itaipu dragado, os resultados indicaram que essa intervenção não trouxe alterações significativas no comportamento hidrodinâmico da Laguna de Piratininga, conforme era esperado. Por outro lado, a Laguna de Itaipu apresentou uma maior eficiência na circulação hidrodinâmica, evidenciando os benefícios locais proporcionados pela dragagem, com índices menores para toda a laguna durante o período simulado. Tais evidências são vistas desde a Figura 93 até a Figura 95.

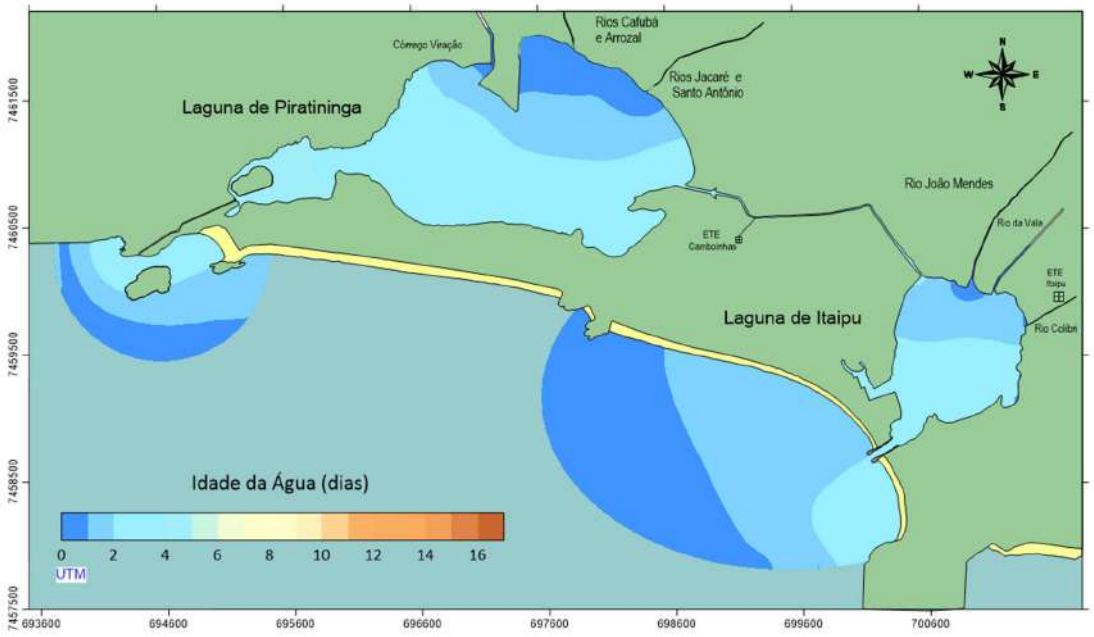

Figura 93- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

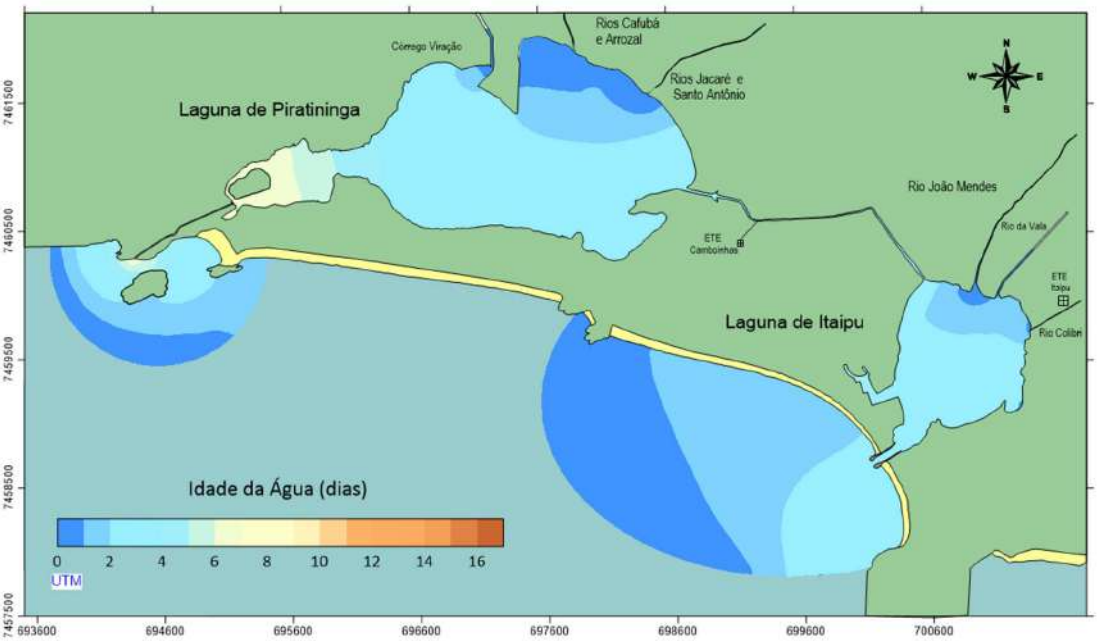

Figura 94- Idade da água após 15 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

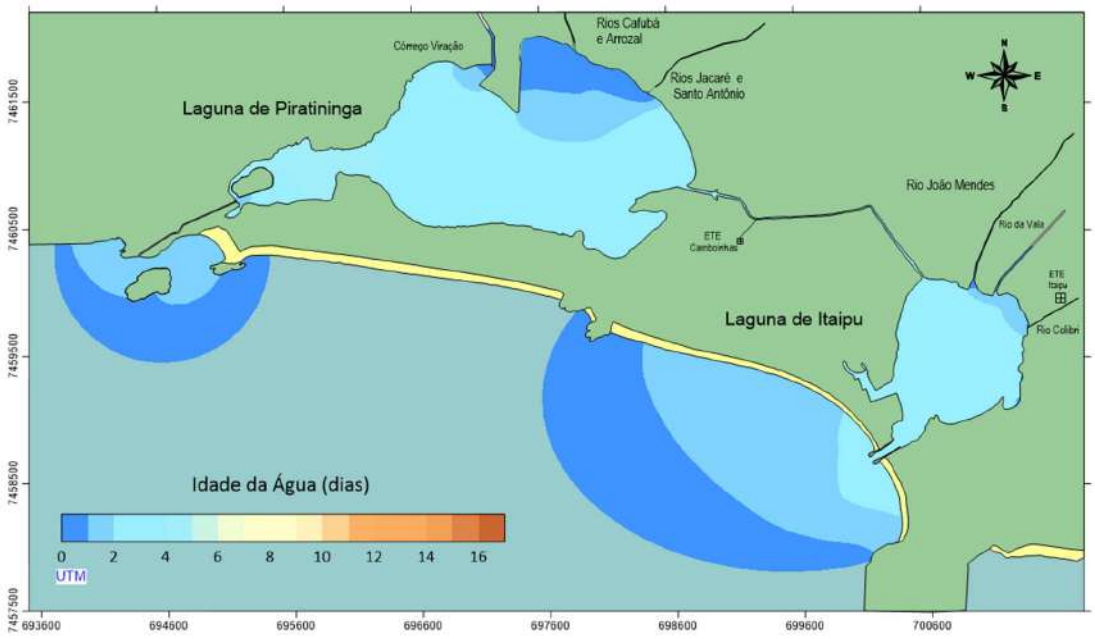

Figura 95- Idade da água após 35 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

As séries temporais da Figura 96 mostram que as águas tidas como novas da Laguna de Itaipu acompanharam subidas e descidas da maré, já que a dragagem do canal proporcionou um aumento na comunicação com o mar. Para a região oeste e central de Piratininga, os índices obtidos foram similares à da simulação do cenário base do sistema lagunar.

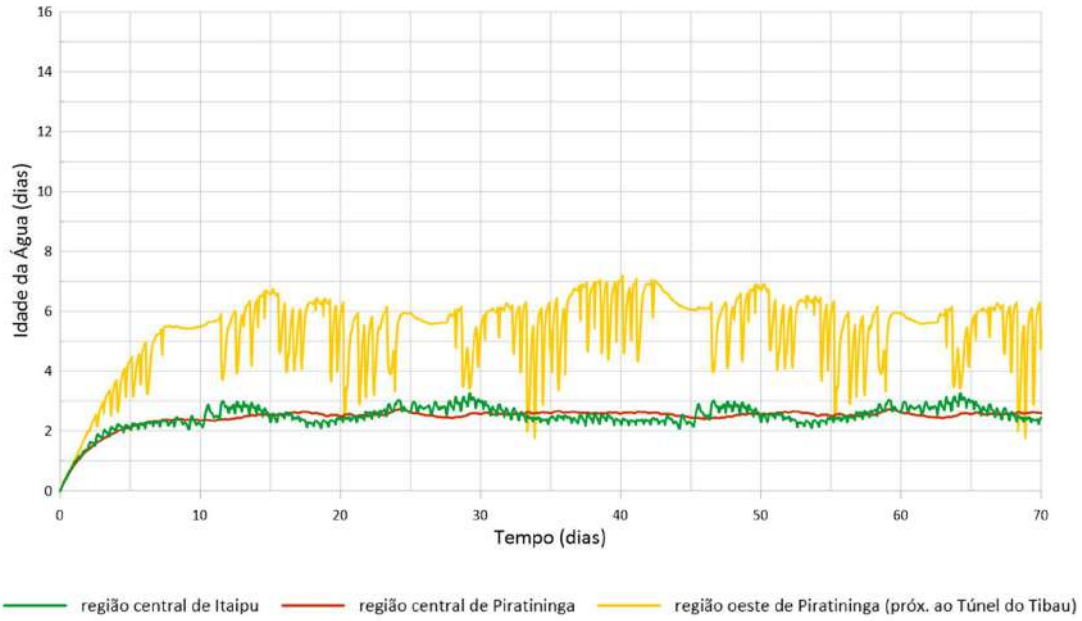

Figura 96- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Itaipu dragado.

5.4.4 Situação Projetada Considerando o Canal de Camboatá Dragado

Com a troca de massas d'água entre as lagunas acontecendo através do canal que conecta as duas lagunas, a Laguna de Itaipu auxiliou a movimentação de massas d'água até Piratininga, e esta conectividade hidrodinâmica aumentou levemente o tempo de residência para Itaipu se comparada a simulação atual do sistema.

A movimentação com o decorrer do tempo é mostrada na Figura 97, Figura 98 e Figura 99.

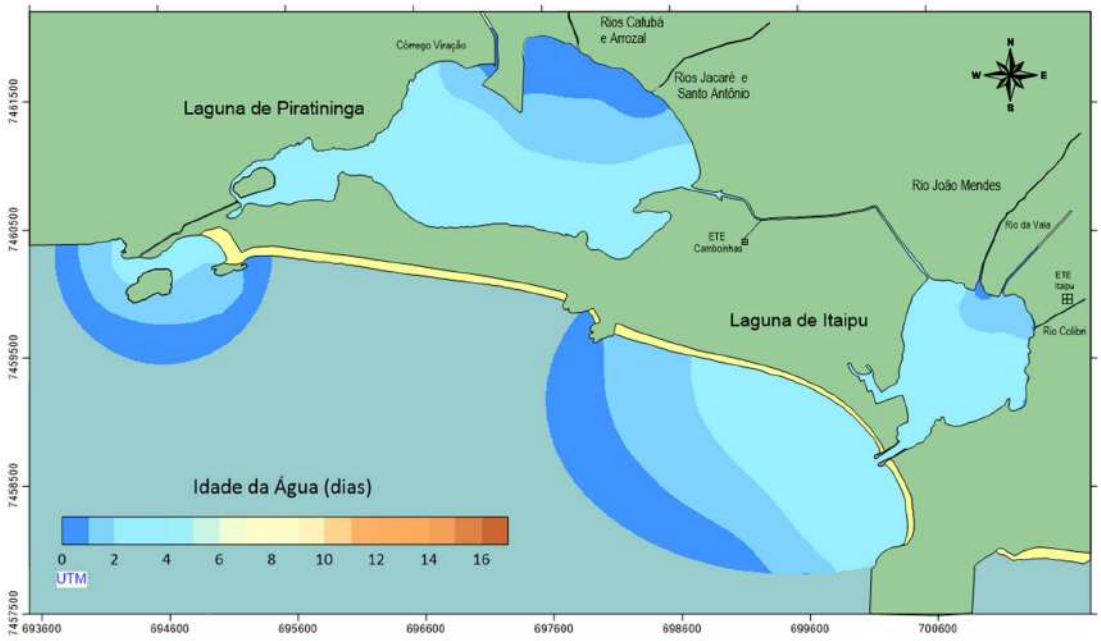

Figura 97- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

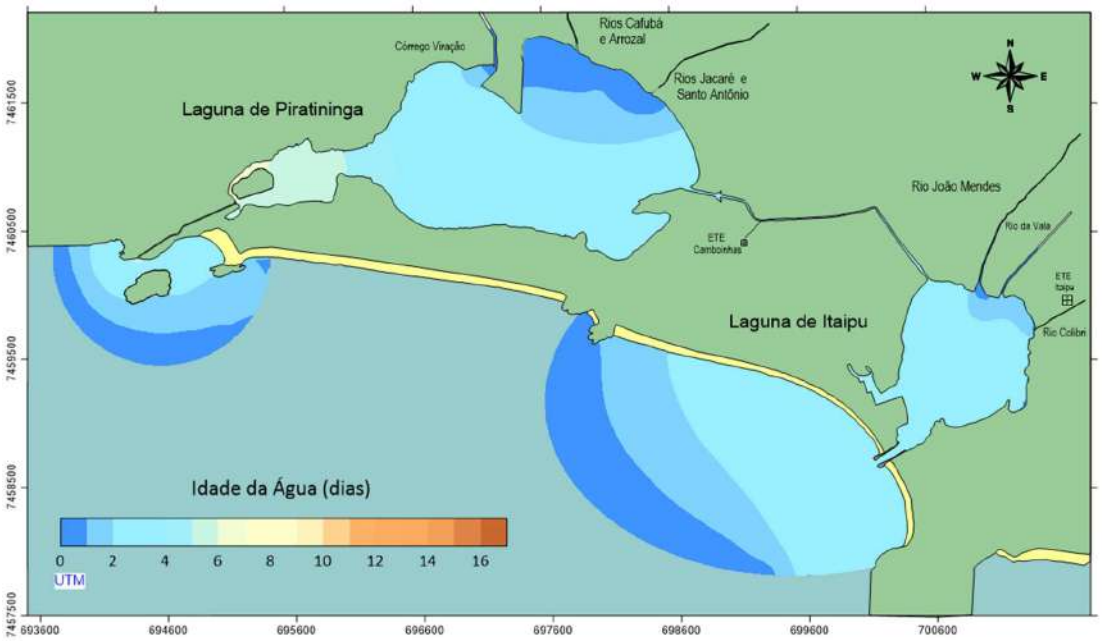

Figura 98- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

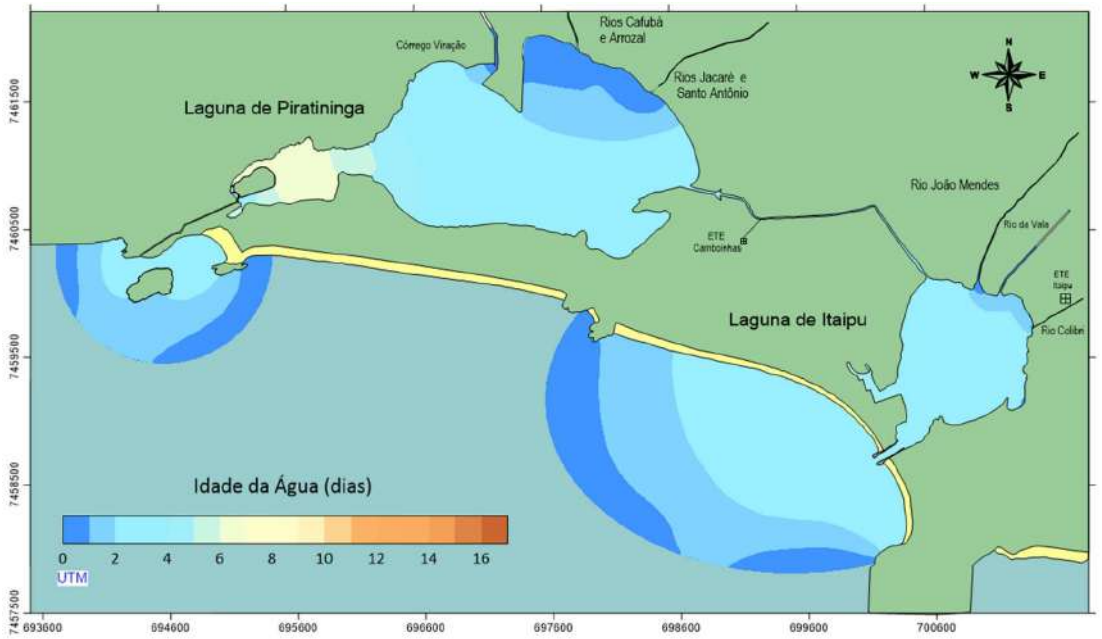

Figura 99- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

As séries temporais da Figura 100 mostram que, ao final dos 70 dias simulados, apesar da modificação hidrodinâmica evidente no sistema, os resultados para idade da água obtidos foram similares as do cenário base.

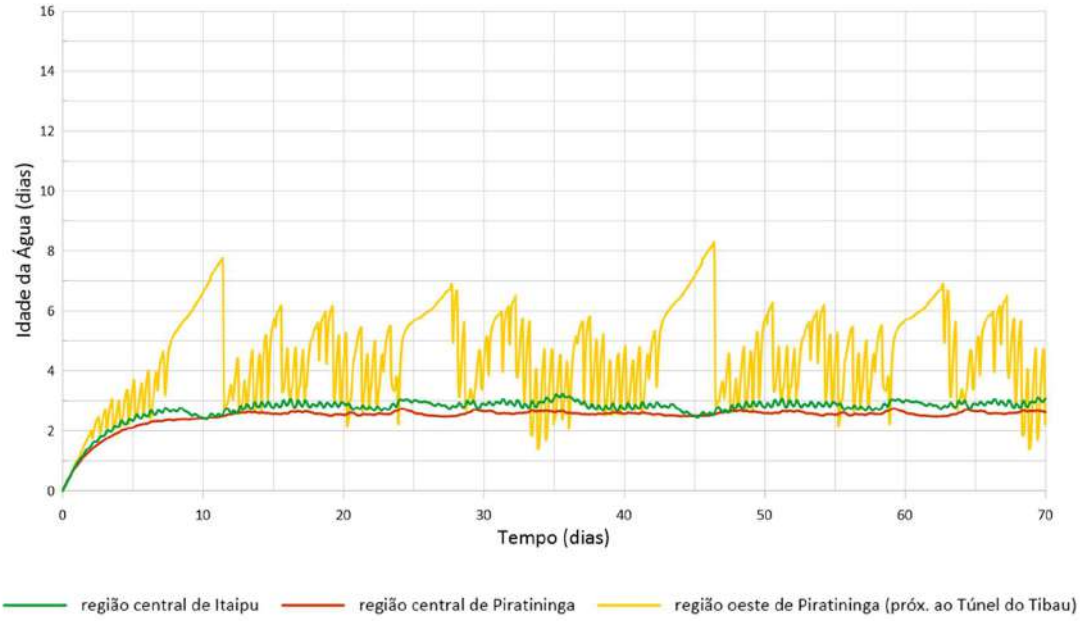

Figura 100- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando o Canal de Camboatá dragado.

5.4.5 Situação Projetada Considerando todos os Canais Otimizados

Com as trocas de massas d'água ocorrendo de forma unificada e integrada pelo sistema, houve uma contribuição para a melhoria da qualidade da água do sistema como um todo. Os primeiros 5, 15 e 35 dias são mostrados da Figura 101 à Figura 103.

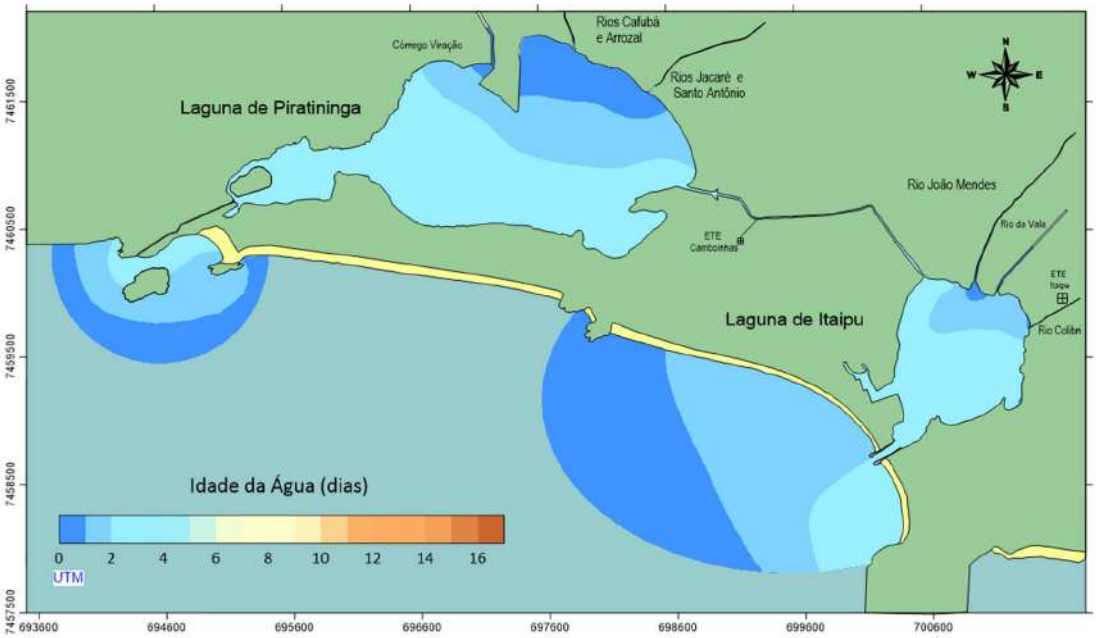

Figura 101- Idade da água após 5 dias simulados para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.

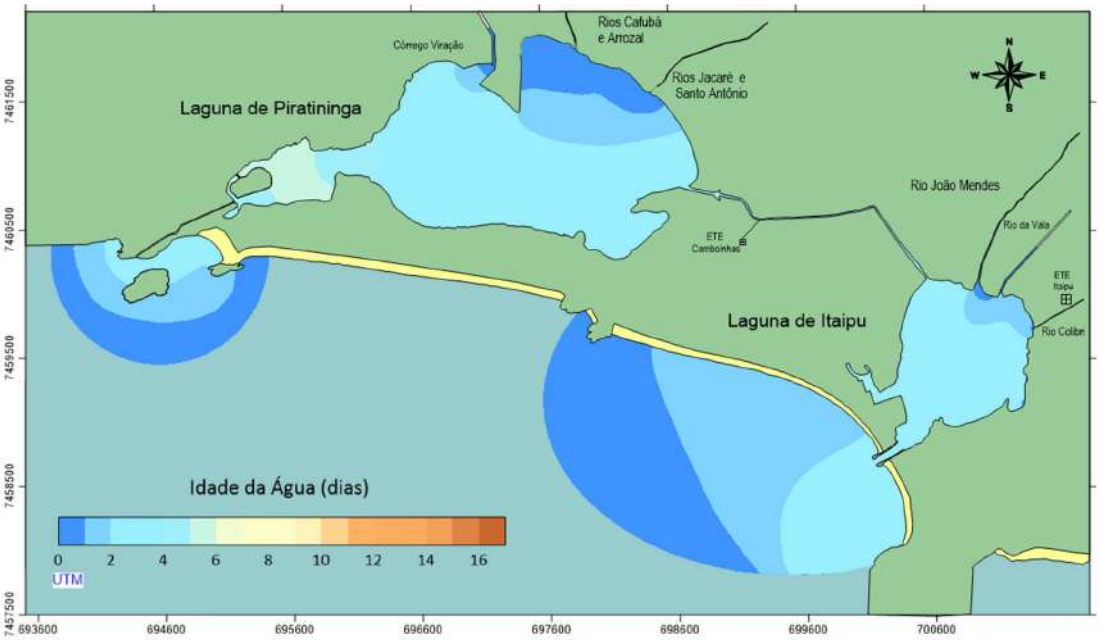

Figura 102- Idade da água após 15 dias simulados para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.

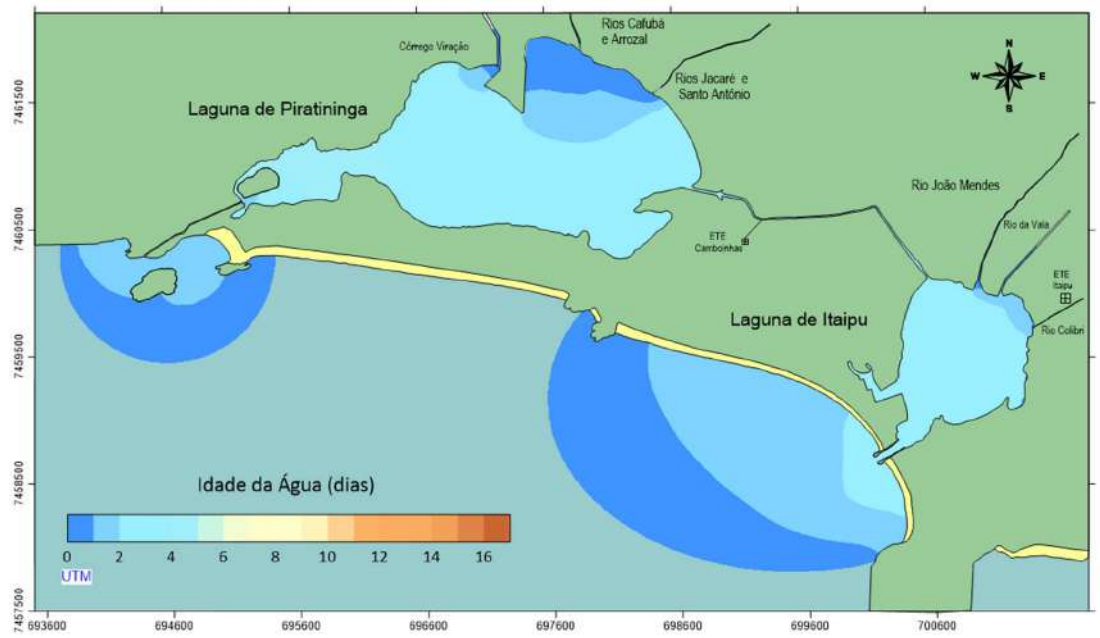

Figura 103- Idade da água após 35 dias simulados para a situação projetada considerando todos os canais otimizados.

As séries temporais (Figura 104) mostram valores médios de idade da água reduzidos em cerca de 30% para a porção oeste da Laguna de Piratininga, se comparados aos obtidos no cenário base. Para a região central da laguna, a redução foi de 5%.

Já para a Laguna de Itaipu, houve um acréscimo de aproximadamente 5% devido

justamente ao balanço hídrico realizado com a laguna adjacente após restabelecimento da conectividade entre elas.

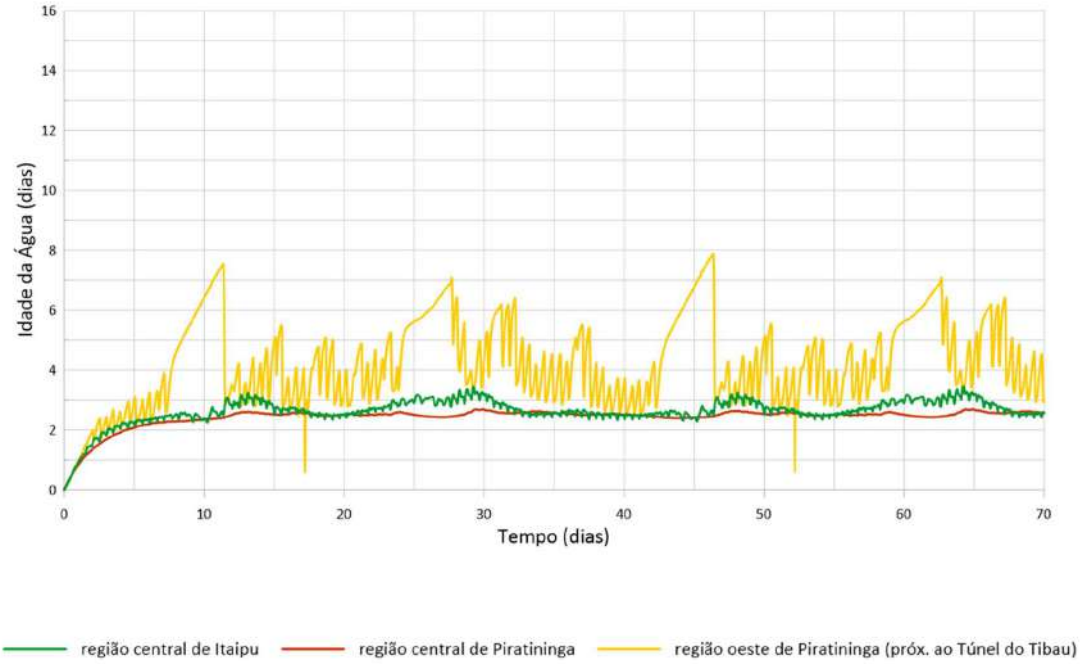

Figura 104- Séries temporais de idade da água no centro das lagunas e na proximidade com a embocadura do Túnel do Tibau, considerando trocas com o mar e rios, na situação projetada considerando todos os canais otimizados.

5.5 Análise dos Pontos Críticos

Uma preocupação recorrente nos estudos anteriores realizados para o sistema lagunar e por parte da prefeitura municipal seria que a dragagem do Canal de Camboatá deveria ser realizada somente após a desobstrução do Túnel do Tibau e da dragagem do Canal de Itaipu, já que a dragagem do Canal de Camboatá ocasionaria rebaixamento do nível da Laguna de Piratininga, uma vez que aumentaria a comunicação entre as lagunas.

Com o intuito de analisar melhor esta questão, como já sugerido no item 5.2.6, foram levantados os dados referentes às profundidades para a porção central da Laguna de Piratininga, mostrados na Figura 105. Nela é possível notar que os menores valores para profundidade foram encontrados em torno do décimo primeiro dia de simulação.

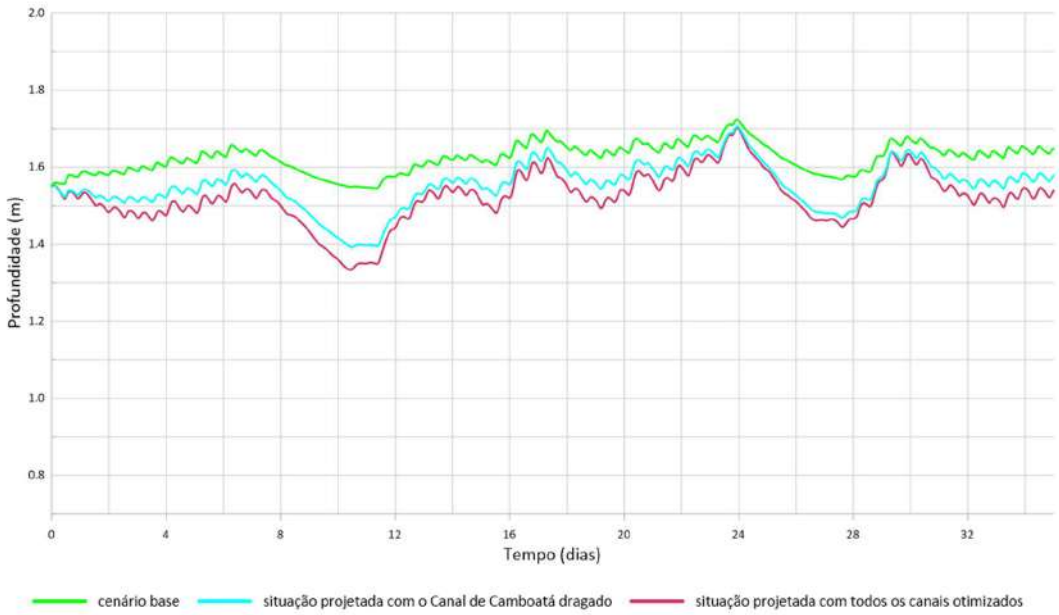

Figura 105- Análise das profundidades obtidas para a região central da Laguna de Piratininga. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

A dragagem do Canal de Camboatá resultaria em uma redução no nível médio da Laguna de Piratininga, o que, apesar de contribuir para o restabelecimento do equilíbrio hidrodinâmico do sistema e para a melhoria da circulação entre as lagunas, requer atenção quanto aos efeitos localizados dessa intervenção. A análise espacial realizada com base na simulação do cenário com o canal dragado evidenciou a possibilidade de emersão do fundo da laguna em regiões marginais, especialmente próximas a áreas habitadas, o que pode ocasionar odores desagradáveis e impactar negativamente a qualidade ambiental local.

Embora a Laguna de Piratininga já apresente histórico de episódios de exposição de fundo durante períodos de estiagem, a presença do Túnel do Tibau tem desempenhado papel fundamental na manutenção de níveis mínimos, mesmo sob condições adversas. Sua soleira atua como uma barreira hidráulica que ajuda a mitigar situações extremas, contribuindo para a estabilidade do sistema. No entanto, as simulações indicaram que, mesmo com a operação do túnel, há tendência à emersão pontual do fundo nas bordas da laguna.

É importante destacar que a ausência de dados batimétricos detalhados nas áreas

rasas da laguna representou uma limitação para o modelo, exigindo interpolações que podem influenciar a precisão da representação dessas zonas críticas. Ainda assim, os resultados não invalidam os benefícios da dragagem do Canal de Camboatá, sugerindo que uma intervenção de menor volume, mais localizada e acompanhada de dados batimétricos refinados, pode ser eficaz para melhorar a conectividade hidrodinâmica sem causar impactos indesejados.

A Figura 106 ilustra o décimo primeiro dia de simulação com o Canal de Camboatá dragado. As áreas com menor profundidade da coluna d'água se assemelham àquelas observadas no cenário base, mas indicam a necessidade de cautela quanto ao risco de exposição do fundo nas margens, reforçando a importância de um tratamento mais preciso da batimetria local na modelagem.

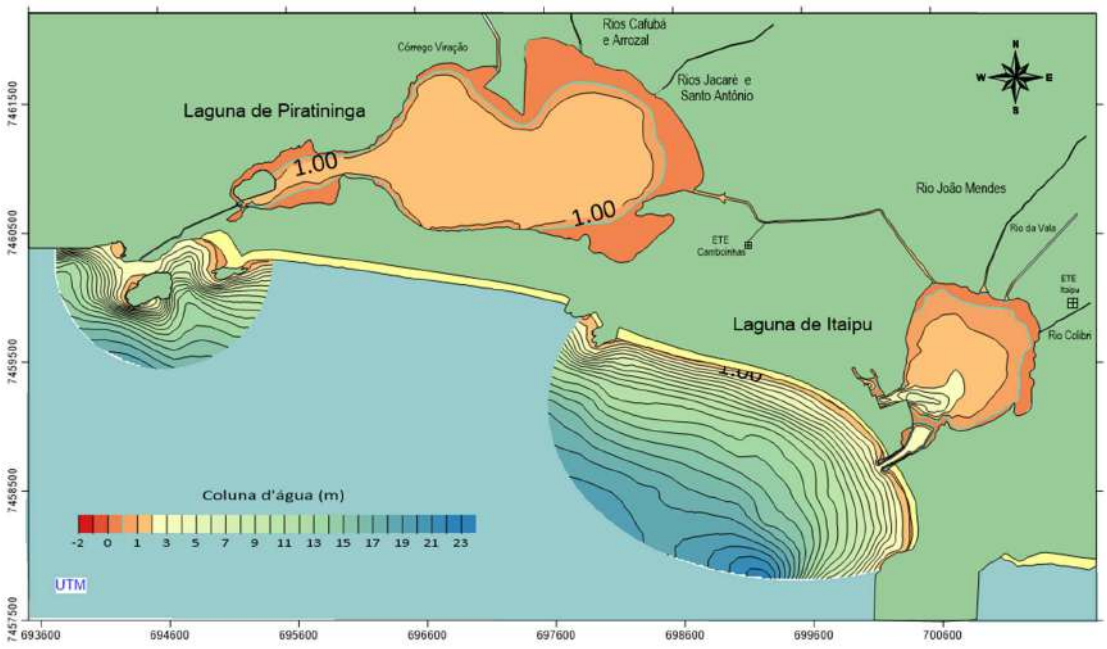

Figura 106- Resultados obtidos para altura da coluna d'água, em momento de menor profundidade para a região central da Laguna de Piratininga, após dragagem do Canal de Camboatá. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

Uma análise detalhada das regiões consideradas críticas devido à menor profundidade, incluindo a porção oeste da Laguna de Piratininga, área notoriamente afetada por problemas de qualidade e estagnação das águas, revelou resultados expressivos quanto à possibilidade de áreas emersas. Os pontos analisados são exibidos na Figura 107.

Figura 107- Localização dos pontos analisados individualmente. Fonte: Google Earth.

Cada ponto que representa as áreas mais rasas, próximas às margens da laguna, foi analisado individualmente. Os resultados, para o cenário que considerou o Canal de Camboatá dragado de forma isolada, foram representados na Figura 108 e mostram uma tendência a áreas marginais secas nos pontos analisados, com exceção para a desembocadura do Túnel do Tibau, destacada pelo ponto 1. A área passou por uma dragagem durante a instalação do túnel se encontrando assim mais profunda.

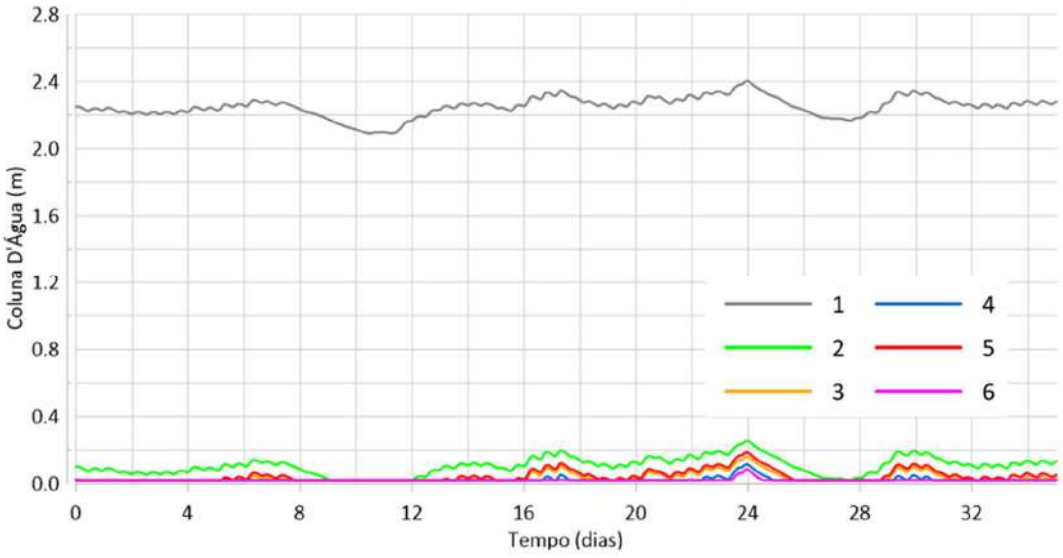

Figura 108- Série temporal da coluna d'água no cenário que considera o Canal de Camboatá dragado.

É importante ressaltar que, os valores de batimetria nas regiões próximas às margens da Laguna de Piratininga não foram medidos devido à pouca profundidade e consequentemente dificuldade de acesso durante a campanha de medição realizada pela prefeitura de Niterói. Para representar estas regiões no modelo, os dados das áreas próximas às margens da Laguna de Piratininga foram interpolados. No entanto, há uma necessidade da obtenção de dados medidos para estas regiões para a apresentação de um estudo mais assertivo.

5.6 Análises Comparativas de Renovação

Para a Laguna de Piratininga, a simulação que apresentou maior eficiência em termos de renovação foi aquela que considerou o Túnel do Tibau desobstruído e os canais de Itaipu e Camboatá dragados, alcançando a taxa máxima de renovação em aproximadamente 40 dias de simulação. Em contrapartida, no cenário base, o sistema atingiu essa mesma taxa somente após 50 dias. A simulação menos eficiente para essa laguna foi aquela em que o Túnel do Tibau não participou da hidrodinâmica do sistema, resultando em índices médios de renovação 10% inferiores aos dos demais cenários simulados.

Na Figura 109, são mostradas as séries temporais das regiões centrais da laguna.

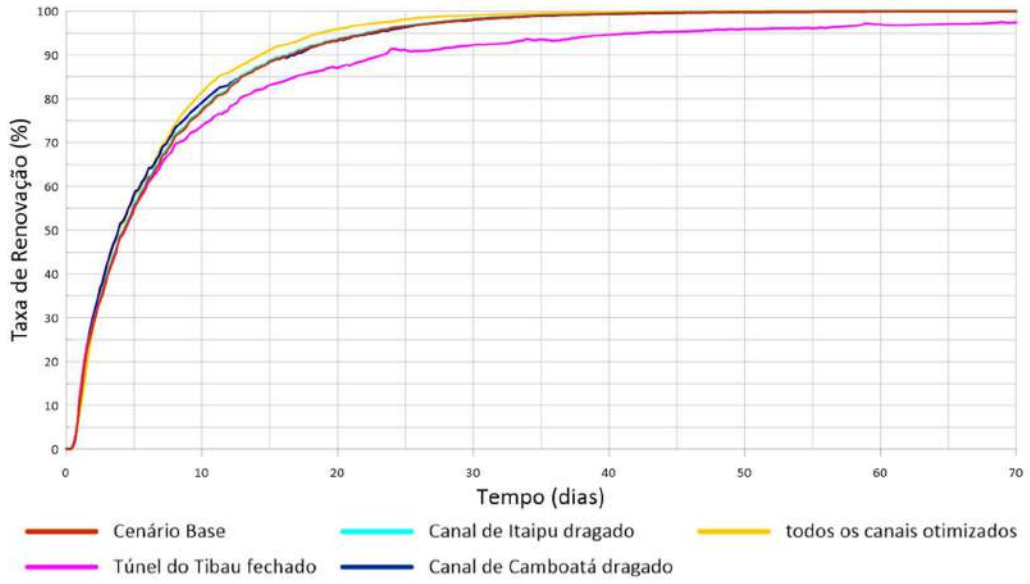

Figura 109- Séries temporais de renovação comparativa entre as simulações analisadas para a região central da Laguna de Piratininga.

Para a região central da Laguna de Itaipu, o cenário mais eficiente foi aquele que considerou o Canal de Itaipu dragado, proporcionando um aumento nas taxas de renovação desde os primeiros instantes da simulação. Por outro lado, o cenário menos eficiente foi aquele que incluiu a dragagem do Canal de Camboatá, onde a dinâmica hídrica favoreceu o movimento de massas d'água da Laguna de Itaipu em direção a Piratininga, priorizando a renovação desta última em detrimento de Itaipu. Na Figura 110, são mostradas as séries temporais obtidas.

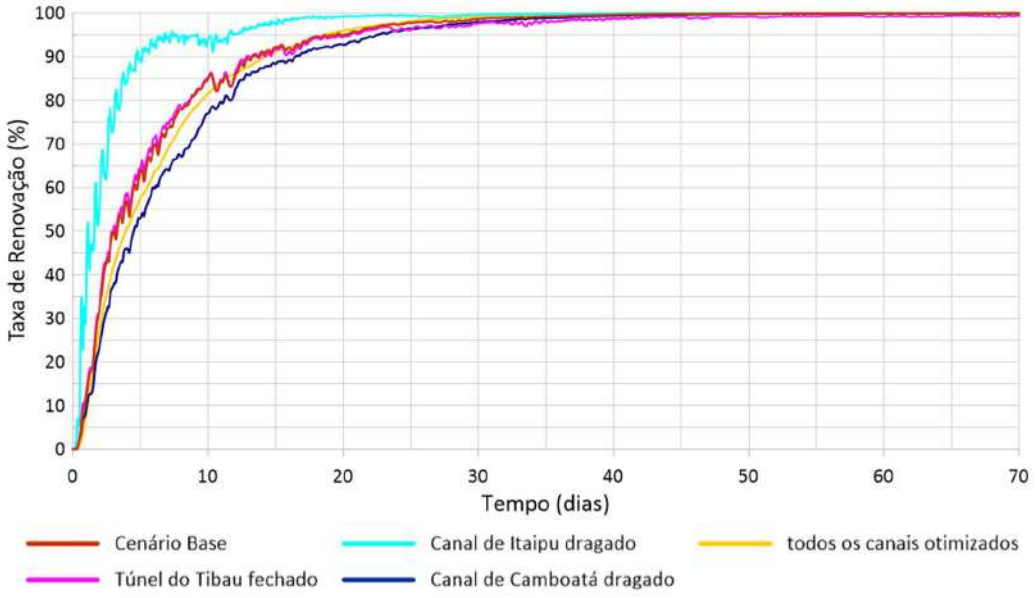

Figura 110- Séries temporais de renovação comparativa entre as simulações analisadas para a região central da Laguna de Itaipu.

6 CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas neste estudo, concluiu-se que a renovação de águas do sistema lagunar Piratininga-Itaipu é fortemente influenciada pela integridade estrutural e operacional dos seus canais de comunicação e do Túnel do Tibau. As simulações demonstraram que, na configuração atual do sistema, a região oeste da Laguna de Piratininga apresenta uma clara tendência à estagnação hídrica, resultado diretamente relacionado à restrição de fluxo no Canal de Camboatá e ao papel limitado do túnel, mesmo quando desobstruído.

A dragagem dos canais apresentou-se como uma intervenção com alto potencial para melhorar o equilíbrio hídrico e a circulação hidrodinâmica do sistema lagunar. Em especial, a dragagem do Canal de Camboatá foi a única medida que demonstrou efetiva capacidade de mitigar os problemas de renovação na Laguna de Piratininga, promovendo maior conectividade entre as lagunas e com o oceano. No entanto, a simulação indicou que a dragagem proposta pode levar à exposição do fundo nas regiões marginais da Laguna de Piratininga, o que representa risco de impactos ambientais e sociais, como o surgimento de odores desagradáveis em áreas urbanizadas próximas. Diante disso, recomenda-se avaliar a possibilidade de uma dragagem com volume reduzido, que mantenha os benefícios hidrodinâmicos sem comprometer a integridade das bordas da laguna. Já a dragagem isolada do Canal de Itaipu apresentou impacto limitado, com melhorias restritas à própria Laguna de Itaipu, sem influência significativa sobre a dinâmica da Laguna de Piratininga.

Os cenários mais eficientes em termos de renovação incluíram tanto o Túnel do Tibau desobstruído quanto os canais dragados, alcançando taxas de renovação significativamente superiores às condições atuais. Esses resultados evidenciam que a conectividade hidrodinâmica entre as lagunas é fundamental para garantir a funcionalidade do sistema como um todo.

Por fim, este trabalho destaca que intervenções pontuais, como a dragagem dos canais e a manutenção do Túnel do Tibau, são cruciais para o equilíbrio do sistema lagunar. Tais medidas têm o potencial de não apenas mitigar os efeitos de estagnação nas áreas críticas, mas também de assegurar uma dinâmica hídrica mais sustentável e resiliente, essencial para a preservação ambiental e a utilização equilibrada deste

importante sistema lagunar. Vale ressaltar que, para este estudo, não foram considerados aspectos relacionados à qualidade dessas águas em termos de seus componentes físico-químicos e biológicos. Além disso, mesmo com a dragagem proposta para o Canal de Itaipu, a estabilidade desse canal dependeria da implementação de um projeto de ampliação dos guia-correntes, garantindo sua estabilidade a longo prazo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSBOOM, J., STIVE, M. J. F., 2012. **Coastal Dynamics I – Lecture Notes CIE4305.** Version 0.3 Delft, Delft University of Technology.

CABRAL I. S., QUEIMA A. M., 2014. **Projeto de Prolongamento dos Guia-correntes do Canal de Maré da Lagoa de Itaipu-RJ**. Tese de Conclusão de Curso, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CAMERON, W.M. PRITCHARD, D.W., 1963. **Estuaries. In: The Sea**. Ed. MN Hill, Vol.2, Wiley, New York, 306-324.

CEM, 2002 – **Coastal Engineering Manual.** U.S. Army Corps of Engineers. Engineer Manual Part II, Chapter 6. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes).

CBH, 2024. **Comitê Baía de Guanabara – Subcomitê Lagoas de Itaipu e Piratininga**. Disponível em: https://comitebaiadeguanabara.org.br/subcomite-itaipu-piratininga/

CUNHA D. L., MUYLAERT S., NASCIMENTO M. T. L., FELIX L. C., GOMES G., BILA D. M., FONSECA E. M., 2020. **Occurrence of Emerging Contaminants and Analysis of Osteogenic Activity in the Water and Sediments from Two Coastal Lagoons in South-eastern Brazil.** Marine and Freshwater Reserch.

DA COSTA, M. R., MONTEIRO-NETO C., TUBINO R. A., ANGELINI R., 2021. **Sistema Lagunares do Leste Fluminense.** Pesca e Sustentabilidade – Passado, Presente e Futuro. AH Edições.

DEAN R. G., DARLYMPLEE R.A., 2002. **Coastal Processes with Engineering Applications**. Cambridge University Press.

DYER, K.R., 1997. **Estuaries: A Physical Introduction**. 2nd. Edition. John Wiley & Sons Ltd.

GERKEMA, T., 2019. **An Introduction to TIDES.** New York: Cambridge University Press.

HYDROSCIENCE, 2018. **Relatório de Hidrologia, Caracterização das Vazões e dos Aportes de Cargas Contribuintes ao Sistema Perilagunar Piratininga-Itaipu**. Hydroscience, Porto Alegre, RS, Brasil.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Resultados preliminares do Censo 2010**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br

MACH, J. S. O.; LONGO, O. C., 1998. **Considerações sobre a Gestão Ambiental – Impacto da Construção Civil: Um Estudo de Caso do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu**. UFF, Niterói RJ, Brasil.

KJERVE B., KNOPPERS B., MOREIRA P., TUERCQ B., 1990. **Hydrological Regimes in**

Lagoa de Guarapina, a Shallow Brazilian Coastal Lagoon. Acta Limnos Brasiliense 3:931-949.

KJERVE B., SCHETTINI C. A. F., KNOPPERS B., LESSA G., FERREIRA H. O.,1996. **Hydrology and salt balance in a large hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil** Est Coast Shelf Sciences 42:701-725.
MOTTA, V.F., 1978**. Processos Sedimentológicos em Estuários**. Programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PHLEGER F. B., 1969. **Some General Features of Coastal Lagoons. In: Ayala-Castaneres A Lagunas Costeras.** Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico, DF, pp 5-26

PINTO, A.C.B., 1999**. Um Modelo Numérico para análise da Estabilidade Hidráulico-Sedimentológica de Canais de Maré.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PMN, Prefeitura Municipal de Niterói, 2018. **Projeto Conceitual - Parque Orla Piratininga, Volume I e II**.

REIS, R. C. S., RAMOS, D. M., SILVA, R. A. G., 2024. **Calibração e Validação do Modelo Hidrodinâmico do SisBaHiA para o Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, RJ**. II Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluídos e Hidráulica.

REIS R. C. S., ROSA A. S., SILVA R. A. G., 2023. **Influência do Túnel do Tibau na Renovação de Massas D'Água do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu**. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

RIBEIRO P. E. A., CARVALHO T. S., DOS SANTOS L.C. M., DIAS L. L., SANTOS G. M. F., 2021. **Monitoramento Quali-quantitativo das Águas Superficiais do Sistema Lagunar Urbano de Piratininga-Itaipu**. XII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Bahia.

ROSMAN, P. C. C., 2024. **Referência Técnica do SisBaHiA®**. COPPE/, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V95.pdf.

SIQUEIRA, L. F. G., QUEIROZ, R. S., 2012. **Estudo para Revitalização do Sistema Lagunar Piratininga- Itaipu com Auxílio da Modelagem Computacional.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SIKORA WB., KJERVE B., 1985. **Factors influencing the salinity of Lake Pontchartrain, Louisiana, a shallow coastal lagoon: analysis of a long-term data set.** Estuaries 8:170-180.

SILVA, R. A. G.; ROSMAN, P. C. C., 2016. **Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Oeste da Lagoa de Araruama -RJ**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 25 -35.

SILVA, R. A. G., QUEIROZ, R. S., ROSMAN, P. A., ROSMAN, P. C. C., **Modelagem Hidrodinâmica Ambiental para Planejamento de Obras nas Lagoas de Piratininga e Itaipu**, para o Instituto Estadual do Ambiente – Estado do Rio de Janeiro, INEA/RJ. Projeto COPPETEC PENO-15795, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

USACE, 2012. **Coastal Engineering Manual**. Engineer Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes), USA.

VALENTINI, E. M. C., ROSMAN, P. C. C., 2010. **Apostila EEH604 Engenharia Costeira & Fluvial.** Rio de Janeiro: UFRJ/DRHIMA.

WRIGHT J., COLLING A., PARK D., 1999. **Waves, Tides and Shallow-Water Processes.** The Open University.