



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Lucas de Carvalho Ferreira

CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA, DE RENOVAÇÃO E
QUALIDADE DAS ÁGUAS DO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-
MANGUABA (AL)

Rio de Janeiro
2023



UFRJ

Lucas de Carvalho Ferreira

CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA, DE
RENOVAÇÃO E QUALIDADE DAS ÁGUAS DO COMPLEXO
ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA (AL)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Monica Pertel

Coorientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

2023

Ferreira, Lucas de Carvalho.

Caracterização da Circulação Hidrodinâmica, de Renovação e Qualidade das Águas do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (AL) / Lucas de Carvalho Ferreira. – 2023.

247 f.: 160 il. 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2023.

Orientadores: Monica Pertel e Paulo Cesar Colonna Rosman

1. Lagunas Mundaú e Manguaba. 2. Modelagem Hidrodinâmica. 3. Tempos Hidráulicos Característicos. 4. Salinidade e Temperatura. 5. Coliformes termotolerantes. I. Pertel, Monica e Rosman, P.C.C. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Análises de Hidrodinâmica Ambiental no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (AL).



UFRJ

CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA, DE RENOVAÇÃO E QUALIDADE DAS ÁGUAS DO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA (AL)

Lucas de Carvalho Ferreira

Orientadora: Monica Pertel
Co-Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Prof.^ª. Monica Pertel, D.Sc., UFRJ

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

Prof.^ª. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha, D.Sc., UFPR

Prof. Osvaldo Moura Rezende, D.Sc., UFRJ

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

Rio de Janeiro

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus;

Aos meus pais, Francisco e Cátia, por todo amor e apoio em todos os momentos de minha vida. Muito obrigado por todo o incentivo e dedicação;

À minha irmã, Mariana, por toda sua ajuda e contribuição, principalmente, quanto à revisão e correção do texto da dissertação;

À minha orientadora, Monica Pertel, pelas ótimas aulas de Saneamento Ambiental, além de toda a assistência prestada ao longo deste trabalho;

Ao meu co-orientador, Paulo Cesar Colonna Rosman, por ter compartilhado tanto conhecimento quanto a hidrodinâmica ambiental de sistemas estuarinos, durante as aulas e nas nossas reuniões;

Aos professores do Programa de Engenharia Ambiental (PEA), e a todos os colegas que tive o prazer de conviver durante este período, tanto do PEA quanto do grupo da Engenharia Costeira e Oceanográfica;

À Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), à Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás), ao Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM), ao Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH), ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), à Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH-AL) e ao Instituto do Meio Ambiente de Alagoas (IMA-AL), por terem fornecido dados ambientais que foram essenciais para realização deste trabalho;

À Ana Carolina Cavalcante de Lima, pela gentileza em compartilhar informações e dados ambientais do CELMM.

RESUMO

FERREIRA, Lucas de Carvalho. **Caracterização da Circulação Hidrodinâmica, de Renovação e Qualidade das Águas do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (AL)**. Rio de Janeiro, 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), localizado no estado de Alagoas (AL, Brasil), é um sistema de corpos aquáticos naturais, constituído por duas lagoas, Mundaú e Manguaba, canais de comunicação, diversas ilhas e uma zona estuarina comum a ambas as lagoas. Diversas atividades antrópicas realizadas no CELMM e em suas bacias de contribuição proporcionaram significativa degradação ambiental, devido, principalmente, a entrada de cargas poluidoras nesse ambiente. O objetivo deste estudo é simular e analisar, por meio do modelo computacional SisBaHiA[®] – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, os padrões de circulação hidrodinâmica, os Tempos Hidráulicos Característicos (THC) e a qualidade de água, para dois cenários: período chuvoso, nos meses de maio, junho e julho de 2018; e período seco, nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2018. Pelos resultados obtidos, constatou-se que as marés e os ventos são as principais forçantes da circulação hidrodinâmica. Durante o período chuvoso, as descargas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio interferiram de forma significativa na hidrodinâmica, com efeitos relevantes na renovação e na qualidade de água. Verificou-se a forte atenuação da maré em direção às lagoas, principalmente, na laguna Manguaba, resultando em reduzidas trocas de massas de água desta laguna com os canais de comunicação/mar. Nas análises dos THC, os resultados mais relevantes se referem a Idade da Água (I_A), que indicou, no período seco, que a renovação das águas ocorreu mais lentamente na região próxima ao centro da laguna Manguaba, assim como nas proximidades da região sudeste da laguna Mundaú. Ambas as regiões apresentaram altos valores de I_A , e foram confirmadas como os locais que apresentam os índices de estado trófico mais crítico, em cada laguna. Quanto às simulações de qualidade de água, observou-se a predominância de baixos valores de salinidade no interior das lagoas ao longo do período chuvoso, e nos meses seguintes, um aumento gradual, dado em função da redução das descargas fluviais. Na laguna Mundaú, o molusco sururu (*Mytella charruana*) possui grande relevância, pois é uma fonte de renda para milhares de moradores do entorno, além de ser um alimento típico da região. Através da modelagem da salinidade, retratou-se como as condições no período chuvoso foram desfavoráveis à sobrevivência do sururu. Em relação à temperatura no interior das lagoas, percebeu-se como as variações temporais, devido à sazonalidade, foram mais significativas do que as variações espaciais, pois, de modo geral, as lagoas tendem a apresentar pequeno gradiente espacial de temperatura. Através das análises da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes foram apontadas as áreas mais críticas em relação à balneabilidade. Demonstrou-se que, com a melhoria do esgotamento sanitário nas bacias contribuintes, e, conseqüentemente, redução das concentrações de coliformes termotolerantes afluentes às lagoas, a qualidade de água apresentaria melhoras significativas.

Palavras-chave: Lagoas Mundaú e Manguaba; Modelagem Hidrodinâmica; Tempos Hidráulicos Característicos; Salinidade e Temperatura; Coliformes Termotolerantes

ABSTRACT

FERREIRA, Lucas de Carvalho. **Caracterização da Circulação Hidrodinâmica, de Renovação e Qualidade das Águas do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (AL)**. Rio de Janeiro, 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The Mundaú-Manguaba Estuarine Lagoon System (MMELS), located in the state of Alagoas (AL, Brazil), is a system of natural water bodies, consisting of two lagoons, Mundaú and Manguaba, communication channels, several islands and an estuarine zone common to both the lagoons. Several anthropic activities carried out in MMELS and in its contribution basins caused significant environmental degradation, mainly due to the entry of polluting loads in this environment. The objective of this study is to simulate and analyze, through the computational model SisBaHiA[®] – Environmental Hydrodynamics Base System, the hydrodynamic circulation patterns, the Characteristic Hydraulic Times (CHT) and the water quality, for two scenarios: wet season, in the months of May, June and July 2018; and dry season, in the months of October, November and December 2018. From the results obtained, it was found that tides and winds are the main forcings of hydrodynamic circulation. During the wet season, discharges from the Mundaú and Paraíba do Meio Rivers significantly interfered in hydrodynamics, with relevant effects on water renewal and quality. There was a strong attenuation of the tide towards the lagoons, mainly in the Manguaba lagoon, resulting in reduced exchanges of water masses of this lagoon with the communication channels/sea. In the CHT analyses, the most relevant results refer to the Water Age (W_A), which indicated, in the dry season, that the water renewal occurred more slowly in the region close to the center of the Manguaba lagoon, as well as, in the vicinity of the region southeast of the Mundaú lagoon. Both regions presented high W_A values, and were confirmed as the places that present the most critical trophic state index, in each lagoon. As for the water quality simulations, a predominance of low salinity values was observed inside the lagoons throughout the wet season, and in the following months, a gradual increase, due to the reduction of river discharges. In the Mundaú lagoon, the sururu mussel (*Mytella charruana*) has great relevance, as it is a source of income for thousands of residents in the surrounding area, in addition to being a typical food of the region. Through salinity modeling, it was portrayed how the conditions in the wet season were unfavorable to the sururu survival. Regarding the temperature inside the lagoons, it was noticed that the temporal variations, due to seasonality, were more significant than the spatial variations, since, in general, the lagoons tend to present a small spatial temperature gradient. Through the analyses of the dispersion and decay of thermotolerant coliform plumes, the most critical areas in relation to standards for recreational water quality were pointed out. It was demonstrated that, with the improvement of sanitation in the contributing basins, and, consequently, reduction of the concentrations of thermotolerant coliforms affluent to the lagoons, the water quality would present significant improvements.

Keyword: Mundaú and Manguaba Lagoons; Hydrodynamic Modeling; Characteristic Hydraulic Times; Salinity and Temperature; Thermotolerant Coliforms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das lagunas, do ponto de vista geomorfológico, segundo as características dos canais que as conectam com o oceano (Kjerfve, 1986).	30
Figura 2 - Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental (ROSMAN, 2023).	42
Figura 3 - Localização do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba e dos seus principais afluentes. Nota-se ainda o destaque para as principais sedes municipais do entorno do CELMM.	49
Figura 4 - Principais Bacias Hidrográficas contribuintes ao CELMM. Nota-se ainda o destaque para as sedes municipais inseridas nas bacias de contribuição, além das usinas e destilarias. 50	
Figura 5 - Classes de vegetação e uso e ocupação do solo na região do CELMM. Observa-se na cor rosa claro, as áreas utilizadas na monocultura de cana-de-açúcar, e na cor cinza, as áreas urbanas (ANA, 2006).	55
Figura 6 - Divisão dos sistemas de esgotamento sanitário da região urbana de Maceió (PMSB - MACEIÓ/AL, 2017).....	63
Figura 7 - Condições de moradia e saneamento básico precários, na região sudeste da laguna Mundaú (Google Earth Pro [®] , 2021).	64
Figura 8 - Imagem da tela de abertura do SisBaHiA [®]	69
Figura 9 - Características da pluma sob ação de correntes em ambientes com densidade variável (TIAN, ROBERTS e DAVIERO, 2006; ROSMAN, 2023). Descrição dos parâmetros: espaçamento entre orifícios (s) do difusor; diâmetro dos orifícios (d); velocidade de lançamento do efluente (u_j); intensidade do escoamento (u); altura do topo da pluma em relação ao fundo (z_m); espessura da pluma (h_n); variações verticais de densidade entre a superfície livre e o ponto de lançamento do efluente (dp/dz). Mais detalhes podem ser obtidos na seção 7.6.5 da Referência Técnica do SisBaHiA [®] (ROSMAN, 2023).	73
Figura 10 - Mapa base, com a exposição da malha de elementos finitos. Nota-se, no canto inferior esquerdo, as informações relativas ao domínio discretizado, tendo como base o nível médio do mar de 1.155 m, segundo a Carta Náutica do Porto de Maceió - CN N° 901 da DHN.	75
Figura 11 - Diagrama de Referência de Nível do Porto de Maceió - CN N° 901. Nota-se que a cota da estação geodésica RN-IBGE-2603M se refere a Altitude Ortométrica, e foi adotada pela ANA no levantamento batimétrico realizado nos anos de 2011 e 2012 (ANA, 2012a).....	76
Figura 12 - Dados batimétricos obtidos da ANA (2012a), à esquerda, e da CPRM (2019), à direita.	77
Figura 13 - Dados batimétricos obtidos da Petrobrás (2011), à esquerda, e do PORTOBRÁS/INPH (1985), à direita.....	77
Figura 14 - Dados batimétricos obtidos da Carta Náutica N° 920 - Proximidades do Porto de Maceió, à esquerda, e do PORTOBRÁS/INPH (1985), à direita.....	78
Figura 15 - Batimetria adotada na modelagem, referenciada à Carta Náutica N° 901 da DHN.	79
Figura 16 - Curvas Hipsométricas de Cota x Área x Volume, da laguna Mundaú, à esquerda, e da laguna Manguaba, à direita. Observa-se que as cotas são altimétricas, e correspondem ao	

negativo das cotas batimétricas. Os níveis máx. e mín. de água foram obtidos das simulações hidrodinâmicas, conforme exposto na Tabela 18, na seção 6.1.3.	80
Figura 17 - Caracterização da amplitude da rugosidade equivalente de fundo (ϵ), de acordo com as informações descritas sobre a granulometria do material de fundo da região modelada.....	82
Figura 18 - Comparação entre a maré medida, na cor azul, e gerada a partir das constantes harmônicas, na cor vermelha, no intervalo de tempo de 13/04/2006 00h00 até 31/05/2007 23h00. Observa-se, na cor rosa, o nível médio do mar estático, e na cor preta, a diferença entre os valores medidos e gerados, representando o nível médio variável.	85
Figura 19 - Séries temporais de elevação da superfície livre da água nos respectivos períodos simulados. Nota-se que as marés resultantes foram obtidas pela soma das marés astronômicas com as variações do nível médio do mar.....	86
Figura 20 - Localização do Eixo Pivô (EP), linha azul, com direção perpendicular à linha de costa, linha laranja. Os sinais positivos e negativos ilustram a adição e subtração de um valor de NMD nos lados opostos da FA, induzindo correntes perpendiculares ao EP, ou seja, paralelas à linha de costa. Nota-se a localização do ponto de extração de dados do HYCOM.....	87
Figura 21 - Hidrogramas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, com vazões já incrementadas para as simulações nos períodos chuvoso e seco, incluindo, ainda, os meses de agosto e setembro.	89
Figura 22 - Vazões médias mensais históricas e do ano de 2018, à esquerda, na estação Fazenda Boa Fortuna no rio Mundaú, enquanto à direita, na estação Atalaia no rio Paraíba do Meio..	89
Figura 23 - Ilustração das entradas dos rios e canais de drenagem urbana, considerados nas modelagens	91
Figura 24 - Localização dos pontos de grade do modelo de reanálise atmosférica global ERA5 (ECMWF), nos quais foram extraídas as séries temporais de ventos. Apresenta-se ainda a localização da estação meteorológica MACEIÓ-A303 (INMET).	94
Figura 25 - Rosa dos ventos, nos períodos chuvoso e seco, para as estações EV1 e EV6. O eixo radial indica a frequência de ocorrência das direções e das velocidades; o eixo polar indica a direção de origem dos ventos; a escala de cor se refere a intensidade das velocidades.....	95
Figura 26 - Localização das estações pluviométricas nas quais foram obtidos dados diários de precipitação. Nota-se que os dados diários de evaporação foram provenientes da estação MACEIÓ-AL (OMM: 82994) - INMET.	96
Figura 27 - Dados de precipitação total mensal referentes aos meses de interesse do ano de 2018, extraídos das estações pluviométricas utilizadas neste estudo.	97
Figura 28 - Série mensal de dados históricos de precipitação e evaporação, de 1961 até 2017, e do ano de 2018, obtidos da estação MACEIÓ-AL (OMM: 82994) - INMET.	98
Figura 29 - Valores de salinidade utilizados na fronteira aberta dos modelos de salinidade, a partir de dados provenientes do HYCOM. O local de extração dessas informações encontra-se exposto na Figura 24. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro.	103
Figura 30 - Temperatura do mar (média) e dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, em referência aos períodos chuvoso e seco. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro.....	104
Figura 31 - Temperatura do ar, em referência aos períodos chuvoso e seco. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro, além da média móvel diária.	105
Figura 32 - Umidade relativa do ar (modificada), em referência aos períodos chuvoso e seco. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro, além da média móvel diária.....	106

Figura 33 - Localização das estações de monitoramento de qualidade de água do IMA-AL.	107
Figura 34 - Localização das estações de amostragem de qualidade de água da ANA (2012c).	108
Figura 35 - Interface do módulo Campo Próximo - Emissários, constituído por cinco abas: Tubulação Difusora; Dados do Efluente; Visibilidade da Coluna de Água; Temperatura e Salinidade; e Inf. Climáticas.....	109
Figura 36 - Séries temporais de radiação solar utilizadas nos modelos de Campo Próximo – Emissários, em referência aos períodos chuvoso e seco.	112
Figura 37 - Mapa das estações selecionadas para gravar resultados temporais nos modelos hidrodinâmicos, de Transporte Euleriano e de Qualidade. Nota-se também a localização das Plataformas de Coletas de Dados (PCDs), e das seções para cálculo das vazões e volumes resultantes.	114
Figura 38 - Séries de elevações da superfície livre da água medida e simulada nas lagunas Mundaú, acima, e Manguaba, abaixo. À esquerda, referente ao mês de julho, representando a calibração do modelo, enquanto, à direita, referente ao mês de outubro, representando a validação do mesmo.	115
Figura 39 - Correlação linear entre os dados medidos e simulados nos períodos chuvoso e seco, nas respectivas lagunas.	115
Figura 40 - Séries temporais de elevação nas estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, em maio, no período chuvoso, à esquerda, e outubro, no período seco, à direita.	116
Figura 41 - Séries temporais de elevação nas estações “Mar”, “Mu-1”, “Mu-2” e “Mu Centro”, referentes à laguna Mundaú. Nota-se, à esquerda, a propagação da maré nos ciclos de maré de quadratura, enquanto, à direita, nos ciclos de maré de sizígia.....	117
Figura 42 - Séries temporais de elevação nas estações “Mar”, “Ma-1”, “Ma-2”, “Ma-3” e “Ma Centro”, referentes à laguna Manguaba. Nota-se, à esquerda, a propagação da maré nos ciclos de maré de quadratura, enquanto, à direita, nos ciclos de maré de sizígia.	117
Figura 43 - Curvas de Regressão Local, para as estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, à esquerda, referente ao período chuvoso, e à direita, ao período seco. Nota-se ao fundo, as séries de maré resultante no mar, nos respectivos períodos.	120
Figura 44 - Séries temporais de elevação do nível d’água e velocidades na direção X (U) ou Y (V), nas estações “Mu-1” e “Mu-2”, à esquerda, e nas estações “Ma-1” e “Ma-3”, à direita. Observa-se que nas estações “Mu-1” e “Mu-2”, as enchentes possuem sinal positivo, ao passo que o oposto ocorre nas estações “Ma-1” e “Ma-3.	122
Figura 45 - Séries temporais de elevação do nível d’água e velocidades na direção X (U) ou Y (V), na estação “Mu Centro”, à esquerda, e na estação “Ma Centro”, à direita. Observa-se que em ambas as estações, as enchentes possuem sinal positivo.	123
Figura 46 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes no instante 17/05/2018 05h00 (389 h), em referência a uma PM de maré de sizígia no período chuvoso.....	125
Figura 47 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de sizígia da Figura 46.....	125
Figura 48 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de sizígia da Figura 44.....	126

Figura 49 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de sizígia da Figura 44.....	126
Figura 50 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 17/05/2018 07h30 (391.5 h), em referência a uma MMV de maré de sizígia no período chuvoso.	127
Figura 51 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de sizígia da Figura 50.....	127
Figura 52 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de sizígia da Figura 50.....	128
Figura 53 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de sizígia da Figura 50.....	128
Figura 54 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 17/05/2018 11h30 (395.5 h), em referência a uma BM de maré de sizígia no período chuvoso.	129
Figura 55 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de sizígia da Figura 54.....	129
Figura 56 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de sizígia da Figura 54.....	130
Figura 57 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de sizígia da Figura 54.....	130
Figura 58 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 17/05/2018 14h30 (398.5 h), em referência a uma MME de maré de sizígia no período chuvoso.....	131
Figura 59 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de sizígia da Figura 58.....	131
Figura 60 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de sizígia da Figura 58.....	132
Figura 61 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de sizígia da Figura 49.....	132
Figura 62 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 09h00 (369 h), em referência a uma PM de maré de quadratura no período seco.	133
Figura 63 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de quadratura da Figura 62.....	133
Figura 64 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de quadratura da Figura 62.....	134

Figura 65 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de quadratura da Figura 62.....	134
Figura 66 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 12h30 (372.5 h), em referência a uma MMV de maré de quadratura no período seco.	135
Figura 67 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de quadratura da Figura 66.....	135
Figura 68 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de quadratura da Figura 66.....	136
Figura 69 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de quadratura da Figura 66.....	136
Figura 70 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 15h30 (375.5 h), em referência a uma BM de maré de quadratura no período seco.....	137
Figura 71 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de quadratura da Figura 70.....	137
Figura 72 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de quadratura da Figura 70.....	138
Figura 73 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de quadratura da Figura 70.....	138
Figura 74 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 19h00 (379 h), em referência a uma MME de maré de quadratura no período seco.	139
Figura 75 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de quadratura da Figura 74.	139
Figura 76 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de quadratura da Figura 74.....	140
Figura 77 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de quadratura da Figura 74.....	140
Figura 78 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Mu Centro”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.	142
Figura 79 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Ma Centro”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.	142
Figura 80 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Mu-1”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.	143
Figura 81 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Ma-1”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.	143

Figura 82 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Mu-2”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.	144
Figura 83 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Ma-3”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.	144
Figura 84 - Mapas de isolinhas de velocidade das correntes residuais, com a inclusão de vetores representando o sentido dessas correntes no interior das lagunas. À esquerda, referente ao período chuvoso, no intervalo de tempo de 16/05/2018 19h30 até 17/05/2018 20h30; à direita, referente ao período seco, de 07/11/2018 06h00 até 08/11/2018 07h00.	146
Figura 85 - Séries temporais de vazões resultantes nos canais de comunicação da laguna Mundaú, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco.	149
Figura 86 - Séries de temporais volumes resultantes nos canais de comunicação da laguna Mundaú, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco. Observa-se também as porcentagens de equivalência ao volume médio da laguna nos respectivos períodos.	149
Figura 87 - Séries temporais de vazões resultantes nos canais de comunicação da laguna Manguaba, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco.	150
Figura 88 - Séries de temporais volumes resultantes nos canais de comunicação da laguna Manguaba, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco. Observa-se também as porcentagens de equivalência ao volume médio da laguna nos respectivos períodos.	150
Figura 89 - Mapas de isolinhas de Tempo de Residência (T_R) ao final de 92 dias de simulação, à esquerda, para período chuvoso, e à direita, para o período seco.	154
Figura 90 - Taxa de Renovação ($T_R\%$) após 1 dia de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.	157
Figura 91 - Taxa de Renovação ($T_R\%$) após 7 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.	158
Figura 92 - Taxa de Renovação ($T_R\%$) após 15 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.	158
Figura 93 - Taxa de Renovação ($T_R\%$) após 30 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.	159
Figura 94 - Taxa de Renovação ($T_R\%$) após 45 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.	159
Figura 95 - Taxa de Renovação ($T_R\%$) após 60 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.	160
Figura 96 - Taxa de Renovação ($T_R\%$) após 75 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.	160
Figura 97 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_R\%$) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.	161
Figura 98 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_R\%$) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.	161
Figura 99 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_R\%$) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.	163
Figura 100 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_R\%$) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.	163

Figura 101 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($TR\%$) no período chuvoso, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.....	165
Figura 102 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($TR\%$) no período seco, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.....	165
Figura 103 - Mapas de isolinhas de Idade da Água (I_A) em referência ao período chuvoso. À esquerda, para os momentos de menor I_A na estação “Mu Centro”, no tempo 02/05/2018 03h00; e na estação “Ma Centro”, no tempo 05/05/2018 05h00. À direita, a maior I_A em maio, na laguna Mundaú, no tempo 29/05/2018 06h00; e na laguna Manguaba, no tempo 24/05/2018 12h00.	168
Figura 104 - Mapas de isolinhas de Idade da Água (I_A) em referência ao período seco. À esquerda, para os momentos de menor I_A na estação “Mu Centro”, no tempo 22/12/2018 01h00; e na estação “Ma Centro”, no tempo 02/10/2018 08h00. À direita, a maior I_A na laguna Mundaú, no tempo 22/10/2018 15h00; e na laguna Manguaba, no tempo 20/11/2018 03h00.....	168
Figura 105 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.....	169
Figura 106 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.....	169
Figura 107 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.	172
Figura 108 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.	172
Figura 109 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período chuvoso, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.	174
Figura 110 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período seco, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.	174
Figura 111 - Isolinhas de salinidade ao final da pré-modelagem do período chuvoso, correspondente a condição inicial do período chuvoso, no instante de tempo 01/05/2018 00h00.	177
Figura 112 - Séries temporais de salinidade nos últimos 10 dias de simulação da pré-modelagem do período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Mundaú.....	177
Figura 113 - Séries temporais de salinidade nos últimos 10 dias de simulação da pré-modelagem do período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.	178
Figura 114 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Mundaú.....	178
Figura 115 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Mundaú.	179
Figura 116 - Isolinhas de salinidade no instante de tempo 15/05/2018 18h00, correspondente ao instante de tempo próximo no qual se obteve a maior salinidade na estação “Mu Sul”.	180
Figura 117 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.	180
Figura 118 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Manguaba.....	181
Figura 119 - Isolinhas de ocorrência temporal de águas salobras, isto é, com salinidade superior a 0.5 ups e inferior a 30 ups, em referência ao período chuvoso, de 01/05/2018 00h00 até	

01/08/2018 00h00. As regiões na cor azul escuro indicam que, em 100% do tempo, prevaleceram águas doces ou então salinas.....	181
Figura 120 - Isolinhas de ocorrência temporal de águas com salinidade entre 5 e 15 ups, em referência ao período chuvoso, de 01/05/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00. Nota-se que essa faixa de salinidade é considerada a ideal para o sururu na laguna Mundaú. No mapa, as regiões na cor azul escuro indicam a ocorrência de 100% de águas com salinidade abaixo de 5 ups, ou então, superior a 15 ups.	183
Figura 121 - Isolinhas de salinidade ao final do período chuvoso, correspondente a condição inicial da pré-modelagem do período seco, no instante de tempo 01/08/2018 00h00.....	184
Figura 122 - Séries temporais de salinidade na pré-modelagem do período seco, referentes as estações localizadas na laguna Mundaú.	184
Figura 123 - Séries temporais de salinidade na pré-modelagem do período seco, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.....	185
Figura 124 - Isolinhas de salinidade ao final da pré-modelagem do período seco, correspondente a condição inicial do referido período, no instante de tempo 01/10/2018 00h00.....	186
Figura 125 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes as estações localizadas na laguna Mundaú.	186
Figura 126 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Mundaú.	187
Figura 127 - Isolinhas de salinidade no instante de tempo 26/11/2018 21h00, correspondente ao momento de maior salinidade na estação “Mu Centro”.	187
Figura 128 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.....	188
Figura 129 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Manguaba.....	188
Figura 130 - Isolinhas de ocorrência temporal de águas com salinidade entre 5 e 15 ups, em referência ao período seco, de 01/10/2018 00h00 até 01/01/2019 00h00. Nota-se que essa faixa de salinidade é considerada a ideal para o sururu na laguna Mundaú. No mapa, as regiões na cor azul escuro indicam a ocorrência de 100% de águas com salinidade abaixo de 5 ups, ou então, superior a 15 ups.	190
Figura 131 - Séries temporais de temperatura nas estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, além dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco.	191
Figura 132 - Mapas de isolinhas de temperatura em referência ao período chuvoso. À esquerda, para o instante de menor temperatura na estação “Mu Centro”, no tempo 24/07/2018 09h00. À direita, para o instante de maior temperatura na mesma estação, no tempo 13/05/2018 17h00.	192
Figura 133 - Mapas de isolinhas de temperatura em referência ao período seco. À esquerda, para o instante de menor temperatura na estação “Mu Centro”, no tempo 12/10/2018 07h30. À direita, para o instante de maior temperatura na mesma estação, no tempo 09/12/2018 17h00.	192
Figura 134 - Valores de T ₉₀ , em horas, referentes à foz do canal de drenagem urbana P28 ANA, ao sul da laguna Mundaú. Nota-se, à esquerda, os valores no período chuvoso, de 22/07/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00, enquanto que, à direita, no período seco, de 07/12/2018 00h00 até 17/12/2018 00h00.	195

Figura 135 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 1º cenário do período chuvoso, de 01/05/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00.	196
Figura 136 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 1º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.	197
Figura 137 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 1º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.	197
Figura 138 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 1º cenário do período seco, de 01/10/2018 00h00 até 01/01/2019 00h00..	198
Figura 139 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 1º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.	198
Figura 140 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 1º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.	199
Figura 141 - Mapa de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00.	199
Figura 142 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.	200
Figura 143 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.	200
Figura 144 - Mapa de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00.	201
Figura 145 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.	201
Figura 146 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.	202
Figura 147 - Quantidade de amostras do IMA-AL (2012, 2013, 2016) que atenderam ao padrão da categoria satisfatória, gráfico à esquerda, e quantidade de amostras que se enquadraram na categoria imprópria, gráfico à direita.	206
Figura 148 - Valores de colimetria obtidas pela ANA (2012c), em diversos pontos da laguna Mundaú, nas condições de maré enchente (PM) e maré vazante (BM).	207
Figura 149 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 2º cenário do período chuvoso. Compare esse mapa com a Figura 135, que retrata o 1º cenário.	210
Figura 150 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 2º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 136, que retrata o 1º cenário....	210

Figura 151 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 2º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 137, que retrata o 1º cenário....	211
Figura 152 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 2º cenário do período seco. Compare esse mapa com a Figura 138, que retrata o 1º cenário.	211
Figura 153 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 2º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 139, que retrata o 1º cenário.	212
Figura 154 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de 1.0E+3 NMP/100 mL no 2º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 140, que retrata o 1º cenário.	212
Figura 155 - Mapa de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00. Compare esse mapa com a Figura 141, que retrata o 1º cenário.....	213
Figura 156 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 142, que retrata o 1º cenário.	213
Figura 157 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 143, que retrata o 1º cenário.	214
Figura 158 - Mapa de isolinhas de colimetria no 2º cenário do seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00. Compare esse mapa com a Figura 144, que retrata o 1º cenário.	214
Figura 159 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 146, que retrata o 1º cenário.	215
Figura 160 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 146, que retrata o 1º cenário.	215

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de qualidade de água dispostas na Resolução CONAMA nº 357/2005, segundo os usos preponderantes em função da classificação quanto à salinidade.	37
Quadro 2 - Alguns estudos de modelagem ambiental do CELMM.	45
Quadro 3 - Resumo das principais questões relacionadas à poluição e à deterioração da qualidade ambiental do CELMM (ANA, 2006).	67
Quadro 4 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo (ϵ). Quadro extraído da Referência Técnica do SisBaHiA [®] (ROSMAN, 2023), adaptado de Abbott e Basco (1989).	81
Quadro 5 - Locais de amostragem de qualidade de água do IMA-AL e da ANA (2012c). ...	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões de qualidade de águas doces de alguns parâmetros selecionados, segundo as classes de qualidade dispostas na Resolução CONAMA nº 357/2005.	38
Tabela 2 - População urbana, rural e total, em valores absolutos e em porcentagens, segundo as bacias contribuintes ao CELMM (IBGE, 2010).....	54
Tabela 3 - População urbana e total nas bacias contribuintes, em valores absolutos e em porcentagens, segundo os municípios do entorno do CELMM (IBGE, 2010).....	54
Tabela 4 - Classes de vegetação e usos do solo, em função da área ocupada e da porcentagem em relação à área total analisada (ANA, 2006).	56
Tabela 5 - Proporção de domicílios particulares permanentes, por tipo de esgotamento sanitário (%), nas bacias contribuintes ao CELMM (IBGE, 2010). Nota-se ainda os dados de Alagoas e Pernambuco, do Nordeste e do Brasil. Observa-se que as porcentagens foram calculadas para cada zona, urbana e rural, de forma individual, considerando o total de domicílios particulares permanentes inseridos em cada uma delas.	60
Tabela 6 - Proporção de domicílios particulares permanentes, inseridos na área de contribuição ao CELMM, por tipo de esgotamento sanitário (%) (IBGE, 2010). Nota-se o destaque para os municípios de interesse. Observa-se que as porcentagens foram calculadas para cada zona, urbana e rural, de forma individual, considerando o total de domicílios particulares permanentes inseridos em cada uma delas.	61
Tabela 7 - Indicadores operacionais de esgotamento sanitário dos municípios de interesse e bacias contribuintes. Nota-se ainda a média dos municípios alagoanos e pernambucanos nas bacias de drenagem, além dos dados de Alagoas e Pernambuco, do Nordeste e do Brasil (SNIS, 2022).....	62
Tabela 8 - Estimativa do potencial poluidor, em Kg DBO ₅ /dia, gerado pelos efluentes sanitários e pelas usinas produtoras de açúcar e álcool (IBGE, 2010; ELIA NETO e SHINTAKU, 2009; Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool do estado de Alagoas, 2010/2011).	65
Tabela 9 - Constantes harmônicas da estação maregráfica Porto de Maceió, obtidas do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), com seus respectivos valores de período, amplitude e fase. Na tabela as constantes estão ordenadas por amplitudes decrescentes.	84
Tabela 10 - Principais informações das estações fluviométricas utilizadas neste estudo, e os valores calculados para incrementar as vazões (ANA, 2022).	88
Tabela 11 - Vazões características das estações fluviométricas utilizadas neste estudo (ANA, 2022), e os valores estimados para as bacias de drenagem.	90
Tabela 12 - Valores estimados de vazões de esgotos, separados por município, sub-bacias e corpo d'água receptor. Tabela elaborada com base no IBGE (2010), FUNASA (2019), ANA (2017), PMSB - Maceió/AL (2017) e SNIS (2022).	92
Tabela 13 - Vazões resultantes (drenagem + esgotos), nos respectivos meses dos períodos chuvoso e seco, apresentados por sub-bacias e corpo d'água receptor ou região receptora. ...	93
Tabela 14 - Informações referentes à precipitação na estação Usina Terra Nova - Hortelã, localizada próxima à margem da laguna Manguaba, e na estação Coqueiro Seco (ANA), à margem da laguna Mundaú, nos meses de interesse.	97
Tabela 15 - Colimetria, expressa em notação científica, do rio Mundaú e dos canais de drenagem urbana de Maceió, segundo dados da ANA (2012c), referente às coletas realizadas	

nos dias 4 e 5 de abril de 2012. Nota-se que os pontos de amostragem estão ilustrados na Figura 34.	110
Tabela 16 - Concentrações adotadas, por contribuintes fluviais, nas simulações do primeiro e segundo cenário, nos períodos chuvoso e seco.....	111
Tabela 17 - Constantes harmônicas, M2 e M4, em 8 estações, abrangendo a zona costeira, os canais de comunicação e as lagoas Mundaú e Manguaba. Nota-se também os valores calculados de M2/M4.	118
Tabela 18 - Informações relacionados ao nível d'água nas lagoas e na região dos canais, nos respectivos períodos. Nota-se que os dados de profundidade média e volume médio se referem ao corpo lagunar, e foram calculados em função do nível médio.	120
Tabela 19 - Diferenças entre os níveis médios das estações “Mu Centro”, “Ma Centro” e “Mar”, nos respectivos períodos.....	121
Tabela 20 - Resumo dos dados de qualidade de água obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), disponibilizados no Apêndice B. Nota-se que a localização dos pontos de amostragem encontra-se na Figura 33. Observa-se que valores limites dos parâmetros, relativo a cada classe de qualidade, foram apresentados na Tabela 1, na seção 3.5.	166
Tabela 21 - Avaliação, em porcentagem, do atendimento dos dados do IMA-AL (2012, 2013, 2016) às classes de qualidade de águas doces. Observa-se que valores limites dos parâmetros, relativo a cada classe de qualidade, foram apresentados na Tabela 1, na seção 3.5.	167
Tabela 22 - Resumo dos dados de salinidade obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), disponibilizados no Apêndice B. Nota-se que a localização e a denominação dos pontos de amostragem encontram-se na Figura 33 e no Quadro 5.	189
Tabela 23 - Resumo dos dados de temperatura obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), disponibilizados no Apêndice B. Nota-se que a localização e a denominação dos pontos de amostragem encontram-se na Figura 33 e no Quadro 5.	193
Tabela 24 - Dados de colimetria obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016). Nota-se ainda os valores provenientes da ANA (2012c), relativo à lagoa Mundaú. A localização e denominação dos pontos de amostragem encontram-se na Figura 33, Figura 34 e no Quadro 5. Os dias de coleta foram mencionados na seção 5.5.3.	206

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVO	24
3	REFERENCIAL TEÓRICO	25
3.1	Conceitos Gerais Sobre Sistemas Estuarinos	25
3.2	Lagoas Costeiras (Lagunas)	28
3.3	Conceitos sobre Qualidade de Água	31
3.4	Parâmetros de Qualidade de Água	32
3.5	Legislação sobre a Qualidade dos Recursos Hídricos Superficiais.....	36
3.6	Tempos Hidráulicos Característicos (THC)	39
3.7	Modelagem Matemática em Recursos Hídricos.....	41
3.8	Estudos de Modelagem Ambiental do CELMM.....	44
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
4.1	Localização e Descrição do CELMM e das Principais Bacias Contribuintes.....	48
4.2	Uso e Ocupação do Solo e Aspectos Socioeconômicos.....	52
4.3	Saneamento Básico – Panorama do Esgotamento Sanitário	58
4.4	Potencial Poluidor e Degradação Ambiental nas Bacias Contribuintes ao CELMM	64
5	METODOLOGIA	68
5.1	Modelo Computacional Adotado	68
5.1.1	Modelo Hidrodinâmico (MH)	69
5.1.2	Modelo de Transporte Euleriano (MTE).....	70
5.1.3	Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA).....	71
5.1.4	Modelo de Transporte Lagrangeano (MTL)	72
5.2	Modelagem Digital de Terreno	73
5.2.1	Domínio de Modelagem e Malha de Discretização	74
5.2.2	Batimetria	75
5.2.3	Rugosidade Equivalente de Fundo	80
5.3	Modelagem Hidrodinâmica	82
5.3.1	Cenários de Modelagem.....	82
5.3.2	Dados Ambientais	83
5.4	Modelagem para Análises de Tempos Hidráulicos Característicos (THC)	98
5.4.1	Tempo de Residência (T_R)	98
5.4.2	Tempos de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$).....	99
5.4.3	Idade da Água (I_A).....	100
5.5	Modelagem de Qualidade de Água	102
5.5.1	Modelagem de Salinidade	102

5.5.2	Modelagem de Temperatura.....	103
5.5.3	Dados de Qualidade de Água	106
5.5.4	Modelagem da Dispersão e Decaimento de Plumas de Coliformes Termotolerantes	108
5.5.4.1	Cenários de Modelagem.....	109
5.5.4.2	Dados Ambientais	109
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	113
6.1	Análises dos Modelos Hidrodinâmicos.....	113
6.1.1	Estações.....	113
6.1.2	Calibração e Validação dos Modelos Hidrodinâmicos	114
6.1.3	Propagação da Maré	116
6.1.4	Caracterização da Maré	121
6.1.5	Padrões de Circulação Hidrodinâmica	124
6.2	Análises dos Modelos de Tempos Hidráulicos Característicos (THC).....	153
6.2.1	Tempo de Residência (T_R)	153
6.2.2	Tempos de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$).....	156
6.2.3	Idade da Água (I_A).....	167
6.2.3.1	A Idade da Água (I_A) e o Índice de Estado Trófico	175
6.3	Análises dos Modelos de Salinidade	176
6.4	Análises dos Modelos de Temperatura	190
6.5	Análises da Dispersão e Decaimento de Plumas de Coliformes Termotolerantes...	194
7	CONCLUSÃO	217
8	RECOMENDAÇÕES	220
9	REFERÊNCIAS	221
	APÊNDICE A – PARÂMETROS CONSIDERADOS NO MH, MQA, MTE E MTL ..	235
	APÊNDICE B – DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA OBTIDOS DO IMA-AL	237

1 INTRODUÇÃO

As zonas costeiras abrangem cerca de 12% da superfície do planeta, o que corresponde a menos de 20% da superfície terrestre. No entanto, elas concentram um grande contingente populacional, uma vez que em torno de 40% da população mundial vive a uma distância de até 100 km da costa (COSTANZA et al., 1997; CROSSLAND et al., 2005; HOOKE, DUQUE e PEDRAZA, 2012; KUMMU et al., 2016; FAN et al., 2019). As regiões costeiras apresentam grande interesse do ponto de vista político, econômico e ecológico, pois a sua localização propicia que sejam desenvolvidas diversas atividades como portuária, pesca, exploração de recursos – petróleo, gás e outros – turismo, navegação, lazer, entre outras, além de possuir uma rica biodiversidade em espécies de fauna e flora, contando ainda com capacidade natural para renovação de suas águas (CROSSLAND et al., 2005; BARBIER et al. 2012; COTOVICZ Jr, 2012; PELLING e BLACKBURN, 2013; FAN et al., 2019).

Os ecossistemas costeiros se tornaram cada vez mais suscetíveis aos impactos de origem antrópica. Isso ocorre como reflexo da crescente ocupação humana e exploração não sustentável dos recursos naturais. Os impactos de origem antrópica são provenientes, principalmente, das bacias hidrográficas, com significativo aporte de poluição a esses ambientes. Tal fato implicou numa crescente degradação da qualidade ambiental, observada através das mudanças ocorridas no meio natural, tal como, o aumento nas concentrações de matéria orgânica, nutrientes – nitrogênio e fósforo – metais, sedimentos, pesticidas, organismos patogênicos, substâncias químicas tóxicas, entre outros (DAFFORN et al., 2015; NEWTON et al., 2016; MIRANDA et al., 2017; FAN et al., 2019).

Nas zonas costeiras encontram-se ambientes complexos constituídos de corpos de água distintos, na zona de transição entre um sistema eminentemente fluvial e um sistema puramente marinho. Estes ambientes são denominados estuários. Os estuários podem apresentar significativa variabilidade espacial e temporal, dados em função de suas características geomorfológicas e das forçantes ambientais a que estão expostos, como, por exemplo, as marés, as descargas fluviais, os ventos e os gradientes de densidade, devido à salinidade e a temperatura (DYER, 1997; MIRANDA et al., 2017).

O ambiente estuarino abordado neste estudo é o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), localizado no litoral do estado de Alagoas. Trata-se de uma área considerada de grande relevância social, econômica, cultural e ambiental para o estado e, principalmente, para a capital, Maceió. As atividades desenvolvidas na região do CELMM e nas bacias contribuintes possibilitaram seu crescimento e desenvolvimento. Tais atividades eram

realizadas por meio de exploração exaustiva e não sustentável dos seus recursos naturais, ocasionando um acelerado processo de degradação ambiental que comprometeu o patrimônio natural e os valores culturais locais (ANA, 2006; LIMA, 2017). Dentre as atividades potencialmente poluidoras, cita-se as usinas produtoras de açúcar e álcool, que geram efluentes com elevada carga orgânica (OLIVEIRA e KJERFVE, 1993; ANA, 2006; COTOVICZ Jr, 2012).

Associado às questões econômicas, destaca-se o intenso processo de urbanização. Este ocorreu de forma desordenada e não foi acompanhado pela expansão da infraestrutura social e urbana, em especial dos serviços de saneamento referentes à coleta e tratamento de esgotos. Segundo dados provenientes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), considerando como referência o período de 2011 a 2021, percebe-se que diversos municípios inseridos total ou parcialmente nas bacias contribuintes ao CELMM não dispõem de informações sobre os indicadores operacionais de esgotamento sanitário. Isso corresponde a 43% dos municípios. Daqueles que possuem dados, nota-se uma acentuada carência em termos de coleta e tratamento dos esgotos (ANA, 2006; ANA, 2017; PMSB - MACEIÓ/AL, 2017; SNIS, 2022).

O aporte de cargas poluidoras industriais e domésticas comprometem uma das mais relevantes atividades praticadas nas lagunas, que é a pesca. Especialmente na laguna Mundaú, a pesca é praticada artesanalmente e de forma extrativa. Dentre as espécies encontradas – crustáceos, moluscos e peixes – notabiliza-se o molusco *Mytella charruana*, conhecido como sururu, que é fonte de renda para milhares de moradores do entorno, além de ser um alimento típico da região. De forma geral, a produção pesqueira de sururu varia em quantidade ao longo do ano. No período seco, verão, é o período de maior produção, enquanto no período chuvoso, inverno, há uma diminuição, com possibilidade de desaparecimento temporário do molusco. Em decorrência da poluição, e conseqüente piora na qualidade ambiental das lagunas, a exploração dos recursos pesqueiros vem sendo prejudicada, de tal modo que os pescadores têm sido forçados a buscar outros meios de sustento (COUTINHO et al., 2014; LIMA, 2017; RIBAS, JUNKES e RODRIGUES, 2019).

Nesse cenário é justificável que sejam realizados estudos e pesquisas que auxiliem no planejamento e desenvolvimento de mecanismos de gestão sustentável, capazes de proporcionar padrões adequados de qualidade ambiental, compatíveis com os usos múltiplos dos recursos hídricos. Dessa forma, a adequada gestão do CELMM deve se pautar no conhecimento da hidrodinâmica ambiental desse sistema. Com base nisso, a modelagem computacional apresenta-se como uma ferramenta indispensável para melhor compreender os aspectos quali-quantitativos em corpos d'água naturais complexos, por ser capaz representar satisfatoriamente o

movimento das águas, isto é, a circulação hidrodinâmica, e o transporte de constituintes, relacionado à qualidade de água (ANDRADE, 2018; SILVA, 2019; ROSMAN, 2023). Segundo Rosman (2023), modelos de hidrodinâmica ambiental, quando bem empregados, permitem, de forma confiável, entender processos dinâmicos, auxiliando na interpretação de medições feitas em estações pontuais; otimizar os custos de monitoramento e medição, integrando informações espacialmente dispersas; prever situações simulando cenários para estudos e projetos; determinar o destino de prováveis contaminantes e outros constituintes; entre outras ações.

Diante do exposto, foram realizadas modelagens ambientais com o intuito de aprofundar os conhecimentos quanto à hidrodinâmica, renovação e qualidade de água do CELMM. Os resultados fornecerão subsídios para propor melhores práticas de gestão e gerenciamento ambiental, com o intuito de reduzir a deterioração da qualidade deste ambiente.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste estudo é caracterizar padrões de circulação hidrodinâmica, renovação e qualidade das águas no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). O trabalho foi feito com auxílio de modelagem computacional.

Este estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- Implementar, calibrar e validar o modelo hidrodinâmico para dois cenários: período chuvoso (outono-inverno) e período seco (primavera-verão);
- Analisar os Tempos Hidráulicos Característicos (THC), considerando os conceitos de Tempo de Residência (T_R), Tempos de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) e Idade da Água (I_A), em diferentes setores do sistema lagunar;
- Analisar as variações espaciais e temporais de salinidade e temperatura;
- Simular a dispersão e o decaimento das plumas de coliformes termotolerantes, para diferentes cenários de esgotamento sanitário nas bacias contribuintes;
- Avaliar, perante a Legislação vigente, a balneabilidade das águas, através dos resultados da modelagem, como também por meio de dados obtidos de qualidade de água.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os conceitos gerais sobre os sistemas estuarinos. São apresentados conceitos sobre qualidade das águas e principais parâmetros de qualidade, mencionando a legislação vigente sobre a qualidade dos recursos hídricos superficiais. Trata-se, ainda, sobre Tempos Hidráulicos Característicos e sua relevância para a qualidade das águas. Por fim, discorre-se sobre a utilização de modelos computacionais como ferramentas de gestão capazes de contribuir de forma significativa em estudos ambientais envolvendo corpos d'água naturais, relatando alguns trabalhos de modelagem ambiental no CELMM.

3.1 Conceitos Gerais Sobre Sistemas Estuarinos

Diversas definições de estuário podem ser encontradas na literatura. Essas definições se fundamentam nas características e processos essenciais que ocorrem em seu interior, bem como no contexto em que o estuário está inserido, possibilitando a aplicação de critérios adequados de classificação. Uma das definições clássicas, dada por Pritchard (1955) e Cameron e Pritchard (1963), é que um estuário é um corpo d'água costeiro semifechado, com livre ligação com o mar aberto, onde a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. Segundo Miranda et al. (2017), a definição possivelmente mais satisfatória é uma adaptação da definição de Pritchard (1955), elaborada por Dyer (1997). Nessa definição, um estuário é um corpo d'água costeiro semifechado com ligação livre com o mar, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que, em seu interior, a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental.

Alguns estuários podem apresentar configurações morfológicas bem complexas. Nesses casos, existem em seu interior descargas fluviais em diferentes pontos da região semifechada, além de múltiplas cabeceiras e, eventualmente, diferentes ligações com o oceano adjacente. Esses ambientes são caracterizados por constituírem subsistemas estuarinos com propriedades e comportamentos hidrodinâmicos distintos. Esse conjunto de estuários concentrados em uma determinada região são tradicionalmente referidos na literatura como sistema estuarino (MIRANDA et al., 2017), como, por exemplo, o Sistema Estuarino de Santos (São Paulo, Brasil). Geralmente, os sistemas estuarinos apresentam ecossistemas mais biologicamente produtivos do que os rios e o oceano adjacente, devido ao grande intercâmbio de materiais bióticos e abióticos provenientes de outros ecossistemas, incluindo água, sais minerais, nutrientes, sedimentos, matéria orgânica e organismos (YÁÑEZ-ARANCIBIA, 1987; SILVA et al., 2004; MIRANDA et al., 2017).

As mudanças constantes, em resposta às forçantes de origem natural, também ocorrem em virtude da interferência humana nesses ambientes. Há diversos centros urbanos densamente povoados que estão próximos ou mesmo inseridos em regiões estuarinas, onde se desenvolveram diversas atividades socioeconômicas, entre elas, atividade portuária, pesca, exploração de recursos – petróleo, gás e outros –, turismo, recreação, navegação, lazer, entre outras (MIRANDA et al., 2017).

A compreensão da dinâmica ambiental dos sistemas estuarinos se baseia no entendimento das forçantes que interferem na circulação hidrodinâmica. As principais forçantes são as marés; as descargas fluviais; os ventos, que induzem tensões de atrito na superfície livre; as tensões de atrito no fundo, responsáveis pela resistência ao escoamento; os gradientes de pressão devido às variações de densidade, em função da salinidade e temperatura; e a circulação costeira adjacente. Como fatores que condicionam a atuação das forçantes, citam-se a geometria e a topografia de fundo. De modo geral, as forçantes atuam de forma variada no espaço e variável no tempo (ROSMAN, 2023).

As variações de nível d'água no interior e exterior dos sistemas estuarinos são, em geral, as principais forças indutoras da circulação hidrodinâmica, influenciando fortemente nos processos de transporte e mistura no interior dos estuários. Na zona externa, as variações do nível do mar ocorrem em resposta às forças gravitacionais geradas, principalmente, pela Lua e pelo Sol, que produzem a onda de maré. Menciona-se, também, que as oscilações do nível do mar podem ser influenciadas por efeitos meteorológicos, relacionados as mudanças na pressão atmosférica, que afetam o sentido e a intensidade dos ventos. As diferenças de nível d'água entre a região externa e interna dos sistemas estuários faz surgir um gradiente de pressão, de natureza barotrópica. A força gerada pelo gradiente de pressão induz o escoamento das águas, da região onde o nível d'água é mais alto para a região onde o nível d'água é mais baixo. Deste modo, ocorre, de forma alternada, correntes de maré estuário acima, enchente, e correntes estuário abaixo, vazante (MIRANDA et al., 2017).

Dada a importância das marés na circulação hidrodinâmica, é válido mencionar algumas informações importantes, que serão fundamentais para compreender os resultados deste estudo. No ciclo de maré, o período (T) corresponde ao intervalo de tempo entre a ocorrência sucessiva de duas cristas, ou então, dois cavados, em uma posição fixa. A crista é chamada de preamar (PM), equivalente ao nível máximo, enquanto que o cavado, denomina-se de baixa-mar (BM), correspondendo ao nível mínimo. A diferença entre esses pontos é conhecida como a altura da maré, e a metade da altura, como amplitude da maré, ou seja, é igual ao desnível existente entre a PM, ou a BM, e o Nível Médio do Mar (NMM). Naturalmente, as alturas de maré variam ao

longo do tempo, e as diferenças mais significativas observadas estão relacionadas as fases da Lua, de modo que nas fases *cheia* ou *nova* ocorrem as maiores alturas, sendo chamadas de marés de sizígia (SG). Em contrapartida, nas fases *quarto crescente* ou *minguante*, notam-se as menores alturas, denominadas marés de quadratura (QD).

Na zona interna dos sistemas estuarinos, as oscilações de nível podem ser relacionadas às variações nas descargas fluviais. A descarga fluvial é um componente significativo para a circulação estuarina, na medida em que impulsiona as massas de água em direção à embocadura do estuário. Além disso, proporciona a diluição da água do mar, produzindo um gradiente longitudinal de salinidade, que ocasiona a indução de movimentos estuário acima, em decorrência das diferenças de densidade. Esses movimentos estuário acima, forçados pelo gradiente longitudinal de pressão, possuem natureza baroclínica. De forma geral, é um movimento essencialmente em duas dimensões, bidirecional em duas camadas, responsável pelo efeito advectivo e pelos transportes de volume e de sal estuário abaixo e estuário acima, nas camadas superior e inferior, respectivamente. Em relação à temperatura, esta possui, na maioria dos casos, uma influência relativamente pequena na geração de gradientes de densidade (MIRANDA et al., 2017).

A ação dos ventos caracteriza-se como uma forçante meteorológica capaz de gerar ondas e correntes nos estuários, promovendo a aeração e a mistura das massas de água. Geralmente, quanto maior for área superficial do corpo d'água, mais relevantes são efeitos provocados pelos ventos (MIRANDA et al., 2017). Já a topografia de fundo e a geometria, geralmente, apresentam configurações bastante complexas e tendem a exercer grande influência no condicionamento das forçantes que atuam nesses ambientes. Conseqüentemente, estão intimamente relacionadas à dinâmica estuarina, influenciando a circulação hidrodinâmica, isto é, os níveis e as correntes; a distribuição de suas propriedades, tal como a salinidade; e os processos morfológicos, relativo à dinâmica sedimentológica. De modo geral, os estuários estão em constante evolução, mudando de forma e adaptando-se tanto às mudanças nos fluxos fluviais e marinhos, como também aos padrões climáticos (DYER, 1997).

Mesmo com o significativo conhecimento já adquirido a respeito da circulação estuarina, ainda há aspectos que não são bem compreendidos. Dentre eles estão as interações entre processos físicos, químicos, biológicos e geológicos, que podem influenciar consideravelmente a qualidade das águas estuarinas. Esta, por sua vez, foi cada vez mais afetada pela crescente pressão antrópica nas áreas próximas aos estuários, em decorrência da expansão do contingente populacional e das atividades econômicas, com a instalação, por exemplo, de complexos industriais (MIRANDA et al., 2017). Como consequência, aumentaram-se os lançamentos de carga

orgânica, nutrientes, metais, pesticidas, organismos patogênicos, substâncias químicas tóxicas, entre outros, nas áreas estuarinas. Ocorreram, ainda, mudanças que alteraram as características geométricas, devido, entre outros aspectos, à dragagem ou ao aumento no fluxo de sedimentos provenientes da drenagem continental. Em razão disso, esses sistemas se tornaram cada vez mais suscetíveis à degradação ambiental, pondo em risco sua sustentabilidade. Dentre os diversos sistemas estuarinos impactados por atividades antrópicas, mencionam-se alguns. No Brasil, o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba, no estado de Alagoas; a Baía de Guanabara e a Lagoa de Araruama, no estado do Rio de Janeiro; a Baía de Todos os Santos, no estado da Bahia; o Sistema Estuarino de Santos, no estado de São Paulo; entre outros. No exterior, a Baía de Homebush, em Sydney, na Austrália; a Baía de Chesapeake e o estuário Hudson-Raritan, nos EUA; entre outros.

3.2 Lagoas Costeiras (Lagunas)

Segundo Kjerfve (1994), as lagunas abrangem cerca de 13% das áreas costeiras em todo o mundo. São corpos d'água, em geral, rasos, normalmente orientados paralelamente à costa, interligados ao oceano, pelo menos intermitentemente, por um ou mais canais. Foram formados como consequência da elevação do nível do mar, principalmente, durante o Holoceno, e da construção das restingas arenosas através de processos marinhos, que isolaram parcialmente ou totalmente esses corpos d'água do oceano. São ambientes vulneráveis às influências naturais e antrópicas. São efêmeros na escala de tempo geológico e sua existência depende das variações do nível do mar, da sedimentação no seu interior, dentre outros fatores. Nota-se que, geralmente, a sedimentação em seu interior tende a se intensificar com o desenvolvimento urbano e a atividade agrícola nas áreas adjacentes. Por serem rasas e típicas de planícies costeiras, as lagunas respondem rapidamente às condições meteorológicas sinóticas e sazonais (FERNANDEZ, 1994; KJERFVE, 1994; MIRANDA et al., 2017).

Normalmente, as lagunas retêm e acumulam sedimentos, principalmente, de granulometria fina. Os depósitos são derivados tanto de fontes externas, entre elas, os rios, o oceano, as margens e barreiras; como também de fontes internas, por exemplo, produção orgânica, precipitação química de sal, calcita e dolomita, além da erosão de depósitos mais antigos. Destaca-se, também, a presença de matéria orgânica, nutrientes, conchas, turfa, dentre outros. Habitualmente, os sedimentos são transportados para as lagunas por meio dos rios, correntes de maré e ventos. Os processos de distribuição, deposição e acumulação de sedimentos dentro das lagunas estão intrinsecamente associados à disponibilidade de sedimentos, à energia disponível para sua mobilização e transporte, e ao comportamento hidrodinâmico das partículas de sedimento

(HEDGES e KEIL, 1995; SILVA et al., 2004; RIBEIRO, KNOPPERS e CARREIRA, 2011).

Frequentemente, esses ambientes exibem altas taxas de produção primária e secundária, devido, entre outros fatores, à elevada disponibilidade de nutrientes. Podem apresentar grande diversidade biológica. Em síntese, são ecossistemas eficientes na retenção e ciclagem de material biogênico, sendo, portanto, ricos em materiais orgânicos de origem autóctone, ou seja, local, e alóctone, de origem externa, em razão da minimização das marés, ondas e correntes (NIXON, 1982; KNOPPERS, 1994; KNOPPERS, BIDONE e ABRÃO, 1999; SILVA et al., 2004; COTOVICZ Jr, 2012).

Os sistemas lagunares são considerados ecossistemas de grande relevância econômica e social. São utilizados para o desenvolvimento de diversas atividades, como a pesca, aquicultura, piscicultura, extração de sal, entre outras. Em contrapartida, a intensa exploração dos recursos naturais torna essas áreas alvo de atividades humanas potencialmente poluidoras, tornando-as vulneráveis à degradação ambiental – um exemplo é a eutrofização, através do enriquecimento de nutrientes, nitrogênio e fósforo, acarretando num crescimento excessivo de algas e demais espécies fotossintetizantes. Como consequência, observam-se diversos efeitos deletérios no corpo d'água, que, de forma geral, prejudicam os usos pretendidos (NIXON, 1995; KNOPPERS, BIDONE e ABRÃO, 1999; LIMA, 2016).

Relativo à circulação hidrodinâmica, as principais forçantes são as marés, as descargas fluviais e os ventos. Os balanços precipitação-evaporação, e também de calor, podem ser relevantes na hidrodinâmica, principalmente, em lagunas que apresentam grande superfície livre e que se localizam em regiões tropicais e subtropicais (MIRANDA et al., 2017). Dada a importância das trocas de massas de água com a região costeira adjacente, as lagunas foram classificadas, conforme exposto na Figura 1, do ponto de vista geomorfológico, segundo as características dos canais que as conectam com o oceano (KJERFVE, 1986; KJERFVE e MAGILL, 1989), a saber:

- *Lagunas sufocadas*: são conectadas ao oceano adjacente através de um único canal estreito;
- *Lagunas restritas*: as trocas de água com o oceano adjacente ocorrem através de dois ou mais canais estreitos;
- *Lagunas vazadas ou abertas*: são corpos d'água alongados que apresentam múltiplas conexões com o oceano, isto é, múltiplos canais de maré.

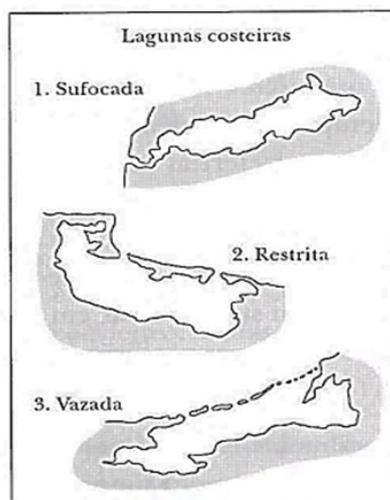


Figura 1 - Classificação das lagunas, do ponto de vista geomorfológico, segundo as características dos canais que as conectam com o oceano (Kjerfve, 1986).

As lagunas Mundaú e Manguaba se enquadram na categoria de *sufocadas*. Nesta categoria, o canal de maré atua como um filtro dinâmico e, conseqüentemente, os efeitos da oscilação da maré e das correntes associadas são muito atenuados no interior das lagunas. Geralmente são formadas por uma série de células elípticas, sendo típicas de regiões costeiras com alta energia das ondas de gravidade, significativa deriva litorânea e maré com altura moderada, ou seja, regime de mesomaré. Além disso, normalmente apresentam grandes tempos de descarga, efeito dominante do vento e variação intermitente da estratificação vertical devido ao aquecimento solar e à descarga fluvial (KJERFVE e KNOPPERS, 1991; KJERFVE et al., 1996). Por apresentar maior restrição de comunicação com o oceano adjacente, as lagunas sufocadas tendem a acumular mais poluentes/contaminantes do que aquelas com maior capacidade de troca de massas de água. Devido a esta condição, são ambientes mais propícios a apresentarem problemas de qualidade de água relacionados à baixa capacidade de exportação de suas águas. A capacidade de exportação de massas de água pode ser associada, de forma inversamente proporcional, ao Tempo Hidráulico Característico (THC) denominado Tempo de Residência (T_R), que reflete o tempo de residência das massas de água no interior do corpo hídrico, como será abordado na seção 3.6. Ao se comparar os valores de T_R com as escalas de tempo dos processos biogeoquímicos, pode-se inferir o grau de suscetibilidade do corpo d'água aos processos cinéticos relacionados à eutrofização. Deste modo, os ambientes que apresentam valores de T_R menores que aqueles demandados por determinados processos biogeoquímicos, provavelmente, não terão a qualidade tão afetada por estes. Caso ocorra o contrário, os efeitos provocados na qualidade podem se tornar bastante expressivos, como, por exemplo, a ocorrência frequente de florações de algas/cianobactérias em uma extensa área do corpo de água (KJERFVE, 1986; KNOPPERS,

BIDONE e ABRÃO, 1999; LIMA, 2016; MIRANDA et al., 2017).

Quanto à salinidade, esta é influenciada pelas condições climáticas e geomorfológicas. É controlada, principalmente, pelas trocas de água com o oceano adjacente, pela descarga fluvial, pela infiltração através do lençol freático e pelo balanço de precipitação-evaporação. A variabilidade de salinidade, em termos espaciais e temporais, pode ser interpretada como indicador primário da circulação estuarina graças ao seu caráter conservativo (MIRANDA et al., 2017). A salinidade interfere na qualidade de água e nos processos tróficos. Além disso, caracteriza-se como um fator significativo para produtividade biológica, distribuição de organismos e estrutura de habitat. Desempenha, portanto, a função de barreira ecológica para os organismos, pois controla as espécies de flora e de fauna que podem sobreviver nas águas, nos sedimentos e ao longo das margens dos ambientes estuarinos (KJERFVE e MAGILL, 1989; KJERFVE, 1994; SILVA et al., 2004). Em relação à classificação dos ambientes quanto à salinidade, pode-se destacar aquela proposta pelo Sistema de Veneza (VENICE SYSTEM, 1958). Essa classificação é amplamente utilizada e enquadra os sistemas aquáticos em seis classes, a saber: águas doces (< 0.5 ‰), oligohalina (0.5 a 5 ‰), mesohalina (5 a 18 ‰), polihalina (18 a 30 ‰), euhalina (30 a 40 ‰) e hiperhalina (> 40 ‰). Ressalta-se que salinidade também pode ser expressa pelo termo ups, que significa, unidade prática de salinidade, sendo equivalente a ‰.

3.3 Conceitos sobre Qualidade de Água

O conceito de qualidade de água está associado a composição e concentração de diversas substâncias que podem estar presentes na água. Dessa forma, a qualidade da água está relacionada às suas propriedades, em termos físicos, químicos e biológicos, em especial, à sua composição em função das espécies químicas presentes, tanto de substâncias orgânicas quanto inorgânicas (BARTRAM e BALLANCE, 1996; VON SPERLING, 2014; BIAN, LIU e DING, 2019). A qualidade da água é consequência de fenômenos naturais e da atuação humana sobre os recursos hídricos. De certa maneira pode-se associar a qualidade de uma determinada água em função das condições naturais e do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica (VON SPERLING, 2007). Do mesmo modo, Tucci, Hespanhol e Cordeiro Netto (2001) citam que a qualidade da água depende das condições geológicas, geomorfológicas e da cobertura e composição do solo da bacia de drenagem, que interferem no tipo e quantidade de sedimentos e matéria orgânica carregados para o corpo d'água, além dos ecossistemas terrestres e das ações antrópicas.

A qualidade está associada, ainda, à compatibilização e adequação para determinados usos. Assim, os usos mais nobres, como abastecimento, exigem uma qualidade mais restritiva,

ao passo que para usos menos nobres, como a navegação, a qualidade não é um fator relevante. Pode-se entender o termo “qualidade mais restritiva” como a condição restritiva ou valor limite, relativo aos parâmetros de qualidade, necessário ao atendimento dos requisitos de qualidade previstos em legislação, ou seja, ao padrão de qualidade compatível com determinado uso (BARTRAM e BALLANCE, 1996; BRAGA et al., 2005; BRASIL, 2005; VON SPERLING, 2014; MACHADO, KNAPIK e BITENCOURT, 2019; SOUZA e PIZELLA, 2021). Geralmente, as atividades antrópicas são responsáveis por gerar os maiores impactos no meio ambiente e provocar a deterioração da qualidade dos recursos hídricos. Segundo Tucci, Hespanhol e Cordeiro Netto (2001), as ações antrópicas que mais podem influenciar na diminuição da qualidade estão relacionadas aos lançamentos de cargas poluidoras, domésticas e/ou industriais, nos corpos d’água (WMO, 2013; VON SPERLING, 2014; VREBOS, BEAUCHARD e MEIRE, 2017).

3.4 Parâmetros de Qualidade de Água

Segundo Von Sperling (2014), a qualidade da água pode ser representada por meio de diversos parâmetros que expressam suas principais características físicas, químicas e biológicas. A análise desses parâmetros permite traçar relações entre as variações de suas concentrações e as diversas formas de poluição em uma bacia hidrográfica (CHAPMAN, 1996; WMO, 2013; HOWLADAR et al. 2021). Segundo Hespanhol (2009), a utilização dos parâmetros pode auxiliar na compreensão das tendências temporais de alteração da qualidade da água, assim como na detecção de violações dos padrões de qualidade. A grande quantidade de parâmetros que podem ser monitorados em corpos d’água permite que a qualidade da água seja analisada sob diversas perspectivas (BARTRAM e BALLANCE, 1996; CHAPMAN, 1996; WMO, 2013; SANTOS et al., 2018).

Os parâmetros de natureza física incluem cor, condutividade, turbidez, temperatura, sabor e odor, série de sólidos (totais, em suspensão, coloidais, dissolvidos, fixos e voláteis), entre outros. Os parâmetros químicos englobam o potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade, cloretos, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT), metais, micropoluentes inorgânicos e orgânicos, entre outros. Já os parâmetros biológicos se referem aos microrganismos presentes na água, como bactérias, algas, fungos, protozoários, vírus, helmintos, entre outros (SAWYER, 2003; VON SPERLING, 2014; METCALF e EDDY, 2016; JORDÃO e PESSÔA, 2017; CETESB, 2021). A seguir, são descritos, de forma sucinta, os parâmetros de qualidade simulados neste estudo.

▪ **Coliformes termotolerantes:** Segundo Von Sperling (2014), coliformes termotolerantes são um grupo de bactérias indicadoras de organismos originários predominantemente do trato intestinal humano e de animais homeotérmicos (WHO, 2017). São representados principalmente pela *Escherichia coli* e por algumas bactérias dos gêneros *Klebsiella*, *Enterobacter* e *Citrobacter* (CETESB, 2021). Dentre esses microrganismos, apenas a *E. coli* é de origem exclusivamente fecal, sendo encontrada em grande densidade nas fezes de humanos, de mamíferos e pássaros, e, raramente, em água ou solo que não tenham recebido contaminação fecal. Os demais podem ocorrer em águas com altos teores de matéria orgânica como, por exemplo, em determinados efluentes industriais ou em material vegetal e solo em processo de decomposição (VON SPERLING, 2014; JORDÃO e PESSÔA, 2017; CETESB, 2021). A determinação deste parâmetro ocorre por meio de métodos rápidos, simples e padronizados, sendo conduzido a elevadas temperaturas com objetivo de suprimir as bactérias que não sejam de origem fecal. No entanto, nestas condições ainda é possível haver presença de bactérias não fecais, isto é, de vida livre (VON SPERLING, 2014; CETESB, 2021). Dessa forma, os coliformes termotolerantes não são indicadores de contaminação fecal tão apropriados quanto a *E. coli*, mas seu uso é aceitável para avaliar a qualidade de água e estimar a possível presença de organismos patogênicos causadores de doenças. Na legislação brasileira, os coliformes termotolerantes são utilizados como padrão para qualidade microbiológica de águas superficiais destinadas a abastecimento, recreação, irrigação e piscicultura (CETESB, 2021).

▪ **Salinidade:** A salinidade é um parâmetro que representa o teor de sais dissolvidos na água. Usualmente, é expressa em partes por mil (‰) (OHREL e REGISTER, 2006) ou unidade prática de salinidade (ups). Nos corpos d'água, os sais podem ser originários da dissolução de minerais, mas também da intrusão de águas salinas, como ocorre nos ambientes estuarinos. Outra fonte de adição de sais são os despejos domésticos e industriais (VON SPERLING, 2014). Em ambientes aquáticos, a salinidade influencia na qualidade de água devido aos seus efeitos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do meio. Por exemplo, o efeito da salinidade nas concentrações de OD e nas reações cinéticas (SOUZA, 2009; FARIAS, RODRIGUES e PEREZ, 2019; ROSMAN, 2023). Além disso, a salinidade pode atuar como barreira ecológica ao desenvolvimento e à sobrevivência de espécies de fauna e flora (KJERFVE e MCGILL, 1989; KJERFVE, 1994), e pode causar restrição a determinados usos dos recursos hídricos (BRAGA et al., 2005; SOUZA e PIZELLA, 2021).

▪ **Temperatura:** A temperatura é uma grandeza física que indica o grau de agitação das moléculas que constituem um corpo. Quanto maior a agitação, maior será a temperatura, e vice-versa. Se dois corpos possuem temperaturas diferentes, ocorrerá a transferência de energia

térmica do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura, até que o equilíbrio térmico seja atingido. Essa transferência, ou fluxo de energia, denomina-se calor. Nos corpos d'água superficiais, a temperatura é influenciada por causas naturais e antrópicas. Pelos meios naturais, a temperatura varia em função de diversos fatores, tais como, latitude, altitude, estação do ano, período do dia, cobertura de nuvens, taxa de fluxo de energia e profundidade. Pelos meios antrópicos, as variações de temperatura podem ser relacionadas, por exemplo, aos despejos indústrias e as águas de torres de resfriamento (CETESB, 2021). O monitoramento da temperatura é importante na medida em que este parâmetro afeta as propriedades da água, as concentrações dos elementos presentes no meio e os diversos processos que ocorrem nos corpos aquáticos. De acordo com Von Sperling (2014), elevações na temperatura aumentam a taxa das reações físicas, químicas e biológicas, além de diminuir a solubilidade dos gases na água, como oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio (N₂), metano (CH₄), entre outros. Além disso, maiores temperaturas provocam um aumento na evaporação e na volatilização de substâncias para a atmosfera (WMO, 2013). Em termos de atividade biológica, a temperatura interfere na taxa metabólica dos organismos aquáticos, alterando a velocidade das reações bioquímicas aeróbicas e anaeróbicas. Cita-se também que a densidade e a viscosidade da água são afetadas pela temperatura, além de várias outras variáveis (WMO, 2013; CETESB, 2021).

Ao longo do trabalho, outros parâmetros de qualidade de água são citados, tais como, OD, DBO₅, nitrogênio, fósforo e clorofila *a*. Estes parâmetros não foram simulados, porém, foram apresentados os seus valores – com exceção da clorofila *a* – com o intuito de caracterizar a qualidade das águas doces afluentes, que contribuem para a renovação das águas do CELMM. Sendo assim, descreve-se, de forma sucinta, esses demais parâmetros de qualidade.

- **Oxigênio Dissolvido (OD):** Segundo Chapman (1996), o OD está envolvido ou influencia praticamente todos os processos biológicos e químicos que ocorrem nos corpos d'água, como também é essencial para a sobrevivência dos seres aquáticos aeróbios. Segundo o mesmo autor, os valores de OD podem, naturalmente, oscilar conforme a temperatura, salinidade, pressão, profundidade, turbulência e com os ciclos biológicos locais, podendo apresentar variações sazonais e até mesmo diárias. O monitoramento do OD nos corpos d'água é de fundamental importância na avaliação e controle da qualidade das águas. De acordo com Von Sperling (2014), o OD é o principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição por despejos orgânicos. No ambiente aquático, os microrganismos decompositores oxidam a matéria orgânica biodegradável a compostos mais simples, consumindo o OD disponível. Além disso, outros processos também reduzem a concentração de OD, como, por exemplo, a nitrificação e a demanda bentônica, isto é, demanda de oxigênio pelo sedimento. Com valores de OD em torno de 4 a 5

mg/L, os peixes mais exigentes não sobrevivem; com OD igual a 2 mg/L, praticamente, todos os peixes não sobrevivem; e com OD igual a 0 mg/L, tem-se o estabelecimento de condições anaeróbicas, com alta possibilidade de ocorrência de maus odores, como também morte de seres aquáticos (VON SPERLING, 2014; JORDÃO e PESSÔA, 2017; CETESB, 2021).

▪ ***Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)***: A DBO é uma medida indireta da porção de matéria orgânica biodegradável presente na água. Representa a quantidade de oxigênio requerida pelos microrganismos aeróbios para oxidar a matéria orgânica a formas inorgânicas estáveis (CHAPMAN, 1996). Segundo Sawyer (2003), a análise da DBO é amplamente utilizada para determinar o potencial poluidor de efluentes domésticos e industriais. O autor menciona ainda que este parâmetro é um dos mais relevantes no controle de qualidade da água de rios e na avaliação de sua capacidade de autodepuração. Von Sperling (2014) cita que a DBO possui grande importância na caracterização do grau de poluição de um corpo d'água. Menciona-se, ainda, que este parâmetro é frequentemente na avaliação do cumprimento aos padrões de lançamento de efluentes (VON SPERLING, 2014; CETESB, 2021). Neste estudo, os valores de DBO que serão apresentados se referem ao padrão conhecido como DBO₅, que representa o consumo de oxigênio durante 5 dias à temperatura de 20 °C.

▪ ***Nutrientes – Nitrogênio e Fósforo***: No meio aquático, o nitrogênio pode ser encontrado nas seguintes formas: nitrogênio molecular (N₂); nitrogênio orgânico – dissolvido e em suspensão; amônia – livre (NH₃) e ionizada (NH₄⁺); nitrito (NO₂⁻) e nitrato (NO₃⁻) (VON SPERLING, 2014). A presença de nitrogênio nos corpos d'água se deve as fontes de origem natural e antrópica. A fonte natural decorre do fato de que o nitrogênio é um constituinte de proteínas e outros compostos biológicos, como também faz parte da composição celular de microrganismos. Já a antrópica, é proveniente do aporte de despejos domésticos e industriais, excrementos de animais e fertilizantes (VON SPERLING, 2014; CETESB, 2021). A identificação da forma predominante do nitrogênio nos corpos d'água permite determinar o estágio de poluição em que aquele ambiente se encontra após o recebimento de uma carga poluidora. Se a poluição for recente, predominam as formas de nitrogênio orgânico ou amônia. Caso a poluição seja antiga ou remota, verifica-se maior presença de nitratos. No corpo d'água, bactérias promovem a conversão de nitrogênio orgânico em amônia, e na presença de condições aeróbicas, a amônia é oxidada a nitrito e, posteriormente, a nitrato (SAWYER, 2003; VON SPERLING, 2014; JORDÃO & PESSÔA, 2017). Este processo de conversão de amônia a nitrato, conhecido como nitrificação, consome OD, sendo por isso chamada de demanda nitrogenada. Este consumo pode agravar mais ainda a situação dos seres aquáticos aeróbicos (VON SPERLING, 2014; CETESB, 2021).

Em relação ao fósforo, pode ser encontrado em espécie solúvel, predominantemente inorgânico, e particulada, na forma orgânica (CHAPMAN, 1996; VON SPERLING, 2014). Von Sperling (2014) cita que a fração inorgânica engloba as espécies conhecidas como ortofosfato e polifosfato. Já a fração orgânica está relacionada a presença de fósforo na composição de moléculas orgânicas, frequentemente, associada à matéria orgânica particulada (VON SPERLING, 2014; CETESB, 2021). A origem natural do fósforo ocorre por meio da dissolução de compostos do solo e decomposição da matéria orgânica. Em termos antrópicos, cita-se as fontes por despejo domésticos e industriais, detergentes, excrementos animais e fertilizantes. Ressalta-se que tanto o nitrogênio como o fósforo são elementos fundamentais para o crescimento de algas, e quando presentes em excesso nos corpos hídricos, promovem condições favoráveis a eutrofização (VON SPERLING, 2014; CETESB, 2021). Devido à multiplicidade das fontes de nitrogênio, o controle da eutrofização deve ser orientado, preferencialmente, ao monitoramento e fiscalização das fontes de fósforo (CETESB, 2021).

▪ **Clorofila *a***: A clorofila é um pigmento verde que existe sob diversas formas (*a*, *b*, *c* e *d*), sendo encontrada na maioria dos organismos fotossintetizantes, tais como plantas, algas e cianobactérias (CETESB, 2021). A clorofila *a* é utilizada como indicador da biomassa algal, refletindo a produtividade primária, que é influenciada por vários fatores, tais como, radiação solar, temperatura e presença de nutrientes. Além disso, a clorofila *a* é considerada a principal variável na avaliação do estado trófico de ambientes aquáticos, principalmente, em lagos e reservatórios, pois o crescimento excessivo de algas pode tornar mais difícil e caro o tratamento de água para abastecimento, além de comprometer os demais usos múltiplos (WMO, 2013; CETESB, 2021).

3.5 Legislação sobre a Qualidade dos Recursos Hídricos Superficiais

No Brasil, a legislação ambiental que trata dos padrões de qualidade requerido para os usos preponderantes dos recursos hídricos é a Resolução CONAMA nº 357/2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente. Esta dispõe sobre a classificação e as diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, enquanto a Resolução CONAMA nº 430/2011 complementa e altera a resolução anteriormente citada, além de dispor sobre as condições e padrões de lançamentos de efluentes.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 classifica as águas quanto à salinidade (‰). Elas se dividem em doces (menor que 0.5 ‰), salobras (de 0.5 a 30 ‰) e salinas (maior que 30 ‰). A partir daí, estabelece treze classes de qualidade, sendo elas: classe especial, classes 1, 2, 3 e 4. Esta última apenas no caso das águas doces. Segundo a resolução, as classes são definidas em

função do conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais e/ou futuros. Dessa forma, cada classe, com exceção da especial, dispõe de parâmetros de qualidade e seus respectivos valores limites. O Quadro 1 sintetiza as classes e os respectivos usos preponderantes, segundo a classificação por salinidade.

Quadro 1 - Classes de qualidade de água dispostas na Resolução CONAMA nº 357/2005, segundo os usos preponderantes em função da classificação quanto à salinidade.

Classes	Usos preponderantes		
	Águas Doces	Águas Salobras	Águas Salinas
Classe especial	<p>a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;</p> <p>b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e,</p> <p>c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.</p>	<p>a) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e,</p> <p>b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.</p>	<p>a) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e</p> <p>b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.</p>
Classe 1	<p>a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;</p> <p>b) à proteção das comunidades aquáticas;</p> <p>c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;</p> <p>d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e</p> <p>e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.</p>	<p>a) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;</p> <p>b) à proteção das comunidades aquáticas;</p> <p>c) à aquicultura e à atividade de pesca;</p> <p>d) ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; e</p> <p>e) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e à irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.</p>	<p>a) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;</p> <p>b) à proteção das comunidades aquáticas; e</p> <p>c) à aquicultura e à atividade de pesca.</p>
Classe 2	<p>a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;</p> <p>b) à proteção das comunidades aquáticas;</p> <p>c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;</p> <p>d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e</p> <p>e) à aquicultura e à atividade de pesca.</p>	<p>a) à pesca amadora; e</p> <p>b) à recreação de contato secundário.</p>	<p>a) à pesca amadora; e</p> <p>b) à recreação de contato secundário.</p>
Classe 3	<p>a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;</p> <p>b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;</p> <p>c) à pesca amadora;</p> <p>d) à recreação de contato secundário; e</p> <p>e) à dessedentação de animais.</p>	<p>a) à navegação; e</p> <p>b) à harmonia paisagística.</p>	<p>a) à navegação; e</p> <p>b) à harmonia paisagística.</p>
Classe 4	<p>a) à navegação; e</p> <p>b) à harmonia paisagística.</p>	-	-

A resolução, em suas disposições finais e transitórias, cita que enquanto não forem aprovados os respectivos enquadramentos em classes de qualidade, as águas doces serão

consideradas classe 2, e as salinas e salobras, classe 1 – exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente. Com base nos usos existentes nas lagunas, como, por exemplo, a pesca e a recreação de contato primário, é coerente avaliar a qualidade das águas segundo as informações dispostas na classe 1 de águas salobras. Observa-se que a recreação de contato primário é definida como atividades nas quais ocorre contato direto e prolongado com a água, em que há grande possibilidade de o banhista ingerir água. Tendo em vista a balneabilidade, ou seja, a avaliação da qualidade das águas destinadas a recreação de contato primário, a Resolução CONAMA nº 357/2005 cita, em referência ao parâmetro coliformes termotolerantes, que deverá ser obedecida a Resolução CONAMA nº 274/2000, que estabelece critérios para avaliar a balneabilidade em águas doces, salobras e salinas, classificando-a nas categorias *própria* ou *imprópria*. A categoria *própria* subdivide-se nas seguintes categorias: *Excelente*, *Muito Boa* e *Satisfatória*.

Neste estudo, para avaliar a balneabilidade das lagunas e canais de comunicação, adotou-se a categoria *Satisfatória*. As águas serão classificadas nesta categoria quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 1000 coliformes fecais (termotolerantes) ou 800 *Escherichia coli* ou 100 Enterococos por 100 mililitros. Observa-se que no decorrer deste trabalho adotou-se a unidade NMP/100 mL, que significa o Número Mais Provável de bactérias por 100 mL, para se referir às concentrações desses microrganismos na água. Menciona-se ainda o uso do termo colimetria, em referência à avaliação espacial e temporal das concentrações de coliformes termotolerantes na área de estudo. Além da balneabilidade, avaliou-se também a qualidade das águas doces afluentes ao CELMM, com base na Resolução CONAMA nº 357/2005. A Tabela 1 apresenta os parâmetros analisados, expondo os padrões de qualidade de água nas classes 1, 2, 3 e 4.

Tabela 1 - Padrões de qualidade de águas doces de alguns parâmetros selecionados, segundo as classes de qualidade dispostas na Resolução CONAMA nº 357/2005.

Parâmetros	Águas Doces			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
OD (mg/L O ₂)	≥ 6	≥ 5	≥ 4	> 2
DBO ₅ (mg/L O ₂)	≤ 3	≤ 5	≤ 10	-
Fósforo Total (mg/L P)	≤ 0.025	≤ 0.05	≤ 0.075	-
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	3.7, para pH ≤ 7.5 2.0, para 7.5 < pH ≤ 8 1.0, para 8.0 < pH ≤ 8.5 0.5, para pH > 8.5	3.7, para pH ≤ 7.5 2.0, para 7.5 < pH ≤ 8 1.0, para 8.0 < pH ≤ 8.5 0.5, para pH > 8.5	13.3, para pH ≤ 7.5 5.6, para 7.5 < pH ≤ 8 2.2, para 8.0 < pH ≤ 8.5 1.0, para pH > 8.5	-
Nitrato (mg/L N)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	≤ 200	≤ 1000	≤ 4000	-

3.6 Tempos Hidráulicos Característicos (THC)

Os THC são parâmetros úteis para analisar a mistura e a renovação das massas de água do domínio de interesse, tendo como base a circulação hidrodinâmica (MONSEN et al., 2002; BOCANIOV e SCAVIA, 2018; AGUILERA, SANTOS e ROSMAN, 2020; GAO et al., 2020; PHAM VAN et al., 2020). São usualmente adotados em estudos de corpos d'água sob forte influência de ações antrópicas, principalmente, no que refere ao lançamento de efluentes industriais e domésticos. Isso porque, a qualidade de água de um sistema aquático está diretamente relacionada a qualidade das águas afluentes, assim como ao tempo de residência da água (DU e SHEN, 2016; LONDE et al., 2016; ROVERSI, ROSMAN e HARARI, 2016; MARSOOLI et al., 2018; LIU et al., 2020). O Tempo de Residência (T_R) é usualmente definido como sendo o tempo médio que águas ficam retidas em determinado compartimento fluido antes de serem transportados para fora desse compartimento (MONSEN et al., 2002; LIMA, 2017; ROSMAN, 2023). Outros THC que podem ser encontrados na literatura, e que se assemelham conceitualmente ao T_R são: o Tempo de Descarga (*flushing time*), também referido como *turnover time*; o Tempo de Retenção; o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), comumente adotado em projetos de dimensionamento de tanques e reatores na área de engenharia sanitária; entre outros (OLIVEIRA e BAPTISTA, 1997; MONSEN et al., 2002; TUNDISI e TUNDISI, 2008; METCALF E EDDY, 2016; MIRANDA et al., 2017).

O T_R pode ser estimado através da razão entre o volume (V) do compartimento e o fluxo residual de água (Q) através desse compartimento. Tal abordagem é útil e adequada quando empregada a compartimentos de geometria simples, que apresentam massas de água bem misturadas. Entretanto, a aplicação do conceito tradicional de T_R a sistemas estuarinos e reservatórios é inadequada, pois, normalmente, esses ambientes apresentam geometria bem complexa, com grande heterogeneidade espacial e variadas condições de fluxos no espaço em um dado instante bem como ao longo do tempo. Nesse contexto, o emprego da modelagem computacional possibilita analisar, de forma variada no espaço e variável no tempo, a renovação das águas nos corpos d'água naturais (ANDRADE, 2018; AGUILERA, SANTOS e ROSMAN, 2020). Rosman (2023) sugere que uma forma mais apropriada de calcular o T_R , fugindo do conceito tradicional, seria por meio da utilização de um Modelo de Transporte Lagrangeano. Em tal modelo, o T_R seria definido como uma função variável espacialmente, gerando resultados que podem ser apresentados através de mapas de isolinhas de T_R para diferentes condições hidrodinâmicas. O mesmo autor, no entanto, propõe que uma solução mais adequada no estudo de corpos d'água muito heterogêneos e variados, é adotar os conceitos de Tempos de Taxa de

Renovação ($T_R\%$) e Idade da Água (I_A), e aplicá-los via modelagem computacional (AGUILERA, SANTOS e ROSMAN, 2020). A seguir, comenta-se, de forma breve, a definição desses conceitos, com base em Rosman (2023).

A $T_R\%$ consiste em avaliar, em termos percentuais, a renovação das águas promovida pela mistura de águas afluentes, consideradas “novas”, com aquelas que já se encontram no interior do domínio de interesse. Já a Idade da Água (I_A), é um parâmetro utilizado com a finalidade de representar, em média, por quanto tempo as águas de um dado local estão dentro do domínio de modelagem (ROVERSI, ROSMAN e HARARI, 2016; ANDRADE, 2018; SILVA, 2019; ROSMAN, 2023). Observa-se que esses parâmetros se complementam, de modo que baixas $T_R\%$ implicam em maiores I_A e vice-versa. Ambos os parâmetros são calculados via modelagem computacional, por meio do Modelo de Transporte Euleriano, que será mencionado na seção 5.1.2.

Em termos de qualidade de água, a simulação de THC, por si só, não fornece resultados que permitam um julgamento direto sobre esta, como seria possível obter via modelagem de qualidade de água. No entanto, a partir dos valores obtidos, em conjunto com o conhecimento geral da qualidade das águas afluentes, pode-se inferir a suscetibilidade de determinados locais desenvolverem problemas de qualidade de água. Para regiões próximas dos contribuintes fluviais, isto é, que são renovadas em grande parte por estes, é fácil deduzir que a qualidade de água do corpo receptor será fortemente influenciada pelas águas doces afluentes. Neste caso, maior renovação da água pode significar piora na qualidade, caso as águas afluentes sejam de má qualidade. Por outro lado, as regiões em que a renovação ocorre mais lentamente, ou seja, aquelas que tendem a apresentar baixas $T_R\%$, assim como altos valores de T_R e I_A , podem apresentar condições mais propícias a estados tróficos mais críticos, principalmente, se o tempo de residência da água no corpo hídrico for superior as escalas de tempo dos processos biogeoquímicos (KNOPPERS, KJERFVE e CARMOUZE, 1991; GAO et al., 2018; ZHAO et al., 2021).

A partir da identificação das regiões mais vulneráveis ao aporte da poluição, pode-se definir melhor os locais mais relevantes para o monitoramento, e as ações prioritárias para melhoria da qualidade ambiental do corpo d'água, em prol da gestão dos recursos hídricos. Análises de THC, relacionadas com questões de qualidade de água, tem sido cada vez mais aplicadas. Aguilera, Santos e Rosman (2020) realizaram simulações de três THC na Lagoa dos Patos (RS, Brasil), sendo eles, o T_R , $T_R\%$ e I_A , e constataram que a região ao norte e nordeste da Lagoa são as mais vulneráveis a eutrofização, tendo por isso, recomendado o monitoramento dessas áreas. Tosic et al. (2019) estudaram a renovação das águas da Baía de Cartagena (Colômbia), sob diferentes cenários de descarga fluvial, e correlacionaram os resultados com possíveis impactos

na qualidade de água desse sistema. Qi et al. (2016) simularam a I_A no Lago Poyang, o maior lago de água doce da China, e constataram forte correlação positiva entre este parâmetro e a concentração de clorofila a , assim como observado por Bocaniov e Scavia (2018) no estudo sobre o Lago St. Clair (EUA-Canadá). Observa-se, quanto aos dois últimos estudos, que o conceito de I_A adotado pelos autores se refere ao tempo que uma parcela de água está dentro do sistema desde que entrou por uma das fronteiras (MONSEN et al., 2002), conceito este, diferente do adotado neste estudo, como será abordado adiante. Ainda assim, a interpretação do resultado é semelhante, na medida em que, as regiões que apresentam os maiores valores de I_A são aquelas que se renovam mais lentamente.

3.7 Modelagem Matemática em Recursos Hídricos

O conhecimento quanto aos aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos são essenciais para sua gestão. A construção desse conhecimento se baseia, por exemplo, na coleta e análise de dados ambientais, que podem ser obtidos por meio de redes/estações de monitoramento quali-quantitativas (ANA, 2016). Rosman (2023) cita, no entanto, que os dados ambientais são, em geral, escassos, constituindo séries históricas de valores medidos em uns poucos pontos distribuídos na área de interesse, alguns destes com intervalos temporais muito espaçados e irregulares, principalmente, em termos qualitativos. Isso se deve, entre outras razões, aos elevados custos envolvidos no levantamento desses dados (VON SPERLING, 2007; USEPA, 2009). Essas questões tendem a dificultar o processo de acompanhamento e gestão ambiental dos corpos hídricos. Assim, é interessante utilizar, em conjunto com os dados já adquiridos, uma ferramenta computacional baseada em modelos matemáticos e numéricos, que seja capaz de auxiliar na análise e prognóstico dos corpos d'água, reduzindo os custos envolvidos no acompanhamento da quantidade e qualidade de água (OPPA, 2007; WANG et al., 2013; LIMA, 2017; PEREIRA, 2017; ROSMAN, 2023).

A modelagem matemática consiste na representação simplificada da realidade traduzida por um conjunto de equações, muitas vezes diferenciais, capazes de descrever adequadamente os principais fenômenos de interesse do mundo real, com o intuito de reduzir a complexidade intrínseca de sistemas naturais a um nível que facilite a compressão e representação da dinâmica ambiental de um determinado sistema (LOUCKS et al., 2005; NAHON, 2006; VON SPERLING, 2007; REIS, 2009; USEPA, 2009; WANG et al., 2013). De acordo com Tucci (1998), os modelos matemáticos são ferramentas que permitem representar alternativas propostas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento técnico-científico.

Rosman (1997) destaca que o modelador deve dar atenção especial ao processo de modelagem, com o intuito de compreender as etapas que envolvem a modelagem ambiental, e dessa forma, utilizar adequadamente a ferramenta computacional. A Figura 2 apresenta, em forma de diagrama, a base do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental, extraída de Rosman (2023). A origem do processo de modelagem é o modelo conceitual, desenvolvido com base nas observações e medições dos fenômenos de interesse. A modelagem conceitual tem o intuito de expressar a concepção do fenômeno observado, conhecer suas causas e efeitos, bem como compreender as interações e a relevância dos agentes intervenientes na sua ocorrência (ROSMAN, 2023). A partir disso, pode-se traduzir a concepção do fenômeno de interesse em linguagem matemática, produzindo o modelo matemático.

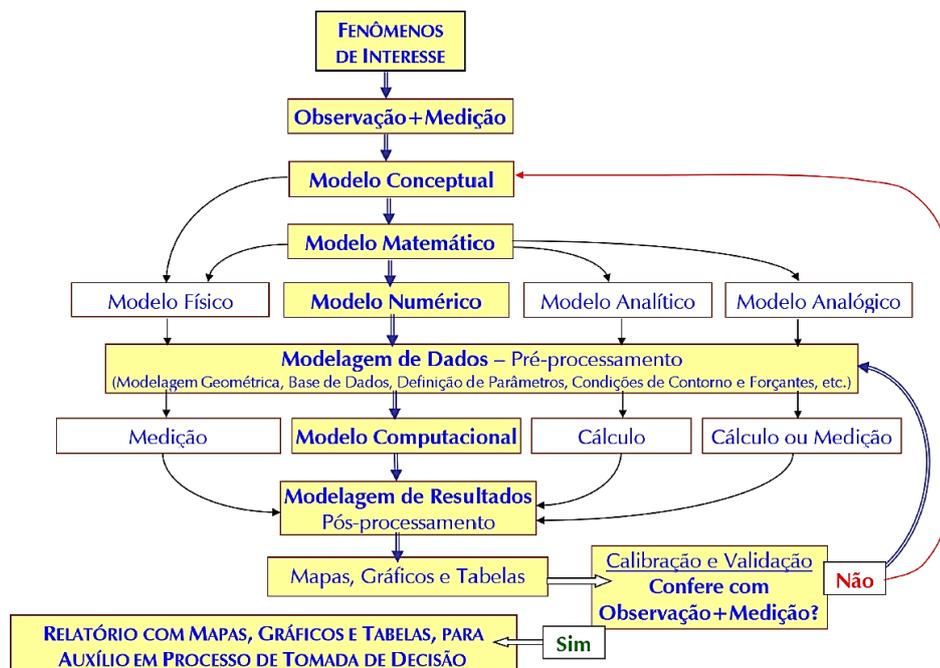


Figura 2 - Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental (ROSMAN, 2023).

Devido à complexidade que os modelos mais gerais apresentam em sua formulação matemática, escrita normalmente em termos de equações diferenciais, os meios para sua resolução contemplam quatro rotas possíveis, entre eles, os modelos físico, numérico, analítico e analógico. Os modelos numéricos, comumente adotados por sua eficácia na resolução de problemas ambientais, são traduções dos modelos matemáticos adaptados para diferentes métodos de cálculo, entre eles, diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos (DIAS, 2003; CORRÊA, 2013; ROSMAN, 2023). A tradução de um modelo numérico para uma linguagem computacional consiste no modelo computacional. Este deve receber informações provenientes da etapa de modelagem de dados, ou pré-processamento, que compreende a obtenção de dados

quantitativos referentes às variáveis envolvidas no modelo conceitual e matemático. Após a execução do modelo computacional se faz necessária a etapa de pós-processamento, na qual os resultados são transformados em mapas, gráficos, tabelas e animações, auxiliando na análise e interpretação destes (ROSMAN, 1997; ROVERSI, 2012; CORRÊA, 2013).

Os processos de calibração e validação são essenciais para averiguar e ajustar o modelo, a fim de que este represente o fenômeno de interesse de forma adequada e coerente com a realidade observada. A calibração pode ser realizada, entre outras formas, por meio de ajustes nos parâmetros do modelo, dentro dos limites aceitáveis e pré-estabelecidos, de modo que os valores calculados se assemelhem aos dados medidos em campo (ALBANO, 2004; BÄUMLE, 2005; VON SPERLING, 2007; LIMA, 2017). Após a calibração, deve-se aferir se o modelo pode ser considerado validado ou não. A validação consiste em realizar uma simulação distinta daquela empregada na calibração, fazendo uso de dados de entrada diferentes dos utilizados anteriormente. O modelo se mostrará validado caso os resultados sejam similares aos valores obtidos em campo. Após esse processo, o modelo pode ser considerado uma ferramenta confiável, capaz de auxiliar no processo de tomada de decisões e no gerenciamento dos corpos hídricos (ALBANO, 2004; CARVALHO, 2018; ROSMAN, 2023). ANA (2009) destaca a importância do uso da modelagem matemática para simulações de qualidade de água, com a finalidade de orientar e avaliar quais ações devem ser tomadas para que as metas de qualidade sejam alcançadas ou mantidas, com base na respectiva classe de qualidade (LIMA, 2006).

Em estudos e projetos desenvolvidos na área de recursos hídricos, a utilização de modelos tem se mostrado cada vez mais presente, especialmente, na gestão e planejamento de ações em corpos d'água naturais complexos, tais como, estuários, baías, lagunas, lagos, reservatórios, entre outros (CORRÊA, 2013; ROVERSI, 2012; ANDRADE, 2018; CARVALHO, 2018; SILVA, 2019). O seu uso é voltado principalmente à compreensão e previsão do escoamento ou movimento das águas, sendo denominados, nesse caso, de “modelos hidrodinâmicos”. Podem, também, ser aplicados em simulações que envolvam aspectos de qualidade de água e transporte de grandezas escalares, sendo chamados de “modelos de transporte de escalares ou de dispersão”. Devido ao potencial de modelar diversos fenômenos de interesse que atuam conjuntamente, os modelos podem ser considerados, portanto, como ferramentas integradoras, sem os quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica sobre a hidrodinâmica ambiental dos corpos d'água (ROSMAN, 2023).

Segundo Rosman (2023), o uso adequado de modelos – calibrados e validados – auxilia na tomada de decisão quanto à gestão e ao gerenciamento de sistemas ambientais, pois permite, em termos de análises de diagnósticos e prognósticos:

- Otimizar os custos de monitoramento e medição, integrando informações espacialmente dispersas que geralmente são obtidas em estações pontuais de medição;
- Estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições, por meio da interpolação e extrapolação de dados, tanto no espaço quanto no tempo;
- Entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais;
- Prever situações simulando cenários para estudos e projetos;
- Determinar o destino de prováveis contaminantes e outros constituintes;
- Auxiliar no mapeamento de áreas de risco;
- Definir estratégias de ação em caso de acidentes com derrames de contaminantes, fornecendo informações para elaboração de Planos de Emergência;
- Colaborar na elaboração de Planos de Mitigação;
- Prever evolução de eventos em tempo real.

Ressalta-se, no entanto, que apesar da grande contribuição que os modelos podem proporcionar no entendimento dos corpos d'água, a utilização inadequada dessa ferramenta pode levar a resultados errôneos e incoerentes com a realidade (ANDRADE, 2018). Dessa forma, é importante que modelador ou o avaliador dedique parte do seu tempo à compreensão das questões envolvidas na dinâmica ambiental desses sistemas e na maneira adequada de modelá-los, de modo a ser capaz de analisar e avaliar os resultados obtidos, de forma crítica e respaldada com conhecimentos sobre o assunto.

3.8 Estudos de Modelagem Ambiental do CELMM

Nesta seção são apresentados, no Quadro 2, alguns estudos anteriores que trataram de modelagem ambiental do CELMM. Destaca-se que a maioria dos trabalhos buscou compreender a circulação hidrodinâmica e, a partir desta, avaliar a renovação das águas, utilizando-se, preferencialmente, da estimativa do T_R . Um ponto relevante nestes trabalhos refere-se à dificuldade de representar adequadamente a hidrodinâmica na laguna Manguaba, devido, entre outros fatores, à escassez de dados batimétricos atuais nesta laguna, bem como em seus canais de comunicação. Acerca da modelagem de qualidade de água, poucos trabalhos abordam esse tema. Daqueles que abordam, discute-se o parâmetro salinidade, porém, pouca informação é disponibilizada sobre como esta varia em termos espaciais e temporais.

Quadro 2 - Alguns estudos de modelagem ambiental do CELMM.

Referência	Principais características do estudo	Objetivos	Principais resultados
Nobre, Nobre e Rotunno Filho (2000)	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo adotado foi desenvolvido em colaboração entre Vatnaskil Consulting Engineers e o Instituto de Ciências Sven Sigurdsson (Univ. da Islândia); - Modelo hidrodinâmico (promediado na vertical - 2DH) e de Transporte Lagrangeano; - Malha de elementos finitos triangulares; - Simulações nos períodos de jul./1984 (chuvoso) e fev./1985 (seco); - Calibrado com dados medidos provenientes de PORTOBRÁS/INPH (1985). 	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterizar o padrão de circulação hidrodinâmica no CELMM e avaliar as condições de circulação e dispersão de um efluente (poluente) lançado no canal da laguna Mundaú. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande amortecimento da onda de maré, com redução nas amplitudes de 85% e 97 % para as lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente; - Renovação das águas é intensa quando ocorrem intensas descargas fluviais; - Maior influência da maré na laguna Mundaú permite maior diluição de plumas de contaminação e menores tempos de residência; - Maior deslocamento e dispersão da pluma de efluente durante o período chuvoso (inverno), devido às maiores velocidades de fluxo.
Paes-Leme, Accetta e Schilithz (2011)	<ul style="list-style-type: none"> - MIKE 21 Flow Model FM; - Modelo Hidrodinâmico (2DH) de volumes finitos; - Malha do tipo triangular não estruturada de alta resolução; - Simulações no período de jun./1984 (inverno); - Vazão constante dos rios Mundaú e Paraíba do Meio; - Calibrado com dados medidos provenientes de PORTOBRÁS/INPH (1985); - Simulação de cenários com alteração batimétrica (linha de costa e profundidade dos canais). 	<ul style="list-style-type: none"> - Simular os efeitos provocados na hidrodinâmica do CELMM, por meio da proposição de cenários com alterações na batimetria, a fim de fornecer subsídios ao aumento da produção do molusco sururu (<i>Mytella falcata</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Apesar de algumas discrepâncias, o modelo foi considerado calibrado; - Observou-se, em relação ao cenário com dragagem, o aumento na amplitude da maré; redução do nível médio das lagoas; e correntes mais intensas nos canais de comunicação; - A dragagem proporcionou o aumento das trocas de água com o mar, provendo maior renovação das águas; - O estudo apontou a necessidade de incluir a modelagem de qualidade de água, para melhor caracterizar os efeitos sobre a população de sururu.
Larsson e Nilsson (2014)	<ul style="list-style-type: none"> - IPH-ECO; - Modelo Hidrodinâmico (2DH); - Malha não estrutura de elementos finitos (triangulares); - Calibração com dados medidos no período fev./2014 (seco); - Simulações de cenários com vazões extremas e adição de um novo canal de comunicação da laguna Mundaú com mar; - Renovação estimada via modelagem e também por dados coletados em campo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterizar a hidrodinâmica no CELMM e avaliar o tempo de renovação das águas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas a laguna Mundaú apresentou calibração satisfatória, com alta correlação com os dados de campo; - Via modelagem, os tempos de renovação foram na ordem de 19 dias e 42 dias durante a estação seca para as lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente; - Durante vazões extremas, o nível da laguna Mundaú aumenta de forma considerável; - Com a adição de um novo canal para a laguna Mundaú, ocorreu um aumento geral na amplitude das marés e redução no tempo médio de renovação para 13 dias.

<p>ANA (2013)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA; - Modelo hidrodinâmico (2DH) acoplado a um modelo de transporte de sal; - Malha de elementos finitos quadráticos (quadrangular e triangular); - Modelos de transporte Euleriano e Lagrangeano; - Simulações apenas na laguna Mundaú; - Calibração com dados medidos no período abr./2012 (seco); - Simulações de cenários de estiagem e cheia, com vazões constantes e duração de 120 dias. 	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterizar a circulação hidrodinâmica, avaliar o tempo de residência e a qualidade da água da laguna Mundaú, em termos da concentração de coliformes termotolerantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - O modelo, de modo geral, representou bem as variações de nível d'água da laguna Mundaú; - No período seco, percebeu-se a grande influência dos ventos na indução de correntes na laguna; o sentido das correntes residuais foi anti-horário; - O Tempo de Residência no cenário de cheia foi bem menor em comparação ao cenário de estiagem; - No cenário de estiagem a renovação ocorreu em 7 dias; - A modelagem das concentrações de coliformes termotolerantes apresentou concordância razoável com os dados medidos; - Tanto o rio Mundaú como os canais de drenagem urbana contribuem para altos valores de colimetria na laguna; - O estudo não apresentou os resultados das simulações de salinidade.
<p>Lessa, Frago Jr e Souza (2016)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - IPH-ECO; - Modelo Hidrodinâmico (2DH) e de Transporte Euleriano; - Malha estruturada bidimensional horizontal; - Modelo de transporte rodou acoplado ao hidrodinâmico; - Efeito do vento desconsiderado; - Calibração com dados medidos no período de fev./2014 (seco); - Simulação de salinidade apenas na laguna Mundaú. 	<ul style="list-style-type: none"> - Calibrar um modelo hidrodinâmico e de salinidade no CELMM. 	<ul style="list-style-type: none"> - Boa calibração em relação à laguna Mundaú, no entanto, os valores na laguna Manguaba não se ajustaram adequadamente; - Os autores mencionam que a falta de dados mais atuais de batimetria, sedimentos e de descarga fluvial, prejudicaram a representação adequada da hidrodinâmica na laguna Manguaba; - O modelo conseguiu representar bem a tendência média de decaimento da salinidade em um ponto da laguna Mundaú; - O estudo não apresentou a distribuição espacial da salinidade.
<p>Souza (2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - IPH-ECO; - Modelo Hidrodinâmico (2DH) e de Transporte Lagrangeano; - Malha estruturada bidimensional; - Simulações nos períodos de fev./1984 e mar./2014; - Cenários individuais de maré de sizígia e de quadratura, considerando ainda vazões mínimas (Q90%). 	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliar a variabilidade espaço-temporal da hidrodinâmica e do tempo de residência causada pelo efeito do assoreamento nas lagunas Mundaú e Manguaba. 	<ul style="list-style-type: none"> - Calibração insatisfatória para a laguna Manguaba; - Assoreamento e alterações na embocadura afetaram consideravelmente a espacialidade do tempo de residência; - De modo geral, o tempo de residência das lagunas diminuiu na configuração mais atual, se comparado a 1984.

<p>Lima (2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - MIKE 21; - Modelo Hidrodinâmico (2DH) e de Transporte Euleriano; - Malha de elementos finitos triangulares; - Simulações nos períodos de jul./2016 (calibração) e ago./2016 (validação); - Simulações de cenários para tempos de taxa de renovação, com vazões diárias e média histórica mensal; - Dados coletados de salinidade, profundidade, temperatura e correntes nas embocaduras. 	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterizar a circulação hidrodinâmica e estimar o tempo de residência no CELMM. 	<ul style="list-style-type: none"> - Boa calibração em relação aos dados medidos no canal da laguna Mundaú; - Observou-se baixa velocidade das correntes nas lagunas; - Com vazão média histórica, a laguna Mundaú necessitou de 14 dias para renovação quase completa; com vazões diárias, foram necessárias 6 semanas atingir a completa renovação; - Na laguna Manguaba, com vazão média histórica, foram necessários 30 dias para obter taxa mínima de 63%, em 94% de sua área; com vazões diárias, mesmo após 2 meses ainda se observou áreas com menos de 63% de renovação; - A laguna Mundaú é menos vulnerável a problemas de qualidade de água do que a laguna Manguaba.
<p>Pinheiro (2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - SisBaHiA; - Modelo Hidrodinâmico (2DH), de Transporte Lagrangeano e Euleriano; - Malha de elementos finitos quadráticos (quadrangular e triangular); - Simulações com configurações de embocaduras distintas (2006, 2014 e 2017); - Dados: maré (2014); vazão e vento (valores médios), para as estações seca e chuvosa; - Calibração com dados médios no período de fev./2014; - Análises de Tempo de Residência (T_R), Tempos de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) e Idade da Água (I_A); 	<ul style="list-style-type: none"> - Estudar a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas do CELMM para diferentes configurações de embocaduras. 	<ul style="list-style-type: none"> - Calibração satisfatória dos níveis d'água da laguna Mundaú, e o oposto em relação à laguna Manguaba; - Forte atenuação das marés em direção às lagunas; - A renovação das águas é fortemente influenciada pelas descargas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. - Identificou-se possíveis áreas de estagnação na região norte da laguna Manguaba, assim como nas porções leste e sul da laguna Mundaú. - A configuração de embocadura de 2014 proporcionou as maiores $T_{R\%}$ e, conseqüentemente, as menores I_A. - Concluiu-se que as diferentes configurações de embocadura afetam de maneira significativa a circulação e a renovação das águas.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesta seção, inicialmente, se apresenta a localização e a descrição do CELMM, com destaque para as suas principais bacias hidrográficas contribuintes. Em seguida, comentam-se aspectos relacionados ao clima da região, bem como as características físicas do CELMM, com foco na geomorfologia, topografia e sedimentologia. Posteriormente, discorre-se sobre o regime de maré a que o estuário está submetido e as variações sazonais de salinidade em suas águas. Apresenta-se ainda informações a respeito do uso e ocupação do solo e aspectos socioeconômicos na região de estudo. Por fim, caracterizam-se, nas bacias contribuintes ao CELMM, as condições de esgotamento sanitário e as atividades potencialmente poluidoras.

4.1 Localização e Descrição do CELMM e das Principais Bacias Contribuintes

O CELMM está situado no litoral do estado de Alagoas, região Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 35° 44' à 35° 58'O e 9° 35' à 9° 46'S, conforme exposto na Figura 3. Trata-se de um sistema de corpos aquáticos naturais constituídos por duas lagunas, Mundaú e Manguaba, canais de comunicação, diversas ilhas e uma zona estuarina comum a ambas as lagunas. Ao todo, possui uma área de um pouco mais 80 km², sendo a laguna Mundaú com ≈ 26 km², a laguna Manguaba com ≈ 42 km² e os canais com cerca de 12 km² (OLIVEIRA e KJERFVE, 1993; ANA, 2006; BRITO Jr, FRAGOSO Jr e LARSON, 2018).

As lagunas originaram-se como resultado da elevação do nível do mar, ocorrida principalmente durante o Holoceno. Graças à disponibilidade de sedimentos marinhos que foram re-trabalhados pelas ondas e transportados pelas correntes litorâneas, formaram-se as restingas arenosas, que ocasionaram o barramento da foz de seus principais contribuintes, os rios Mundaú e o Paraíba do Meio, e afogamento de seus leitos. Esse processo provocou o isolamento desses corpos d'água do oceano adjacente, sendo por isso enquadrado, do ponto de vista de classificação geomorfológica, em estuário do tipo *construído por barra* (KJERFVE, 1994).

A bacia hidrográfica do rio Mundaú é a principal bacia de contribuição à laguna Mundaú, e drena uma área de 4126 km². O rio Mundaú, que é perene, possui extensão de 141 km, desde suas nascentes na região de Garanhuns, pertencente ao agreste do estado de Pernambuco, até o deságue na laguna, no limite municipal entre Santa Luzia do Norte e Maceió. Este rio percorre ao todo trinta municípios, sendo quinze no território pernambucano e outros quinze em território alagoano. Do total, oito municípios possuem sede às margens deste rio (ANA, 2006).

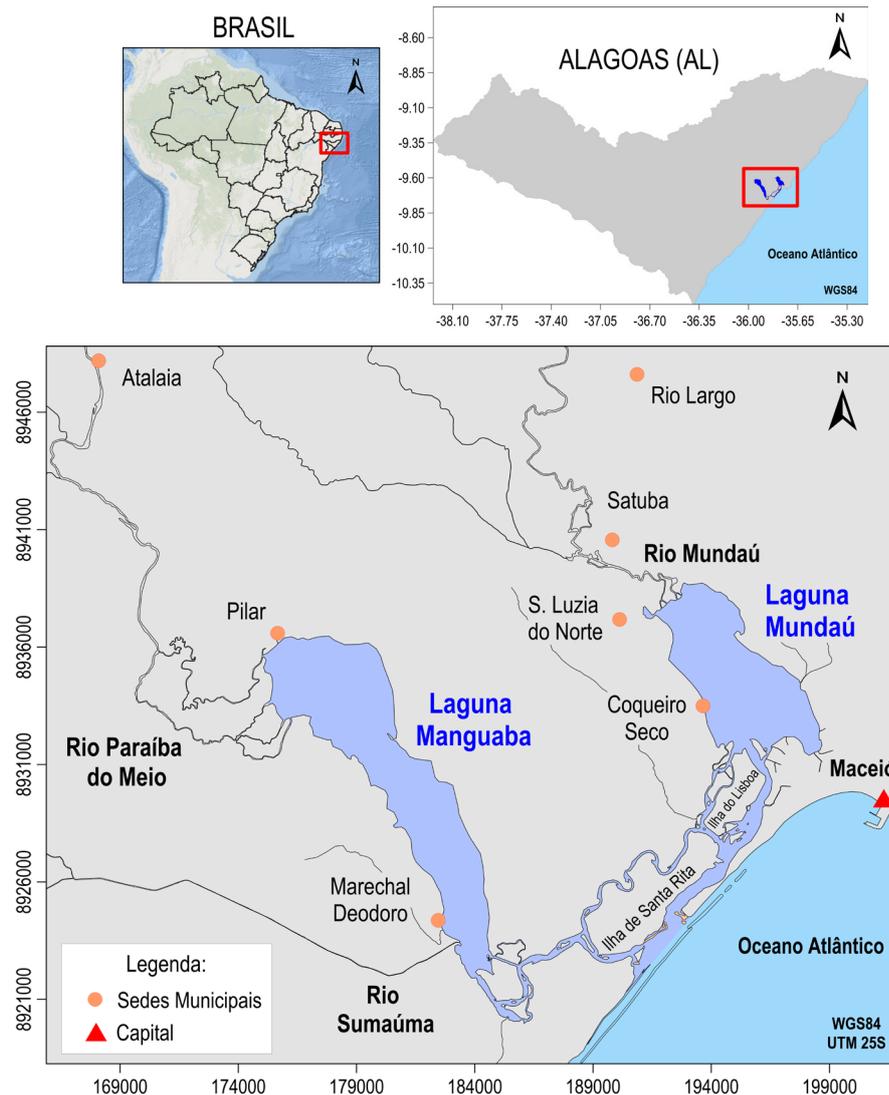


Figura 3 - Localização do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba e dos seus principais afluentes. Nota-se ainda o destaque para as principais sedes municipais do entorno do CELMM.

A laguna Manguaba possui como principais contribuintes os rios Paraíba do Meio e Sumaúma. A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio possui 3157 km², e se situa no extremo leste de Alagoas, cobrindo a maior área superficial deste estado. O rio nasce no estado de Pernambuco e desemboca na laguna, no município de Pilar, cruzando catorze municípios em território alagoano e seis em território pernambucano, que possuem, ao todo, treze sedes municipais ribeirinhas. Já o rio Sumaúma drena uma área de \approx 372 km², e percorre seis municípios alagoanos, entre os quais, apenas um possui sede municipal ribeirinha. Destaca-se ainda o rio dos Remédios, que desemboca na região dos canais, e possui área drenante de 46.7 km². A Figura 4 apresenta as bacias contribuintes ao CELMM, segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2006).

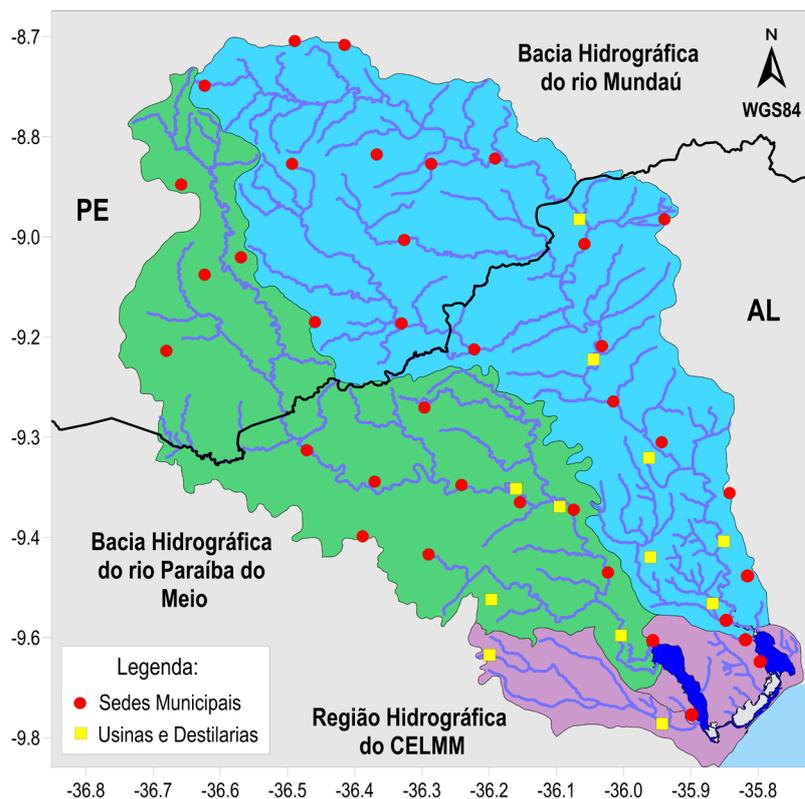


Figura 4 - Principais Bacias Hidrográficas contribuintes ao CELMM. Nota-se ainda o destaque para as sedes municipais inseridas nas bacias de contribuição, além das usinas e destilarias.

Aspectos climáticos

Na região de estudo, o clima é tropical, com período chuvoso no outono-inverno, e período seco na primavera-verão. A estação chuvosa ocorre nos meses de abril a agosto, com o trimestre mais chuvoso em maio-junho-julho. O período seco compreende os meses de outubro a fevereiro, com o trimestre mais seco em outubro-novembro-dezembro (BARROS et al., 2012). Segundo dados da estação meteorológica MACEIÓ-AL (OMM: 82994), pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, nos 57 anos, de 1961 a 2018, a precipitação média anual foi de 1913 mm, com o mês de junho apresentando a maior média, 329 mm, enquanto novembro a menor, 43 mm. A evaporação média anual foi de 1126 mm, com o mês de janeiro apresentando a maior média, 112 mm, seguido de dezembro e novembro. A menor média correspondeu ao mês de junho, com 72 mm. A temperatura do ar apresenta pequena variação no decorrer do ano, com máximas entre os meses de dezembro a março, alcançando em torno de 30°C, e mínimas entre os meses de junho a agosto, com 20°C (LIMA, 2017). Quanto à temperatura da água, Melo-Magalhães (2005) relata que do período chuvoso, mais frio, para o período seco, mais quente, as temperaturas da laguna Manguaba variaram de 25 a 31°C, enquanto da laguna Mundaú, de 26 a 31.5°C. Menciona, ainda, que as temperaturas no interior das lagunas são praticamente homogêneas espacialmente, em concordância com o estudo de Oliveira e

Kjerfve (1993). Segundo ANA (2022), em razão das diferenças expressivas nos volumes acumulados de chuva entre as estações secas e chuvosas, as descargas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio variam de valores inferiores a 5 m³/s até superiores a 1000 m³/s.

Aspectos geomorfológicos, topográficos e sedimentológicos

Segundo Alagoas (1993), do ponto de vista geológico, a região apresenta as seguintes formas de relevo: o baixo planalto sedimentar dos tabuleiros e a planície litorânea. O primeiro se caracteriza por ser um planalto, de 50 a 100 metros de altura, de origem sedimentar, formado durante o terciário pela deposição de material erodido das estruturas cristalinas, granito e gnaiss. Trata-se de uma formação do grupo Barreiras. A planície litorânea é uma formação recente, do quaternário, originária de depósitos flúvio-marinhos (MENDES et al., 2017). Há ainda, nas regiões norte e centro-oeste da laguna Manguaba, a presença de formações sedimentares conhecidas como Muribeca e Coqueiro Seco, que evoluíram no início do Cretáceo (COUTINHO et al., 1988; MENDES et al., 2017). Destaca-se a presença de recifes, paralelos à costa e a algumas centenas de metros da embocadura do sistema lagunar, constituídos de arenito, e que atuam como uma barreira de proteção, contribuindo para a dissipação da energia das ondas (CORREIA e SOVIERZOSKI, 2005).

Referente à topografia de fundo das lagunas, Oliveira e Kjerfve (1993) afirmam que a profundidade média na laguna Mundaú é de 1.5 m, com valor máximo de 5.0 m na entrada do canal dragado próximo à costa sul. A laguna Manguaba possui profundidade média de 2.1 m, e máxima de 3.0 m entre a região central e norte da laguna. Os canais apresentam valor médio de \approx 1.4 m, com o máximo de 9.0 m no canal de comunicação da laguna Mundaú (PORTOBRÁS/INPH, 1985; OLIVEIRA e KJERFVE, 1993).

O fundo das lagunas contém sedimentos de granulometria fina, composto por silte e argila, em quase toda sua totalidade, com exceção de algumas regiões onde é possível encontrar concentrações variáveis de sedimentos de maior granulometria, principalmente, próximo à foz dos rios. Há, em algumas regiões, a presença de cascalho ou conchas de moluscos, em diferentes profundidades. Nos canais de comunicação, a depender da intensidade das correntes, podem predominar areias grossas, médias e/ou finas (PORTOBRÁS/INPH, 1985; OLIVEIRA e KJERFVE, 1993; MELO-MAGALHÃES, 2005; ALVES, 2010; ANA, 2012b).

Regime de maré e salinidade

Segundo Oliveira e Kjerfve (1993), as marés na região de estudo classificam-se como semidiurnas, e apresentam regime de mesomaré, isto é, com a máxima altura de maré maior que 2 m e menor que 4 m. Mencionam também que a altura média da maré no Porto de Maceió

é de 1.44 m, com redução de 88% e 98% no interior das lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente. Com isso, a altura média da maré na laguna Mundaú é de 0.2 m, enquanto na laguna Manguaba, 0.03 m.

Os mesmos autores, com base nos estudos de PORTOBRÁS/INPH (1985), relataram os efeitos que a sazonalidade provoca na distribuição espacial e temporal da salinidade, devido, principalmente, as variações significativas nas descargas fluviais. Esses estudos mencionam que a salinidade na laguna Mundaú tende a variar de 0 a 9 ups nos períodos chuvosos, e de 6 a 24 ups nos períodos secos. Na laguna Manguaba, a salinidade média é de 3 ups no período seco, e 1 ups no período chuvoso. Em geral, esta laguna apresenta condições de homogeneidade vertical e horizontal, exceto em períodos de vazões mínimas. As salinidades mínimas observadas na laguna Manguaba variaram de 0.1 a 0.6 ups nos períodos chuvosos, e de 0.5 a 8 ups nos períodos secos. Esta laguna possui níveis de salinidade inferiores ao da laguna Mundaú, com valores de salinidade média variando entre 0 a 5 ups, devido à significativa atenuação da maré (MACHADO, 1989; OLIVEIRA e KJERFVE, 1993; MELO-MAGALHÃES, 2005; ANA, 2006; LIMA, 2017). Em síntese, do ponto de vista do valor médio de salinidade, a laguna Mundaú muda de condições mesohalinas (5 a 18 ups) para oligohalinas (0.5 a 5 ups) entre os períodos seco e chuvoso, respectivamente, enquanto a laguna Manguaba é predominantemente oligohalina na maior parte do tempo. Os canais de comunicação variam entre oligohalino e euhalino (30 a 40 ups).

4.2 Uso e Ocupação do Solo e Aspectos Socioeconômicos

A partir do século XVI, intensificaram-se a exploração dos recursos naturais e a expansão das atividades antrópicas nas bacias contribuintes ao CELMM. No início do período colonial foram recorrentes a extração de pau-brasil e o desmatamento da mata nativa para a plantação de coqueirais e canaviais, além da implantação de diversos engenhos para produção de açúcar. Surgiu nessa época uma das mais importantes atividades econômicas da região, a agricultura, à qual esteve vinculada ao desenvolvimento regional e a geração de riquezas, principalmente, por meio da cana-de-açúcar, mas também de culturas como milho, feijão, fava, mandioca, café e banana, que constituem o segundo sistema de produção mais importante para os municípios inseridos nas bacias de contribuição ao CELMM (ANA, 2006; SANTOS, 2011).

Observou-se nos séculos posteriores, o crescimento e a expansão populacional, apoiados na produção de açúcar em inúmeros engenhos. Nos séculos XIX e XX ocorreram diversas mudanças no eixo de povoamento devido, entre outras razões, à substituição dos engenhos por usinas; ao início da industrialização têxtil nos municípios ao redor, Maceió e Pilar; e à

implantação da estrada de ferro de Maceió, seguindo ao longo do vale do rio Mundaú. Como consequência, ocorreu um processo de urbanização e o deslocamento da concentração populacional do entorno da laguna Manguaba para o entorno da laguna Mundaú (ANA, 2006).

A partir da década de 1970, verificou-se a expansão e a modernização da atividade açucareira, com aumento no plantio e intensificação do desmatamento na região. Cita-se que o cultivo da cana-de-açúcar representa mais de 90% da área colhida nos municípios inseridos nas bacias de contribuição, onde estão presentes 12 usinas sucroalcooleiras, conforme exposto na Figura 4. Observa-se que algumas usinas se encontram fora de operação, segundo a Secretaria de Planejamento de Alagoas¹. Do ponto de vista das atividades industriais, instalou-se um polo industrial na restinga do Pontal da Barra, em Maceió, e no Tabuleiro de Marechal Deodoro, entre as lagunas, com atuação de empresas no setor de Petroquímica e Cloroquímica, respectivamente (TORRES, 2004; ANA, 2006; COTOVICZ Jr, 2012). Relativo às atividades econômicas, menciona-se, por exemplo, os setores de comércio e serviços, entre eles o turismo, além da atividade portuária e da indústria de transformação, com ênfase nos bens intermediários que atendem tanto a indústria química quanto as usinas sucroalcooleiras. Há, ainda, a pecuária bovina e avicultura, ambas atendendo demandas locais e regionais (ANA, 2006). Mais detalhes quanto às atividades econômicas e industriais serão abordados na seção 4.4.

Em termos de planejamento urbano, observou-se que o parcelamento do solo foi realizado de forma desordenada nas cidades e povoados rurais. As populações de baixa renda iniciaram um processo de favelização às margens dos cursos d'água e encostas (TORRES, 2004). Segundo dados censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), 46 municípios estão inseridos total ou parcialmente nas bacias drenantes ao CELMM. Desse total, 27 municípios pertencem ao estado de Alagoas, e o restante, 19, fazem parte do estado de Pernambuco. Os municípios alagoanos concentravam $\approx 70\%$ da população total residente nas bacias contribuintes, conforme pode ser observado na Tabela 2, que expõe a quantidade de habitantes, em valores absolutos e em porcentagens, segundo as bacias contribuintes ao CELMM. Observa-se que a população alagoana nessas bacias correspondeu a $\approx 26\%$ da população do Estado.

Da população total nas bacias contribuintes, cerca de 40% residiam nos municípios do entorno do CELMM. A Tabela 3 apresenta esses municípios, além da quantidade de habitantes em cada um deles. Nota-se que para o município de Maceió foi considerada apenas a parcela

¹ Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio de Alagoas. Alagoas em dados e informações. Usinas e destilarias. Disponível em <https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/usinas-e-destilarias-de-alagoas>. Acesso em 06/07/2021.

da população inserida nas bacias drenantes à laguna Mundaú, cujo valor representava $\approx 31\%$ da população total de Maceió. Com base nessa porcentagem, e nos resultados iniciais do Censo IBGE (2022), pode-se estimar que a população de Maceió inserida nas bacias drenantes ao CELMM seria equivalente a ≈ 296400 hab. Relativo à ocupação desordenada do território de Maceió, destaca-se a presença de diversos aglomerados subnormais² que, segundo o IBGE (2010), totalizavam 12.3% da população urbana.

Tabela 2 - População urbana, rural e total, em valores absolutos e em porcentagens, segundo as bacias contribuintes ao CELMM (IBGE, 2010).

	Estado	População urbana (hab.)	População rural (hab.)	População total (hab.)	Porcentagem (%)
Bacia Hidrográfica do rio Mundaú	AL	231599	58735	290334	25.2
	PE	182072	79515	261587	22.7
	TOTAL	411253	138250	549503	47.9
Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Meio	AL	99555	51677	151232	13.1
	PE	38975	42486	81461	7.1
	TOTAL	138530	94163	232693	20.2
Região Hidrográfica do CELMM	AL	350609	16112	366721	31.9
TOTAL		902810	248525	1151335	100.0

Tabela 3 - População urbana e total nas bacias contribuintes, em valores absolutos e em porcentagens, segundo os municípios do entorno do CELMM (IBGE, 2010).

Municípios	População urbana (hab.)	População total (hab.)	Porcentagem (%)
Maceió	288602	288602	62.3
Rio Largo	55947	68481	14.8
Marechal Deodoro	43392	45977	9.9
Pilar	31801	33305	7.2
Satuba	12792	14603	3.2
Santa Luzia do Norte	6172	6891	1.5
Coqueiro Seco	4973	5526	1.2
TOTAL	443679	463385	100.0

Uso do solo no entorno das lagoas

Descreve-se, de forma breve, o uso do solo no entorno das lagoas Mundaú e Manguaba, conforme exposto na Figura 5.

² Segundo o IBGE, *Aglomerado Subnormal* é uma forma de ocupação irregular de terrenos de propriedade alheia – públicos ou privados – para fins de habitação em áreas urbanas e, em geral, caracterizados por um padrão urbano irregular, carência de serviços públicos essenciais e localização em áreas com restrição à ocupação.

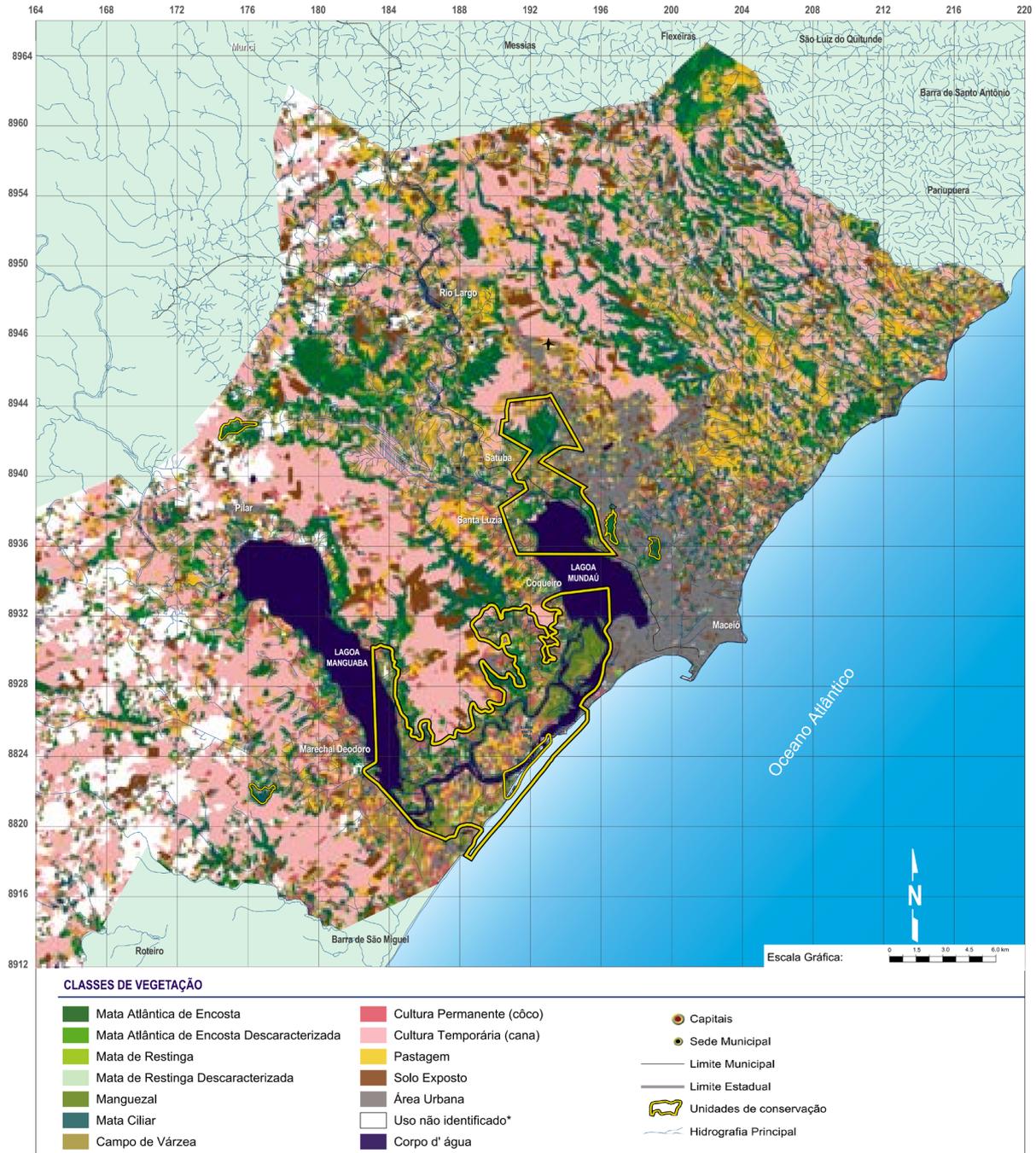


Figura 5 - Classes de vegetação e uso e ocupação do solo na região do CELMM. Observa-se na cor rosa claro, as áreas utilizadas na monocultura de cana-de-açúcar, e na cor cinza, as áreas urbanas (ANA, 2006).

A margem leste da laguna Mundaú caracteriza-se pelo alto grau de adensamento urbano no município de Maceió, com presença significativa de aglomerados subnormais, especialmente, às margens dessa laguna. No aspecto econômico, ressalta-se a exploração de poços de sal-gema e a presença de fábricas têxteis. A margem oeste apresenta ocupação urbana mais restrita, representada pelos núcleos dos municípios de Satuba, Santa Luzia do Norte e Coqueiro Seco. Em termos econômicos, apresenta atividade agrícola, com destaque para a cultura de coco, mas também conta com a presença de uma fábrica de fertilizantes próximo ao rio Mundaú.

Na porção sul encontra-se fragmentos florestais representados por Mata Atlântica de encosta descaracterizada, campos de várzea e ilhas ocupadas por manguezais. Esta porção da laguna está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) Santa Rita, com área de 10230 hectares (ANA, 2006; ALVES, 2010).

Na laguna Manguaba, em ambas as margens, observam-se fragmentos de vegetação remanescente de Mata Atlântica, campos de várzea e manguezais, muito embora sejam áreas bem antropizadas, com atividades tais como o cultivo de cana-de-açúcar e de coco, além do uso como pastagem. A área ao norte, próxima à foz do rio Paraíba do Meio, e a área ao sul, próxima à foz do rio Sumaúma, são caracterizadas como áreas, em parte, urbanizadas, tendo nas cidades de Pilar e Marechal Deodoro seus principais centros urbanos. Grande parte da porção sul da laguna, com suas ilhas e canais, também está inserida na APA Santa Rita. Em termos habitacionais, nessa porção encontram-se povoados com ocupação desordenada e, em termos de vegetação, existe uma maior diversidade de cobertura vegetal, registrando-se a presença de restinga, manguezais e áreas de cultivo de coco (MARQUES, LEMOS e RODRIGUES, 2000; ANA, 2006; ALVES, 2010).

Na região situada entre as duas lagunas, conhecida como Tabuleiros, o uso do solo é predominantemente agrícola. O cultivo de cana-de-açúcar é o que ocupa a maior parte do solo, embora existam ainda fragmentos significativos de Mata Atlântica de encosta ao longo do rio dos Remédios. Já na Zona dos Canais e Ilhas, a vegetação predominante é de manguezais e campos de várzea, sendo seu uso restrito à ocupação para veraneio e faixas de domínio da rede elétrica de alta tensão. A Tabela 4 sintetiza as informações quanto às classes de vegetação existentes e aos usos do solo na região do CELMM, em termos de área ocupada (ANA, 2006).

Tabela 4 - Classes de vegetação e usos do solo, em função da área ocupada e da porcentagem em relação à área total analisada (ANA, 2006).

Classe de vegetação e uso do solo	Área (ha)	(%)
Mata atlântica de encosta	10152	5.15
Mata atlântica de encosta descaracterizada	10340	5.25
Mata de restinga	857	0.05
Mata de restinga descaracterizada	1820	0.95
Manguezal	3034	1.55
Mata ciliar	9666	5.00
Campo de várzea	15352	7.80
Cultura permanente (coco)	9713	4.91
Cultura temporária (cana-de-açúcar)	58800	29.73
Pastagem	16401	8.30
Solo exposto	7920	4.00
Área urbana	14854	7.55
Corpos d'água	8691	4.50
Uso não identificado	30187	15.26
Área total	197787	100.00

Uso das lagunas para a atividade de pesca

Além dos usos mencionados no entorno das lagunas, destaca-se também o uso das lagunas para a atividade de pesca. Essa atividade é exercida, de forma mais relevante, na laguna Mundaú, pois é desta laguna que é extraído o molusco sururu (*Mytella charruana*). O sururu, conforme mencionado na introdução deste trabalho, é fonte de renda para milhares de moradores do entorno, além de ser um alimento típico da região. Deste modo, a sua disponibilidade impacta as questões socioeconômicas da região, especialmente, para a comunidade pesqueira (RIBAS, JUNKES e RODRIGUES, 2019). Dentre os principais fatores que interferem na quantidade de sururu extraído da laguna Mundaú, destaca-se a poluição e as variações de salinidade ao longo do ano. O primeiro é consequência dos lançamentos de efluentes domésticos e industriais nas águas estuarinas, provenientes, principalmente, do rio Mundaú e dos canais de drenagem urbana da margem leste, sul e sudeste da laguna. O segundo está relacionado às variações nas descargas do rio Mundaú, entre os períodos chuvoso e seco. No inverno, período chuvoso, as intensas descargas reduzem a salinidade da laguna. Já no verão, período seco, a redução das descargas provoca um aumento da salinidade. A atividade de pesca do sururu é afetada pela salinidade, pois, segundo Pourmozaffar et al. (2020), este parâmetro de qualidade é um dos principais fatores abióticos que regulam o desenvolvimento e a sobrevivência de moluscos bivalves em ambientes estuarinos.

De acordo com Pereira-Barros (1987) e Pereira et al. (2003), a salinidade abaixo de 5 ups é prejudicial ao *Mytella charruana*, pois além de não haver fixação de novos moluscos, ainda ocorre acentuada mortalidade dos espécimes, com possibilidade de dizimar grande parte desses seres, caso a salinidade se mantenha em teores de 2 ups ou abaixo disso, num período superior a 10 dias. Yuan et al. (2010, 2016) apontam que a exposição prolongada a um ambiente com salinidades de 0, 2, 5 ou ainda 45 ups, provocam redução significativa ou então a morte de diversos desses organismos. Com as grandes cheias do rio Mundaú, provocando redução expressiva da salinidade, ocorre um desequilíbrio no ecossistema da laguna Mundaú, ocasionando, por um determinado tempo, a diminuição acentuada ou até o desaparecimento desses organismos (OLIVEIRA e KJERFVE, 1993). Isso ocorreu, por exemplo, na estação chuvosa do ano de 2017, e provocou grande prejuízo a toda cadeia produtiva associada ao sururu. Com a queda vertiginosa da população desse molusco foram necessários mais de 7 meses para que a produção/extração do sururu retornasse às suas condições normais, segundo reportagens dos

jornais *Folha de São Paulo*³ e *Gazeta de Alagoas*⁴. Diante do exposto, percebe-se a importância de se compreender melhor as variações espaciais e temporais de salinidade no CELMM, justificando a relevância da modelagem deste parâmetro de qualidade de água.

4.3 Saneamento Básico – Panorama do Esgotamento Sanitário

O processo histórico de crescimento e expansão urbana nas bacias contribuintes, em especial na região do entorno do CELMM, não ocorreu de forma planejada nem foi acompanhado pela expansão da infraestrutura social e urbana compatível com as demandas existentes. Esse cenário é evidenciado pelas condições inadequadas de habitação, salubridade e qualidade de vida às margens da laguna Mundaú, com a presença de diversos aglomerados subnormais (RIBAS, JUNKES e RODRIGUES, 2019; MESSIAS, 2020). Nestas localidades, assim como em diversas outras regiões das bacias de contribuição, nota-se a inexistência ou a precariedade de infraestrutura e disponibilidade dos serviços públicos destinados ao saneamento básico, especialmente, ao esgotamento sanitário (ANA, 2006; IBGE, 2010; ANA, 2017; SNIS, 2022).

Neste estudo, será utilizado a definição de saneamento básico que consta no artigo 3º da Lei nº. 11445/2007 - Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico, citado abaixo:

Art. 3º Para fins do disposto nesta Lei, considera-se:

I - **saneamento básico**: conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de:

a) **abastecimento de água potável**: constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e seus instrumentos de medição;

b) **esgotamento sanitário**: constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias à coleta, ao transporte, ao tratamento e à disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até sua destinação final para produção de água de reuso ou seu lançamento de forma adequada no meio ambiente;

c) **limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos**: constituídos pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais de coleta, varrição manual e mecanizada, asseio e conservação urbana, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbana; e

d) **drenagem e manejo das águas pluviais urbanas**: constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes (BRASIL, 2007) (grifo meu).

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em sua publicação

³ VASCO, Katia. Ganha-pão, sururu desaparece e deixa pescadores sem sustento em Maceió. *Folha de São Paulo*, São Paulo, 12 ago. 2017. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2017/08/1909339-ganha-pao-sururu-desaparece-e-deixa-pescadores-sem-sustento-em-maceio.shtml>. Acesso em 05 abr. 2021.

⁴ FERREIRA, Arnaldo. A alegria voltou à lagoa mundaú. *Gazeta de Alagoas*, Maceió, 09 dez. 2017. Disponível em: <https://d.gazetadealagoas.com.br/cidades/190796/a-alegria-voltou-a-lagoa-mundau>. Acesso em 05 abr. 2021.

Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas (ANA, 2017), o esgotamento sanitário é um dos serviços de saneamento que mais necessitam de análises e propostas para o encaminhamento de soluções, com o objetivo de alcançar sua universalização. Em termos da gestão qualitativa dos recursos hídricos, o estudo destaca que o déficit de coleta e tratamento de esgoto nas cidades brasileiras permite que uma parcela significativa de carga poluidora chegue aos corpos d'água, prejudicando os usos múltiplos desses recursos.

Segundo ANA (2006), o panorama do saneamento básico nas bacias contribuintes ao CELMM inseridas no estado de Alagoas encontra-se entre os mais críticos da região Nordeste. Os dados mais alarmantes se referem ao acesso ao esgotamento sanitário considerado adequado⁵ à luz do que menciona o Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB (2019). Enquanto apenas uma pequena parcela da população de Maceió é atendida por rede coletora de esgotos, na grande maioria dos demais municípios do CELMM tal serviço é pequeno ou até mesmo inexistente. Com base nos dados provenientes do censo demográfico de 2010, realizado pelo IBGE, elaborou-se a Tabela 5, que apresenta a proporção de domicílios particulares permanentes inseridos nas áreas de contribuição ao CELMM, segundo o tipo de esgotamento sanitário existente. Observa-se que as porcentagens foram calculadas para cada zona, urbana e rural, de forma individual, considerando o total de domicílios particulares permanentes inseridos em cada uma delas. Na Tabela 5, por exemplo, quando se diz que o estado de Alagoas possuía 12.5% de domicílios urbanos com esgotamento sanitário por meio de fossas sépticas, isso significa que, do total de domicílios urbanos em Alagoas, 12.5% destinavam seus esgotos para fossas sépticas.

A Tabela 5 mostra que 73.6% dos domicílios urbanos na Região Hidrográfica do CELMM não possuíam seus esgotos coletados por uma rede geral de esgoto ou pluvial. É importante destacar que tal situação pode ser associada à inexistência ou precariedade de infraestrutura sanitária, além do fato de que uma parcela dos moradores não está disposta a conectar seus domicílios ao sistema público de coleta de esgoto, segundo informações contidas no Plano Municipal de Saneamento Básico de Maceió (PMSB - MACEIÓ/AL, 2017). Ainda nessa região, nota-se que a principal forma de esgotamento sanitário era realizada por outros meios, categoria “Outros”, que engloba fossa rudimentar/rústica, vala, rio, lago, mar ou outro. Observa-se ainda que diversos domicílios urbanos faziam uso das fossas sépticas. Segundo Jordão e Pessoa (2017), as fossas sépticas são capazes de reduzir $\approx 30\%$ da carga orgânica dos esgotos,

⁵ Segundo o PLANSAB (2019), atendimento adequado é aquele suprido por fossa séptica – sucedida por pós-tratamento ou unidade de disposição final, adequadamente projetados e construídos – ou por rede coletora de esgotos seguida de tratamento.

antes de serem lançados no ambiente

Tabela 5 - Proporção de domicílios particulares permanentes, por tipo de esgotamento sanitário (%), nas bacias contribuintes ao CELMM (IBGE, 2010). Nota-se ainda os dados de Alagoas e Pernambuco, do Nordeste e do Brasil. Observa-se que as porcentagens foram calculadas para cada zona, urbana e rural, de forma individual, considerando o total de domicílios particulares permanentes inseridos em cada uma delas.

Proporção de domicílios particulares permanentes, por tipo de esgotamento sanitário (%)							
	Estado	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica		Outros		Sem banheiro de uso exclusivo e nem sanitário
		Urbano	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano
Bacia Hidrográfica do rio Mundaú	AL	44.1	8.5	13.8	45.8	62.7	1.6
	PE	55.4	8.6	9.9	35.2	70.5	0.8
Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Meio	AL	32.3	5.3	6.2	59.9	69.9	2.6
	PE	73.7	2.6	5.5	22.5	75.3	1.3
Região Hidrográfica do CELMM	AL	26.4	17.4	12.0	54.6	70.0	1.6
Alagoas		27.6	12.5	7.3	58.3	69.3	1.6
Pernambuco		52.1	11.4	11.6	35.5	61.0	1.0
Nordeste		44.5	12.2	8.3	41.6	63.2	1.7
Brasil		64.1	11.2	13.9	24.1	67.9	0.6

Nos domicílios inseridos na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Meio, observa-se a maior diferença entre os estados, em termos de atendimento com rede geral de esgoto ou pluvial. Nota-se que os municípios de Pernambuco pertencentes a essa bacia foram capazes de prover melhores condições, em termos de infraestrutura e serviços de saneamento básico, do que os municípios de Alagoas na mesma bacia. Por conta disso, os domicílios urbanos desses municípios pernambucanos apresentaram um percentual de atendimento com rede acima do valor do próprio estado, e até do país. Os domicílios urbanos dos municípios do lado alagoano, no entanto, apresentaram o maior percentual em esgotamento pela categoria “Outros”, bem próximo do valor do próprio estado.

Os domicílios urbanos alagoanos inseridos na Bacia Hidrográfica do rio Mundaú apresentaram o maior percentual, 45.8%, em relação à categoria “Outros”, situação pior em comparação aos domicílios urbanos do lado pernambucano. Já na área rural, observa-se que a utilização de fossas sépticas era uma prática mais comum nos municípios alagoanos que nos pernambucanos pertencentes a essas bacias. Há também a situação de domicílios urbanos que não apresentavam banheiro de uso exclusivo dos moradores e nem sanitário. Esse dado alarmante, de 2.6%, faz referência aos domicílios alagoanos na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Meio. Este valor era mais de quatro vezes o percentual brasileiro, de 0.6%. De modo geral, apesar de essas informações estarem defasadas, são muito relevantes para compreender o quão precárias são as condições sanitárias na região de estudo, em especial na área do entorno das lagunas, como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Proporção de domicílios particulares permanentes, inseridos na área de contribuição ao CELMM, por tipo de esgotamento sanitário (%) (IBGE, 2010). Nota-se o destaque para os municípios de interesse. Observa-se que as porcentagens foram calculadas para cada zona, urbana e rural, de forma individual, considerando o total de domicílios particulares permanentes inseridos em cada uma delas.

Proporção de domicílios particulares permanentes, inseridos na área de contribuição ao CELMM, por tipo de esgotamento sanitário (%)						
Municípios	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica		Outros		Sem banheiro de uso exclusivo e nem sanitário
	Urbano	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano
Maceió	24.9	17.4	-	56.6	-	1.1
Rio Largo	24.6	12.9	19.1	61.7	77.6	0.8
Marechal Deodoro	10.2	19.7	0.8	65.5	79.4	4.6
Pilar	9.6	18.3	2.1	71.2	63.6	0.9
Satuba	62.9	12.3	46.7	22.9	44.0	1.9
Santa Luzia do Norte	2.7	0.8	0.6	93.5	94.9	3.0
Coqueiro Seco	15.1	1.5	-	80.0	87.4	3.4

Dos municípios do entorno, Satuba se destacava por possuir quase 63% dos domicílios urbanos ligados à rede geral de esgoto ou pluvial. No entanto, na base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) não consta quaisquer informações sobre coleta e tratamento nesse município, como pode ser observado na Tabela 7. Segundo ANA (2017), os esgotos coletados não são tratados, sendo lançados diretamente no rio Mundaú. O pior cenário encontra-se no município de Santa Luzia do Norte, a montante da laguna Mundaú, onde 90.4% da população não é atendida por rede coletora de esgoto (ANA, 2017). Apenas 2.7% dos domicílios estavam ligados à rede geral de esgoto ou pluvial, segundo o IBGE (2010). O município de Pilar, a montante da laguna Manguaba, também se destaca negativamente, pois possui apenas 20.7% de atendimento com rede coletora de esgoto na área urbana (SNIS, 2022). Nesse município, apenas 5.1% dos esgotos gerados são tratados, de modo que uma parcela do restante deve desembocar *in natura* na laguna Manguaba. O município de Marechal Deodoro apresentou índice de 13.1% de atendimento com rede coletora na área urbana, um avanço bem pequeno, considerando que na época do Censo 2010, apenas 10.2% dos domicílios urbanos estavam ligados à rede geral de esgoto ou pluvial. O índice fornecido pelo SNIS, para Marechal Deodoro, corresponde a apenas 20% do valor nacional, que é de 64.1%.

É válido mencionar que diversos municípios que se encontram inseridos total ou parcialmente nas bacias de contribuição não dispõem de dados recentes sobre os indicadores operacionais de esgotamento sanitário no SNIS. Considerando dados no período de 2011 a 2021, apenas 67% dos municípios alagoanos e 42% dos pernambucanos pertencentes às bacias drenantes ao CELMM possuem essas informações. Esses dados são apresentados na Tabela 7, com o objetivo de compor um diagnóstico mais atual possível do esgotamento sanitário na área de estudo.

Tabela 7 - Indicadores operacionais de esgotamento sanitário dos municípios de interesse e bacias contribuintes. Nota-se ainda a média dos municípios alagoanos e pernambucanos nas bacias de drenagem, além dos dados de Alagoas e Pernambuco, do Nordeste e do Brasil (SNIS, 2022).

Municípios	Índice de atendimento com rede (%)		Índice de coleta dos esgotos (%)	Índice de tratamento dos esgotos (%)	
	Coleta de esgotos		Esgotos gerados	Esgotos gerados	Esgotos coletados
	Total	Urbano	Total	Total	Total
	(IN056)	(IN024)	(IN015)	(IN046)	(IN016)
Maceió	23.7	23.7	36.3	36.3	100.0
Rio Largo	16.4	20.1	38.1	19.6	51.4
Marechal Deodoro	12.4	13.1	14.1	4.8	33.6
Pilar	19.8	20.7	8.3	5.1	61.9
Satuba	-	-	-	-	-
Santa Luzia do Norte	-	-	-	-	-
Coqueiro Seco	-	-	-	-	-
Média dos municípios alagoanos na bacia de drenagem	34.6	47.3	41.8	11.0	51.4
Alagoas	17.9	22.7	23.8	20.5	67.6
Média dos municípios pernambucano na bacia de drenagem	52.3	67.3	56.0	1.5	25.0
Pernambuco	30.8	35.8	36.0	35.6	75.0
Nordeste	30.2	39.2	39.3	35.5	77.9
Brasil	55.8	64.1	60.2	51.2	80.8

Da parcela do município de Maceió inserida na Região Hidrográfica do CELMM, 75.1% dos domicílios urbanos não estavam conectados a uma rede geral de esgoto ou pluvial. Esse valor ultrapassou a condição do estado de Alagoas naquela época, que era de 72.4%, como também da região Nordeste, com 55.5% (IBGE, 2010). Dados do SNIS (2022) indicam que este município possui 23.7% de atendimento com rede coletora na área urbana. Além disso, cerca de 36.3% dos esgotos gerados são tratados, número este que está $\approx 30\%$ abaixo do índice nacional de 51.2%. O PMSB - Maceió/AL (2017), no entanto, menciona que o índice de atendimento com rede coletora de esgoto na área urbana é de apenas 19%, valor considerado baixo tendo em vista que o sistema de esgotamento começou a ser implantado na década de 1950. Nota-se ainda segundo o IBGE (2010), que 56.7% dos domicílios urbanos possuíam esgotamento por meio de fossa rudimentar/rústica, vala, rio, lago, mar ou outro.

Historicamente, a prestação dos serviços de esgotamento sanitário na cidade de Maceió era realizada pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL). A CASAL foi criada em 1962 pelo Governo do Estado de Alagoas, e era responsável pela construção, exploração e manutenção dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário dos centros populacionais do Estado (PMSB - MACEIÓ/AL, 2017). Atualmente, a prestação dos serviços de esgotamento sanitário a este município, assim como aos demais que se encontram no entorno das lagunas, é ou será realizada, de forma total ou parcial, por uma empresa privada (SNIS, 2022).

Os investimentos na área de esgotamento sanitário, por parte da CASAL, ocorreram de

forma mais expressiva a partir da década de 1980, com implantação e expansão do sistema de coleta de esgoto e disposição final por meio de emissário submarino. O sistema coletivo de esgotamento sanitário na área urbana de Maceió, exposto na Figura 6, pode ser dividido em três sistemas de tratamento diferentes, a saber: Sistema de Disposição Oceânica, Sistema de Lagoas de Estabilização Benedito Bentes I e Sistemas Condominiais de Tratamento por Lodos Ativados. Parte da área de interesse deste estudo está inserida na área de cobertura do Sistema de Disposição Oceânica, em especial a bacia hidrossanitária denominada Sudoeste, também conhecida como Bacia Lagunar.

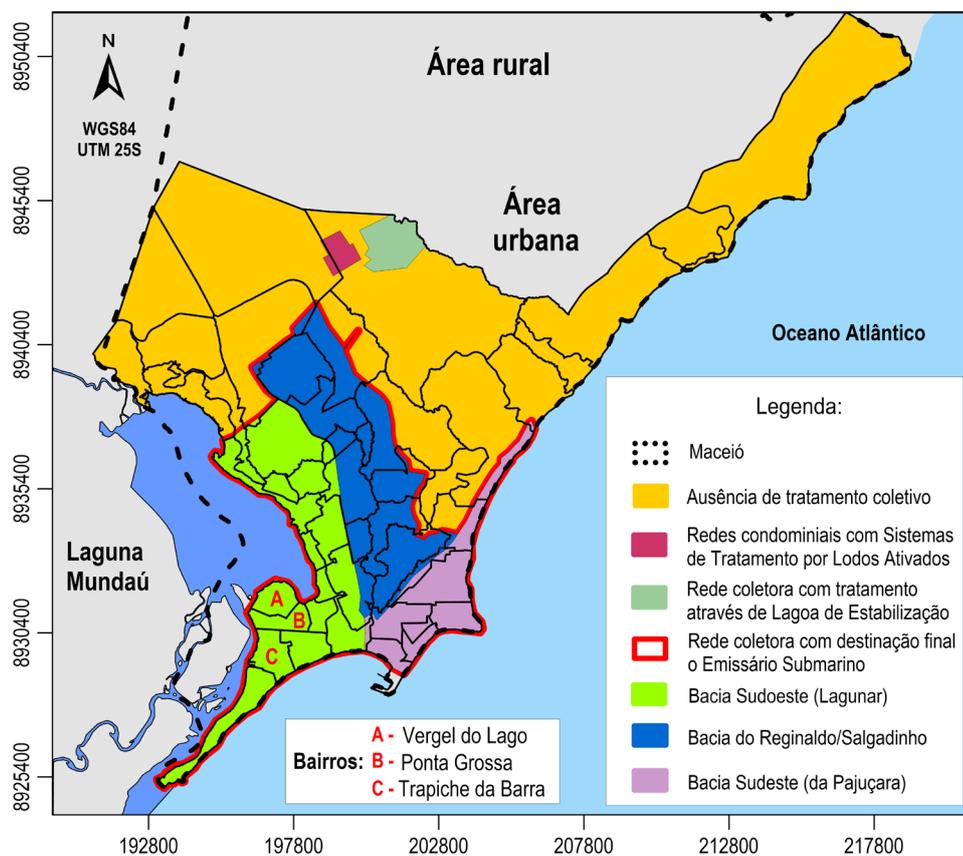


Figura 6 - Divisão dos sistemas de esgotamento sanitário da região urbana de Maceió (PMSB - MACEIÓ/AL, 2017).

Dentre as bacias inseridas na área de cobertura do Sistema de Disposição Oceânica, a Bacia Lagunar é aquela que possui a rede coletora implantada mais recentemente no município, o que reflete o baixo índice de atendimento por rede coletora de esgoto, cerca de 30%. Segundo o PMSB - Maceió/AL (2017), os principais problemas relativos ao esgotamento sanitário estão relacionados à ausência ou precariedade do sistema de coleta de esgoto nas regiões mais a montante da bacia, além da existência de diversos moradores que não realizaram a ligação de seus domicílios à rede. Informa ainda que o Sistema de Disposição Oceânica atende cerca de

16% da população urbana de Maceió, e o emissário opera com, aproximadamente, metade de sua capacidade de projeto.

Segundo o Instituto Trata Brasil (2023), a avaliação do saneamento básico de Maceió ocupa a posição de 93º lugar, com base no Ranking do Saneamento, que analisa a situação do saneamento básico dos 100 maiores municípios do Brasil. A Figura 7 retrata as condições precárias de moradia e saneamento básico no bairro Bom Parto, região sudeste da laguna Mundaú. Percebe-se, deste modo, a necessidade urgente de se prover maiores investimentos em políticas públicas, programas, projetos e ações voltadas à melhoria das condições de habitação e saneamento básico, em especial na área de esgotamento sanitário.

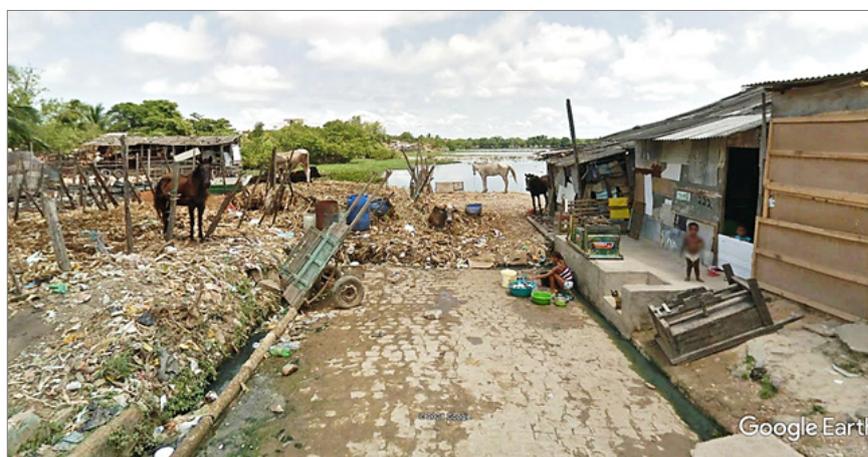


Figura 7 - Condições de moradia e saneamento básico precários, na região sudeste da laguna Mundaú (Google Earth Pro®, 2021).

4.4 Potencial Poluidor e Degradação Ambiental nas Bacias Contribuintes ao CELMM

O potencial poluidor das atividades econômicas se deve principalmente aos efluentes industriais que, tratados ou não, alcançam os rios e chegam às lagunas (ANA, 2006). As usinas produtoras de açúcar e álcool geram como resíduo, entre outros, a vinhaça, também conhecido como vinhoto. A concentração orgânica desse resíduo geralmente é muito elevada, com DBO₅ variando de 15000 a 20000 mg/L (ELIA NETO e SHINTAKU, 2009), enquanto nos esgotos domésticos, como comparação, a DBO₅ normalmente varia de 100 a 400 mg/L (JORDÃO e PESSÔA, 2017). Conforme já mencionado, a DBO é amplamente utilizada para determinar o potencial poluidor de efluentes domésticos e industriais (CHAPMAN, 1996; SAWYER, 2003; VON SPERLING, 2014; JORDÃO e PESSÔA, 2017). Outra fonte de poluição relevante provém das lavouras de cana-de-açúcar, com a utilização de fertilizantes/nutrientes e pesticidas/agrotóxicos, sendo parte deles carreados em direção aos cursos d'água durante o escoamento das águas da chuva.

Principalmente na área urbana, mas também na rural, a falta de tratamento adequado dos efluentes sanitários é uma das principais fontes de poluição e degradação dos recursos hídricos. Com bases nos dados de população do IBGE (2010), e assumindo uma contribuição *per capita* de carga orgânica de 45 g DBO₅/hab.×dia, com base no intervalo de valores apresentado por Von Sperling (2014), pode-se estimar a carga de DBO₅ produzida nas bacias drenantes ao CELMM. Conforme exposto na Tabela 8, a carga total estimada foi de 51810 Kg DBO₅/dia. Nota-se que a laguna Mundaú tende a receber maior parcela de carga orgânica do que a laguna Manguaba, devido ao maior contingente populacional em suas bacias. As cargas geradas pelos habitantes nessas bacias são pequenas se comparada às cargas geradas pelas usinas nos períodos de safra. Como exemplo, segundo dados provenientes do Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool do estado de Alagoas, para a safra de 2010/2011, foi possível estimar, com base em parâmetros médios provenientes de Elia Neto e Shintaku (2009), as cargas orgânicas geradas durante o período de safra, considerando a média de 193 dias, compreendidos entre os meses de setembro a maio.

Tabela 8 - Estimativa do potencial poluidor, em Kg DBO₅/dia, gerado pelos efluentes sanitários e pelas usinas produtoras de açúcar e álcool (IBGE, 2010; ELIA NETO e SHINTAKU, 2009; Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool do estado de Alagoas, 2010/2011).

	Estado	Estimativa do Potencial Poluidor - Kg DBO ₅ /dia			Equivalente populacional
		Efluente Sanitário (esgotos)	Nº Usinas (Safra - 2010/2011)	Efluente Industrial (Usinas - açúcar e álcool) ⁶	
Bacia Hidrográfica do rio Mundaú	AL	13065	5	301337	6696378
	PE	11771	-	-	-
	TOTAL	24836			
Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Meio	AL	6805	1	12094	268756
	PE	3666	-	-	-
	TOTAL	10471			
Região Hidrográfica do CELMM	AL	16502	2	129547	2878822
TOTAL		51810	8	442978	9843956

A carga estimada para os efluentes das usinas foi de ≈ 443000 Kg DBO₅/dia, valor muito superior à carga calculada para os efluentes domésticos. O valor obtido corresponderia a um equivalente populacional superior a 9.8 milhões de habitantes, mais de 8.5 vezes o contingente populacional naquela época. Observa-se que as usinas consideradas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Meio e também na Região Hidrográfica do CELMM estão inseridas na zona drenante à laguna Manguaba. Com base nisso, percebe-se que a carga gerada pelas usinas na

⁶ Nota-se que na estimativa das cargas foram consideradas as contribuições dos seguintes efluentes: lavagem da cana; limpeza de pisos e equipamentos; colunas barométricas e multijatos; condensados do vapor vegetal e vinhaça/vinhoto.

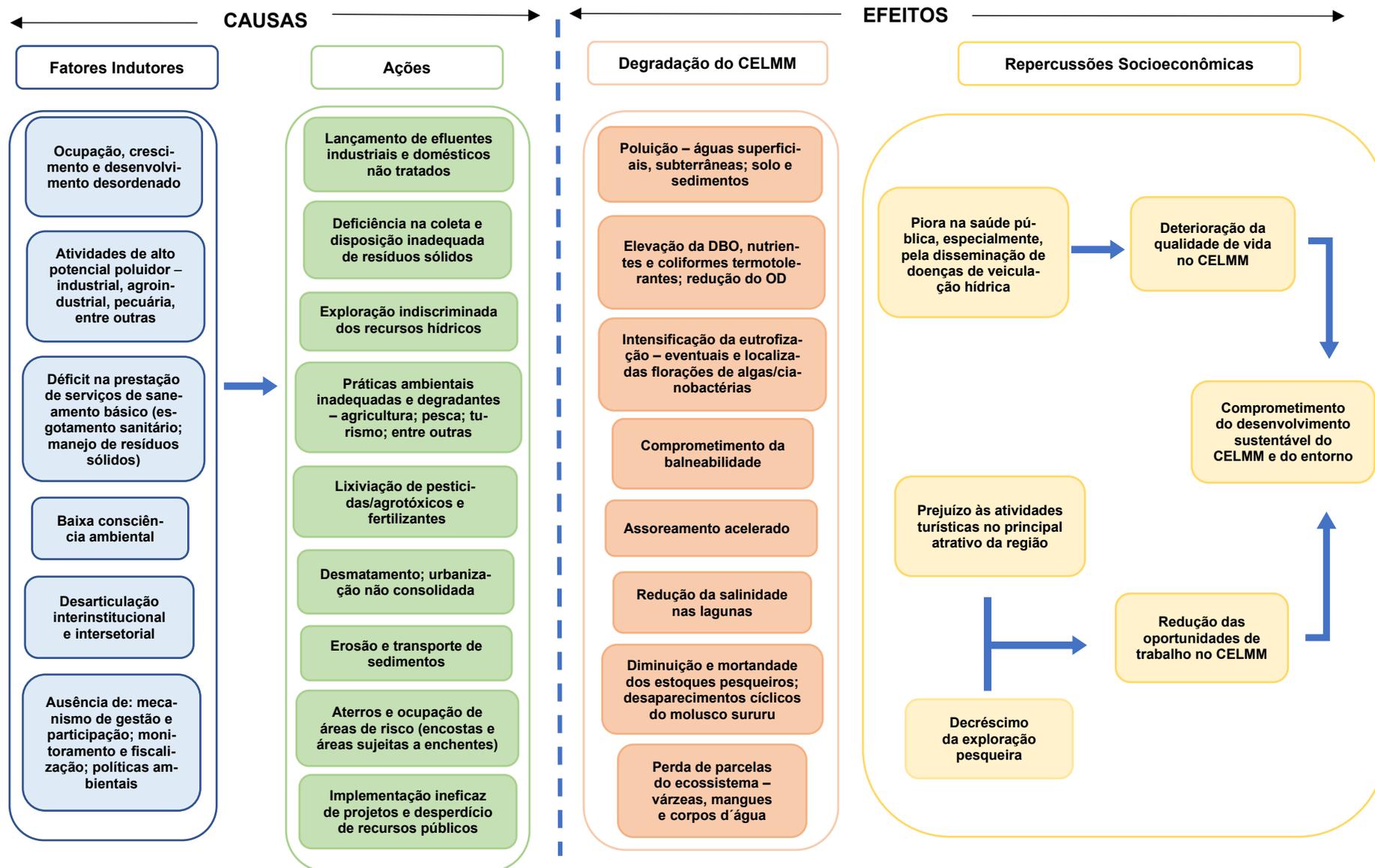
bacia drenante à laguna Mundaú teve maior potencial poluidor, mais que o dobro, em comparação à carga gerada pelas usinas nas bacias drenantes à laguna Manguaba.

A pecuária, com a presença de diversos matadouros nas bacias contribuintes, também é uma atividade de alto potencial poluidor, pois gera resíduos e efluentes com elevada carga orgânica, que podem ser lançados, sem tratamento, nos cursos d'água. Diversas outras atividades econômicas/industriais de potencial poluidor variando de baixo a elevado também podem impactar o ambiente, caso seus resíduos e efluentes não sejam tratados e/ou dispostos de forma adequada. Citam-se, por exemplo: indústrias da agropecuária; indústrias químicas, entre elas petroquímica e cloroquímica; indústrias de laticínios, têxtil, fertilizantes, tintas, curtumes, cerâmicas; atividades de turismo, entre outras (ANA, 2006). É válido mencionar que, segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas (2016), há uma crescente implantação de aterros sanitários para dar destinação adequada aos resíduos sólidos urbanos, em substituição aos lixões, que contaminavam, com chorume, tanto o solo como os recursos hídricos. O PMSB - Maceió/AL (2017), menciona, no entanto, a presença de lixo na região da orla lagunar e áreas circunvizinhas, como também em alguns canais urbanos que desembocam na laguna Mundaú.

Todos esses fatores geram forte pressão antrópica nas lagunas. Cotovicz Jr. et al. (2012) avaliaram o estado trófico do CELMM através dos modelos ASSETS (*Assessment of Estuarine Trophic Status*) e TRIX (*Trophic Index*), além de outros três índices de estado trófico, e constataram que as lagunas são eutrofizadas, devido, principalmente, ao grande aporte de nutrientes. A laguna Mundaú apresentou condições de eutrofização moderadas, enquanto na laguna Manguaba, as condições foram altamente tróficas. Os autores indicaram tendência de pouca melhoria em relação às condições apresentadas no referido estudo. É mencionado ainda a ocorrência de cianobactérias na laguna Manguaba, com grande frequência e abrangência espacial, em concordância com o estudo de Melo-Magalhães et al. (2009), que observaram, em ambas as lagunas, concentrações elevadas de clorofila *a*.

O Quadro 3 apresenta o diagrama adaptado da ANA (2006), com um resumo das principais questões relacionadas à poluição e à deterioração da qualidade ambiental do CELMM.

Quadro 3 - Resumo das principais questões relacionadas à poluição e à deterioração da qualidade ambiental do CELMM (ANA, 2006).



5 METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a metodologia adotada para o desenvolvimento deste estudo. Os assuntos abordados envolvem a descrição sucinta dos modelos adotados, a origem e a manipulação dos dados ambientais utilizados e a definição dos cenários a serem simulados.

5.1 Modelo Computacional Adotado

Os modelos computacionais empregados neste estudo são provenientes do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA[®], um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Em meio às diversas ferramentas computacionais disponíveis, tais como MIKE 21/3 (DHI, 2021) e o Delft3D (DELTARES, 2021), adotou-se o SisBaHiA[®] em razão da adequabilidade aos propósitos do estudo, comprovada aplicabilidade e eficácia na modelagem ambiental de sistemas estuarinos, além de sua acessibilidade.

O SisBaHiA[®], exposto na Figura 8, se caracteriza por ser um conjunto de modelos aplicados para desenvolver estudos e projetos com foco na gestão ambiental dos recursos hídricos, de forma quantitativa e qualitativa. Os modelos constituintes desse sistema podem ser utilizados, por exemplo, para análises de circulação hidrodinâmica e de renovação e qualidade de água. De forma geral, tais modelos auxiliam na compreensão da dinâmica ambiental em sistemas ambientais complexos, sendo, portanto, adequados para realizar simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, reservatórios, lagos e lagoas (ROSMAN, 2023). Citam-se, como exemplos de aplicações, os trabalhos desenvolvidos por Lima (2016), Silva (2019), Aguilera, Santos e Rosman (2020), Dalazen, Cunha e Almeida (2020), e Cunha et al. (2021). Demais aplicações podem ser consultadas nas seções “Aplicações – Projetos” e “Pesquisas – Teses”, em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>.

Os seguintes módulos do SisBaHiA[®] foram utilizados neste trabalho: Modelo Hidrodinâmico; Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização; Modelo de Transporte Euleriano e o Modelo de Transporte Lagrangeano. A seguir, apresentam-se as principais informações referentes aos modelos adotados. Mais detalhes quanto aos modelos e suas formulações matemáticas encontram-se na Referência Técnica do SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2023), disponível no mesmo site citado anteriormente.



Figura 8 - Imagem da tela de abertura do SisBaHiA[®].

5.1.1 Modelo Hidrodinâmico (MH)

Modelos hidrodinâmicos são aplicados quando se deseja determinar as variações de nível da superfície livre da água e o campo de correntes bidimensional ou tridimensional. O MH presente no SisBaHiA[®] adota técnicas de filtragem espaço-temporal otimizados para corpos d'água naturais, sendo chamado de FIST3D (*Filtered in Space and Time 3D*). FIST representa um método de modelagem de corpos d'água com superfície livre nos quais a definição de escalas resolvíveis e não resolvíveis (turbulência) da modelagem de escoamentos é baseada em técnicas de filtragem semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - Large Eddy Simulation) (ROSMAN, 1997). O FIST3D pode ser considerado um eficiente modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, capaz de simular com grande acurácia a circulação hidrodinâmica em corpos d'água naturais com geometria complexa, sob diferentes cenários meteorológicos, oceanográficos, fluviais ou lacustres (ROSMAN, 2023).

Em corpos d'água naturais, a modelagem de escoamentos em regime turbulento baseia-se no princípio da conservação da quantidade de movimento (Segunda Lei de Newton), sendo descrita a partir das equações gerais de escoamentos em regime turbulento, conhecidas como equações de Navier-Stokes. Os escoamentos de grande escala, nos quais as escalas dos movimentos horizontais são pelo menos 20 vezes maiores do que a profundidade, são considerados como sendo em águas rasas. Dessa forma, as equações governantes do movimento, baseada nas equações de Navier-Stokes, são chamadas equações de águas rasas, nas quais considera em sua

formulação a aproximação de pressão hidrostática, assim como a aproximação de Boussinesq. Essas equações, em conjunto com a equação da continuidade do volume, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado, compõe o modelo matemático que permite representar a hidrodinâmica de qualquer corpo d'água (ROSMAN, 2023).

No SisBaHiA[®], o sistema de discretização espacial é otimizado para sistemas aquáticos naturais e é preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode ser utilizado também elementos finitos triangulares quadráticos ou a combinação de ambos. A discretização temporal é realizada via esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem (ROSMAN, 2023). O MH é composto de um módulo 2DH, bidimensional na horizontal, que calcula a elevação da superfície livre e as correntes médias na vertical, e outro módulo em 3D, que calcula o campo de velocidades tridimensional. Segundo Oliveira e Kjerfve (1993), ANA (2012c), Lima (2017) e Cunha et al. (2021), as lagoas Mundaú e Manguaba são rasas, sujeitas à ação das marés e ventos frequentes vindos de Este (E) a Sudeste (SE). Como consequência, a coluna de água é bem misturada verticalmente. Sendo assim, uma modelagem com variáveis médias na vertical é adequada.

5.1.2 Modelo de Transporte Euleriano (MTE)

O MTE é um modelo de transporte advectivo-difusivo médio na vertical, com reações cinéticas. Tem como finalidade simular o transporte e a concentração de substâncias ou escalares passivos, isto é, que não interferem de forma relevante na hidrodinâmica. O transporte de constituintes em um corpo d'água natural se baseia no princípio da conservação da massa, expressa por equações de balanço do constituinte em questão, que conceitualmente pode ser compreendida, com base em Rosman (1997), como: *“A taxa temporal de variação da massa de qualquer constituinte em um volume de controle é igual ao fluxo de entrada, menos o fluxo de saída, mais a massa resultante de reações internas de produção e consumo do constituinte no interior do volume.”* Mais informações, incluindo a equação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, podem ser obtidas na seção 2.6 e no capítulo 5 da Referência Técnica do SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2023).

Neste estudo, o modelo abordado foi utilizado para avaliar, em termos espaciais e temporais, os Tempos Hidráulicos Característicos (THC), expressos pelos Tempos de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) da Água e Idade da Água (I_A). A concepção desses modelos será abordada na seção 5.4. A partir da caracterização desses THC, será possível identificar quais as regiões do corpo d'água se renovam mais rapidamente, bem como aquelas em que a renovação se processa

lentamente, sendo estas, em teoria, mais vulneráveis à deterioração da qualidade de água, ocasionada, por exemplo, pela eutrofização.

5.1.3 Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA)

O MQA é adotado quando se deseja simular grandezas escalares ou as múltiplas concentrações de constituintes presentes na água. Possui a mesma base numérica do Modelo Euleriano de Transporte Advectivo-Difusivo integrado na vertical, e pode contar, a depender da reatividade do constituinte, com reações cinéticas de produção e consumo através de processos físicos, biológicos e químicos (ROSMAN, 2023). O MQA considera o ciclo do oxigênio, do nitrogênio e do fósforo, além de biomassa de fitoplâncton e zooplâncton. A modelagem pode ser realizada com até 11 escalares, considerando que cada parâmetro de qualidade de água, com exceção da salinidade e temperatura, possui reações cinéticas distintas nos processos de transformação. Os escalares ou parâmetros são: Salinidade, Temperatura, OD, DBO, Amônia, Nitrato, Nitrogênio Orgânico, Fósforo Inorgânico e Orgânico, Clorofila *a* e Zooplâncton. Além de análises individuais dos parâmetros, é possível agrupar os resultados e obter, por exemplo, o Nitrogênio Total (Amônia + Nitrato + Nitrogênio Orgânico), Nitrogênio Kjeldahl (Nitrogênio Orgânico + Amônia) e Fósforo Total (Fósforo Inorgânico + Fósforo Orgânico).

Esses parâmetros, com exceção da salinidade e temperatura, são considerados constituintes passivos, isto é, não interferem de forma relevante na hidrodinâmica, tornando possível que ambos os modelos, o MQA e o MH, rodem desacoplados. A salinidade e a temperatura podem apresentar comportamento ativo, quando são capazes de gerar gradientes de densidade suficientes para interferir na hidrodinâmica, ou comportamento passivo, a critério do modelador. Caso seja considerado ativo, o MQA é executado de forma acoplada ao MH, isto é, simultaneamente. De modo geral, o transporte do escalar fica condicionado principalmente aos processos advectivos, indicando uma enorme dependência entre os resultados da simulação hidrodinâmica e o processo de transporte. Ressalta-se que os processos difusivos também são muito importantes para a definição do transporte, sendo modelados pelas mesmas técnicas de filtragem utilizadas no MH (ALDAMA, 1985; ROSMAN, 1987; ROSMAN, 2023). Dentre os diversos parâmetros disponíveis, apenas a salinidade e a temperatura foram simuladas, com comportamento ativo, a fim de contabilizar os efeitos dos gradientes de densidade na circulação hidrodinâmica, principalmente, quanto à salinidade. Ressalta-se que o principal objetivo das modelagens de salinidade e temperatura foi caracterizar as variações espaciais e temporais desses parâmetros de qualidade de água.

5.1.4 Modelo de Transporte Lagrangeano (MTL)

O MTL é um modelo de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, indicado para simular o transporte de constituintes que possam estar flutuando, misturados ou ocupando uma determinada camada na coluna de água, por meio da observação da trajetória de partículas no meio (ROSMAN, 2023). Este modelo também faz uso de técnicas de filtragem espaço-temporal para calcular a difusão e dispersão de partículas. É apropriado para modelar fenômenos que apresentem conflitos de escalas espaciais em relação à discretização do modelo hidrodinâmico, no qual podem apresentar fortes gradientes ou não, como, por exemplo, nas simulações de transporte de contaminantes como manchas de óleo e plumas de emissários. Pode-se considerar na modelagem, a inclusão de diversos processos cinéticos de ganho ou perda de quantidade do escalar sendo transportado, que seja função do tempo transcorrido após o lançamento da parcela de contaminante em questão. O modelo pode ser empregado de forma determinística e probabilística. O determinístico calcula o transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas em camadas do escoamento. Já o probabilístico, que é acoplado ao anterior, possibilita obter resultados probabilísticos a partir de diferentes eventos ou de resultados ao longo de um período específico, como a probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite.

O MTL foi utilizado com dois propósitos. O primeiro para avaliar o Tempo de Residência (T_R) das massas de água no interior das lagoas, considerando os respectivos períodos chuvoso e seco. Já o segundo, para simular a dispersão e o decaimento de plumas de coliformes termotolerantes, originárias dos lançamentos de esgotos pelos rios e canais de drenagem urbana considerados na região de estudo. De forma mais específica, empregou-se os Modelos de Campo Próximo e de Decaimento Bacteriano para Fontes Pontuais e Emissários. Nas simulações dos processos de mistura dos esgotos com o corpo d'água receptor, é conveniente modelar duas regiões com característica espaciais e temporais marcadamente distintas: a primeira denominada *campo próximo* ou *zona de mistura ativa*, devido a sua proximidade com a linha difusora do emissário; e a segunda, chamada de *campo afastado* ou *zona de mistura neutra* (FEITOSA e ROSMAN, 2007; ROSMAN, 2023). Na região do *campo próximo*, a turbulência é intensa e a circulação hidrodinâmica é extremamente influenciada pelo jato efluente da tubulação difusora, pelas forças de empuxo e pelo escoamento ambiente (ROSMAN, 2023). De forma geral, a modelagem do *campo próximo* tem como objetivo obter resultados sobre as características da pluma, incluindo informações sobre a diluição dos efluentes, altura do topo da pluma em relação ao fundo, espessura da pluma, o comprimento da região de mistura inicial (campo próximo),

entre outros. Como exemplo, apresenta-se, na Figura 9, as características da pluma sob ação de correntes em ambientes com densidade variável (TIAN, ROBERTS e DAVIERO, 2006; ROSMAN, 2023). Na medida em que a pluma ejetada se afasta da linha difusora, ela vai se misturando com a água ambiente até tornar-se neutra em relação ao escoamento, sendo, portanto, transportada passivamente pelas correntes. Nesta condição, a pluma se encontra na região denominada *campo afastado* ou *zona de mistura neutra*. De forma geral, a modelagem do *campo afastado* objetiva obter resultados sobre a dispersão e transporte da pluma, considerando os principais processos envolvidos, tais como advecção, difusão turbulenta do contaminante e reações cinéticas de consumo. Observa-se que o SisBaHiA[®] realiza, de forma automática, o acoplamento entre o modelo de *campo próximo* e o de *campo afastado*.

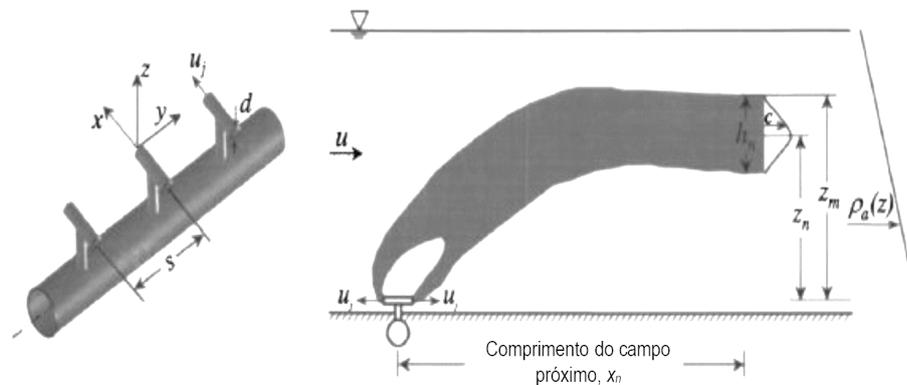


Figura 9 - Características da pluma sob ação de correntes em ambientes com densidade variável (TIAN, ROBERTS e DAVIERO, 2006; ROSMAN, 2023). Descrição dos parâmetros: espaçamento entre orifícios (s) do difusor; diâmetro dos orifícios (d); velocidade de lançamento do efluente (u_j); intensidade do escoamento (u); altura do topo da pluma em relação ao fundo (z_m); espessura da pluma (h_n); variações verticais de densidade entre a superfície livre e o ponto de lançamento do efluente (dp/dz). Mais detalhes podem ser obtidos na seção 7.6.5 da Referência Técnica do SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2023).

As reações cinéticas, no caso de lançamentos de efluentes sanitários, referem-se à taxa de decaimento bacteriano. Os principais fatores que influenciam a modelagem de decaimento bacteriano são: a radiação solar incidente, a salinidade, a temperatura e as condições de turbidez na coluna d'água. Outros fatores também proporcionam reduções nas concentrações, porém, são desconsiderados na modelagem, como, por exemplo, a predação. Tal ação possui o intuito de diminuir os níveis de incerteza ao calcular a taxa de decaimento dos microrganismos indicadores, além de contribuir em favor da segurança na avaliação da balneabilidade (ROSMAN, 2023).

5.2 Modelagem Digital de Terreno

Na modelagem digital de terreno definiu-se o domínio de modelagem, ou seja, a área de interesse a ser modelada. A partir disso, realizou-se a discretização desse domínio por meio de

uma malha de elementos finitos, que recebeu os dados de batimetria e rugosidade equivalente de fundo, afim de representar as características físicas da região.

5.2.1 Domínio de Modelagem e Malha de Discretização

A delimitação do domínio de modelagem foi realizada a partir do emprego de contornos terrestres e abertos. Usualmente, os contornos terrestres, também chamados de “fechados”, são utilizados para representar as margens de baías ou lagunas, seções de rios ou canais, os limites do litoral, como também a presença de ilhas. Neste contorno são prescritas condições de fluxos de água por meio de valores de vazões ou velocidades, de modo que as variações de nível d’água são calculadas via modelagem. Já os contornos abertos, também chamados de “Fronteira Aberta”, são utilizados para representar os limites do domínio, e não um limite físico. Normalmente delimitam o encontro da massa de água modelada com a massa de água exterior. Como exemplo, cita-se a entrada de uma baía ou estuário. Na “Fronteira Aberta” são prescritos níveis d’água específicos, de modo que os fluxos de água são calculados via modelagem.

Os contornos terrestres e abertos foram gerados a partir de imagens do Google Earth Pro[®] referentes ao ano de 2018. A partir dos contornos, e por meio do software Surfer[®] (<https://www.goldensoftware.com>), gerou-se o Mapa Base, exposto na Figura 10. No Mapa Base, o domínio de modelagem está na cor branca, o contorno de mar em azul e o contorno de terra em cinza. No contorno de terra, destaca-se, quanto à rede de drenagem, os rios Mundaú, Paraíba do Meio, Sumaúma e Remédios, além de outros afluentes de menor importância em termos de vazão, no entanto, relevantes em termos de poluição. Com base nos contornos gerados foi realizada, no SisBaHiA[®], a discretização do domínio de modelagem, a partir de uma malha de elementos finitos quadrangulares biquadráticos e triangulares quadráticos. A Figura 10 expõe a malha produzida, constituída de 3227 elementos finitos, sendo 3093 quadrangulares e 134 triangulares, resultando em 14533 nós de cálculo. Na mesma figura, no canto inferior esquerdo, são apresentadas as informações relativas ao domínio discretizado, que foram geradas a partir dos dados batimétricos que serão comentados logo após. Nota-se que, com exceção da “Área da Malha”, as demais informações foram obtidas considerando o nível d’água equivalente ao Nível Médio do Mar (NMM), isto é, 1.155 m, segundo a Carta Náutica do Porto de Maceió - CN N° 901 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil.

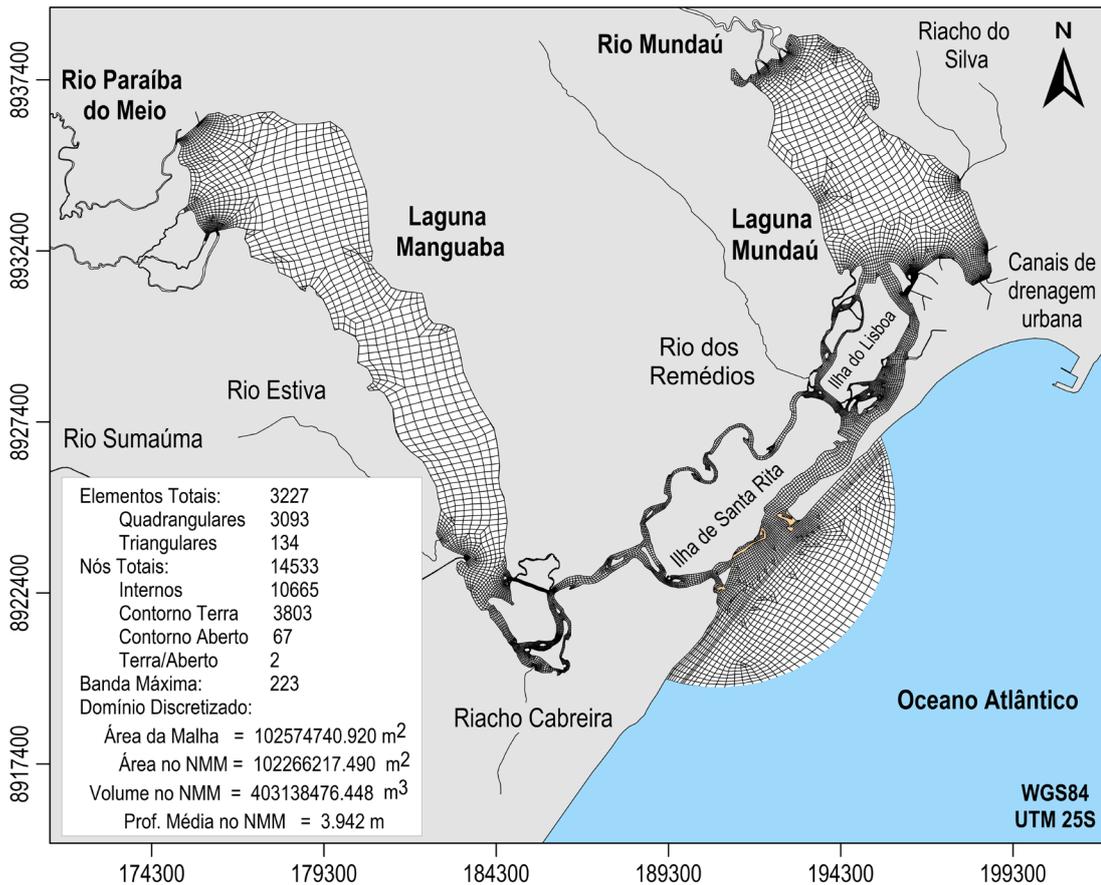


Figura 10 - Mapa base, com a exposição da malha de elementos finitos. Nota-se, no canto inferior esquerdo, as informações relativas ao domínio discretizado, tendo como base o nível médio do mar de 1.155 m, segundo a Carta Náutica do Porto de Maceió - CN N° 901 da DHN.

5.2.2 Batimetria

Nesta seção apresentam-se as informações batimétricas adquiridas para caracterizar a topografia de fundo da região de estudo. Antes, porém, é definido o nível de referência adotado na modelagem.

➤ Nível de Referência Adotado na Modelagem

O conhecimento acerca das Referências de Nível (RN) existentes na área de estudo e a sua correlação com o nível de referência a ser adotado na modelagem é fundamental, pois torna possível corrigir, caso seja necessário, os dados de topografia de fundo da região. A manipulação desses dados se baseou na Figura 11, que apresenta o diagrama adaptado da Estação Maregráfica do Porto de Maceió, no qual se evidencia que o Nível de Redução (NR) da DHN é o 0 da modelagem, ou seja, é o nível de referência adotado. Além disso, relaciona-o com o Datum Imbituba do IBGE (Altitude Ortométrica), e define, ainda, a cota referente ao Nível Médio do Mar (NMM), utilizada posteriormente na geração das séries de elevação da superfície livre da água na fronteira aberta dos modelos hidrodinâmicos.

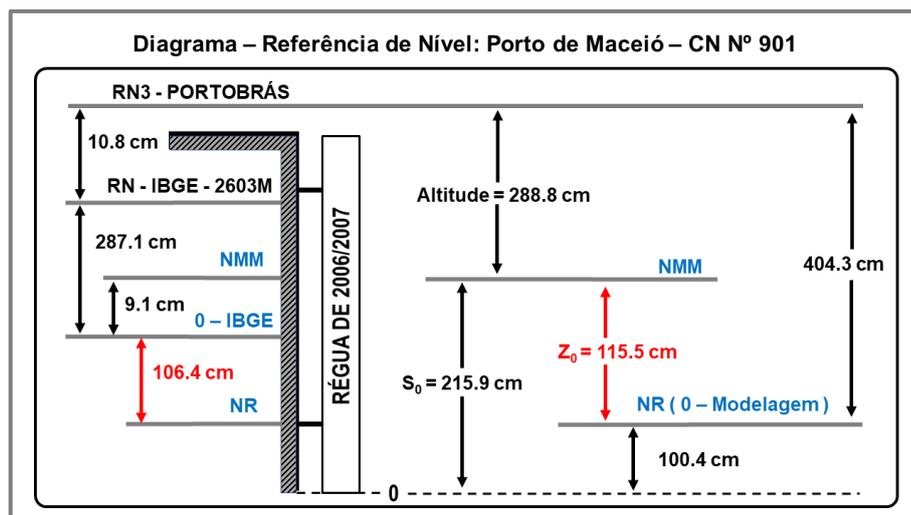


Figura 11 - Diagrama de Referência de Nível do Porto de Maceió - CN Nº 901. Nota-se que a cota da estação geodésica RN-IBGE-2603M se refere a Altitude Ortométrica, e foi adotada pela ANA no levantamento batimétrico realizado nos anos de 2011 e 2012 (ANA, 2012a).

➤ Dados de Batimetria

Os dados de batimetria foram obtidos de diferentes fontes. Na laguna Mundaú e em grande parte dos canais de comunicação, os dados foram provenientes de campanhas de sondagem batimétrica realizadas nos períodos de dezembro de 2011 e abril de 2012, pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O mapa batimétrico obtido, cujas cotas estão referenciadas ao NR da DHN, é apresentado na Figura 12, à esquerda. Ainda na laguna Mundaú, utilizou-se também dados provenientes do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), no âmbito dos “Estudos Sobre a Instabilidade do Terreno nos Bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL)”, desenvolvido no período de 2018 a 2019. Nesse estudo realizou-se o levantamento batimétrico parcial da laguna, no qual priorizou-se a região equivalente à metade inferior desta, juntamente com uma parcela de seu canal de comunicação. Na Figura 12, à direita, apresenta-se o mapa batimétrico, com cotas altimétricas referenciadas ao Datum Imbituba do IBGE (Altitude Ortométrica).

Na laguna Manguaba, no ano de 2011, a Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás) realizou um levantamento batimétrico na região norte e central da laguna, totalizando uma área de 28 km², de modo a abranger mais de 65% da área total da laguna. O mapa obtido, cujas cotas batimétricas estão referenciadas à cota 0.5 m em relação ao Datum Imbituba do IBGE, é apresentado na Figura 13, à esquerda. Posteriormente, este mapa foi georreferenciado no ArcGis® (<https://www.esri.com/en-us/home>) e realizou-se a extração dos dados.

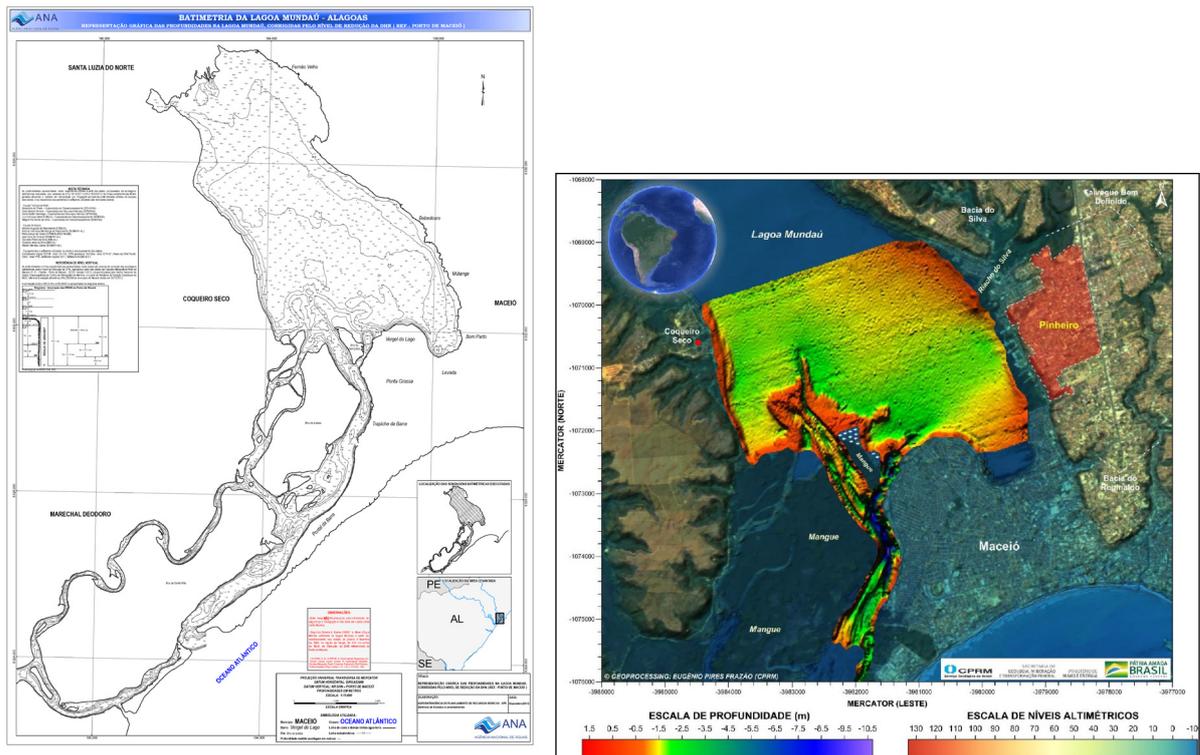


Figura 12 - Dados batimétricos obtidos da ANA (2012a), à esquerda, e da CPRM (2019), à direita.

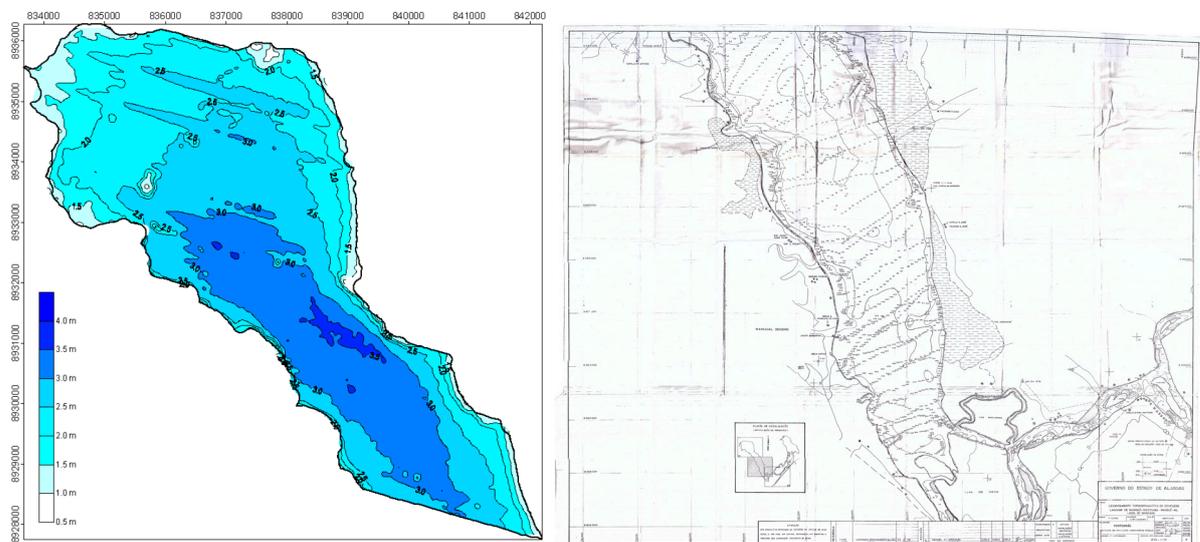


Figura 13 - Dados batimétricos obtidos da Petrobrás (2011), à esquerda, e do PORTOBRÁS/INPH (1985), à direita.

A batimetria da parte inferior e dos canais de comunicação desta laguna foram adquiridas do “Levantamento Topohidrográfico do Complexo Lagunar de Mundaú-Manguaba - Maceió/AL” produzido pela Empresa de Portos do Brasil S.A e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – PORTOBRÁS/INPH, no período de 1984 a 1985. Esses dados foram fornecidos por Lima (2017) e, posteriormente, foram manipulados no ArcGis®. Na Figura 13, à direita, apresenta-se o mapa batimétrico, com cotas referenciadas ao NR da DHN.

Em relação aos rios e canais de drenagem urbana, a representação destes se limitou à região já bem próxima das lagoas, de tal forma que os valores de cota foram estimados com base nas informações já apresentadas. Relativo à região costeira, os dados foram extraídos de cartas náuticas provenientes da DHN, sendo elas: Porto de Maceió CN N° 901 (BRASIL, 1977a) e Proximidades do Porto de Maceió CN N° 920 (BRASIL, 1977b), Figura 14, à esquerda. Observa-se que esses dados já se encontravam devidamente referenciados. Utilizou-se também dados provenientes da ANA (2012a) e do PORTOBRÁS/INPH (1985), Figura 14, à direita.

No que se refere às regiões das embocaduras, inicialmente, as cotas foram obtidas via interpolação dos dados citados. Posteriormente, durante a simulação do período chuvoso, os valores de batimetria foram ajustados com base na observação de imagens do Google Earth Pro[®] relativas à configuração da embocadura, identificando os trechos mais profundos e os mais rasos com bancos de areia. Foram utilizadas relações morfológicas de largura e profundidade média (BUCKMANN, 2019), corrigindo as médias de acordo com as imagens. A batimetria adotada mostrou-se adequada, devido ao bom ajuste entre os níveis medidos e simulados nas lagoas e no canal de comunicação da laguna Mundaú, conforme será apresentado na seção 6.1.2. Este fato comprova que as trocas volumétricas entre as lagoas e o mar estão corretas. Isso não ocorreria com a geometria inadequada da embocadura. Em relação aos recifes localizados defronte à embocadura, nos quais não se dispunha de informações, as cotas de suas cristas também foram estimadas com o auxílio do Google Earth Pro[®], em conjunto com dados de maré.

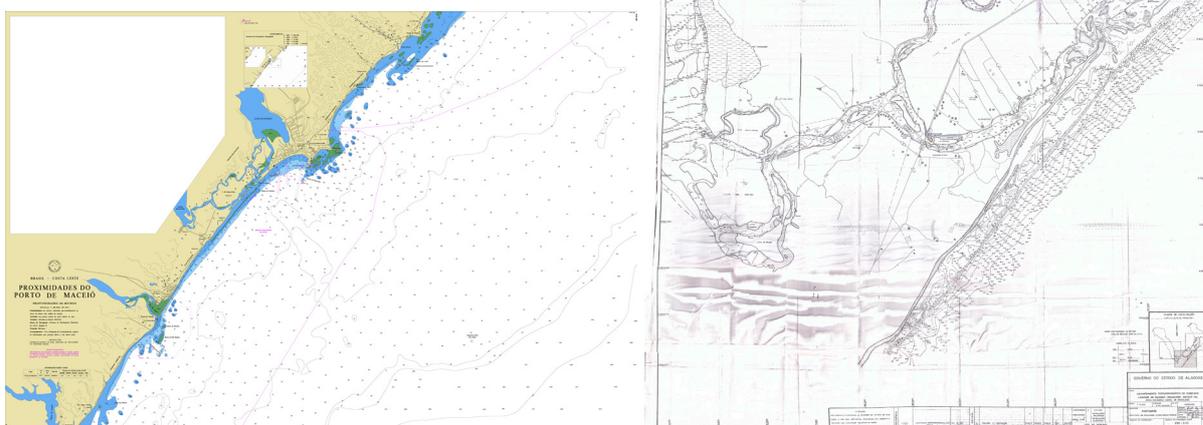


Figura 14 - Dados batimétricos obtidos da Carta Náutica N° 920 - Proximidades do Porto de Maceió, à esquerda, e do PORTOBRÁS/INPH (1985), à direita.

Após compilar e ajustar os dados para o mesmo referencial adotado na modelagem, gerou-se o mapa batimétrico, Figura 15, com os valores utilizados neste estudo. Nota-se, em

referência à laguna Mundaú, que a região norte e nordeste são bem rasas, com cota batimétrica média de ≈ -0.7 m. Em contrapartida, observou-se o valor de 8.8 m na região sul desta laguna, próximo ao canal de comunicação. Já na laguna Manguaba, o local mais profundo localiza-se entre região norte e central, com a cota máxima de 2.24 m. A região mais rasa encontra-se ao sul, próxima aos canais de comunicação, com cota média de ≈ -0.5 m. No canal de comunicação da laguna Mundaú, a batimetria variou consideravelmente com trechos bem rasos na embocadura do canal, e o oposto, na região próxima ao sul da laguna, como já comentado. Quanto ao canal de comunicação da laguna Manguaba, de modo geral, prevaleceram profundidades rasas, com exceção de alguns trechos bem mais profundos, na região próxima a Ilha de Santa Rita, como pode ser observado na Figura 15.

A partir do modelo digital de terreno foram elaboradas as curvas hipsométricas de Cota x Área x Volume, de cada laguna, conforme exposto na Figura 16. As áreas e os volumes foram calculados considerando as seções de controle expostas na Figura 37, na seção 6.1.1. Nos gráficos da Figura 16, as cotas são altimétricas, isto é, correspondem ao negativo das cotas batimétricas. Além disso, a cota 0 se refere ao NR da DHN. Observa-se que os níveis máximos e mínimos de água foram obtidos a partir das modelagens hidrodinâmicas.

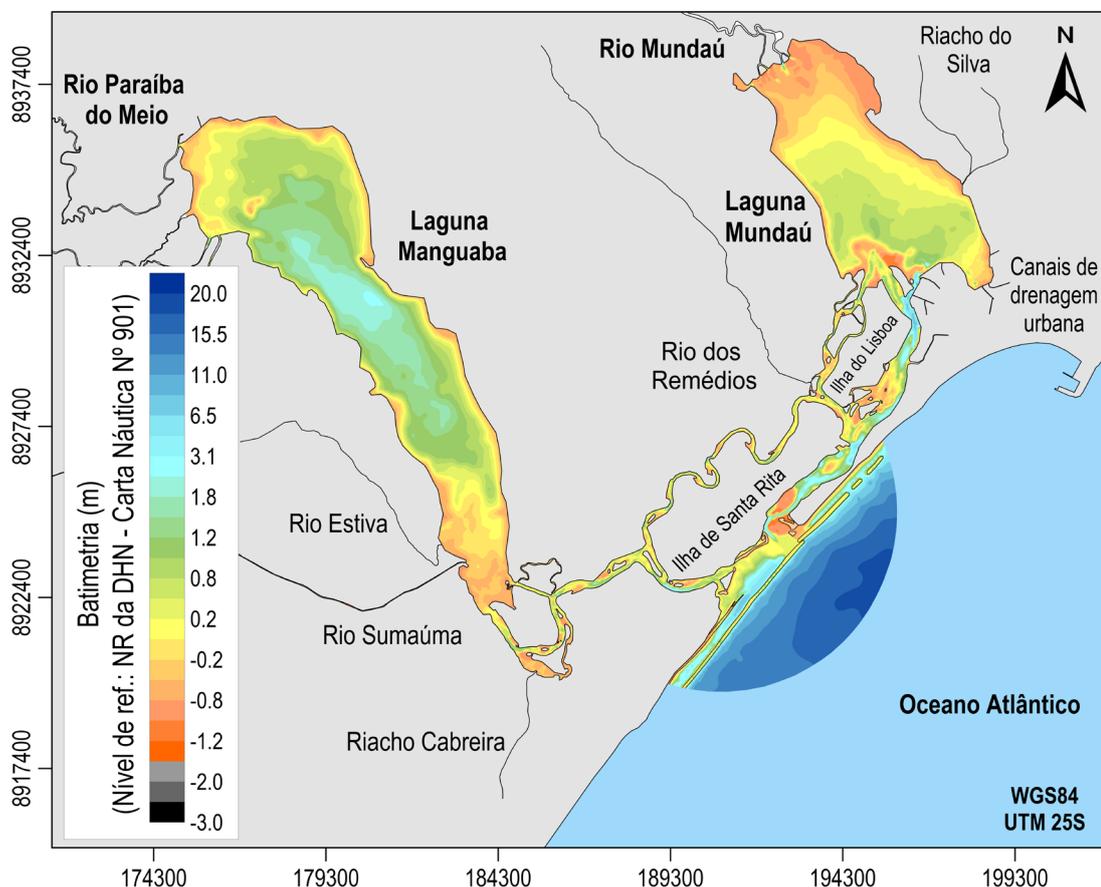


Figura 15 - Batimetria adotada na modelagem, referenciada à Carta Náutica N° 901 da DHN.

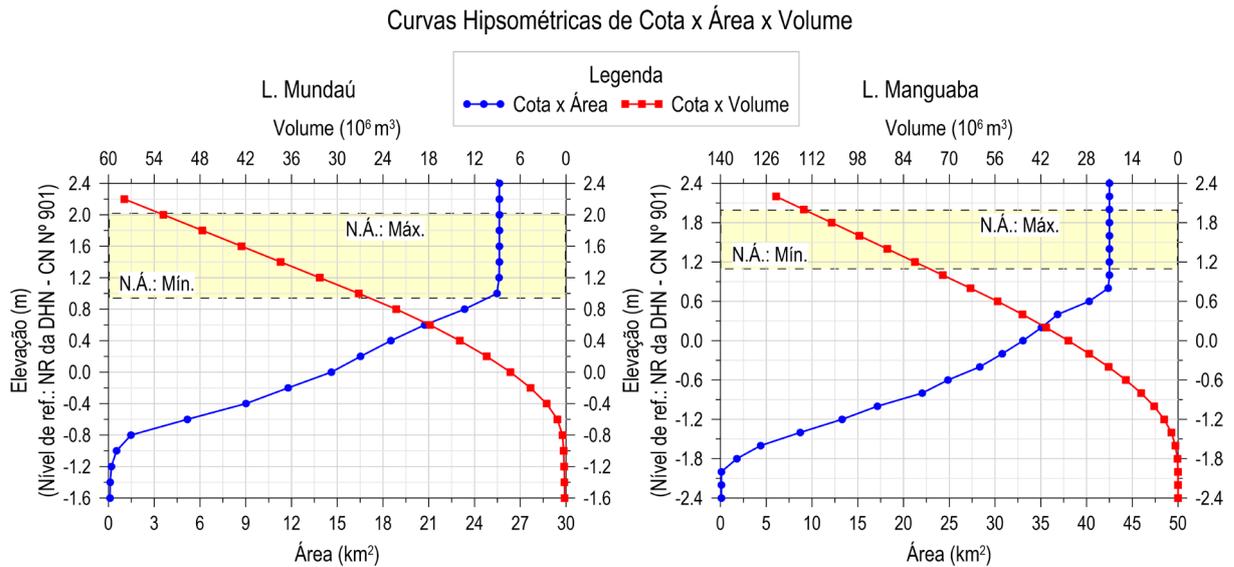


Figura 16 - Curvas Hipsométricas de Cota x Área x Volume, da laguna Mundaú, à esquerda, e da laguna Manguaba, à direita. Observa-se que as cotas são altimétricas, e correspondem ao negativo das cotas batimétricas. Os níveis máx. e mín. de água foram obtidos das simulações hidrodinâmicas, conforme exposto na Tabela 18, na seção 6.1.3.

5.2.3 Rugosidade Equivalente de Fundo

Na modelagem hidrodinâmica, os dois principais forçantes do movimento fluido são a força motriz gerada pelos gradientes de pressão e a força de atrito no fundo que se opõe ao movimento. Como dito anteriormente, a primeira forçante é prioritariamente dependente dos desníveis da superfície livre, já a segunda depende da magnitude das correntes e do coeficiente de atrito no fundo. O coeficiente de atrito no fundo depende fortemente da rugosidade equivalente de fundo, que reflete o tipo de fundo. Este coeficiente, em associação com a massa específica da água e a intensidade das correntes, compõem o cálculo da tensão de atrito no fundo. Ressalta-se que essas tensões atuam de forma variada no espaço e variável no tempo. O mesmo ocorre com o coeficiente de atrito no fundo, pois este é calculado em função de três parâmetros: a aceleração da gravidade, a altura instantânea da coluna de água em cada local e a amplitude de rugosidade equivalente de fundo (ε) em cada local. A amplitude de rugosidade equivalente de fundo deve ser determinada em função do tipo de material que compõe o leito em cada local.

Como mencionado na seção 4.1, os sedimentos presentes na laguna Mundaú são caracterizados como finos, composto por silte e argila em quase toda sua totalidade, com exceção de algumas regiões onde é possível encontrar maiores proporções de sedimentos de maior granulometria. Segundo ANA (2012b), a região norte, próxima à foz do rio Mundaú, apresenta relevante presença de areia média e grossa. Um pouco ao sul desta região, há a presença de areia fina, ocupando a faixa de transição granulométrica na laguna. Ao sul, próximo ao canal de comunicação, constata-se a existência de areia grossa. Nos canais, a predominância é de areia

média e grossa. Nota-se em algumas regiões desta laguna, a presença cascalho ou conchas de moluscos em diferentes profundidades (PORTOBRÁS/INPH, 1985; OLIVEIRA, 1993; OLIVEIRA e KJERFVE, 1993; OLIVEIRA e CAVALCANTE, 1998; OLIVEIRA, 2000; ALVES, 2010; ANA, 2012b).

Na laguna Manguaba, os sedimentos finos predominam na maior parte de sua extensão. No entanto, na região noroeste, próxima à foz do rio Paraíba do Meio, é possível encontrar areias médias e grossas. Além disso, na região ao sul, próxima à foz do rio Sumaúma e dos canais de comunicação, há presença de areias finas, médias e grossas, no qual se considerou a predominância de areias médias (PORTOBRÁS/INPH, 1985; OLIVEIRA, 1993; OLIVEIRA e KJERFVE, 1993; ALVES, 2010; LARSSON e NILSSON, 2014). Nos canais de comunicação, incluindo a embocadura, foi considerado, de forma predominante, areias médias e grossas. Na região costeira admitiu-se a predominância de areias grossas. Já nos recifes, o tipo de material se assemelha a um leito rochoso. Diante dessas informações, os valores de rugosidade equivalente de fundo, para cada tipo de sedimento, foram definidos de acordo com o sugerido por Rosman (2023), adaptado de Abbot e Basco (1989), conforme exposto no Quadro 4. A Figura 17 apresenta o mapa de caracterização da amplitude da rugosidade equivalente de fundo.

Quadro 4 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo (ϵ). Quadro extraído da Referência Técnica do SisBaHiA® (ROSMAN, 2023), adaptado de Abbott e Basco (1989).

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	0.0001 m < ϵ < 0.0100 m
Predominância de areias finas	0.0070 m < ϵ < 0.0150 m
Predominância de areias médias	0.0100 m < ϵ < 0.0300 m
Predominância de areias grossas	0.0250 m < ϵ < 0.0500 m
Predominância de areias muito grossas	0.0400 m < ϵ < 0.0800 m
Predominância de areias com cascalho	0.0500 m < ϵ < 0.1200 m
Sedimentos com vegetação	0.0500 m < ϵ < 0.1500 m
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	0.1500 m < ϵ < 0.4000 m
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo com pedras ($d_{50} < 20$ cm)	0.0400 m < ϵ < 0.1000 m
Fundo com rochas ($d_{50} < 50$ cm)	0.1000 m < ϵ < 0.2500 m

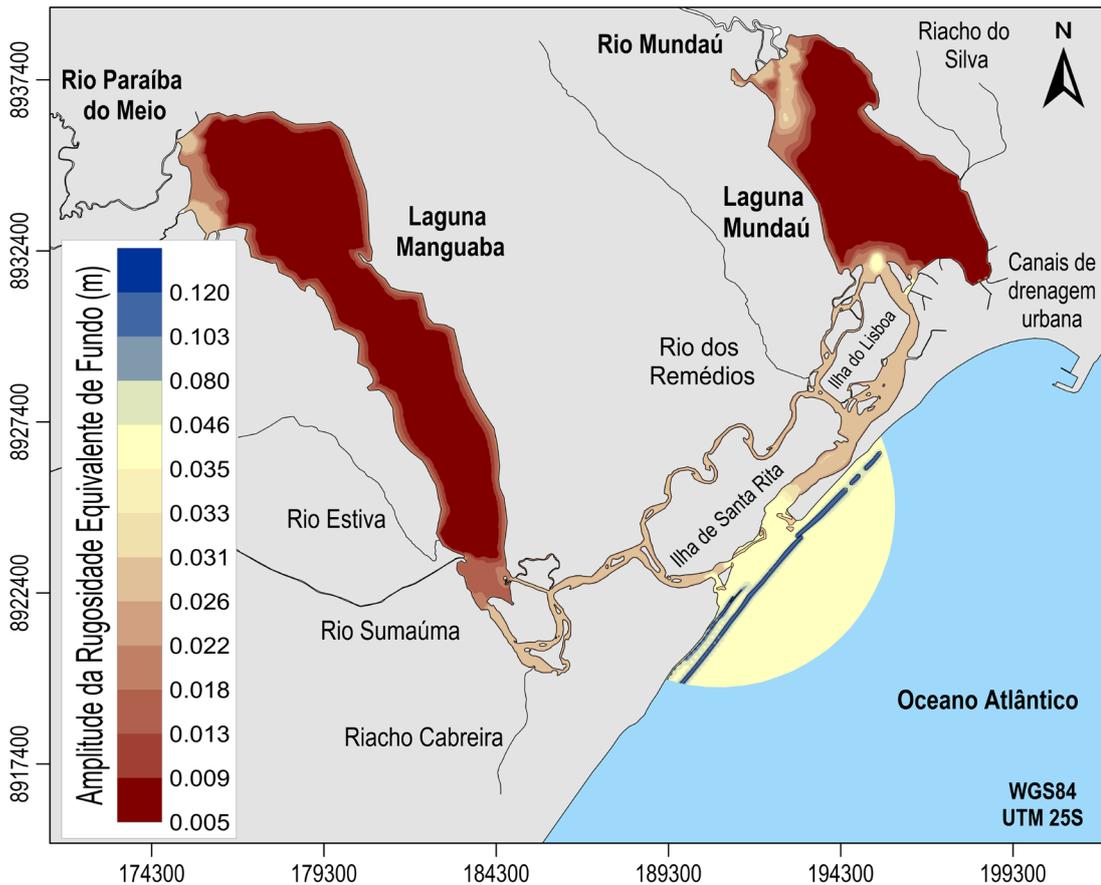


Figura 17 - Caracterização da amplitude da rugosidade equivalente de fundo (ϵ), de acordo com as informações descritas sobre a granulometria do material de fundo da região modelada.

5.3 Modelagem Hidrodinâmica

Nesta seção são apresentados os cenários de modelagem propostos para as simulações hidrodinâmicas, assim como as forçantes ambientais consideradas nos modelos hidrodinâmicos. Além disso, são expostos os dados ambientais utilizados, detalhando a origem e a manipulação destes para a inserção nos modelos.

5.3.1 Cenários de Modelagem

Os cenários de modelagem foram propostos com objetivo de evidenciar os efeitos que a sazonalidade provoca na circulação hidrodinâmica, perante as mudanças nas forçantes ambientais. No CELMM, as vazões dos rios Mundaú e Paraíba do Meio se destacam como as forçantes que apresentam maior variação sazonal e, com base nisso, foram definidos dois cenários. O primeiro referente ao período de vazões de cheia, correspondente à estação chuvosa (outono-inverno). Neste cenário foram selecionados os meses de maio, junho e julho de 2018. O segundo cenário refere-se ao período de vazões de estiagem, estação seca (primavera-verão). Neste cenário foram selecionados os meses de outubro, novembro e dezembro de 2018. Em resumo:

- Período Chuvoso: de 01/05/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00;

- Período Seco: de 01/10/2018 00h00 até 01/01/2019 00h00.

Antes de iniciar a simulação do período chuvoso, rodou-se o modelo (MH + MQA) previamente, de modo a gerar condições iniciais apropriadas, e assim, representar adequadamente a grande descarga fluvial ocorrida logo no início desse período. Nesta pré-modelagem, foi realizada uma partida a “frio” do MH, com o nível d’água homogêneo e igual a 1.155 m (NMM), considerando também velocidades iguais a zero. As condições iniciais dos modelos de salinidade e temperatura serão apresentadas posteriormente, nas seções 5.5.1 e 5.5.2. Pode-se dizer também que foram simulados os meses de agosto e setembro, com o objetivo de considerar a continuidade e evolução da salinidade e da temperatura, bem como da I_A , para as simulações do período seco. Destaca-se algumas configurações adotadas no MH e no MQA. No MH, o passo de tempo da simulação foi igual a 7.5 s, enquanto no MQA, 60 s. No MH, os resultados temporais foram gravados no intervalo de tempo de 15 min, o mesmo intervalo de tempo dos dados de nível d’água das estações PCD. Já os resultados espaciais, 30 min. Relativo ao MQA, os valores foram, respectivamente, 30 min e 1 h. Mais informações podem ser obtidas no Apêndice A. Cita-se que no MH, o número de Courant máximo foi igual a 14.5, enquanto o valor médio foi equivalente a 1.3.

5.3.2 Dados Ambientais

Esta seção descreve as forçantes ambientais consideradas nos modelos hidrodinâmicos, que receberam os seguintes dados:

- Oceanográficos: marés astronômicas, variações do nível médio do mar e correntes costeiras;
- Hidrológicos: vazões dos principais rios afluentes às lagunas, além de diversos outros contribuintes de menor vazão, que desaguam tanto nas lagunas quanto nos canais de comunicação;
- Meteorológicos: séries temporais de vento, precipitação e evaporação.

➤ Dados Oceanográficos

▪ Maré Astronômica e Variações do Nível Médio do Mar

As séries de maré astronômica foram geradas no SisBaHiA[®], a partir das componentes harmônicas do Porto de Maceió, disponibilizadas pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), referentes às observações de maré durante o período de 365 dias, entre 13/04/2006 00h00 e 13/04/2007 00h00. A Tabela 9 apresenta as 21 constantes harmônicas, listadas em ordem decrescente de amplitude.

Tabela 9 - Constantes harmônicas da estação maregráfica Porto de Maceió, obtidas do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), com seus respectivos valores de período, amplitude e fase. Na tabela as constantes estão ordenadas por amplitudes decrescentes.

Constante	Período (seg.)	Amplitude (m)	Fase (grau)	Constante	Período (seg.)	Amplitude (m)	Fase (grau)
M2	44714.16	0.6922	106.45	Q1	96726.08	0.0176	104.60
S2	43200.00	0.2572	120.80	T2	43259.22	0.0168	104.55
N2	45570.05	0.1322	98.18	S1	86400.00	0.0147	212.32
Sa	31556955.92	0.0869	72.07	P1	86637.20	0.0108	209.11
K2	43082.05	0.0737	115.12	MTS2	44777.61	0.0094	16.76
O1	92949.63	0.0546	125.90	M4	22357.08	0.0086	167.90
K1	86164.09	0.0372	224.39	M3	29809.44	0.0071	110.93
MU2	46338.33	0.0290	88.86	KJ2	42316.28	0.0065	306.08
NU2	45453.62	0.0255	99.00	MNS2	47258.16	0.0060	71.37
L2	43889.83	0.0213	97.24	LAMBDA2	43998.39	0.0058	101.46
2N2	46459.35	0.0198	90.47				

Ao executar os modelos hidrodinâmicos com as marés astronômicas, observou-se pequenas diferenças entre os níveis médios medidos e simulados nas lagunas, por ciclo de maré. Essas diferenças poderiam estar relacionadas a batimetria, ou então, aos valores prescritos na fronteira aberta, ou seja, as variações do nível do mar. A batimetria não foi modificada, ao invés disso, buscou-se compreender melhor as variações do nível do mar. Para tanto, foi obtida, além das constantes harmônicas do Porto de Maceió, a série de dados medidos no período de 13/04/2006 00h00 até 31/05/2007 23h00, que possui intervalo de tempo de 1 h. Ao se comparar e subtrair os valores medidos neste período com os valores gerados a partir das constantes harmônicas, observou-se claramente as amplitudes de variação do nível médio do mar, que ocorreram, predominantemente, na faixa de ± 0.2 m em torno do nível médio do mar estático, que é de 1.155 m, conforme exposto na Figura 11. Essas flutuações do nível médio do mar podem ser relacionadas as marés meteorológicas. A Figura 18 apresenta os valores medidos, na cor azul, e os gerados a partir das constantes harmônicas, na cor vermelha, para o mesmo período mencionado anteriormente. Na cor rosa, o nível médio do mar estático, e na cor preta, a diferença entre os valores medidos e gerados, representando o nível médio variável.

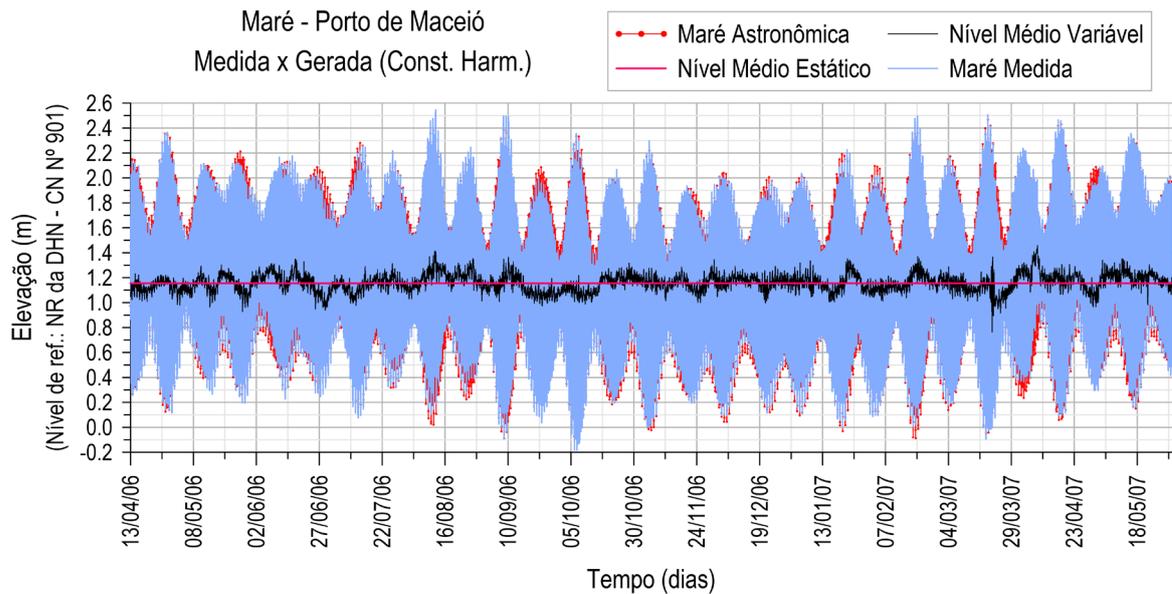


Figura 18 - Comparação entre a maré medida, na cor azul, e gerada a partir das constantes harmônicas, na cor vermelha, no intervalo de tempo de 13/04/2006 00h00 até 31/05/2007 23h00. Observa-se, na cor rosa, o nível médio do mar estático, e na cor preta, a diferença entre os valores medidos e gerados, representando o nível médio variável.

Com base nisso, considerou-se também, na fronteira aberta, as variações do nível médio do mar, através de séries de nível médio variável, que estão expostas na Figura 19, na cor preta. Estas séries foram obtidas a partir da diferença, por ciclo de maré, entre os valores de nível médio medidos e simulados nas lagunas e no canal de comunicação da laguna Mundaú, nos respectivos períodos chuvoso e seco. Nota-se que as amplitudes obtidas também variaram, predominantemente, no intervalo já mencionado, ± 0.2 m, em torno do nível médio do mar estático de cada período simulado. Na Figura 19, na cor preta, estão expostos os valores de nível médio variável. Na cor azul estão representadas as marés resultantes, ou seja, marés astronômicas \pm nível médio variável. Foram estas, as marés resultantes, que foram inseridas na fronteira aberta dos respectivos modelos hidrodinâmicos.

A partir da análise das constantes harmônicas e das séries geradas, pode-se observar que a onda de maré na região de estudo classifica-se como semidiurna, isto é, com uma periodicidade de 12h42. Isso pode ser constatado, também, por meio do Número de Forma (Nf), que consiste na razão entre a soma das amplitudes das duas principais componentes diurnas (K1 e O1) e a soma das amplitudes das duas principais componentes semidiurnas (M2 e S2) (POND e PICKARD, 1983). O valor obtido de ≈ 0.095 está inserido no intervalo de maré semidiurna ($0 < Nf < 0.25$). Tendo em vista a classificação do regime de maré proposta por Davies (1964), com base nas máximas alturas de marés, pode-se enquadrar a região de estudo no regime de mesomaré, com valor maior que 2 m e menor que 4 m. Em síntese, nos meses de maio a julho,

o nível médio do mar resultante foi igual a 1.24 m, e a altura máxima igual a 2.31 m. De outubro a dezembro, os valores foram 1.08 m e 2.36 m, respectivamente.

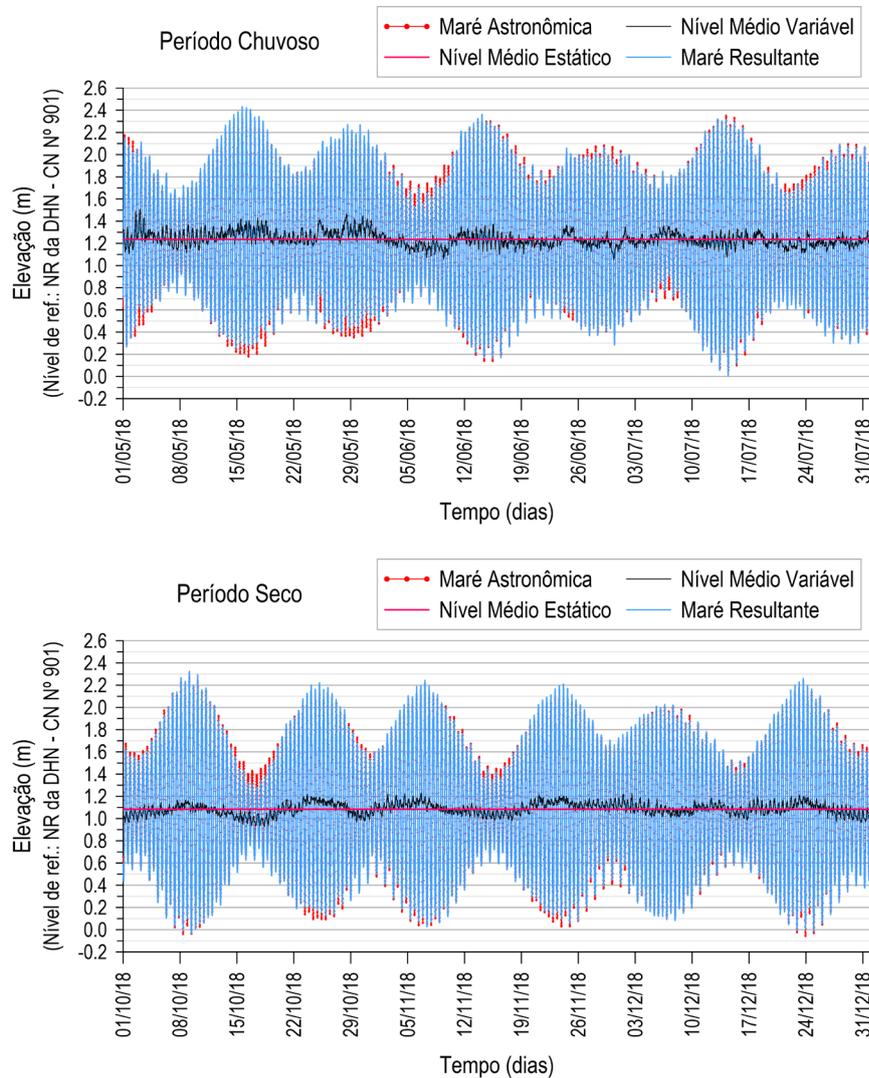


Figura 19 - Séries temporais de elevação da superfície livre da água nos respectivos períodos simulados. Nota-se que as marés resultantes foram obtidas pela soma das marés astronômicas com as variações do nível médio do mar.

▪ Correntes Costeiras

A fim de representar nas modelagens os efeitos das correntes costeiras de deriva dissociadas das marés astronômicas, adotou-se, nas condições de Fronteira Aberta (FA), o Nível Médio Diferencial (NMD). O NMD é uma maneira de induzir correntes a partir da criação de um desnível na superfície livre da água. Observa-se que os valores calculados para o NMD são somados aos valores de variação de nível já prescritos para cada nó da FA. Para calcular esse desnível, é necessário definir o eixo pivô (EP) do NMD, e importar uma série temporal de referência, denominada Série Geradora de Nível Médio Diferencial (SGNMD). O EP é uma

reta que passa por um ponto da malha, com coordenadas (x_1, y_1) , e faz um ângulo (α_x) com o eixo x da malha. O EP foi criado atravessando um ponto na região central da FA, com direção perpendicular à linha de costa. Basicamente, o EP divide a FA em duas regiões, no qual em um lado é somado um valor de NMD ao nível, enquanto no lado oposto, subtrai-se esse valor. No ponto em que o EP cruza o segmento de FA, o incremento é igual a zero, ou seja, esse é o ponto neutro. A Figura 20 apresenta o EP criado, ilustrando, por meio de sinais positivos e negativos, o que foi mencionado sobre a adição e subtração de um valor de NMD nos lados opostos da FA. Como consequência do desnível na superfície livre da água, são induzidas correntes perpendiculares ao EP, conforme mostrado na referida figura. O módulo e o sinal do valor de NMD são obtidos a partir da SGNMD, considerando, também, um fator de escala (calibração) e a distância do nó ao EP. Nota-se que o módulo e o sinal estão diretamente associados a intensidade e o sentido das correntes induzidas.

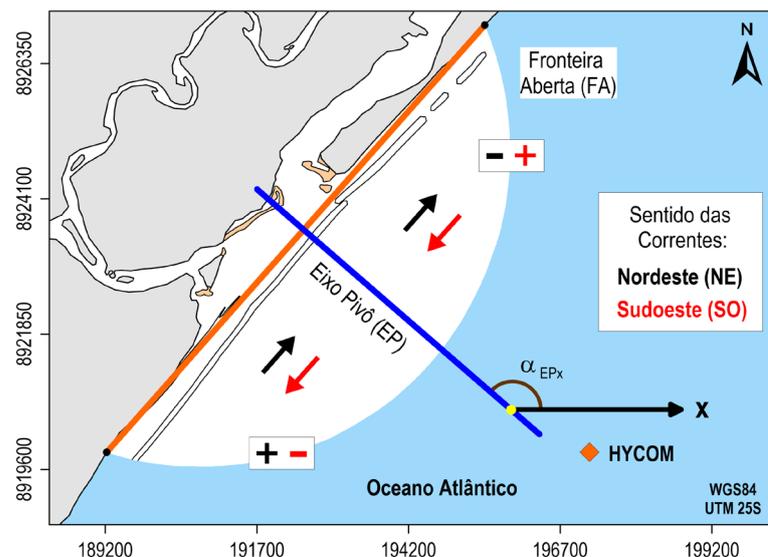


Figura 20 - Localização do Eixo Pivô (EP), linha azul, com direção perpendicular à linha de costa, linha laranja. Os sinais positivos e negativos ilustram a adição e subtração de um valor de NMD nos lados opostos da FA, induzindo correntes perpendiculares ao EP, ou seja, paralelas à linha de costa. Nota-se a localização do ponto de extração de dados do HYCOM.

Na criação da SGNMD, inicialmente, foram obtidos do *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM), séries de componentes de velocidade U (Este) e V (Norte), com resolução temporal de 3 h, para um ponto localizado a cerca de 6.3 km da costa, com profundidade de 17 m. O ponto em questão possui coordenadas 35.76° O e 9.76° S, conforme exposto na Figura 20. A partir das componentes obtidas em diferentes profundidades, foram calculadas as velocidades médias (U e V) na coluna d'água e, em seguida, a intensidade e direção das correntes. Finalmente, realizou-se a decomposição dos vetores velocidade média, de modo a calcular a

componente paralela a linha de costa, ou seja, direção Sudoeste (SO) – Nordeste (NE). Os valores resultantes dessa decomposição constituíram a SGNMD. Em resumo, o módulo e o sentido (sinal) das correntes, presentes na SGNMD, foram matematicamente traduzidos em correntes costeiras na FA, via NMD. Observa-se que as correntes não foram calibradas e validadas, devido à ausência de dados medidos. Detalhes quanto às formulações matemáticas encontram-se na seção 3.5.1.3 da Referência Técnica do SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2023). Quanto aos dados obtidos do HYCOM, considerando a direção paralela à linha de costa, pode-se afirmar que o sentido predominante das correntes foi para SO, em 78% do tempo no período chuvoso e 99% no período seco. O que é esperado, uma vez que em maio, junho e julho ocorrem mais frentes frias, que induzem correntes para o NE, conforme discutido por Pires (2017).

➤ Dados Hidrológicos

▪ Vazões

As vazões foram obtidas de duas maneiras. A primeira via Portal HidroWeb, proveniente da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e a segunda por meio da estimativa de vazões para os cursos d'água e canais de drenagem urbana que não possuíam essas informações. Por meio do Portal HidroWeb foram obtidas vazões diárias das estações fluviométricas inseridas nos principais rios, Mundaú e Paraíba do Meio. Como estas estações se encontram a montante das lagoas, realizou-se o incremento das vazões por meio de correlações entre as áreas de drenagem das estações e as áreas drenantes às lagoas. A Tabela 10 expõe as principais características das estações fluviométricas, além dos valores calculados para o incremento das vazões.

Tabela 10 - Principais informações das estações fluviométricas utilizadas neste estudo, e os valores calculados para incrementar as vazões (ANA, 2022).

Código - ANA	Nome	Rio	Lat.	Long.	Área de Drenagem - Estação (km ²)	Área de Drenagem - Bacia (km ²)	Incremento das vazões (%)
39770000	Fazenda Boa Fortuna	Mundaú	-9.4672	-35.8597	3560	4126	15.9
39870000	Atalaia	Paraíba do Meio	-9.5067	-36.0228	2600	3157	21.4

A Figura 21 apresenta os hidrogramas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, com vazões já incrementadas para as simulações nos respectivos períodos, incluindo, ainda, os meses de agosto e setembro. Nota-se que foram adicionadas barras verticais aos gráficos, com o propósito de destacar a divisão mensal dos valores. Além disso, pode-se perceber que, por coincidência, o início da modelagem do período chuvoso ocorreu durante um pico de vazão. Como o modelo já se encontrava “aquecido”, tal evento foi modelado adequadamente.

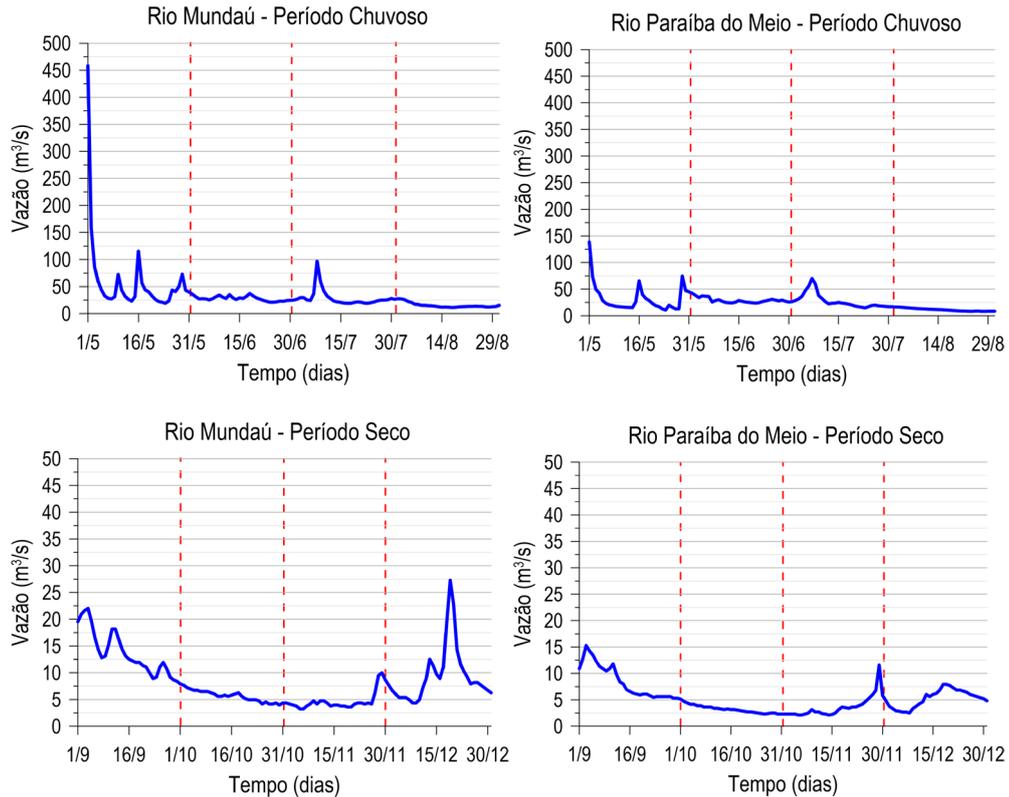


Figura 21 - Hidrogramas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, com vazões já incrementadas para as simulações nos períodos chuvoso e seco, incluindo, ainda, os meses de agosto e setembro.

Com o objetivo de embasar a análise dessas vazões, são apresentadas, na Figura 22, as séries de vazões médias mensais do ano 2018 em conjunto com as séries históricas das estações. Nota-se no gráfico à esquerda, correspondente à estação Fazenda Boa Fortuna no rio Mundaú, que as barras na cor azul se referem aos dados mensais no intervalo de 1974 até 2017. Já as barras na cor vermelha, correspondem aos dados mensais em 2018. Da mesma forma ocorre no gráfico à direita, referente à estação Atalaia no rio Paraíba do Meio, com exceção do intervalo de tempo, que foi de 1977 até 2017. Nota-se que, em ambos os gráficos, foram destacados os meses correspondentes aos períodos simulados.

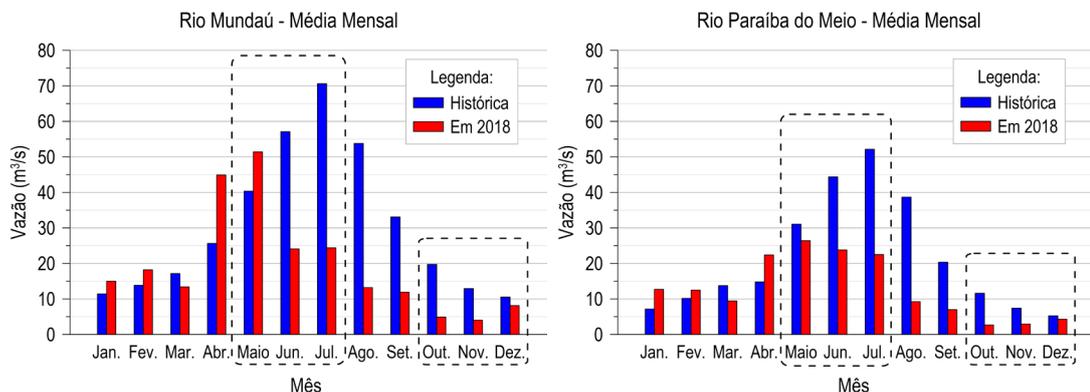


Figura 22 - Vazões médias mensais históricas e do ano de 2018, à esquerda, na estação Fazenda Boa Fortuna no rio Mundaú, enquanto à direita, na estação Atalaia no rio Paraíba do Meio.

No que diz respeito ao período chuvoso, de maio a julho, os dados históricos da estação Fazenda Boa Fortuna demonstram que no ano de 2018 as vazões estiveram bem abaixo da média mensal, com exceção do mês de maio, que apresentou valor superior. Cenário semelhante ocorreu na estação Atalaia. Só que, neste caso, as vazões mensais nesse período estiveram todas abaixo dos dados históricos. O mesmo pode ser dito a respeito das vazões nos meses de agosto e setembro, considerando ambas as estações. No período seco, de outubro a dezembro, as duas estações apresentaram valores inferiores à média. Nota-se, relativamente aos meses de outubro e novembro, que as vazões mensais se aproximaram das respectivas vazões mínimas Q95% – vazão excedida em 95% do tempo. Estas foram calculadas por meio da ferramenta Hidro[®] da ANA, e estão expostas na Tabela 11. Em referência ao rio Mundaú, as vazões mensais de outubro e novembro foram de 4.89 m³/s e 4.02 m³/s, respectivamente. Quanto ao rio Paraíba do Meio, 2.66 m³/s e 2.95 m³/s, respectivamente. A Tabela 11 apresenta ainda outras informações, como, por exemplo, a vazão média das máximas anuais e o valor calculado⁷ para a vazão máxima com Tempo de Recorrência (T. Rec.) igual a 5 anos. O Tempo de Recorrência pode ser entendido como intervalo de tempo médio em que uma variável pode ser igualada ou excedida. Observa-se, na Tabela 11, que o cálculo dessas vazões se baseou em dados consistidos, do início das séries históricas até o ano de 2014. Nas vazões estimadas para as bacias de drenagem aplicou-se o incremento das vazões, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 11 - Vazões características das estações fluviométricas utilizadas neste estudo (ANA, 2022), e os valores estimados para as bacias de drenagem.

Vazão (m ³ /s)	Estação fluviométrica		Estimado - Bacia de drenagem	
	Fazenda Boa Fortuna (R. Mundaú)	Atalaia (R. Paraíba do Meio)	R. Mundaú (L. Mundaú)	R. Paraíba do Meio (L. Manguaba)
Média anual (Média de Longo Termo - MLT)	30.5	21.2	35.3	25.7
Média das máximas anuais	372	397	432	482
Máxima com T. Rec. = 5 anos	515	606	596	736
Mínima (Q95% mensal)	4.71	2.16	5.46	2.62

Um ponto relevante acerca dessas informações se refere ao pico de vazão afluente à laguna Mundaú, logo no primeiro dia de simulação do período chuvoso, com uma vazão média diária incrementada de ≈ 460 m³/s – o valor na estação Fazenda Boa Fortuna foi de 395 m³/s – valor este que ultrapassou a média das máximas anuais. Esse evento, cujo Tempo de

⁷ As vazões máximas com tempo de recorrência igual a 5 anos foram calculadas com base em Eletrobrás (2000), que recomenda, em função do valor do coeficiente de assimetria da série amostral, a utilização das distribuições de probabilidade de Gumbel, adotada para os dados da estação Fazenda Boa Fortuna, ou então a exponencial de dois parâmetros, aplicada nos dados da estação Atalaia.

Recorrência calculado corresponderia a ≈ 3 anos, influenciou consideravelmente a circulação hidrodinâmica, com efeitos expressivos para a renovação das águas, como será apresentado nas análises dos THC. Devido às ramificações que os rios Paraíba do Meio e Mundaú apresentam quando desembocam nas lagunas, optou-se por distribuir as vazões por trechos, com base em imagens do Google Earth Pro[®]. Dessa forma, cada rio foi representado por quatro entradas. A Figura 23 ilustra essas entradas, além de apresentar os demais afluentes considerados neste estudo, que serão comentados logo após.

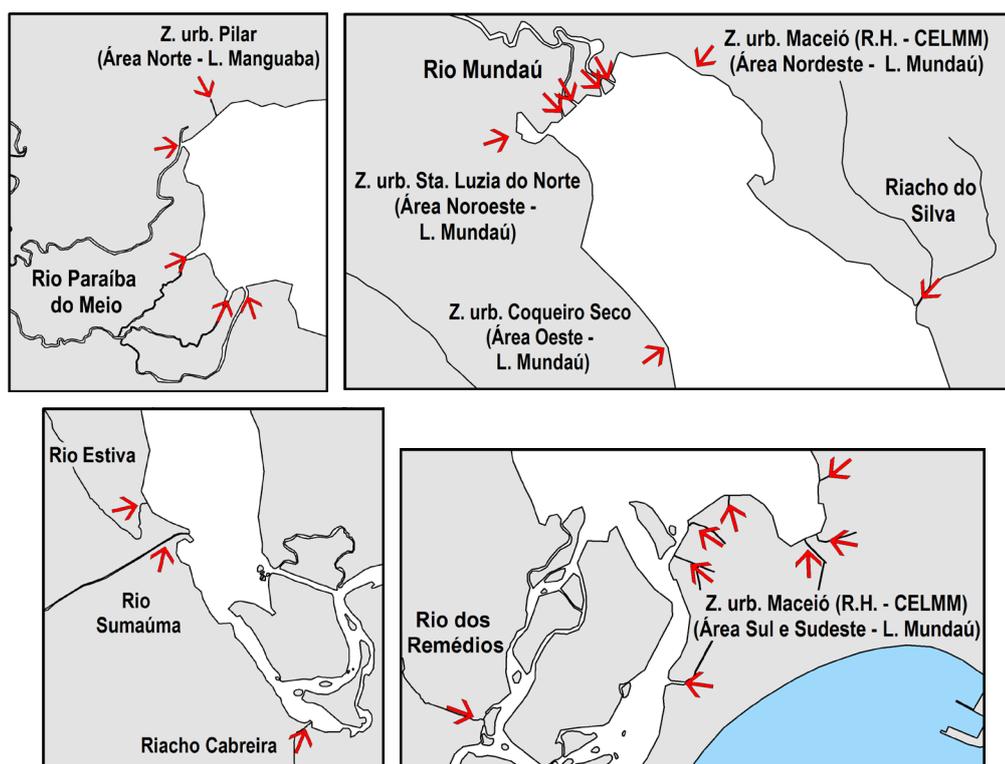


Figura 23 - Ilustração das entradas dos rios e canais de drenagem urbana, considerados nas modelagens

As vazões dos demais rios e canais de drenagem foram determinadas considerando o somatório de duas contribuições. A primeira contribuição se refere à estimativa das vazões afluentes de esgotos ao CELMM, oriundas das zonas urbanas ao redor das lagunas. Já a segunda foi proveniente das vazões de drenagem geradas nas sub-bacias em que essas zonas urbanas estão inseridas. Isto posto, as contribuições de esgotos foram estimadas com base na equação 1, que retrata, segundo Von Sperling (2014), o cálculo da vazão média de esgotos domésticos ($Q_{dméd}$), em L/s, determinada por meio das seguintes informações: quantidade de habitantes (Pop); quota de consumo *per capita* de água (QPC), em L/hab. \times dia; além do coeficiente de retorno esgoto/água (R), cujo valor adotado foi de 0.8, conforme recomendado pela NBR 9649/1986 (ABNT, 1986).

$$Q_{d_{méd}} = \frac{Pop \times QPC \times R}{86400} \quad (1)$$

A Tabela 12 exhibe os valores estimados de vazões de esgotos, separados por município e pelas sub-bacias analisadas. Vale ressaltar que os dados de população utilizados para a determinação dessas vazões se referem as estimativas do IBGE para o ano de 2018. Além disso, com base no Manual de Saneamento (FUNASA, 2019), adotaram-se valores médios de consumo *per capita*, relacionando este parâmetro com o porte da comunidade e as faixas de população dos municípios. Observa-se nessa tabela, que as vazões foram estimadas com base em informações provenientes do Censo 2010 do IBGE, sobre o tipo de esgotamento sanitário, além de dados da ANA (2017), PMSB - Maceió/AL (2017) e SNIS (2022). As demais contribuições de efluentes, dos municípios inseridos nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, foram consideradas já inclusas nas vazões desses rios.

Tabela 12 - Valores estimados de vazões de esgotos, separados por município, sub-bacias e corpo d'água receptor. Tabela elaborada com base no IBGE (2010), FUNASA (2019), ANA (2017), PMSB - Maceió/AL (2017) e SNIS (2022).

Município	Sub-Bacias	Pop. Urb. Estimada (2018)	Per capita (L/hab. X dia)	Lançamento (%)	Vazão (L/s)	Corpo d'água receptor
Maceió (R.H. - CELMM)	Zona urbana (Área Nordeste – L. Mundaú)	13866	225	57.2	16.51	L. Mundaú
	Riacho do Silva	101521		46.5	98.38	
	Z. urb. (Área Sul e Sudeste) – L. Mundaú)	149818		38.5	120.1	L. Mundaú e canal de comunicação
Coqueiro Seco	Z. urb. (Área Oeste – L. Mundaú)	5243	130	47.4	2.99	L. Mundaú
Santa Luzia do Norte	Z. urb. (Área Noroeste – L. Mundaú)	6514	130	41.6	3.26	
Pilar	Z. urb. (Área Norte – L. Manguaba)	33428	145	42.8	19.21	L. Manguaba
Marechal Deodoro	Rio Sumaúma	15525	145	39.2	8.17	L. Manguaba
	Rio Estiva	13081		39.3	6.90	
	Riacho Cabreira	6711		35.7	3.22	Canal de comunicação (L. Manguaba)

As vazões de drenagem nas respectivas sub-bacias foram estimadas por meio do Método I-Pai-Wu Modificado. Segundo o Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE), este método constitui-se num aprimoramento do Método Racional, sendo recomendável sua aplicação em bacias com área de drenagem de 2 km² a 200 km² (DAEE, 2005). Dessa forma, baseia-se na relação chuva-deflúvio, que estima as vazões por meio de parâmetros determinados, tal como a área de drenagem, a intensidade da chuva, o coeficiente de

escoamento superficial, entre outros. A equação 2 apresenta a equação base utilizada para calcular as vazões. Mais detalhes podem obtidos em São Paulo (1999), entre eles, as equações para calcular o valor de C (Coeficiente de escoamento superficial), assim como o ábaco no qual se obtém o valor de K (Coeficiente de distribuição espacial da chuva).

$$Q = 0.278 \times C \times i \times A^{0.9} \times K \quad (2)$$

Onde:

Q = Vazão, em m³/s;

C = Coeficiente de escoamento superficial;

i = Intensidade da chuva, em mm/h;

A = Área da bacia de contribuição, em km²;

K = Coeficiente de distribuição espacial da chuva.

A partir de dados de precipitação total mensal, obtidos da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH-AL), dos valores calculados de C (entre 0.22 e 0.67) e K (entre 0.96 e 0.99), em associação com informações provenientes do PMSB - Maceió/AL (2017), e do Google Earth Pro[®], estimou-se as vazões, consideradas neste trabalho como vazões médias mensais. A Tabela 13 apresenta as vazões resultantes (drenagem + esgotos) adotadas nas modelagens hidrodinâmicas. Observa-se que as vazões dos rios Sumaúma e Remédios foram estimadas com base em Oliveira e Kjerfve (1993) e ANA (2006). Além disso, na bacia do rio dos Remédios desconsiderou-se a possível parcela de esgotos.

Tabela 13 - Vazões resultantes (drenagem + esgotos), nos respectivos meses dos períodos chuvoso e seco, apresentados por sub-bacias e corpo d'água receptor ou região receptora.

Sub-Bacias	Área (km ²)	Receptor	Vazão (m ³ /s): Drenagem + Esgoto					
			Período Chuvoso			Período Seco		
			Maio	Jun.	Jul.	Out.	Nov.	Dez.
Z. urb. Maceió (Área Nordeste – L. Mundaú)	3.5	L. Mundaú	0.108	0.092	0.099	0.017	0.046	0.045
Riacho do Silva	12.8		0.378	0.330	0.349	0.100	0.189	0.185
Z. urb. Maceió (Área Sul e Sudeste – L. Mundaú)	11.3	L. Mundaú e canal de comunicação	0.543	0.471	0.499	0.123	0.257	0.251
Z. urb. Coq. Seco (Área Oeste – L. Mundaú)	1.7	L. Mundaú	0.031	0.025	0.023	0.003	0.011	0.011
Z. urb. Sta. L. do Norte (Área Noroeste – L. Mundaú)	3.5		0.057	0.045	0.041	0.004	0.019	0.018
Z. urb. Pilar (Área Norte – L. Manguaba)	4.9	L. Manguaba	0.106	0.078	0.113	0.019	0.043	0.062
Rio Sumaúma	371.9	L. Manguaba	6.555	4.316	4.203	0.646	0.615	1.055
Rio Estiva	30.5		0.349	0.247	0.359	0.026	0.097	0.127
Riacho Cabreira	3.7	Canal de comunicação (L. Manguaba)	0.087	0.062	0.089	0.008	0.025	0.033
Rio dos Remédios	46.7	Região dos canais	1.311	0.863	0.841	0.129	0.123	0.211

➤ Dados Meteorológicos

▪ Vento

O vento exerce tensão de atrito na superfície livre da água, transferindo energia e induzindo o movimento das águas. No modelo hidrodinâmico foram prescritos valores de intensidade e direção dos ventos. Os dados de vento foram fornecidos pelo modelo de reanálise atmosférica global ERA5, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF* (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>), que disponibiliza informações referentes ao vento a 10 m de altura. Os dados obtidos possuem resolução espacial em grade regular, de $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, e resolução temporal de 3 h. Com o intuito de considerar o vento agindo de modo variado no espaço, adotou-se um total de sete estações, conforme exposto na Figura 24, a partir das quais o modelo produziu, por interpolação, o campo de vento atuante em todo o domínio de modelagem. Vale ressaltar que é conveniente adotar essas estações de vento, pois assim, evita-se considerar os dados da estação meteorológica MACEIÓ-A303 (INMET) atuando de modo uniforme no espaço, o que significaria dizer que a velocidade do vento é a mesma em todo o domínio de modelagem, o que não reflete a realidade. Destaca-se que os dados da estação MACEIÓ-A303 (INMET) são assimilados nos resultados de reanálise do modelo ERA5.

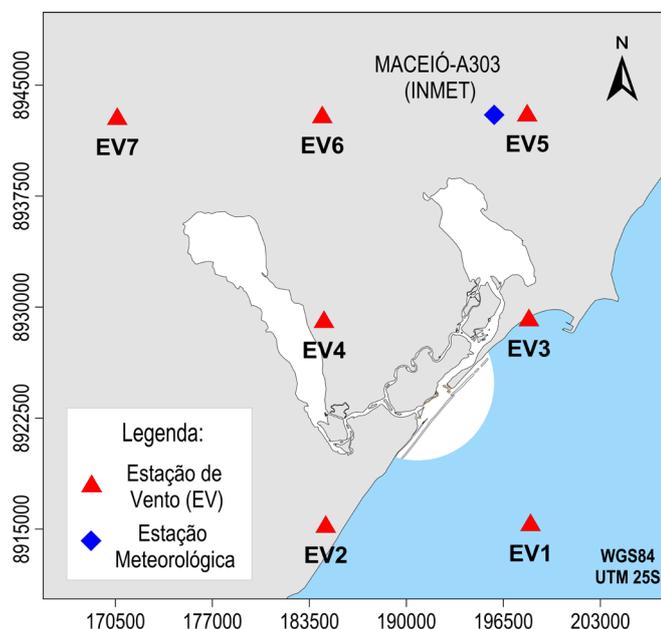


Figura 24 - Localização dos pontos de grade do modelo de reanálise atmosférica global ERA5 (ECMWF), nos quais foram extraídas as séries temporais de ventos. Apresenta-se ainda a localização da estação meteorológica MACEIÓ-A303 (INMET).

A Figura 25 apresenta as rosas dos ventos referentes às estações EV1 e EV6, para o período chuvoso, de maio a julho, e período seco, de outubro a dezembro. Nota-se que a região de

estudo está sob o regime dos ventos alísios. No período chuvoso, observou-se na EV1 que o vento reinante, isto é, o de maior frequência, originou-se de Sudeste (SE), com 46% de frequência, seguido do vento Este-Sudeste (ESE), com 40%. A maior intensidade, de 8.45 m/s, foi do vento de Este-Sudeste (ESE). Já na EV6, as condições foram semelhantes quanto à origem dos ventos. As diferenças se devem às frequências e velocidades, pois na EV6 o vento de Sudeste (SE) apresentou frequência de 48%, enquanto o de Este-Sudeste (ESE) registrou frequência de 33%. A intensidade máxima, de 7.15 m/s, correspondeu ao vento de Este-Sudeste (ESE).

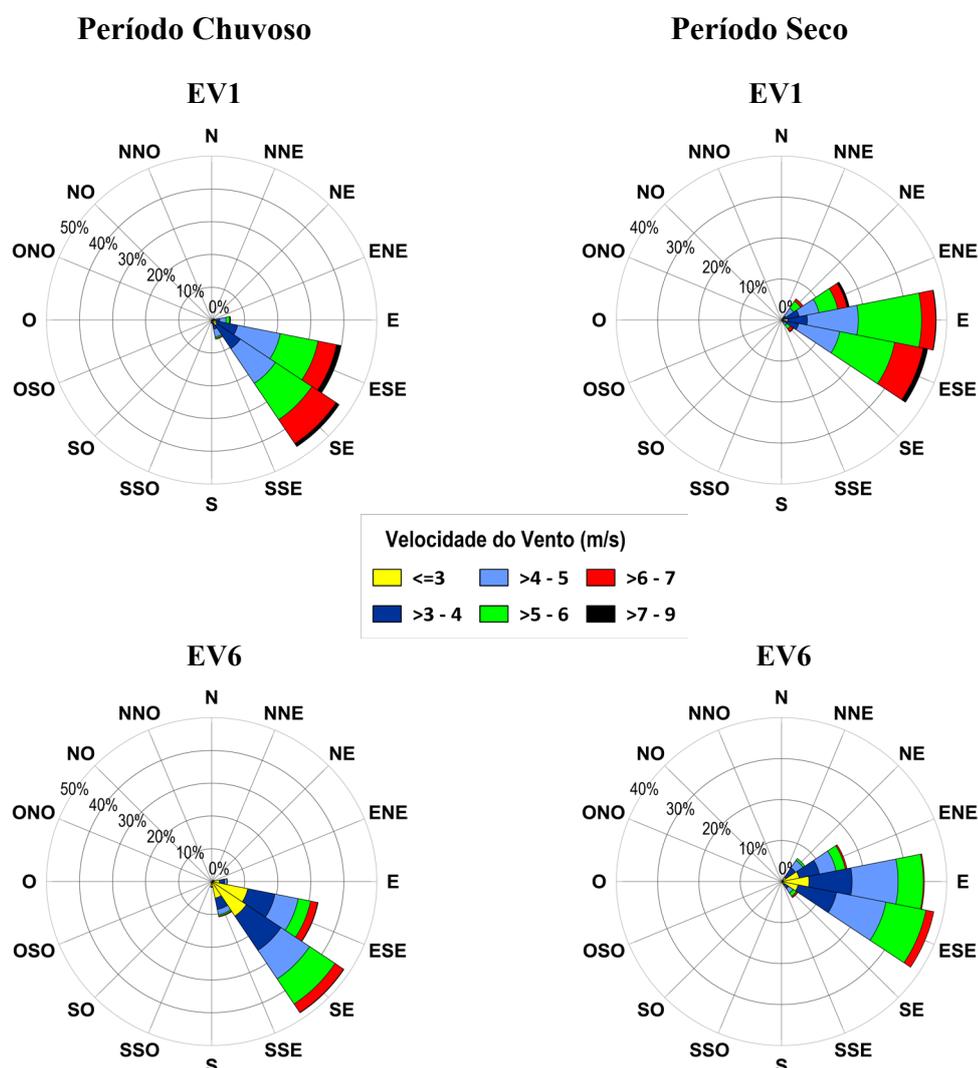


Figura 25 - Rosa dos ventos, nos períodos chuvoso e seco, para as estações EV1 e EV6. O eixo radial indica a frequência de ocorrência das direções e das velocidades; o eixo polar indica a direção de origem dos ventos; a escala de cor se refere a intensidade das velocidades.

No período seco, o vento reinante na EV1 procedeu de Este (E), seguido do vento Este-Sudeste (ESE), ambos com frequências próximas de 37%. Os ventos de Este-Sudeste (ESE) foram aqueles que apresentaram as maiores intensidades, atingindo o valor máximo de 7.6 m/s. Na EV6 as frequências de Este-Sudeste (ESE) e Este (E) também foram bem similares, com

destaque para o vento reinante de Este-Sudeste (ESE), alcançando intensidade máxima de 6.9 m/s. Detalhes do cálculo das tensões de atrito devido ao vento na superfície livre encontram-se na seção 3.2.3.1 da Referência Técnica do SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2023).

▪ Precipitação e Evaporação

A precipitação e a evaporação foram consideradas com intuito de representar seus efeitos nas modelagens. Nos modelos hidrodinâmicos, considerou-se a precipitação atuando de forma variável no tempo e variada no espaço, e a evaporação de forma variável no tempo e uniforme no espaço. Os dados de precipitação diária foram obtidos de estações pluviométricas gerenciadas pela SEMARH-AL, sendo elas: Coqueiro Seco (ANA), IMA-AL (ANA), Marechal Deodoro (ANA), Usina Terra Nova - Hortelã e Usina Terra Nova T.N. A Figura 26 apresenta o mapa com a localização dessas estações.

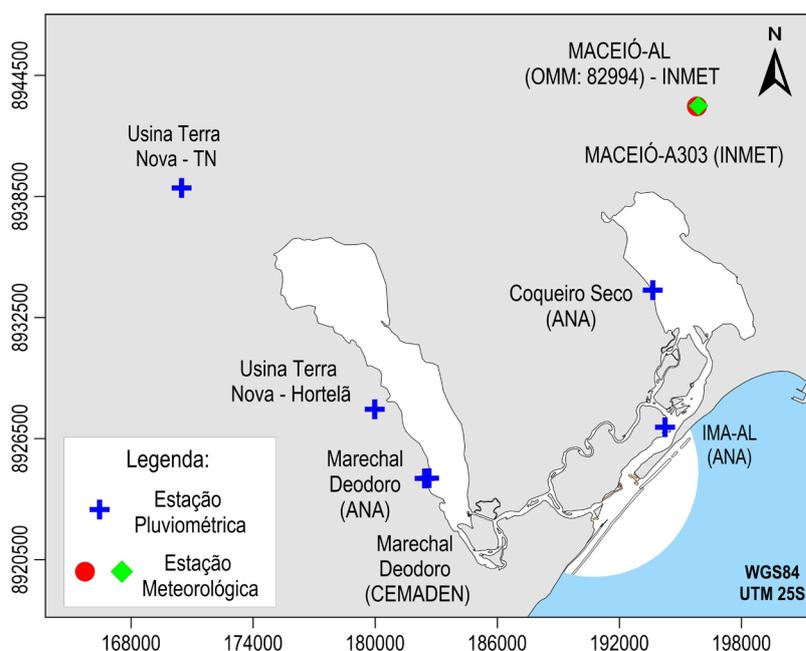


Figura 26 - Localização das estações pluviométricas nas quais foram obtidos dados diários de precipitação. Nota-se que os dados diários de evaporação foram provenientes da estação MACEIÓ-AL (OMM: 82994) - INMET.

Nota-se no referido mapa, a localização de outras estações, além daquelas já apresentadas. Cita-se a estação gerenciada pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), denominada Marechal Deodoro (CEMADEN), que foi utilizada para suprir as falhas da estação Marechal Deodoro (ANA), nos meses de maio e junho apenas. Além desta, observa-se ainda as estações meteorológicas MACEIÓ-AL (OMM: 82994) e MACEIÓ-A303, ambas pertencentes ao INMET. A estação MACEIÓ-AL (OMM: 82994) foi utilizada para expor os dados históricos e do ano de 2018, de precipitação e evaporação, além de fornecer

dados diários de evaporação utilizados nas modelagens. Já a estação MACEIÓ-A303 forneceu informações de temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar, utilizadas nos modelos de temperatura. Além disso, a radiação solar também foi usada nas modelagens da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes.

A Figura 27 apresenta a precipitação total mensal no período de interesse. Em adição a isto, a Tabela 14 expõe informações quanto à precipitação diária na estação Usina Terra Nova - Hortelã, localizada próxima à margem da laguna Manguaba, e na estação Coqueiro Seco (ANA), à margem da laguna Mundaú. A partir dessas informações, destaca-se que o mês de julho foi o mais chuvoso, com acumulado médio de 180 mm, considerando todas as estações, seguido do mês de maio, com 174 mm. Em contrapartida, o mês de outubro foi o mais seco, com o valor médio de 3 mm. De modo geral, as diferenças na precipitação acumulada nas estações Usina Terra Nova - Hortelã e Coqueiro Seco (ANA) foram pequenas, com exceção dos meses de julho e dezembro, como pode ser constatado na Figura 27 e na Tabela 14.

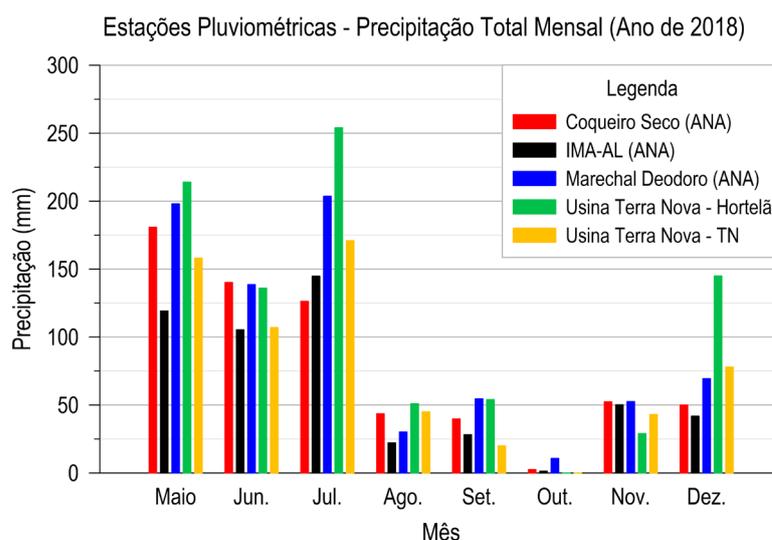


Figura 27 - Dados de precipitação total mensal referentes aos meses de interesse do ano de 2018, extraídos das estações pluviométricas utilizadas neste estudo.

Tabela 14 - Informações referentes à precipitação na estação Usina Terra Nova - Hortelã, localizada próxima à margem da laguna Manguaba, e na estação Coqueiro Seco (ANA), à margem da laguna Mundaú, nos meses de interesse.

Estação	Dados	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Usina Terra Nova - Hortelã	Prec. Total (mm)	214.0	136.0	254.0	51.0	54.0	0.0	29.0	145.0
	Máx. diária (mm)	35.0	20.0	40.0	15.0	30.0	0.0	10.0	118.0
	Mín. diária (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Dias - chuva	13	13	17	6	4	0	5	5
Coqueiro Seco (ANA)	Prec. Total (mm)	180.8	140.2	126.3	43.6	39.8	2.6	52.4	50.0
	Máx. diária (mm)	26.6	15.4	37.6	8.2	13.4	0.6	13.2	22.4
	Mín. diária (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Dias - chuva	21	26	26	17	14	8	16	7

A Figura 28 expõe os dados de precipitação e evaporação – da média histórica, de 1961 até 2017, e do ano de 2018 – da estação MACEIÓ-AL (OMM: 82994). Referente ao ano de 2018, observa-se que no período chuvoso, a precipitação acumulada no mês de junho ficou bem abaixo da média histórica, seguido dos meses de maio e julho. Os meses de agosto e setembro também apresentaram valores inferiores à média. Quanto ao período seco, o mês de outubro foi o mais seco, com valor bem inferior à média, enquanto que nos meses de novembro e dezembro, os valores foram superiores. No ano de 2018, os valores de evaporação foram, de modo geral, um pouco inferiores à média histórica.

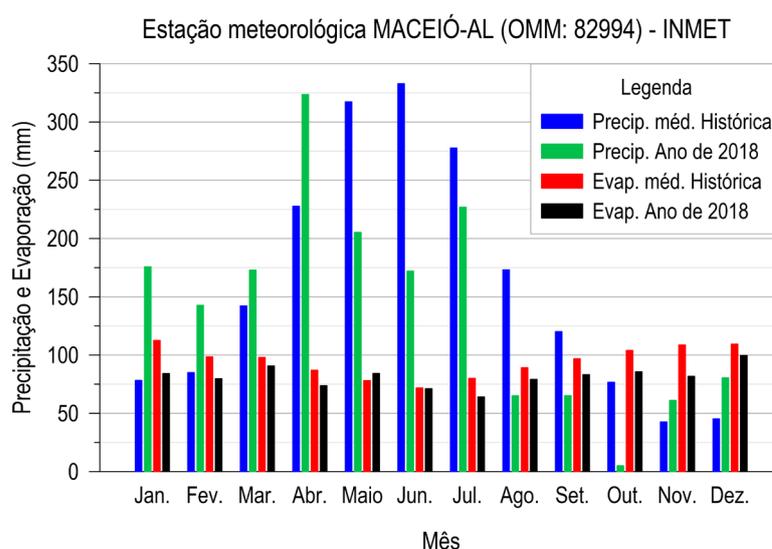


Figura 28 - Série mensal de dados históricos de precipitação e evaporação, de 1961 até 2017, e do ano de 2018, obtidos da estação MACEIÓ-AL (OMM: 82994) - INMET.

5.4 Modelagem para Análises de Tempos Hidráulicos Característicos (THC)

Nesta seção descreve-se como foram realizadas as simulações para análises de Tempo de Residência (T_R), Tempos de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) e Idade da Água (I_A), abordando-se a concepção de cada modelo, com base na Referência Técnica do SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2023). Para caracterizar a influência da sazonalidade na renovação das águas, realizou-se duas simulações, referentes aos períodos chuvoso e seco, para cada THC. Destaca-se, relativamente as configurações adotadas em comum, que o passo de tempo das simulações foi igual a 60 s. O intervalo de tempo de gravação dos resultados espaciais foi de 1 h, enquanto dos resultados temporais, de 30 min. Mais informações podem ser obtidas no Apêndice A.

5.4.1 Tempo de Residência (T_R)

A modelagem do T_R tem o objetivo de determinar o tempo que as massas de água residem em determinado compartimento fluido, antes de serem transportadas para fora desse compartimento. A modelagem do T_R se inicia com o preenchimento do compartimento, isto é, o domínio

de interesse, com diversas partículas neutras, que não ocupam espaço. Essas partículas simbolizam centroides de parcelas de massa de água dentro do compartimento, e são passivamente transportadas pelas correntes. Observa-se que o modelo atribui a cada partícula, um número próprio, e a ele ficam vinculados a posição inicial e o instante de seu lançamento no compartimento. Ao longo da simulação, o modelo acompanha a trajetória de cada partícula. Enquanto a partícula permanece circulando no interior do compartimento, seu tempo de vida aumenta e é contabilizado. No momento em que a partícula sai do compartimento, o seu tempo de vida passa a ser o valor do T_R , atribuído à posição inicial da partícula no início da simulação. Ao final da simulação, caso a partícula não tenha saído do compartimento, o valor do T_R , no local de lançamento da partícula, será igual a duração da simulação.

Neste estudo, o compartimento correspondeu às lagunas, com as seções de controle equivalentes àquelas adotadas para calcular as séries temporais de vazões e de volumes resultantes de enchente e vazante, conforme exposto na Figura 37. Ao todo, o compartimento foi preenchido com 143825 partículas, distribuídas em grade regular de 15×15 metros. O tempo de simulação correspondeu a 92 dias, em cada período de simulação. Observa-se que nas configurações do modelo adotou-se, como condição de contorno na fronteira de terra, a reflexão total das partículas, ou seja, absorção nula.

5.4.2 Tempos de Taxa de Renovação ($T_R\%$)

A modelagem da Taxa de Renovação ($T_R\%$) tem o propósito de avaliar, em porcentagem, a renovação das águas promovida pela mistura de águas “novas”, que entram pelos rios, canais de maré e via precipitação, com as águas presentes no domínio de interesse desde o início da simulação. Observa-se que ao se utilizar o termo “Tempos de Taxa de Renovação”, o que se deseja indicar é o tempo necessário para que um dado local do corpo d’água atinja uma determinada taxa de renovação, o que possibilita comparar o quão rapidamente as regiões se renovam.

A concepção deste modelo se baseia no cálculo da concentração de uma substância de referência, sendo esta obrigatoriamente neutra ou conservativa. Reações cinéticas de produção ou consumo são desconsideradas, como também velocidades de sedimentação e ressuspensão. No instante inicial, considerou-se que toda a água do domínio de interesse, lagunas e canais de comunicação, possuía renovação inicial igual a 0%, ou seja, o valor de concentração da substância de referência foi igual a zero. Na região costeira, adotou-se o oposto, isto é, o valor de concentração igual a 100, indicando que as águas dessa região foram consideradas “novas”, e por isso, iniciaram a simulação com índice de renovação igual a 100%. O mesmo valor foi

atribuído as águas que entram no domínio de modelagem pelos contribuintes fluviais, pelo mar e via precipitação. Nota-se que tal valor de concentração é independente das variações dos afluxos ao sistema ao longo da simulação, assim como da qualidade das águas afluentes. Portanto, tal valor apenas indica a entrada de água “nova” no domínio de modelagem. Ao longo da simulação, em função dos processos advectivos e difusivos, as águas com índice de 0% vão se misturando com as águas “novas” que afluem com 100%, indicando o percentual de renovação das águas. Em um dado instante e local, por exemplo, se o valor de renovação indicar 70%, significa que 70% das águas seriam águas “novas” que entraram no domínio de interesse após o início da simulação, e o restante, 30%, se referem àquelas que já se encontravam neste domínio desde o início da simulação.

5.4.3 Idade da Água (I_A)

A modelagem da Idade da Água (I_A) tem a finalidade de representar a idade média das águas em um dado setor do corpo d’água. Em outras palavras, em média, por quanto tempo as águas de um dado local estão dentro do domínio de modelagem. Por exemplo, regiões próximas das entradas de rios e do mar terão idades menores, pois são regiões que sempre recebem águas “novas”, ao passo que as zonas mais distantes desses locais tendem a ter águas com idades maiores. Para o cálculo da I_A , o modelo considera uma substância passiva marcadora de idade, $C(x, y, t)$, que sofre decaimento de primeira ordem, com a taxa constante $K_d > 0$. São desprezados os efeitos de perdas ou ganhos de massa. Como exemplo, considere um volume de água bem misturado com concentração inicial C_0 de tal substância. A variação no tempo da concentração da substância marcadora de idade, $C(t)$, é dada pela Equação 3:

$$\frac{dC}{dt} = -K_d C, \quad (3)$$

cuja solução analítica leva a Equação 4:

$$C(t) = C_0 \exp(-K_d t) \therefore t = \frac{-\ln(C / C_0)}{K_d} \quad (4)$$

Conhecendo-se a concentração inicial C_0 e uma concentração C registrada posteriormente, é possível determinar o tempo de decaimento, t , decorrido entre o instante inicial da modelagem e o instante do registro de C . O tempo de decaimento, t , representa a “idade” da água no instante do registro de C . Relacionou-se o K_d , cuja unidade é o inverso do tempo, com

o tempo equivalente denominado T_{90} , isto é, o tempo requerido para decaimento de 90% da concentração, equivalente a uma ordem de grandeza. Adotando-se $C/C_0 = 0.1$, calcula-se $K_d = -\ln(0.1)/T_{90}$. Na modelagem, em um dado instante e local, em consequência dos mecanismos de transporte advectivo e difusivo turbulento, o valor da função $I_A(x, y, t)$ simboliza uma média da mistura de águas com diferentes idades, sendo expressa pela Equação 5:

$$I_A(x, y, t) = \frac{-\ln(C(x, y, t)/C_0)}{K_d} = \ln(C(x, y, t)/C_0) \frac{T_{90}}{\ln(0.1)} \quad (5)$$

Na concepção deste modelo, considerou-se que no instante inicial, t_0 , toda a água no domínio de modelagem era homogênea com $C(x, y, t_0) = C_0 = 1.0$, ou seja, a I_A no instante inicial é igual a zero em todos os locais, pois $\ln(1) = 0$. Observa-se que essa condição inicial foi adotada na simulação realizada previamente ao período chuvoso, com o objetivo de criar condições iniciais apropriadas para o respectivo período. Usualmente, a condição inicial de $I_A = 0$ em todo o domínio de modelagem é adotada logo no início da simulação do período de interesse, como pode ser observado no estudo de Pinheiro et al. (2021). Um ponto negativo de se partir de uma condição homogênea é o tempo despendido para que a I_A atinja uma condição de equilíbrio dinâmico, dada em função das forçantes ambientais. Deste modo, para evitar iniciar a simulação com uma condição homogênea, o valor de $I_A = 0$ foi adotado previamente, em uma pré-modelagem do período chuvoso, com duração correspondente a 30 dias. Além disso, a I_A também foi simulada nos meses de agosto e setembro, com intuito de considerar a evolução desta ao longo do tempo e, conseqüentemente, gerar condições iniciais apropriadas para o período seco.

Para as águas “novas” que entram no domínio de modelagem pelos contribuintes fluviais, pelo mar e via precipitação, foi atribuído o valor de concentração igual a 1, isto é, possuem $I_A = 0$. Da mesma forma como mencionado em relação à $T_{R\%}$, o valor de concentração é independente das variações dos afluxos ao sistema ao longo da simulação, assim como da qualidade das águas afluentes. Ao longo do tempo, as águas iniciais e as águas que entram no domínio vão se misturando e sendo transportadas, o que ocasiona a diminuição do valor de C em cada local, em função do processo de decaimento, gerando, por consequência, o aumento da I_A . No que diz respeito ao T_{90} , Rosman (2023) recomenda que o valor deste seja próximo da duração da simulação, a fim de garantir acurácia numérica. Sendo assim, adotou-se $T_{90} = 92$ dias, equivalente à duração da modelagem em cada período. Para compreender os resultados, considere que em um dado instante e local, o valor de $I_A = 20$ dias, isso significa que as águas nesse momento e local estão, em média, a 20 dias circulando no domínio de modelagem.

Com base no estudo de Aguilera, Santos e Rosman (2020), a I_A pode ser relacionada à $T_R\%$, na medida em que indica uma estimativa do tempo requerido para renovar ao menos 50% das águas de uma determinada região. Como exemplo, se uma determinada região, ao longo de um dado período, possuir uma I_A média de 5 dias, pode-se interpretar, em função das condições ambientais deste período, que seriam necessários, em média, 5 dias para renovar ao menos 50% das águas dessa região.

5.5 Modelagem de Qualidade de Água

Nesta seção são descritas como foram realizadas as modelagens de salinidade, temperatura e da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes. Serão apresentadas a localização das estações de monitoramento de qualidade de água gerenciadas pelo Instituto do Meio Ambiente de Alagoas (IMA-AL), e os locais de amostragem da ANA (2012c), nos quais foram obtidos dados de salinidade, temperatura e coliformes termotolerantes, que serão discutidos no decorrer do trabalho. Observa-se que devido à indisponibilidade de dados medidos na época referente às simulações, os modelos de salinidade, temperatura e de dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes não foram calibrados e validados.

5.5.1 Modelagem de Salinidade

A salinidade tem grande relevância na região de estudo, principalmente, na laguna Mundaú, pois interfere no ciclo de desenvolvimento do molusco sururu (*Mytella charruana*) e, conseqüentemente, na atividade econômica proveniente de sua extração. Desta forma, foram realizadas simulações para caracterizar as variações espaciais e temporais de salinidade. Como mencionado na seção 5.1.3, a salinidade foi tratada como escalar ativo, ou seja, os modelos de salinidade foram executados simultaneamente aos modelos hidrodinâmicos.

Nos modelos de salinidade, as condições de contorno adotadas na fronteira aberta foram provenientes do HYCOM, extraídos do mesmo local onde foram adquiridas as séries de componentes de velocidade U (Este) e V (Norte). A série obtida possui resolução temporal de 3 h, e valores em diferentes profundidades. A partir do perfil de salinidade, calculou-se a salinidade média na coluna d'água, que foi posteriormente inserida nos modelos. A Figura 29 expõe os dados obtidos nos respectivos períodos, com a inclusão dos meses de agosto e setembro. Com base nesses dados, destaca-se que os valores médios no período chuvoso, de maio a julho, variaram entre 36.4 e 36.8 ups, enquanto no período seco, de outubro a dezembro, entre 36.5 e 36.7 ups. Para as águas doces afluentes, adotou-se o valor de 0 ups. Devido à falta de dados medidos nas lagunas, as condições iniciais para o período chuvoso foram geradas a partir de uma pré-modelagem, realizada por 30 dias antes do início do respectivo período, como já

mencionado anteriormente. Com relação à condição inicial adotada nesta pré-modelagem, considerou-se, de modo homogêneo, o valor de 4.5 ups na laguna Mundaú, 3 ups na laguna Manguba, 14.5 ups nos canais de comunicação e 37 ups na zona costeira. Após a execução da pré-modelagem, obteve-se a condição inicial do período chuvoso, que será apresentada na seção 6.3.

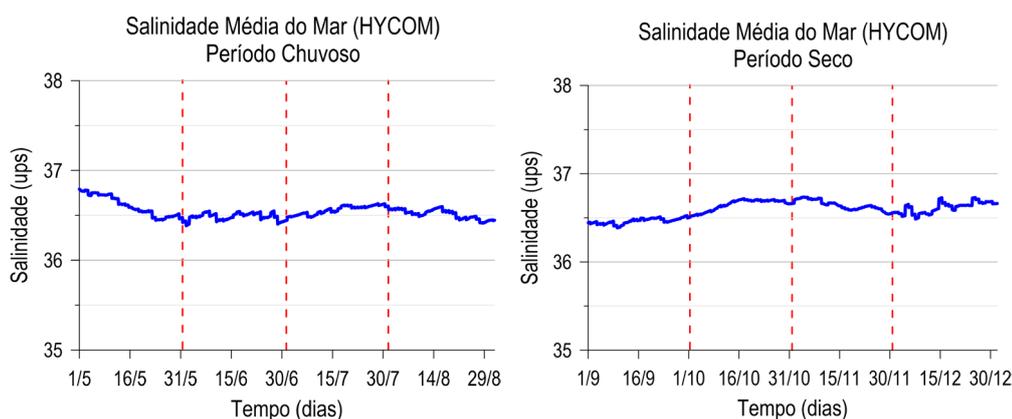


Figura 29 - Valores de salinidade utilizados na fronteira aberta dos modelos de salinidade, a partir de dados provenientes do HYCOM. O local de extração dessas informações encontra-se exposto na Figura 24. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro.

Para a modelagem do período seco, a condição inicial de salinidade foi gerada, também, por meio de uma pré-modelagem. Neste caso, o intervalo considerado foi do final do período chuvoso até o início do período seco, ou seja, os meses de agosto e setembro. Optou-se por esse procedimento, para que os valores fossem capazes de representar, de forma adequada, uma condição de continuidade e evolução da salinidade no sistema, que ocorreria naturalmente na transição do período chuvoso para o período seco. A condição inicial do período seco será apresentada e discutida na seção 6.3.

5.5.2 Modelagem de Temperatura

A temperatura foi modelada com intuito principal de representar as variações espaciais e temporais deste parâmetro, além de gerar dados para as simulações da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes. Nos modelos de temperatura, as condições de contorno adotadas para as contribuições fluviais foram adquiridas das mesmas estações fluviométricas citadas anteriormente. Tendo em vista que as temperaturas obtidas se encontravam em intervalos longos e irregulares ao longo do ano, e que as diferenças de temperatura entre os rios Mundaú e Paraíba do Meio são bem pequenas, optou-se por combinar as duas séries de dados em uma única série. Após isso, os valores foram interpolados, a fim de criar uma série de dados

contínua. A Figura 30 apresenta as temperaturas adotadas nas respectivas simulações, com a inclusão dos meses de agosto e setembro.

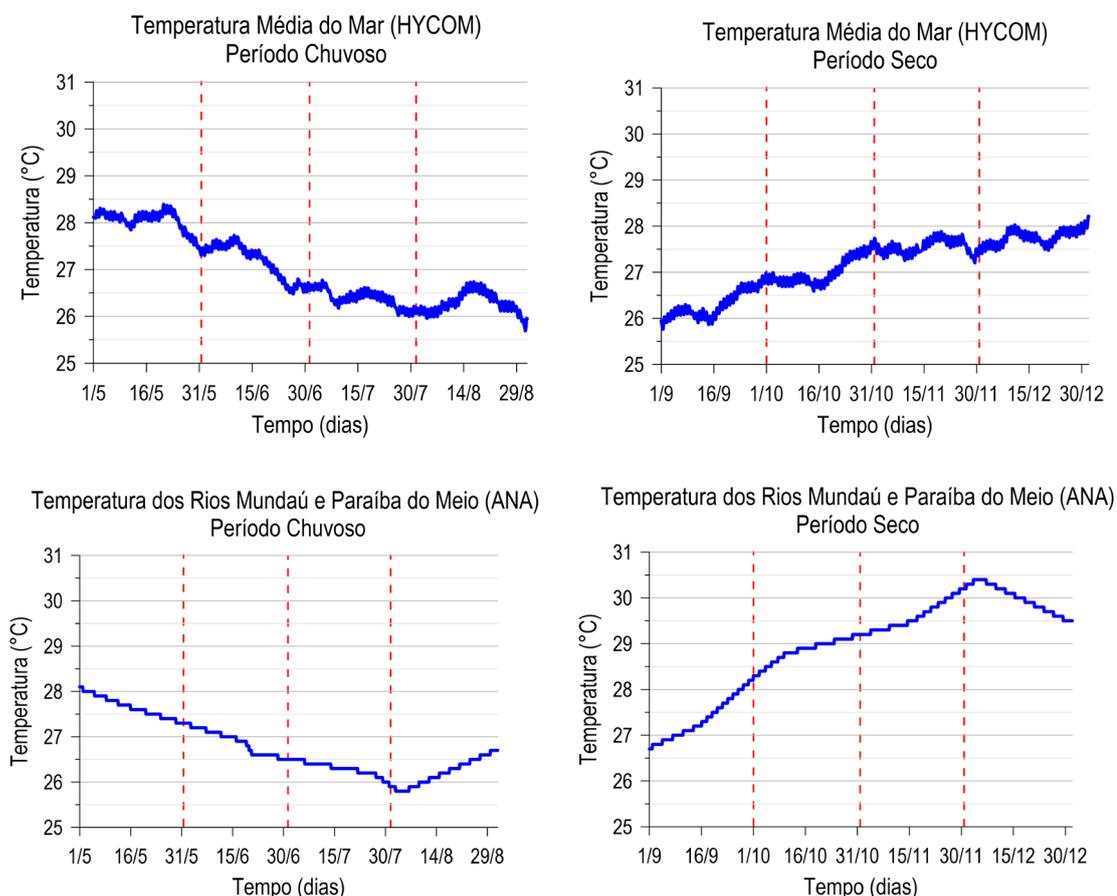


Figura 30 - Temperatura do mar (média) e dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, em referência aos períodos chuvoso e seco. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro.

No período chuvoso, de maio a julho, representativo das estações de outono e inverno, a temperatura dos rios Mundaú e Paraíba do Meio variou entre 25.9 e 28.1°C. Já no período seco, de outubro a dezembro, representativo das estações de primavera e verão, variou entre 28.3 e 30.4°C. Nota-se que a menor temperatura ocorreu em agosto, com o valor de 25.8°C, enquanto a maior, em dezembro, com o valor de 30.4°C. As temperaturas citadas foram consideradas em todas as contribuições fluviais, com exceção dos canais de drenagem urbana de Maceió, região sul e sudeste da laguna Mundaú. Nestes, foram somados 2°C aos valores, tendo como base as medições da ANA (2012c). Na fronteira aberta, realizou-se o mesmo procedimento descrito em relação à salinidade. No período chuvoso, a temperatura média do mar variou entre 26.0 e 28.4°C, enquanto no período seco, entre 26.6 e 28.2°C. Observa-se que a menor temperatura média ocorreu em agosto, com o valor de 25.7°C, enquanto a maior, em maio, com o valor de 28.4°C.

Cita-se ainda os demais dados de relevância para a modelagem, sendo eles: a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a radiação solar. Esses dados foram obtidos da estação meteorológica MACEIÓ-A303 (INMET), com intervalo de tempo de 1 h. Os dois primeiros parâmetros são apresentados a seguir, enquanto o último, será exposto na seção 5.5.4, em referência aos dados de entrada para as simulações da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes. A Figura 31 exibe os dados de temperatura do ar utilizados nas simulações, representados na cor azul. Já na cor preta, expõe-se a média móvel diária. No período chuvoso, a temperatura do ar variou entre 18.5 e 30.2°C, com valor médio de 24.1°C. Já no período seco, entre 20.1 e 32.9°C, com a média de 26.2°C. Nota-se que a menor temperatura do ar ocorreu em agosto, com o valor de 17.2°C, enquanto a maior, em dezembro, com o valor de 32.9°C.

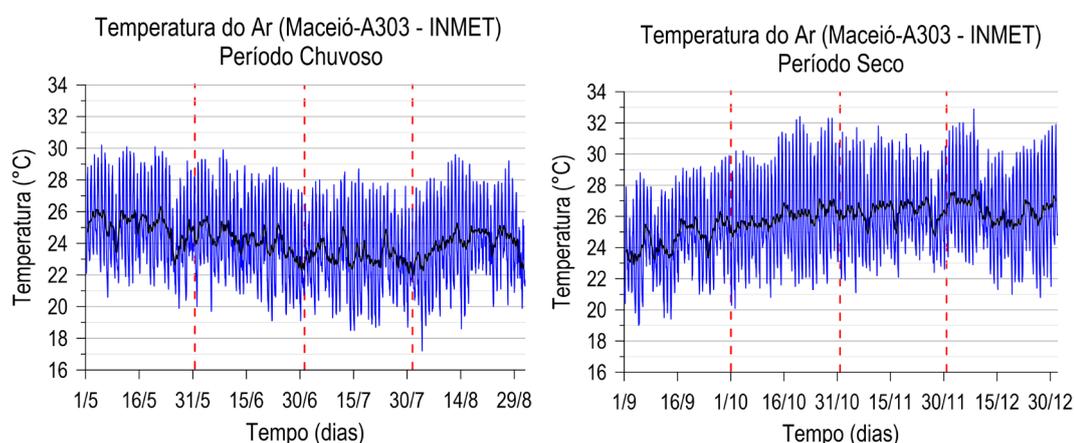


Figura 31 - Temperatura do ar, em referência aos períodos chuvoso e seco. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro, além da média móvel diária.

Quanto à umidade relativa do ar, a modelagem revelou que a inserção direta dos dados de umidade não era adequada, pois os resultados obtidos se mostraram incoerentes com a provável realidade. Uma explicação para isso se deve ao fato de que a informação correta a ser inserida no modelo de temperatura é a umidade relativa do ar da camada de ar logo acima do espelho d'água das lagunas. No entanto, as únicas informações disponíveis são da estação MACEIÓ-A303 (INMET), que se encontra no continente, a uma distância de um pouco mais de 8 km do centro da laguna Mundaú. Ao se utilizar diretamente esses dados, as temperaturas nas lagunas reduziram-se consideravelmente, pois, como a umidade relativa do ar na referida estação tende, em média, a ser menor do que a do ar logo acima das lagunas, o que se observou, como consequência, foi a uma maior perda de calor, por evaporação. Sendo assim, após realizadas algumas simulações, os dados foram manipulados da seguinte forma: primeiramente, foi somado um valor constante à série de umidade, a fim de atingir o máximo de 100%, após isso, estabeleceu-se o valor mínimo de 80%. Em resumo, a Figura 32 apresenta os dados utilizados

nas modelagens. Um exemplo de aplicação e discussão sobre a sensibilidade de modelos de transporte de calor quanto ao parâmetro umidade relativa do ar, aplicado em um corpo d'água lagunar, pode ser obtido em Silva (2012).

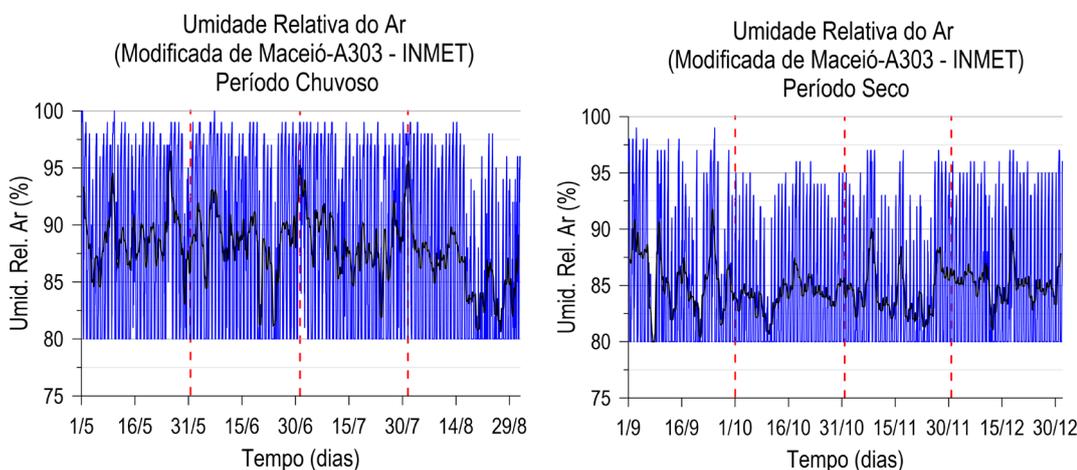


Figura 32 - Umidade relativa do ar (modificada), em referência aos períodos chuvoso e seco. Observa-se a inclusão dos meses de agosto e setembro, além da média móvel diária.

É válido mencionar que a condição inicial do período chuvoso também foi gerada por meio de uma pré-modelagem, em que a condição inicial adotada para as lagunas e os canais de comunicação foi a média entre a temperatura do mar e dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, ou seja, 29.0°C. Da mesma forma como mencionado em relação à salinidade, a condição inicial do período seco foi obtida a partir das simulações dos meses de agosto e setembro.

5.5.3 Dados de Qualidade de Água

Com objetivo de embasar as análises das modelagens de salinidade, temperatura e da dispersão e decaimento das plumas de coliformes termotolerantes, foram obtidos dados de qualidade de água do IMA-AL. Apresentam-se ainda, na discussão dos resultados dos THC, informações sobre a qualidade das águas doces afluentes, que contribuem para a renovação das águas do CELMM. Os parâmetros citados foram: OD, DBO₅, Fósforo Total, Nitrogênio – Amoniacal e Nitrato, ou ainda, o Total. O IMA-AL possui diversas estações de monitoramento de qualidade de água no CELMM, conforme apresentado na Figura 33. Por sua vez, o Quadro 5 identifica essas estações. Os dados adquiridos do IMA-AL encontram-se disponibilizados no Apêndice B. Devido à indisponibilidade de informações recentes, as informações apresentadas referem-se aos seguintes períodos:

- Ano de 2012 - Dia/Mês: 01/02; 14/03; 25/04; 04/06; 25/07; 17/09; 21/11 e 20/12;
- Ano de 2013 - Dia/Mês: 20/02; 13/03; 17/04 e 15/05;
- Ano de 2016 - Dia/Mês: 29/02.

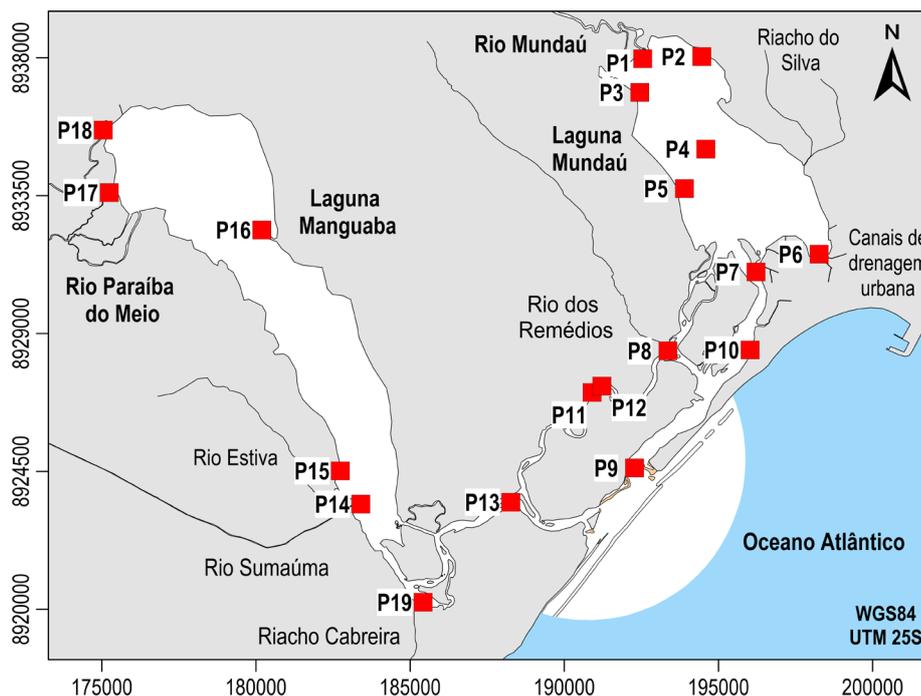


Figura 33 - Localização das estações de monitoramento de qualidade de água do IMA-AL.

Quadro 5 - Locais de amostragem de qualidade de água do IMA-AL e da ANA (2012c).

Pontos de Amostragem – IMA-AL		Pontos de Amostragem – ANA (2012c)	
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	P1_ANA	Laguna Mundaú
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	P2_ANA	
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	P3_ANA	
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	P4_ANA	
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	P5_ANA	
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	P6_ANA	
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	P7_ANA	
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	P8_ANA	
P9	Boca da Barra.	P9_ANA	
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	P10_ANA	
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Polo Cloroquímico.	P21_ANA	Foz do rio Mundaú
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sito do Buraco.	P22_ANA	Foz do riacho do Silva
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	P23_ANA	Canais de drenagem urbana
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma.	P25_ANA	
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	P26_ANA	
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	P27_ANA	
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	P28_ANA	
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	P29_ANA	
P19	Riacho Cabreira	P30_ANA	

Além dos dados do IMA-AL, obteve-se também dados de qualidade de água da ANA (2012c), referente aos locais de amostragem expostos na Figura 34, que incluem o rio Mundaú, a laguna Mundaú e alguns canais de drenagem urbana que desembocam nesta laguna. Esses

locais estão identificados no Quadro 5. Dos diversos parâmetros analisados, será dado enfoque aos mencionados anteriormente, com dados referentes aos dias 4 e 5 de abril de 2012.

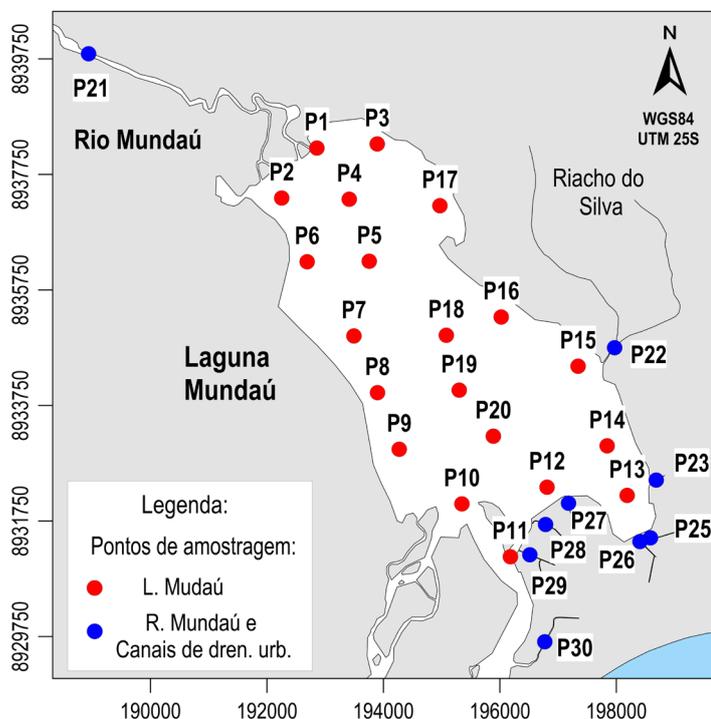


Figura 34 - Localização das estações de amostragem de qualidade de água da ANA (2012c).

Os dados de salinidade, temperatura e coliformes termotolerantes serão apresentados e discutidos na seção 6, relacionando-os com as informações descritas no referencial teórico e com os resultados das modelagens. Além disso, os dados de coliformes termotolerantes serão avaliados perante os valores limites dispostos nas Resoluções CONAMA nº 357/2005 e CONAMA nº 274/2000. Antecipadamente, na seção 5.5.4.2, apresentam-se as concentrações de coliformes termotolerantes do rio Mundaú e dos canais de drenagem urbana de Maceió, obtidas da ANA (2012c), que auxiliaram na definição das concentrações adotadas nos contribuintes fluviais considerados nas modelagens da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes.

5.5.4 Modelagem da Dispersão e Decaimento de Plumais de Coliformes Termotolerantes

O ponto em comum entre os temas saneamento básico e modelagem ambiental é apresentado nesta seção, que contém os cenários propostos e a concepção da modelagem da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes. A análise e a modelagem deste parâmetro de qualidade permitem avaliar, em termos espaciais e temporais, como a qualidade de água é afetada pelos lançamentos de esgotos gerados nas zonas urbanas. A modelagem possibilita, ainda, que seja analisada a balneabilidade para diferentes cenários de esgotamento

sanitário nas bacias de contribuição, tendo em vista os padrões de qualidade de água compatíveis com os usos preponderantes.

5.5.4.1 Cenários de Modelagem

Com base nas informações apresentadas foram propostos dois cenários para avaliar a colimetria, sendo eles:

- **1º Cenário:** As simulações, nos períodos chuvoso e seco, pretendem representar as variações espaciais e temporais nas concentrações de coliformes termotolerantes, tendo como base as condições de esgotamento sanitário apresentadas na seção 4.3 “Saneamento Básico – Panorama do Esgotamento Sanitário”.
- **2º Cenário:** Avaliou-se os efeitos causados na colimetria supondo a implantação e expansão de soluções voltadas à coleta e tratamento de parte dos esgotos gerados nas bacias contribuintes. Considerou-se nesse caso, o abatimento de 90% nas concentrações admitidas no primeiro cenário.

5.5.4.2 Dados Ambientais

As simulações para avaliar a dispersão e o decaimento de plumas de coliformes termotolerantes foram realizadas por meio do MTL, através do módulo denominado *Campo Próximo - Emissários*. A Figura 35 exibe a interface desse módulo, que é composto por cinco abas, que serão mencionadas em seguida, descrevendo os dados inseridos em cada uma delas.

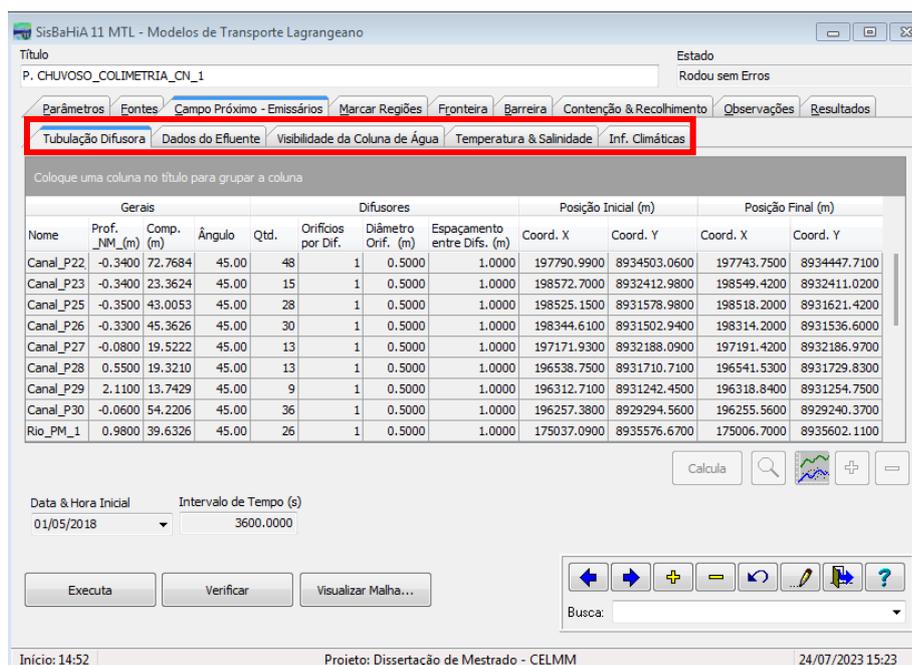


Figura 35 - Interface do módulo *Campo Próximo - Emissários*, constituído por cinco abas: *Tubulação Difusora*; *Dados do Efluente*; *Visibilidade da Coluna de Água*; *Temperatura e Salinidade*; e *Inf. Climáticas*.

Na aba *Tubulação Difusora* foram adicionados dados relativos às linhas difusoras consideradas, as quais se encontram inseridas na região próxima à foz de cada rio, canal de drenagem ou ponto de lançamento. Dessa forma, as linhas difusoras representam os locais de entrada das vazões de esgotos diluídos, a partir dos quais serão simulados os processos iniciais de mistura com as águas do CELMM.

Na aba *Dados do Efluente* foram inseridas as vazões de entrada e respectiva massa específica do fluido, além das concentrações de coliformes termotolerantes e número de partículas lançadas para representar adequadamente a distribuição espacial da pluma no corpo d'água. As vazões adotadas já foram apresentadas na seção 5.3.2. As concentrações de coliformes termotolerantes basearam-se nos dados de qualidade mencionados na seção 5.5.3, e que são apresentados na Tabela 15, e discutidos logo após. Para definir os valores de concentração, consideraram-se também informações provenientes de Von Sperling (2014) e Jordão e Pessoa (2017). Segundo esses autores, esgotos domésticos brutos tendem a apresentar colimetria com ordem de grandeza de 10^6 a 10^9 NMP/100 mL, com valor típico de 10^8 NMP/100 mL, que equivale a $1.0E+8$ NMP/100 mL.

Tabela 15 - Colimetria, expressa em notação científica, do rio Mundaú e dos canais de drenagem urbana de Maceió, segundo dados da ANA (2012c), referente às coletas realizadas nos dias 4 e 5 de abril de 2012. Nota-se que os pontos de amostragem estão ilustrados na Figura 34.

Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)					
Rio Mundaú e canais de drenagem urbana de Maceió - ANA (2012c)					
P21_ANA	4.9E+4	P25_ANA	3.5E+5	P28_ANA	3.3E+4
P22_ANA	1.6E+6	P26_ANA	7.9E+4	P29_ANA	2.4E+5
P23_ANA	2.3E+4	P27_ANA	4.9E+4	P30_ANA	3.5E+5

Como se pode observar pelos valores expostos, os canais de drenagem urbana de Maceió, assim como o rio Mundaú (P21_ANA), relevaram elevadas concentrações de coliformes termotolerantes, sendo inegável a presença de esgotos nesses corpos fluviais. Tendo em vista a Resolução CONAMA nº 357/2005, para águas doces, todas as amostras ultrapassaram o limite da classe 2, máximo de $1.0E+3$ NMP/100 mL, como também da classe 3, máximo de $4.0E+3$ NMP/100 mL. O maior valor obtido, de $1.6E+6$ NMP/100 mL, correspondeu à foz do Riacho do Silva (P22_ANA), seguido dos locais P25_ANA (canal de drenagem urbana que desemboca na região sudeste da laguna Mundaú) e P30_ANA (canal de drenagem urbana que desemboca no canal de comunicação da laguna Mundaú). A respeito do rio Mundaú, este apresentou concentração de $4.9E+4$ NMP/100 mL. Nota-se que o local de amostragem se localiza a montante

da região urbana de Maceió, e dessa forma, esse valor foi influenciado pelos lançamentos dos municípios próximos, Rio Largo e Satuba. Na região próxima à foz, o rio Mundaú recebe ainda parte das contribuições de esgotos da região norte de Maceió, resultando numa piora ainda maior da qualidade de água, como demonstra os demais dados de qualidade da ANA (2012c).

A partir dessas informações, além daquelas provenientes de Von Sperling (2014) e Jordão e Pessoa (2017), apresenta-se a Tabela 16, com as concentrações consideradas nos modelos, nos respectivos períodos, conforme os cenários propostos. Observa-se que na foz do rio Paraíba do Meio mais próxima da cidade de Pilar, adotou-se as mesmas concentrações do rio Sumaúma, afim de considerar a influência de uma parcela dos lançamentos desta cidade na região próxima à foz.

Tabela 16 - Concentrações adotadas, por contribuintes fluviais, nas simulações do primeiro e segundo cenário, nos períodos chuvoso e seco.

Contribuintes fluviais	Colimetria (NMP/100 mL)			
	Período Chuvoso		Período Seco	
	1º Cenário	2º Cenário	1º Cenário	2º Cenário
Rio Mundaú	1.0E+4	1.0E+3	1.0E+5	1.0E+4
Rio Paraíba do Meio	5.5E+2	5.5E+1	5.5E+3	5.5E+2
Rio Sumaúma	5.5E+3	5.5E+2	5.5E+4	5.5E+3
Rio Estiva	1.0E+5	1.0E+4	5.5E+5	5.5E+4
Os demais cursos d'água	5.5E+5	5.5E+4	1.0E+6	1.0E+5

Na aba *Visibilidade da Coluna de Água* foram estimados valores para a Profundidade de Secchi, referentes à transparência das águas e das plumas de coliformes termotolerantes. As estimativas se basearam nos dados da ANA (2012c). Considerou-se a faixa de valores de 0.3 a 1.2 m, variando de regiões de menor transparência, perto da foz dos contribuintes fluviais, para aquelas de maior transparência, perto dos canais de comunicação. De modo geral, adotou-se valores menores no período chuvoso, em decorrência da maior concentração de sedimentos em suspensão, que reduziram a transparência das águas. Relativo às plumas de coliformes termotolerantes, adotou-se o valor de 0.5 m.

Na aba *Temperatura e Salinidade*, os dados foram inseridos considerando a coluna d'água homogênea, pois ela é bem misturada verticalmente. Os valores de temperatura e salinidade foram obtidos dos resultados dos respectivos modelos.

Na última aba, *Informações Climáticas*, foram inseridos dados referentes à radiação solar atuante na região de estudo. Esses dados foram provenientes da estação meteorológica MACEIÓ-A303 (INMET). A Figura 36 apresenta as séries temporais de radiação solar utilizadas nos modelos de *Campo Próximo – Emissários* e nas modelagens de temperatura. Observa-se

que os dados de agosto e setembro foram incluídos nos gráficos. Nota-se que essas informações estão escritas na unidade $\text{cal}/\text{cm}^2 \times \text{h}$, sendo que, $1 \text{ cal}/\text{cm}^2 \times \text{h} \approx 41.85 \text{ KJ}/\text{m}^2$. A análise desses dados será realizada na seção 6.5, em conjunto com valores de T_{90} gerados nas modelagens.

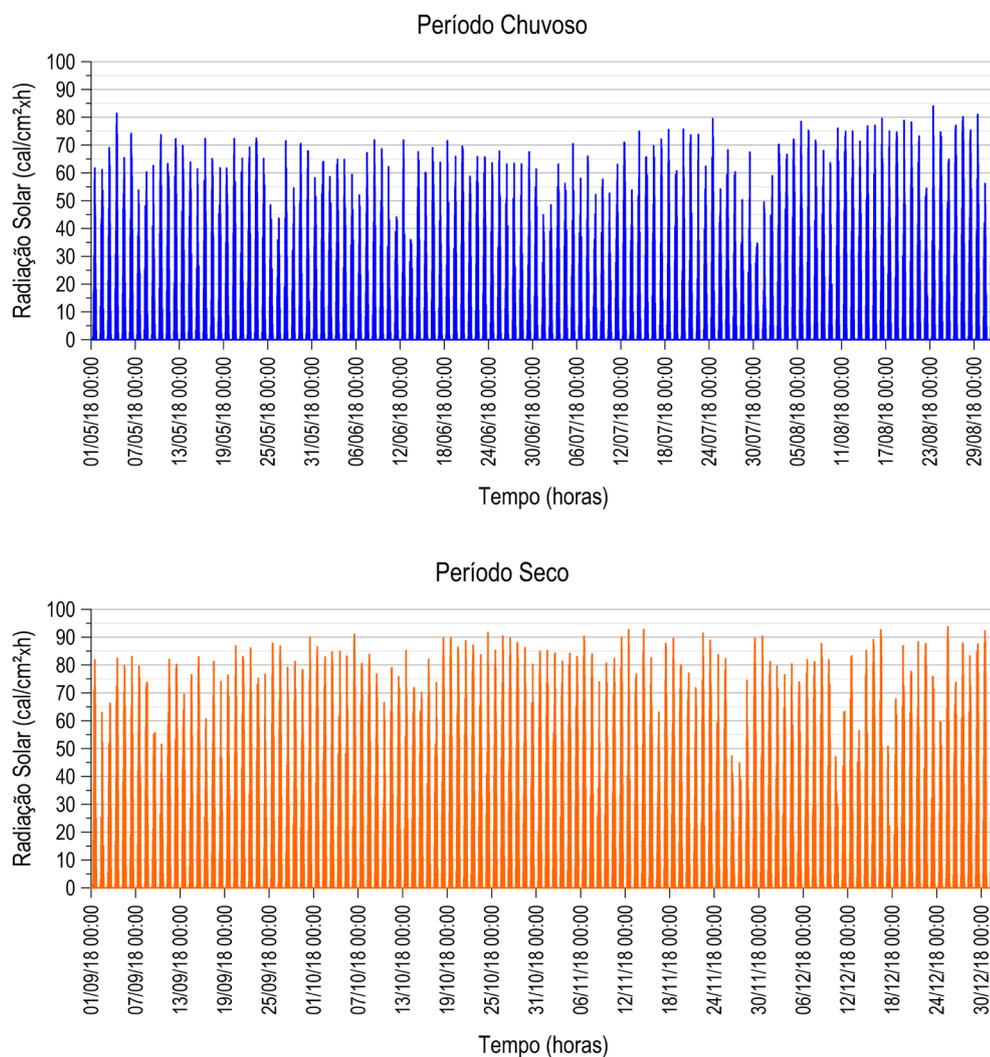


Figura 36 - Séries temporais de radiação solar utilizadas nos modelos de Campo Próximo – Emissários, em referência aos períodos chuvoso e seco.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos modelos hidrodinâmicos. Discutem-se, ainda, os resultados das simulações de T_R , $T_{R\%}$, I_A , salinidade, temperatura e dispersão e decaimento das plumas de coliformes termotolerantes. No decorrer do trabalho, os dados medidos de salinidade, temperatura e coliformes termotolerantes serão apresentados e discutidos, relacionando-os com os resultados obtidos nas modelagens. Para o parâmetro coliformes termotolerantes, os valores medidos e simulados foram avaliados segundo a Legislação vigente. Os demais parâmetros, OD, DBO_5 , Fósforo Total, Nitrogênio – Amoniacal e Nitrato, ou ainda, o Total, serão apresentados no decorrer das análises dos THC.

6.1 Análises dos Modelos Hidrodinâmicos

Esta seção expõe os resultados das modelagens hidrodinâmicas nos períodos chuvoso e seco. Primeiramente, abordou-se a seleção de nós da malha de elementos finitos para gravar resultados em forma de séries temporais, com intervalo de tempo diferente dos resultados espaciais. Observa-se que, no SisBaHiA[®], os nós selecionados são chamados de “Estações”. Em seguida, foram apresentados e analisados os resultados da calibração e validação dos modelos hidrodinâmicos. Logo após, discorreu-se sobre a propagação e caracterização da maré. Por fim, foram expostos e discutidos os resultados temporais e espaciais de caracterização dos padrões de circulação hidrodinâmica.

6.1.1 Estações

Os dados de nível d'água obtidos das Plataformas de Coletas de Dados (PCDs) encontravam-se no intervalo de 15 min. Desta forma, foram selecionados nós, ou seja, estações, nas lagunas e canais de comunicação para gravar resultados temporais nesse intervalo de tempo, a fim de possibilitar uma boa calibração dos modelos hidrodinâmicos. A Figura 37 apresenta as estações escolhidas, que também foram consideradas nas modelagens de $T_{R\%}$, I_A , salinidade e temperatura.

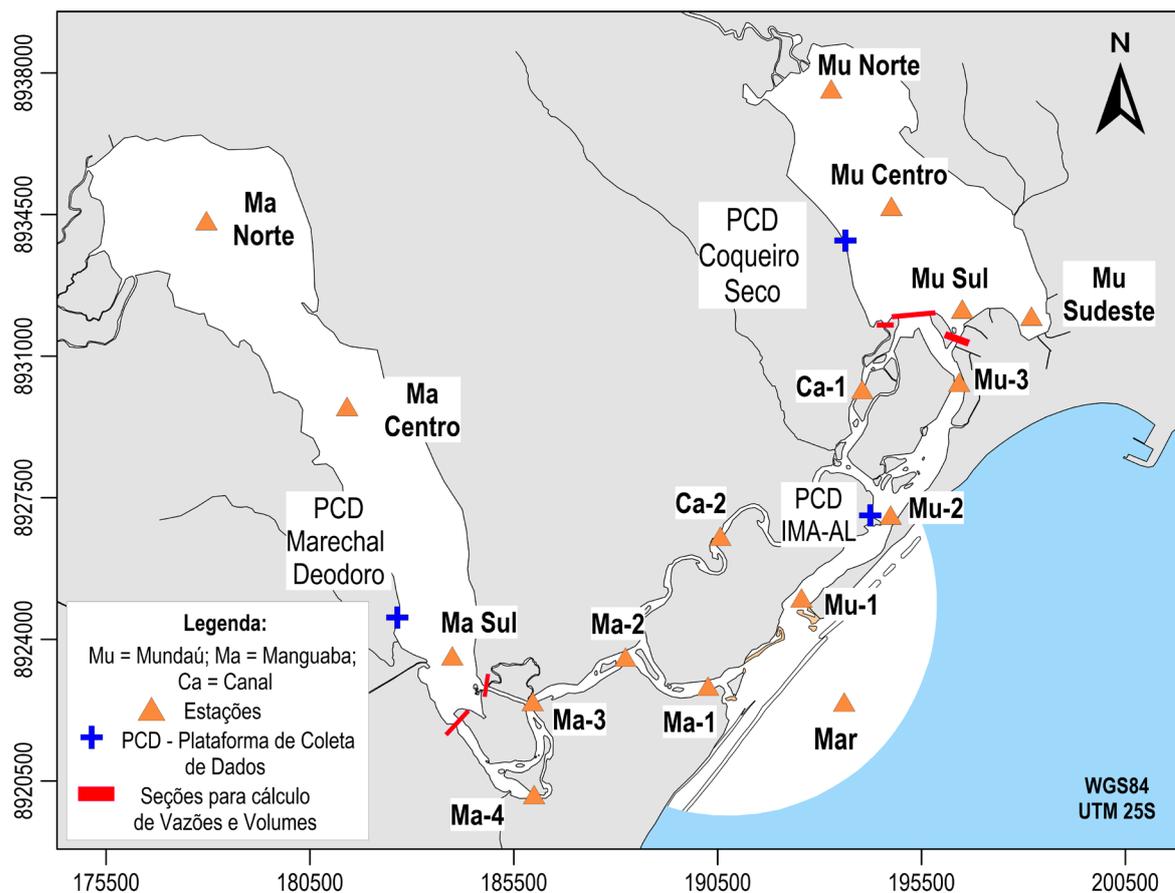


Figura 37 - Mapa das estações selecionadas para gravar resultados temporais nos modelos hidrodinâmicos, de Transporte Euleriano e de Qualidade. Nota-se também a localização das Plataformas de Coletas de Dados (PCDs), e das seções para cálculo das vazões e volumes resultantes.

6.1.2 Calibração e Validação dos Modelos Hidrodinâmicos

A Figura 38 apresenta as séries temporais de elevação da superfície livre da água medidas e simuladas nas lagunas, nos meses de julho, para o período chuvoso, e outubro, para o período seco. Nota-se que os resultados de julho expõem a calibração do modelo, realizada no período chuvoso, enquanto os resultados de outubro expressão a sua validação. Observa-se que os dados medidos foram filtrados através do “Filtro de Thompson”, disponível no menu “Ferramentas” do SisBaHiA[®]. Com isso, retirou-se dos dados medidos as escalas incompatíveis com as computadas nas modelagens. Posteriormente, na Figura 39, avaliou-se a correlação linear entre os dados medidos e simulados nos períodos chuvoso e seco, nas respectivas lagunas.

As simulações representaram de forma satisfatória os níveis de água medidos nas lagunas. Destaca-se a boa coerência entre os dados medidos e simulados, em que se obteve, a partir da regressão linear dos referidos dados, coeficientes $R^2 \geq 0.98$, e coeficientes angular ≈ 1 e linear ≈ 0 , conforme exposto na Figura 39. Tal afirmação também é válida para a correlação entre “Mu-2” e PCD IMA-AL. Na laguna Manguaba, o valor de R^2 foi um pouco inferior em comparação à laguna Mundaú, devido, principalmente, à indisponibilidade de dados batimétricos

mais recentes dos seus canais de comunicação. Outros estudos, como, por exemplo, Pinheiro (2020), também obteve boa calibração para a laguna Mundaú, com valor de R^2 igual a 0.96. Já para a laguna Manguaba, o valor de R^2 foi igual a 0.73, em razão da forte atenuação das marés em comparação aos valores medidos.

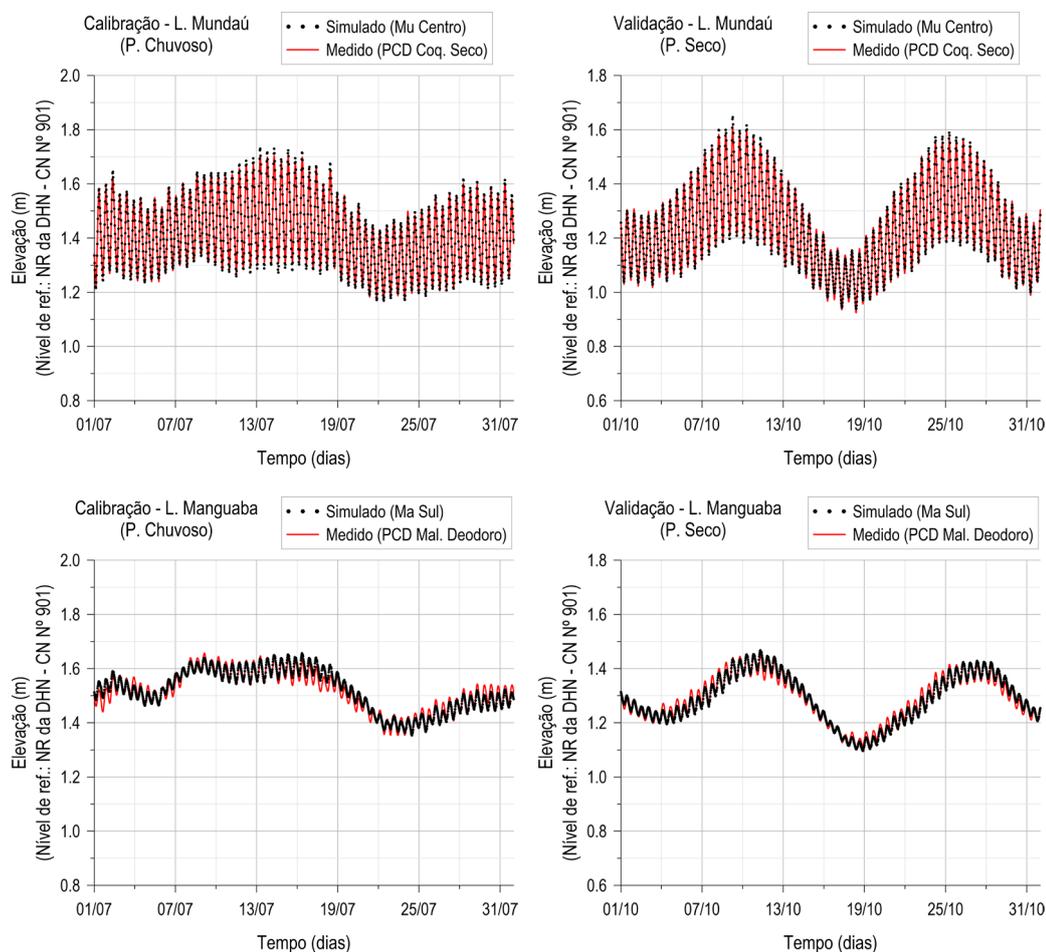


Figura 38 - Séries de elevações da superfície livre da água medida e simulada nas lagunas Mundaú, acima, e Manguaba, abaixo. À esquerda, referente ao mês de julho, representando a calibração do modelo, enquanto, à direita, referente ao mês de outubro, representando a validação do mesmo.

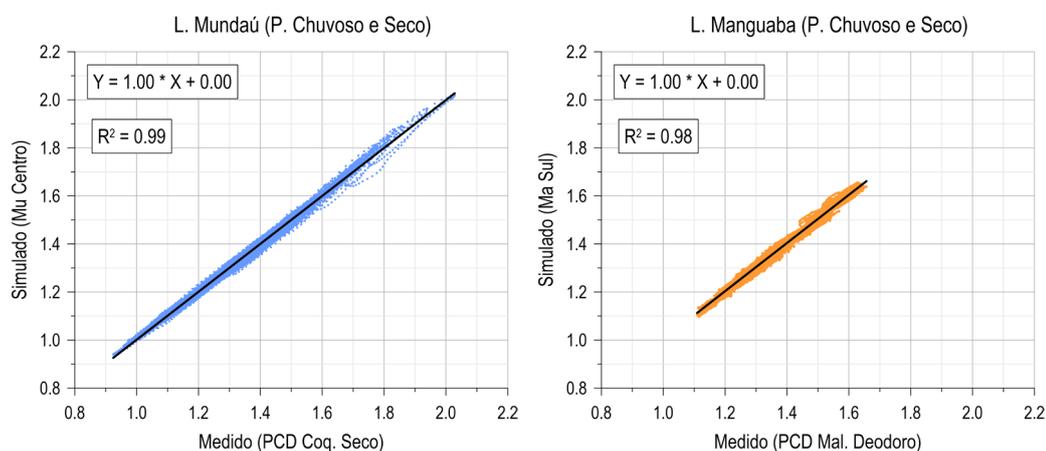


Figura 39 - Correlação linear entre os dados medidos e simulados nos períodos chuvoso e seco, nas respectivas lagunas.

6.1.3 Propagação da Maré

A fim de analisar a propagação da maré em direção às lagunas, apresenta-se, na Figura 40, os gráficos com as séries temporais de elevação para as estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, para o mês de maio, no período chuvoso, e para o mês de outubro, no período seco.

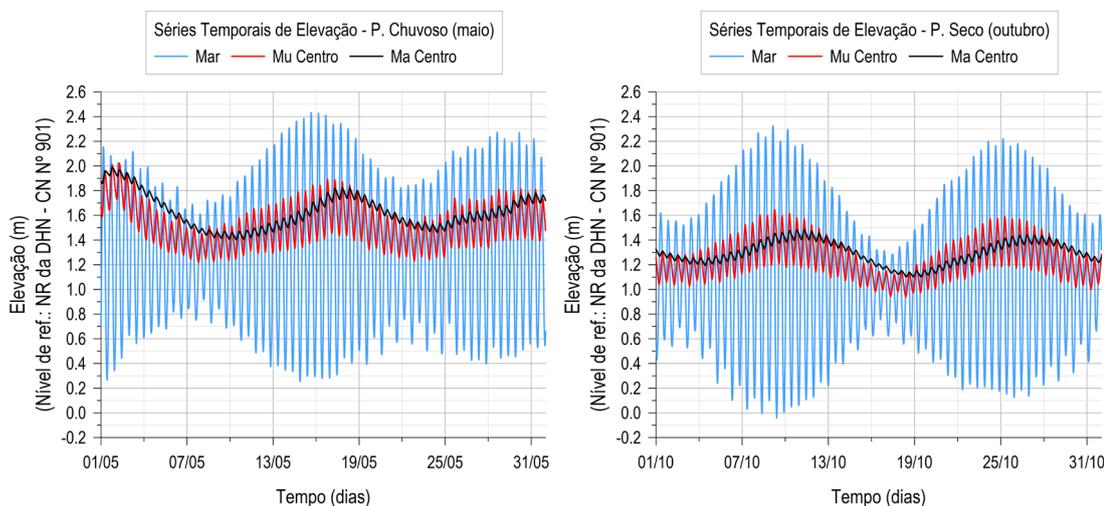


Figura 40 - Séries temporais de elevação nas estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, em maio, no período chuvoso, à esquerda, e outubro, no período seco, à direita.

A partir dessas séries foram selecionados, em cada gráfico, ciclos de maré no intervalo de tempo equivalente a 25 h. Essa seleção, para o período chuvoso, correspondeu aos ciclos de maré de quadratura no intervalo de tempo de 07/05/2018 20h30 (164.5 h) até 08/05/2018 21h30 (189.5 h), conforme exposto na Figura 40, à esquerda. No período seco, destacou-se os ciclos de maré de sizígia no intervalo de tempo de 09/10/2018 01h15 (193.25 h) até 10/10/2018 02h15 (218.25 h), exposto na mesma figura, à direita.

Os ciclos selecionados foram analisados para cada laguna, de forma independente. Assim, foram incluídas algumas estações localizadas em seus canais de comunicação. Desta forma, para a laguna Mundaú, as estações consideradas foram: “Mar”, “Mu-1”, “Mu-2” e “Mu Centro”. Já para a laguna Manguaba: “Mar”, “Ma-1”, “Ma-2”, “Ma-3” e “Ma Centro”. Em síntese, a Figura 41 e a Figura 42 apresentam, para as lagunas Mundaú e Manguaba, respectivamente, a propagação da maré nos ciclos de quadratura, nos gráficos à esquerda, e nos ciclos de sizígia, nos gráficos à direita.

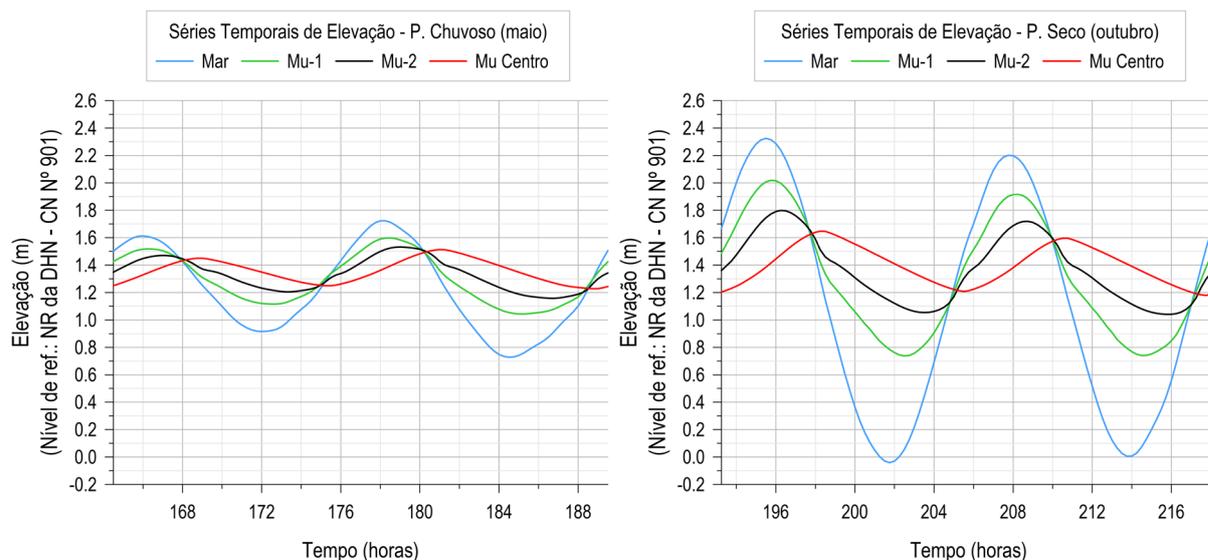


Figura 41 - Séries temporais de elevação nas estações “Mar”, “Mu-1”, “Mu-2” e “Mu Centro, referentes à laguna Mundaú. Nota-se, à esquerda, a propagação da maré nos ciclos de maré de quadratura, enquanto, à direita, nos ciclos de maré de sizígia.

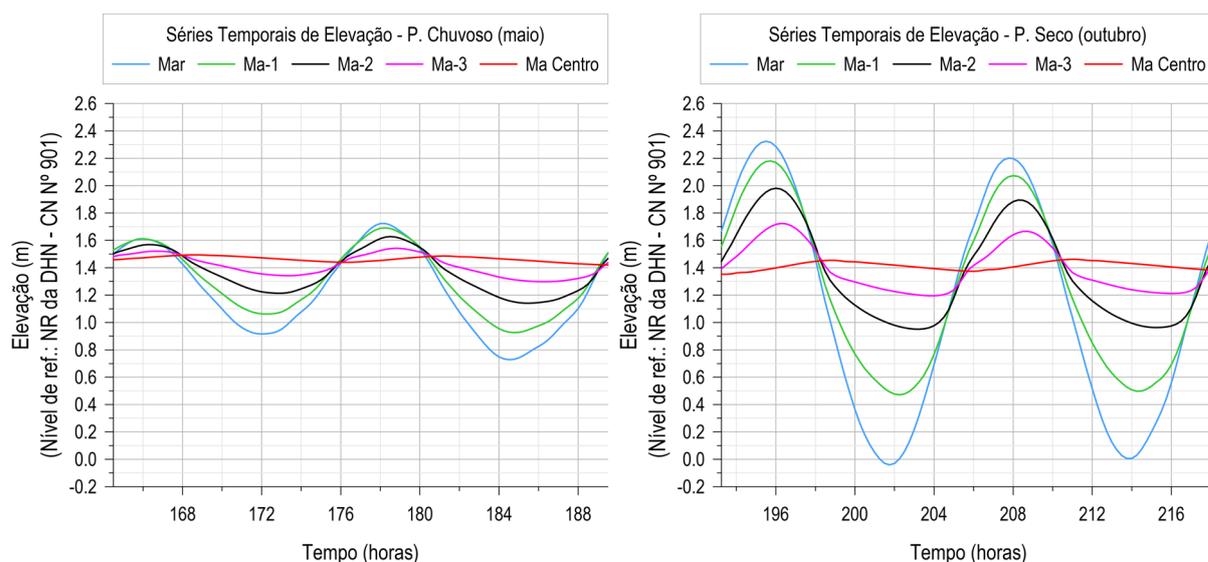


Figura 42 - Séries temporais de elevação nas estações “Mar”, “Ma-1”, “Ma-2”, “Ma-3” e “Ma Centro, referentes à laguna Manguaba. Nota-se, à esquerda, a propagação da maré nos ciclos de maré de quadratura, enquanto, à direita, nos ciclos de maré de sizígia.

Observa-se, na Figura 40, que as alturas das marés nas lagoas, principalmente, durante os ciclos de maré sizígia, foram significativamente menores em comparação com o mar. Percebe-se, na Figura 41 e na Figura 42, que a altura de maré média no mar, durante os ciclos de maré de sizígia, foi de 2.28 m; na laguna Mundaú, 0.43 m, enquanto na laguna Manguaba, 0.08 m. Constatou-se, portanto, uma atenuação de 81%, para a laguna Mundaú, e 97%, para a laguna Manguaba. Aplicando-se a mesma análise para os ciclos de maré de quadratura, calculou-se para o mar, uma altura média de 0.85 m, já na laguna Mundaú, 0.24 m, enquanto na laguna Manguaba, 0.06 m. Nesse caso, obteve-se uma atenuação de 71%, para a laguna Mundaú, e

93%, para a laguna Manguaba. Sabe-se que a densidade de energia da onda de maré é proporcional ao quadrado da sua amplitude, e dessa forma, a grande perda de energia por atrito, nos canais de comunicação das lagunas, faz com que as amplitudes da maré no interior das lagunas sejam significativamente menores do que as amplitudes no mar. Segundo Dyer (1997), com base em Nichols e Biggs (1985), pode-se classificar o CELMM como um estuário *hiposíncrono*, o que significa dizer, que na medida em que a maré se propaga para o interior das lagunas, as perdas de energia por atrito dominam.

Percebe-se, na Figura 41, a deformação da onda de maré em direção à laguna Mundaú. Nota-se, na estação “Mu-1”, o grande amortecimento e a evidente assimetria da curva de maré. A assimetria aumenta pela redução da razão entre as constantes harmônicas semidiurnas, M2, e quartidiurnas, M4, em cada local. Com o intuito de expor as razões M2/M4 em determinadas estações, apresentam-se, previamente, os valores de amplitude de M2 e M4, obtidos através de análises harmônicas dos resultados gerados nas modelagens, com exceção da estação “Mar”, com dados provenientes do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), conforme exposto na Tabela 9. Sendo assim, a Tabela 17 apresenta essas informações. Observa-se que os valores de M2 e M4 se referem a média obtida a partir dos valores calculados em cada período, à exceção da estação “Mar”.

Tabela 17 - Constantes harmônicas, M2 e M4, em 8 estações, abrangendo a zona costeira, os canais de comunicação e as lagunas Mundaú e Manguaba. Nota-se também os valores calculados de M2/M4.

Região	Estação	Amplitude (m)		M2/M4
		M2	M4	
Zona Costeira	Mar	0.692	0.009	80.5
L. Mundaú e seu canal de comunicação	Mu-1	0.381	0.032	12.0
	Mu-2	0.224	0.028	8.1
	Mu Centro	0.141	0.014	10.0
L. Manguaba e seu canal de comunicação	Ma-1	0.525	0.028	18.9
	Ma-2	0.315	0.045	7.0
	Ma-3	0.149	0.028	5.2
	Ma Centro	0.028	0.004	7.7

Outro ponto observado foi a defasagem da onda. Nos ciclos de maré de sizígia selecionados, o nível máximo (PM) na laguna Mundaú ocorreu, em média, após 2.88 h da PM no mar. Relativo ao nível mínimo (BM), este ocorreu, em média, após 3.88 h. A duração média das enchentes foi de 5.25 h, enquanto para as vazantes, 7.13 h. Nos ciclos de maré de quadratura, a defasagem média para a PM foi de 2.75 h, enquanto para a BM, 3.75 h. Já a duração média das enchentes e vazantes, foram, respectivamente, 5.63 h e 7.13 h.

A Figura 42 retrata a propagação da maré em direção à laguna Manguaba. Observou-se, nos ciclos de maré de sizígia, que o amortecimento da onda de maré na embocadura, estação “Ma-1”, foi menor em comparação ao canal da laguna Mundaú, estação “Mu-1”. No entanto, a dissipação de energia ao longo do canal da laguna Manguaba foi significativamente maior em comparação ao canal da laguna Mundaú. Expressando em valores, a partir da atenuação total, do mar até o centro das lagoas, isto é, de 97%, para laguna Manguaba, e 81%, para laguna Mundaú, pode-se dizer que da estação “Ma-1” até a estação “Ma Centro”, a parcela da atenuação total correspondeu a $\approx 69\%$, enquanto que para a laguna Mundaú, da estação “Mu-1” até a estação “Mu Centro”, foi de apenas 35%. No caso da laguna Mundaú, isso significa dizer que dos 81%, cerca de 46% da altura de maré foi atenuada na embocadura, e o restante, 35%, da estação “Mu-1” até o centro desta laguna. A respeito da defasagem nos ciclos de maré de sizígia selecionados, a PM na laguna Manguaba ocorreu, em média, após 3.25 h da PM no mar, enquanto a BM, 4.38 h. A duração média das enchentes foi de 5.25 h, enquanto para as vazantes, 7.25 h. Nos ciclos de maré de quadratura, a defasagem média para a PM foi de 2.88 h, enquanto para a BM, 4.63 h. Já a duração média das enchentes e vazantes foram, respectivamente, 4.75 h e 7.88 h.

A Figura 43 e a Tabela 18 sintetizam as variações de nível d’água. A figura citada retrata as curvas de regressão local aplicadas às estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, nos respectivos períodos. A curva adotada é conhecida como LOESS (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*), sendo utilizada quando se deseja gerar uma regressão local ou regressão polinomial local, sendo também chamada de regressão móvel. Neste estudo, as curvas representam as variações de nível médio por ciclo de maré. A Tabela 18 expõe, para algumas estações selecionadas, os níveis médios obtidos em cada período. Nota-se ainda a inclusão dos valores de profundidade média e volume médio das lagoas, calculados em função dos níveis médios obtidos nas estações “Mu Centro” e “Ma Centro”.

Como pode-se perceber na Figura 43, as variações do nível médio das lagoas estiveram ligadas à modulação gerada pelos ciclos de maré, que proporcionaram, durante os ciclos de maré de sizígia e quadratura, os maiores e menores valores de nível médio, respectivamente. É relevante notar o maior atraso da laguna Manguaba em relação à laguna Mundaú, em resposta às variações do nível do mar. Isso se deve, entre outros fatores, a maior restrição à passagem de água no canal da laguna Manguaba, como será evidenciado nas análises das séries temporais de vazões resultantes, e também porque a laguna Manguaba possui uma maior área.

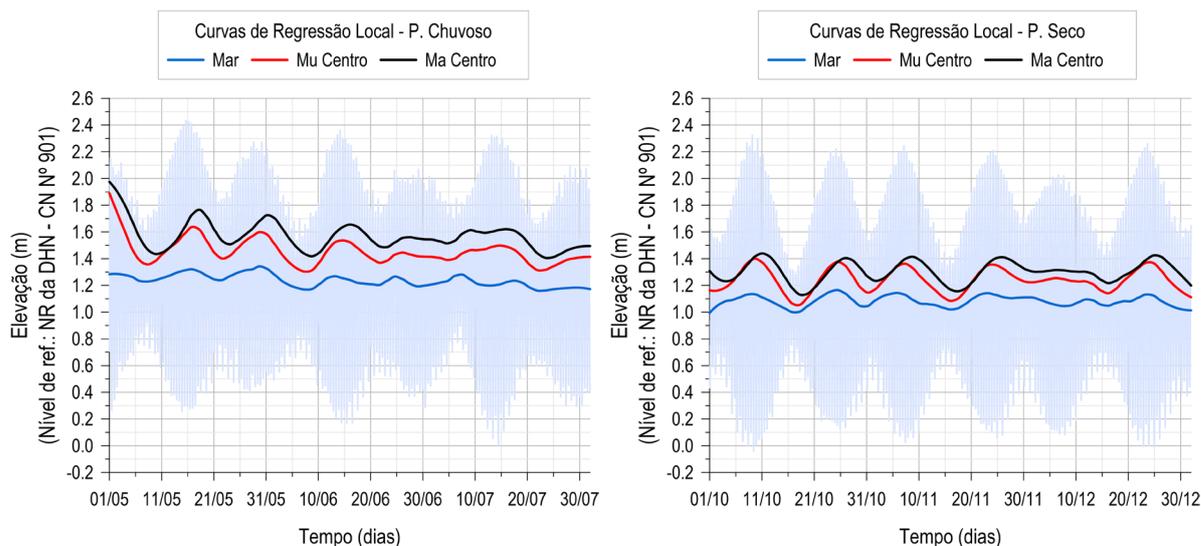


Figura 43 - Curvas de Regressão Local, para as estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, à esquerda, referente ao período chuvoso, e à direita, ao período seco. Nota-se ao fundo, as séries de maré resultante no mar, nos respectivos períodos.

Tabela 18 - Informações relacionados ao nível d’água nas lagunas e na região dos canais, nos respectivos períodos. Nota-se que os dados de profundidade média e volume médio se referem ao corpo lagunar, e foram calculados em função do nível médio.

Período	Informações	Estações						
		Mar	Mu-2	Mu Centro	Ma-2	Ma Centro	Ca-1	Ca-2
Chuvoso	Nível Mín. (m)	0.00	1.08	1.16	1.04	1.37	1.15	1.07
	Nível Máx. (m)	2.43	1.98	2.02	2.13	1.99	1.99	2.06
	Nível Méd. (m)	1.24	1.41	1.45	1.45	1.57	1.44	1.44
	Prof. Méd. Laguna (m)	-	-	1.51	-	2.26	-	-
	Vol. Méd. ($\times 10^6$ m ³)	-	-	38.79	-	96.18	-	-
Seco	Nível Mín. (m)	-0.04	0.89	0.94	0.85	1.10	0.94	0.88
	Nível Máx. (m)	2.32	1.80	1.65	1.98	1.48	1.66	1.91
	Nível Méd. (m)	1.08	1.22	1.24	1.23	1.30	1.24	1.24
	Prof. Méd. Laguna (m)	-	-	1.30	-	2.00	-	-
	Vol. Méd. ($\times 10^6$ m ³)	-	-	33.32	-	84.87	-	-

Como consequência do maior aporte fluvial durante a estação chuvosa, observou-se as maiores diferenças entre o nível médio das lagunas e do mar, especialmente, na laguna Manguaba. Conforme exposto na Tabela 18, foi neste período, logo no início da simulação, que ocorreram os níveis máximos nas estações “Mu Centro” e “Ma Centro”, em razão do pico de descarga dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. Relativo ao período seco, nota-se, nos ciclos de maré de quadratura, as menores diferenças entre o nível médio das lagunas e do mar, especialmente, na laguna Mundaú. A Tabela 19 expõe as diferenças entre níveis médios das lagunas e do mar. Por meio desta tabela, observa-se que o nível médio da laguna Manguaba manteve-se acima do nível médio da laguna Mundaú em cerca de 12 cm, no período chuvoso, e 6 cm, no período seco.

Tabela 19 - Diferenças entre os níveis médios das estações “Mu Centro”, “Ma Centro” e “Mar”, nos respectivos períodos.

Diferenças entre os Níveis Médios (cm)		
Estações	P. Chuvoso	P. Seco
Mu Centro - Mar	21	16
Ma Centro - Mar	33	22
Ma Centro - Mu Centro	12	6

A seguir, calculou-se o prisma médio de marés de sizígia e de quadratura, considerando ambos os períodos. De acordo com Miranda et al. (2017), o prisma de maré corresponde ao volume de água do mar que entra na laguna durante a maré enchente, sendo calculado pelo produto entre a altura da maré e a área superficial da laguna. A partir da área superficial média e das alturas médias de marés de sizígia e de quadratura, obteve-se, para a laguna Mundaú, o prisma de maré de sizígia médio de $10.16 \times 10^6 \text{ m}^3$, enquanto para a laguna Manguaba, $3.64 \times 10^6 \text{ m}^3$. O prisma de maré de quadratura médio para a laguna Mundaú foi de $6.19 \times 10^6 \text{ m}^3$, e para a laguna Manguaba, $1.74 \times 10^6 \text{ m}^3$. A área da laguna Manguaba corresponde a ≈ 1.7 vezes a área da laguna Mundaú, no entanto, o prisma de maré de sizígia médio na laguna Manguaba foi equivalente a $\approx 36\%$ do prisma na laguna Mundaú. Quanto ao prisma de maré de quadratura médio, o valor na laguna Manguaba correspondeu a $\approx 28\%$ do valor na laguna Mundaú. O prisma de maré médio na laguna Mundaú foi equivalente a $\approx 23\%$ de seu volume médio. Já na laguna Manguaba, correspondeu a $\approx 3\%$ de seu volume médio. Isso explica porque as águas demoram mais a se renovar na laguna Manguaba do que na laguna Mundaú, como será discutido na seção 6.2.

6.1.4 Caracterização da Maré

A Figura 44 e a Figura 45 apresentam os gráficos que relacionam as elevações do nível d'água e as velocidades na direção x (componente U) ou na direção y (componente V). À esquerda, estão as estações “Mu-1”, “Mu-2” e “Mu Centro”, referentes à laguna Mundaú. Já à direita, encontram-se as estações “Ma-1”, “Ma-3” e “Ma Centro”, referentes à laguna Manguaba. Nos gráficos, foram destacados os instantes de preamar (PM), meia maré vazante (MMV), baixa-mar (BM) e meia maré enchente (MME), relativos aos ciclos de maré de sizígia no intervalo de 13/07/2018 20h45 (1772.75 h) até 14/07/2018 21h45 (1797.75 h). Além disso, em cada gráfico foi exposto o nível médio dos respectivos ciclos selecionados. É relevante mencionar que o sentido das correntes depende da orientação do fluxo em relação ao eixo de coordenadas (x, y). Assim, nas estações “Mu-1” e “Mu-2”, as enchentes possuem sinal positivo, ao passo que nas estações “Ma-1” e “Ma-3”, possuem sinal negativo. Nas estações “Mu Centro”

e “Ma Centro”, as enchentes possuem sinal positivo. Outro ponto importante se refere a distorção da curva de velocidade no gráfico da estação “Mu-1”. Essa distorção ocorreu porque o nível d’água alcançou o valor de 0.9 m, equivalente ao negativo da cota de fundo adotada. Com isso, o valor da coluna d’água foi igual a zero, como também a velocidade.

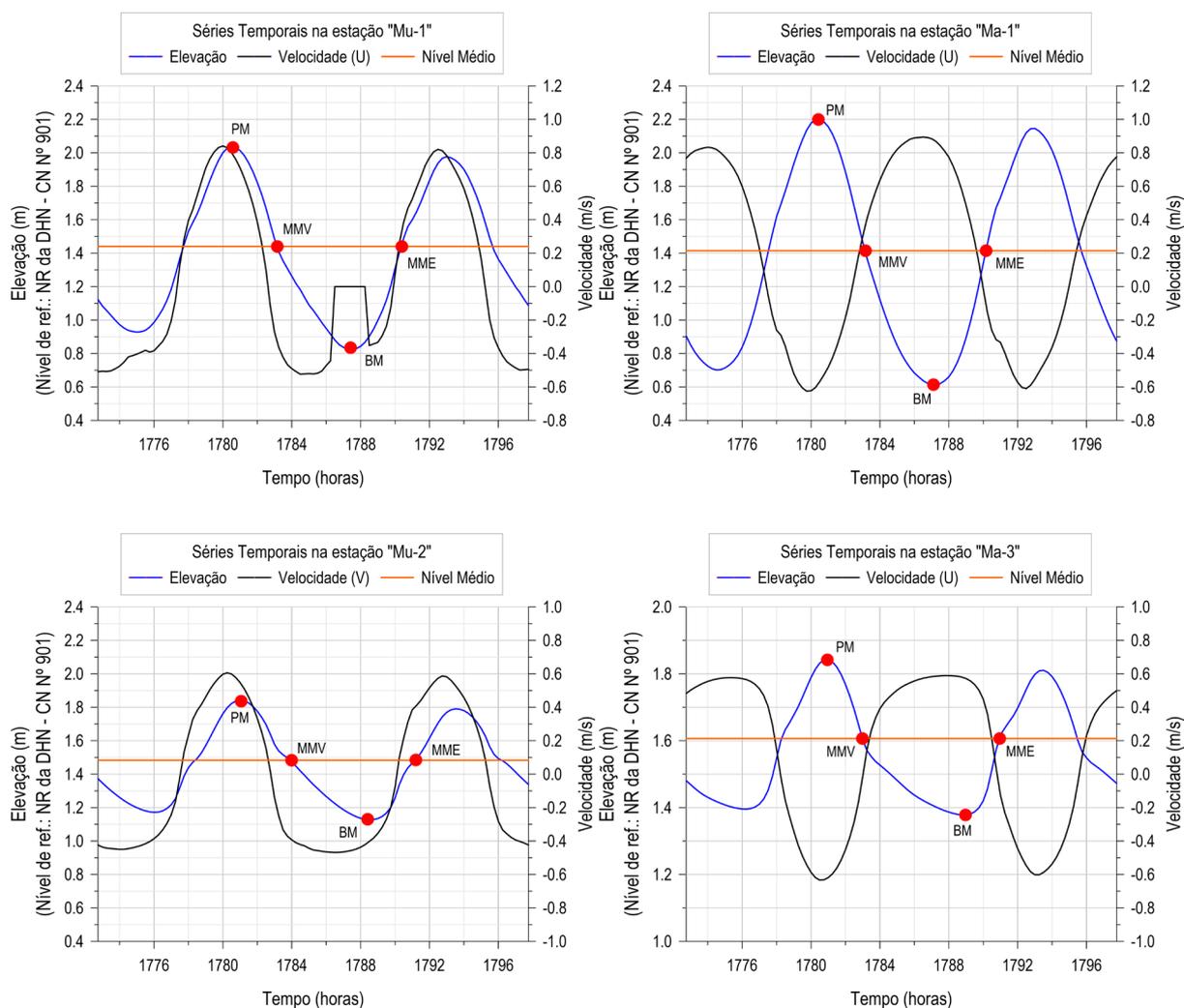


Figura 44 - Séries temporais de elevação do nível d’água e velocidades na direção X (U) ou Y (V), nas estações “Mu-1” e “Mu-2”, à esquerda, e nas estações “Ma-1” e “Ma-3”, à direita. Observa-se que nas estações “Mu-1” e “Mu-2”, as enchentes possuem sinal positivo, ao passo que o oposto ocorre nas estações “Ma-1” e “Ma-3”.

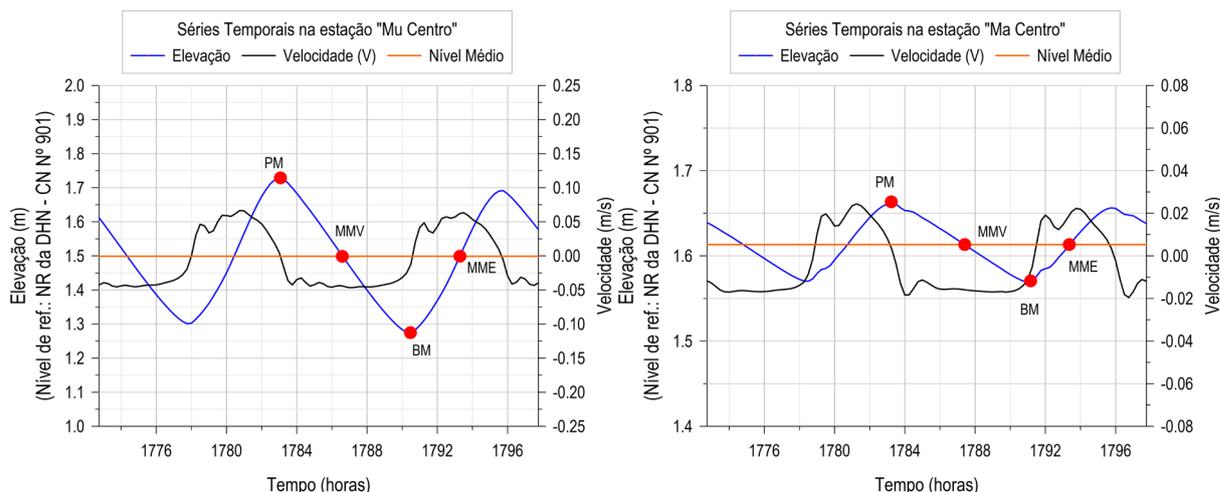


Figura 45 - Séries temporais de elevação do nível d'água e velocidades na direção X (U) ou Y (V), na estação “Mu Centro”, à esquerda, e na estação “Ma Centro”, à direita. Observa-se que em ambas as estações, as enchentes possuem sinal positivo.

Observou-se que nas estações “Mu-1” e “Ma-1”, localizadas na entrada dos canais de comunicação, as velocidades máximas nas enchentes ocorreram entre a MME e a PM, enquanto as máximas nas vazantes aconteceram entre a MMV e a BM. As velocidades nulas ocorreram tanto entre a PM e a MMV, quanto entre a BM e a MME. Tal comportamento se assemelha a onda de maré do tipo *progressiva*. Segundo Dyer (1997), na propagação de ondas de maré do tipo *progressiva*, as variações de nível e de velocidade estão em fase, o que significa dizer que as velocidades máximas nas enchentes e nas vazantes ocorreriam nos instantes de PM e BM, respectivamente. Em contrapartida, nos instantes de MMV e MME, as velocidades seriam nulas. Nas estações “Mu-1” e “Ma-1”, as características de propagação da onda estão relacionadas aos gradientes de pressão barotrópico nos canais de comunicação, gerados pelas diferenças de nível d'água entre o mar e as lagunas. Nos momentos de PM e BM, em relação ao mar, os canais experimentam o maior desnível da superfície livre da água, e, portanto, observam-se velocidades intensas. Já nos instantes de MME e MMV, os gradientes são pequenos, levando a correntes de baixa intensidade. Ao longo dos canais de comunicação, estações “Mu-2” e “Ma-3”, a onda de maré apresentou comportamento semelhante ao que foi descrito.

Nas estações “Mu Centro” e “Ma Centro”, observou-se, no entanto, que o comportamento da onda de maré não se assemelhava ao conceito de ondas *progressivas*. Na verdade, se aproximava do conceito de ondas *estacionárias*, que normalmente são observadas em estuários que promovem maior reflexão da onda de maré do que perda de energia por atrito (DYER, 1997). Este tipo de onda se forma quando o tempo requerido na reflexão da onda é equivalente ao período da maré, ocorrendo uma interferência entre a onda refletida e a próxima onda de maré incidente, desenvolvendo-se, portanto, uma onda dita *estacionária*. Como pode ser observado

na estação “Mu Centro”, as velocidades máximas nas enchentes e vazantes ocorreram próximo dos instantes de MME e MMV, respectivamente. Nos instantes de PM e BM, no entanto, as velocidades foram próximas de zero, indicando, portanto, a transição do final da enchente para o início da vazante e vice-versa.

6.1.5 Padrões de Circulação Hidrodinâmica

Os padrões de circulação hidrodinâmica foram caracterizados através de mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, em conjunto com a exposição de vetores representando o sentido das correntes. Para tanto, escolheram-se ciclos de maré de sizígia, no período chuvoso, e de quadratura, no período seco, destacando os instantes de PM, MMV, BM e MME, relativos às variações de nível d’água na estação “Mu-1”. Após a apresentação dos resultados espaciais, foram caracterizadas as variações temporais da velocidade das correntes, a partir dos resultados obtidos em estações localizadas em três setores, sendo eles: embocadura, canais de comunicação e lagunas. Observa-se que as velocidades se referem à média na coluna d’água, pois se trata de um modelo 2DH. Ao final, apresentou-se e discutiu-se o escoamento residual, em cada período, assim como as séries temporais de vazões e de volumes resultantes em seções selecionadas nos canais de comunicação.

➤ Análises da Circulação Hidrodinâmica

Para a exposição dos padrões de circulação hidrodinâmica, selecionou-se, a partir da Figura 40, um ciclo de maré de sizígia no período chuvoso, no intervalo de tempo de 17/05/2018 05h00 (389 h) até 17/05/2018 17h30 (401.5 h), e um ciclo de maré de quadratura no período seco, no intervalo de tempo de 16/10/2018 09h00 (369 h) até 16/10/2018 21h30 (381.5 h). Sendo assim, apresentam-se, da Figura 46 até a Figura 76, os mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, com a inclusão de vetores representando o sentido das correntes. Observa-se que os vetores possuem a mesma dimensão e, portanto, não indicam a intensidade das correntes. Além disso, a densidade de vetores apresentada é muito menor do que a quantidade de pontos de cálculo.

Para auxiliar na compreensão dos resultados, cita-se que no intervalo de tempo selecionado para o período chuvoso, o aporte fluvial médio do rio Mundaú foi de 82.0 m³/s, enquanto do rio Paraíba do Meio, 46.8 m³/s. O vento foi proveniente de Sudeste (SE), com velocidade média de 3.5 m/s, considerando todas as estações de vento. Já para o período seco, os valores das vazões foram 5.82 m³/s e 3.16 m³/s, respectivamente. Quanto ao vento, este originou-se de Este-Nordeste (ENE), com velocidade média de 4.9 m/s, considerando todas as estações de vento.

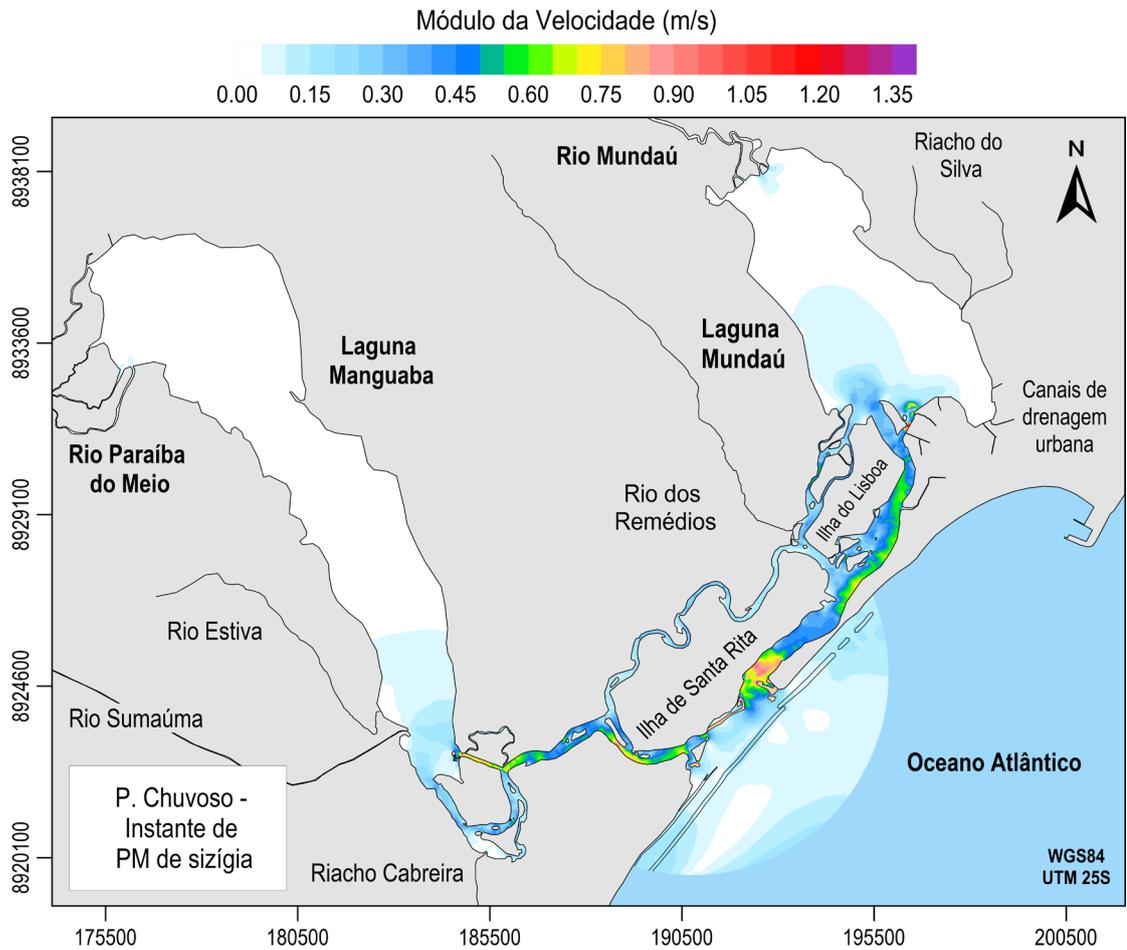


Figura 46 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes no instante 17/05/2018 05h00 (389 h), em referência a uma PM de maré de sizígia no período chuvoso.

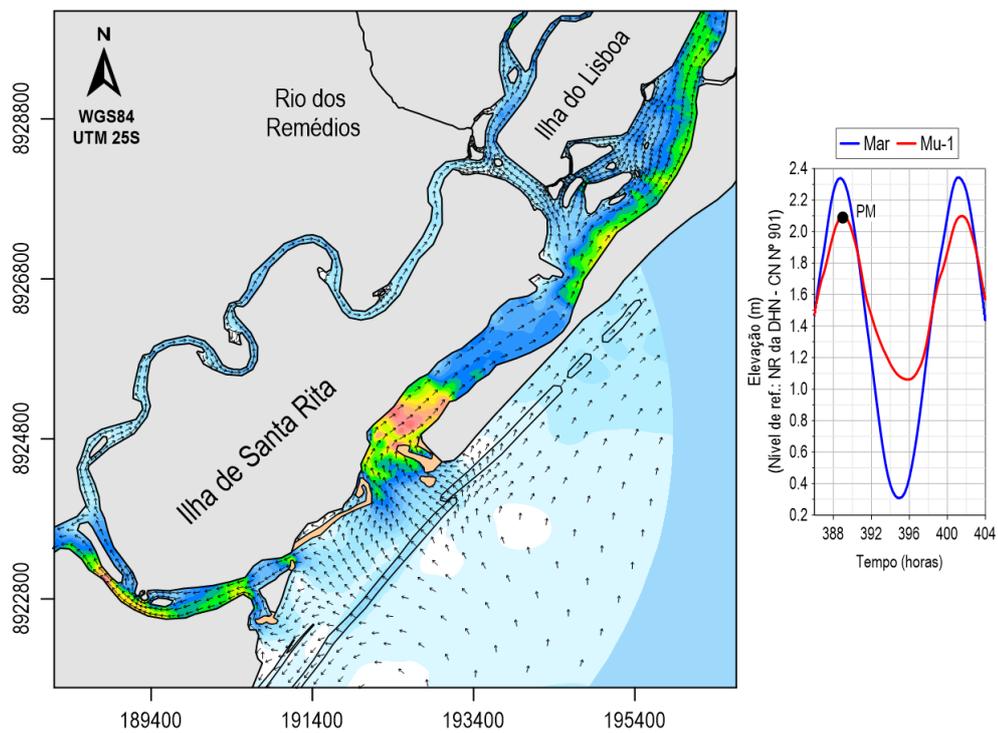


Figura 47 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de sizígia da Figura 46.

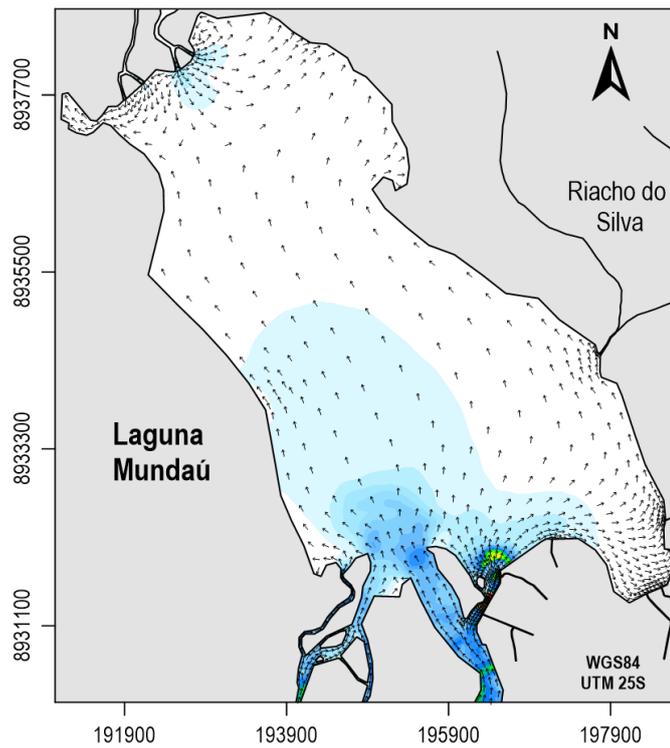


Figura 48 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de sizígia da Figura 44.

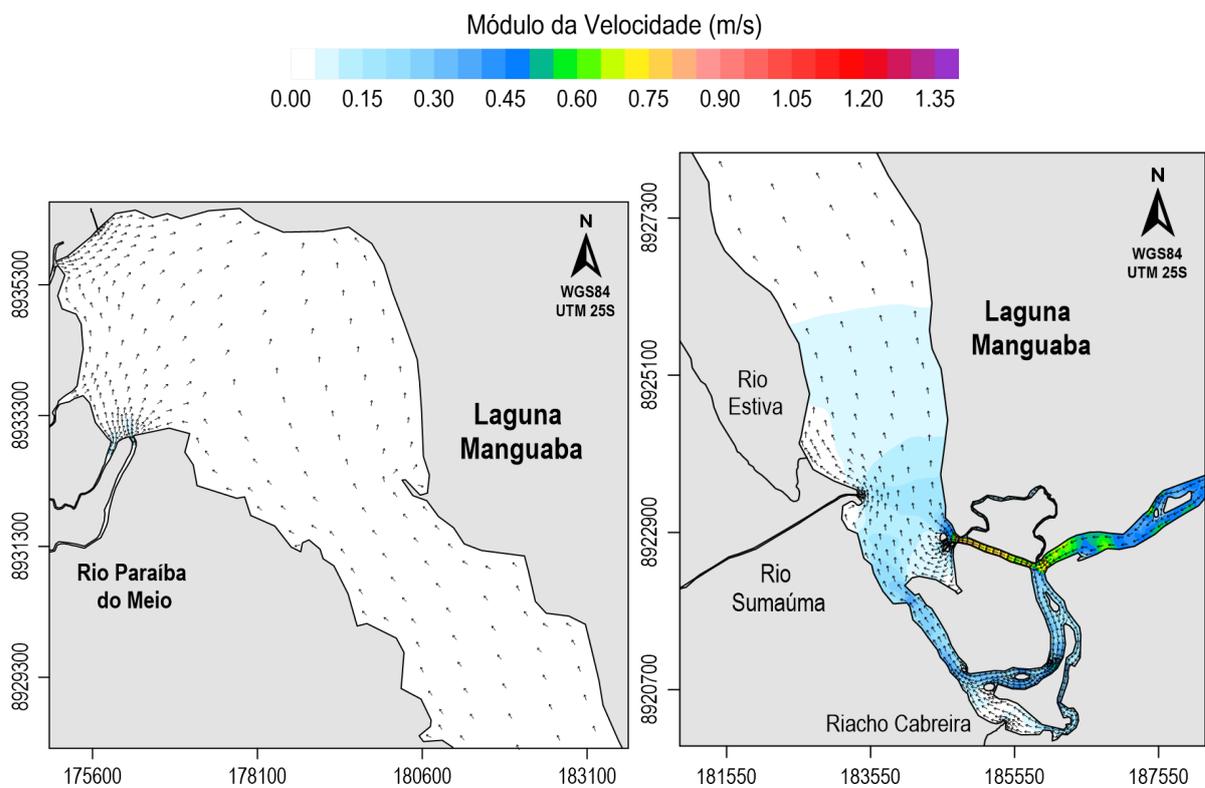


Figura 49 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de sizígia da Figura 44.

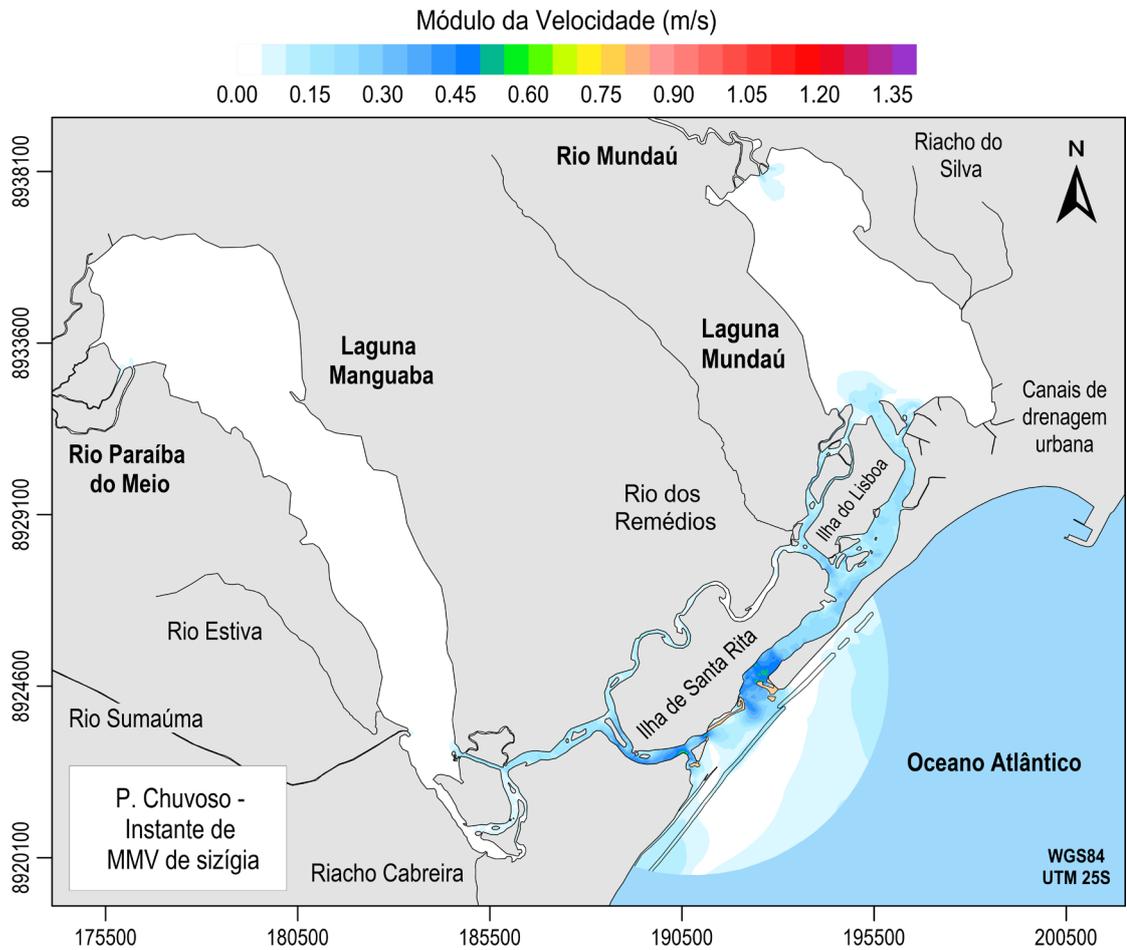


Figura 50 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 17/05/2018 07h30 (391.5 h), em referência a uma MMV de maré de sizígia no período chuvoso.

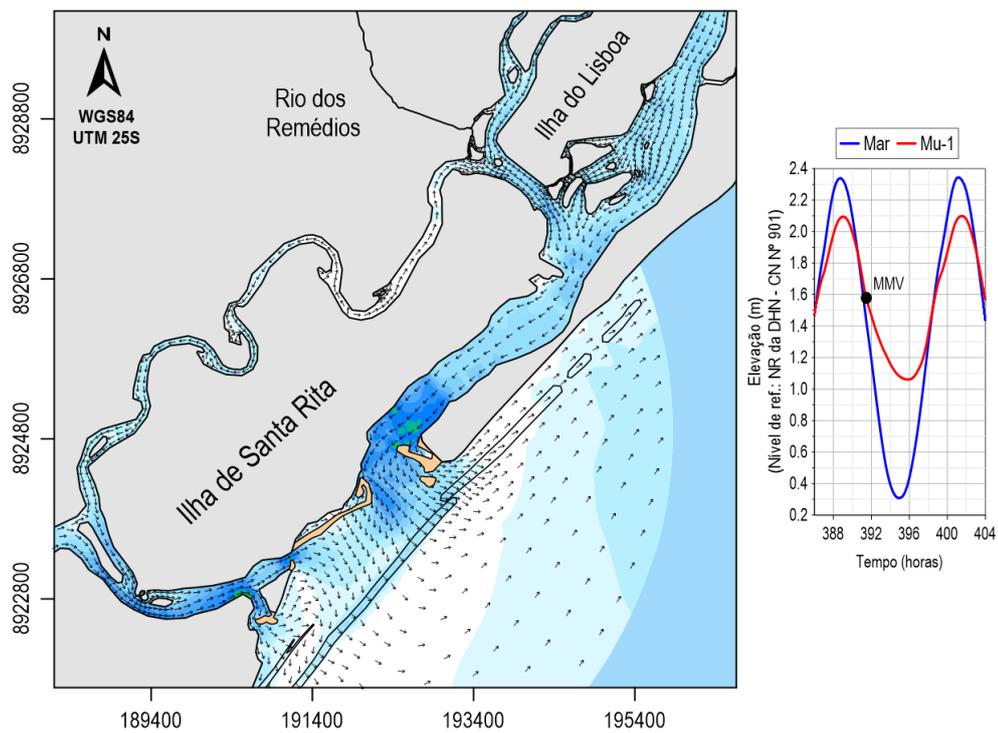


Figura 51 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de sizígia da Figura 50.

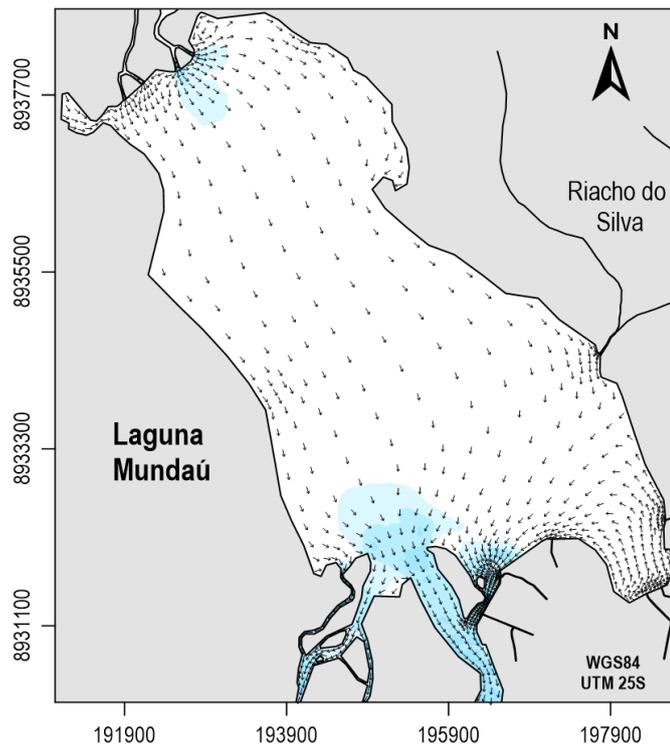


Figura 52 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de sizígia da Figura 50.

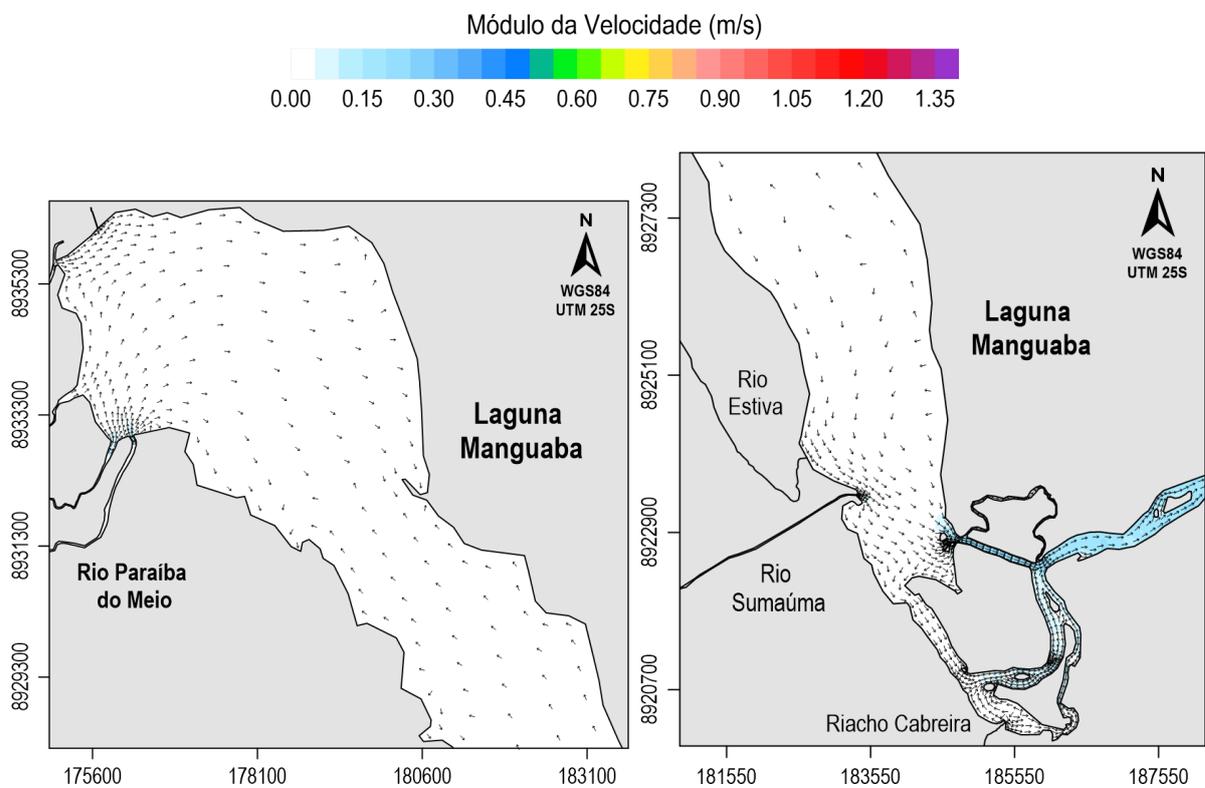


Figura 53 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de sizígia da Figura 50.

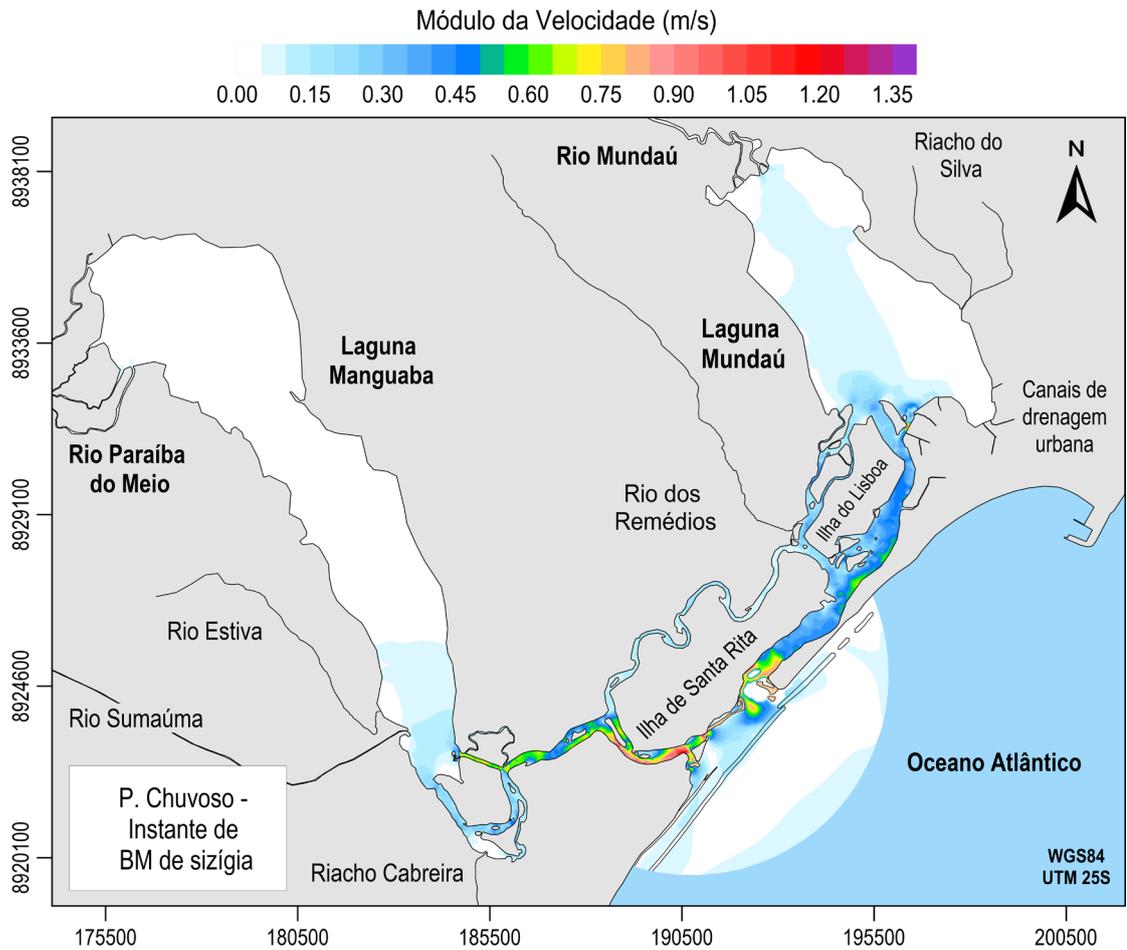


Figura 54 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 17/05/2018 11h30 (395.5 h), em referência a uma BM de maré de sizígia no período chuvoso.

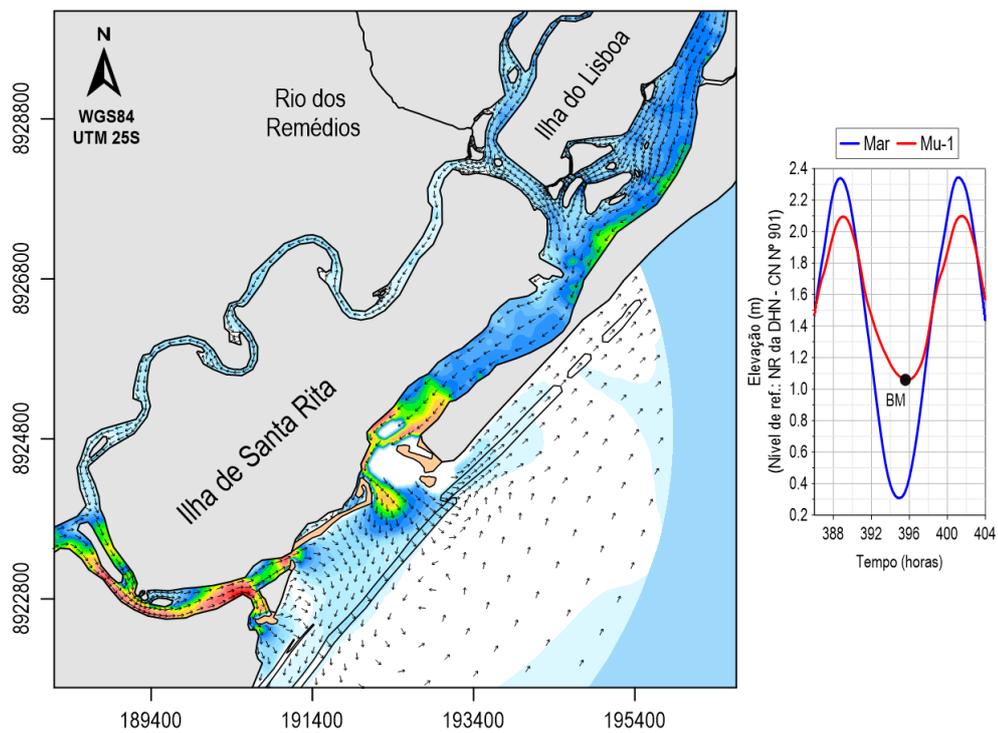


Figura 55 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de sizígia da Figura 54.

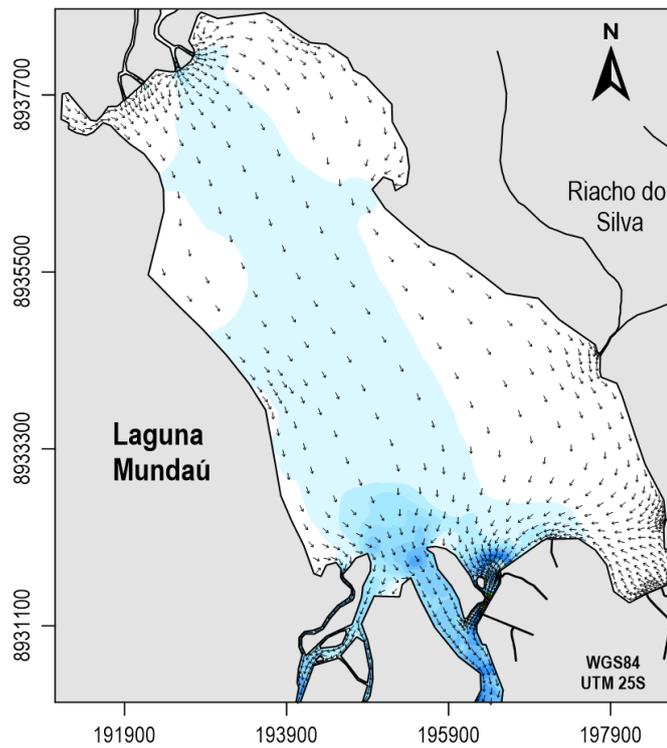


Figura 56 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de sizígia da Figura 54.

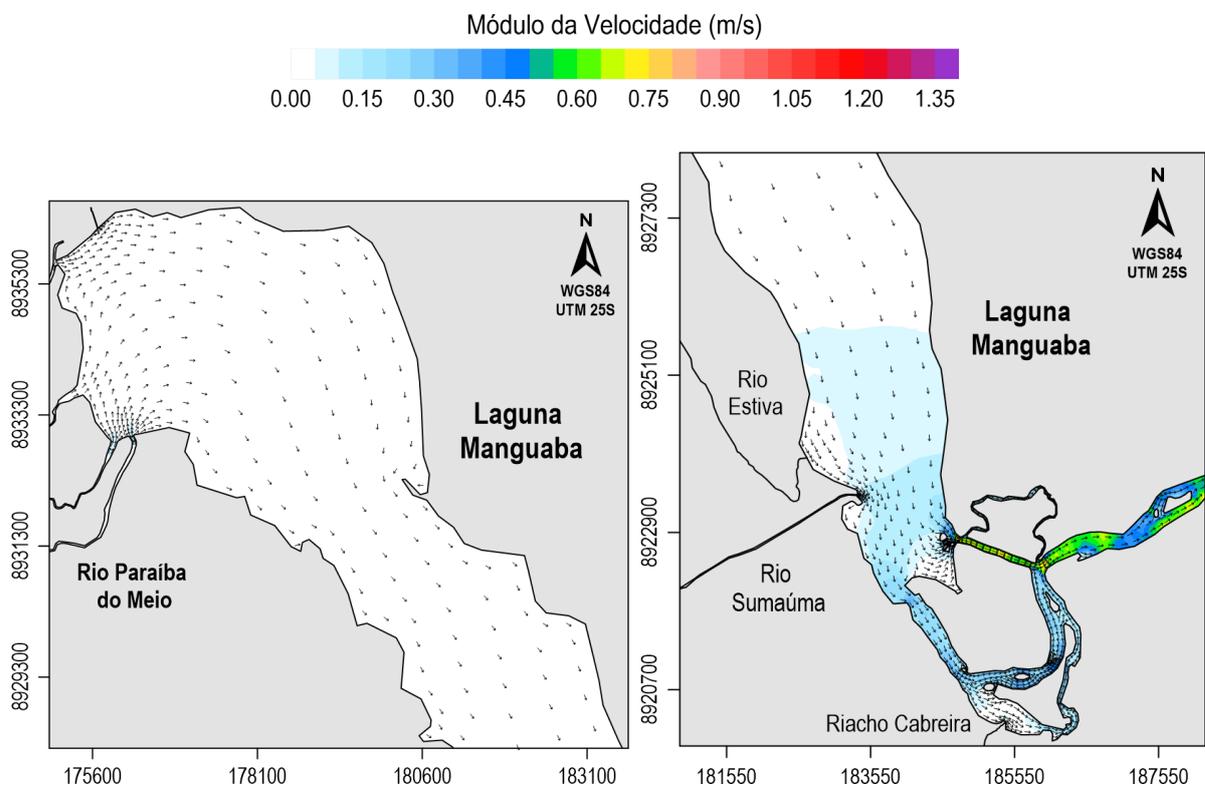


Figura 57 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de sizígia da Figura 54.

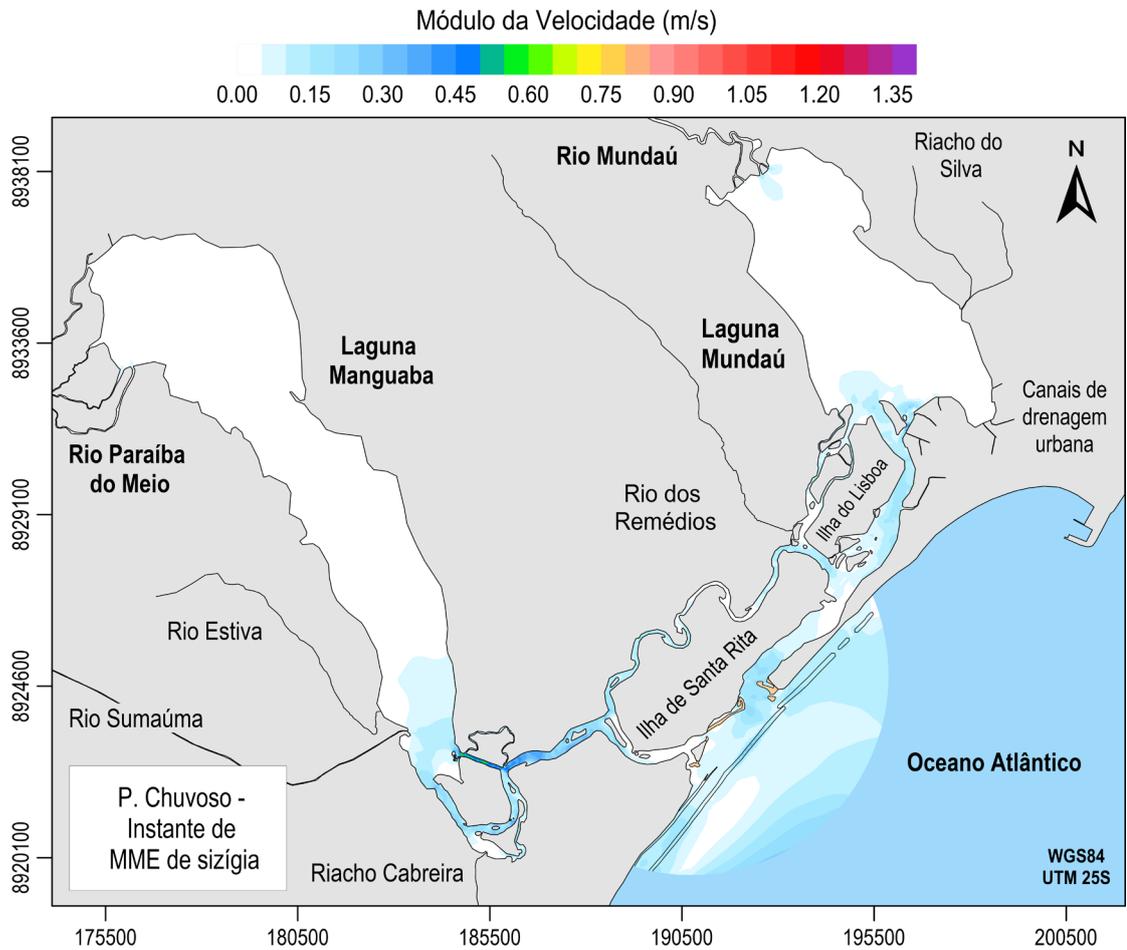


Figura 58 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 17/05/2018 14h30 (398.5 h), em referência a uma MME de maré de sizígia no período chuvoso.

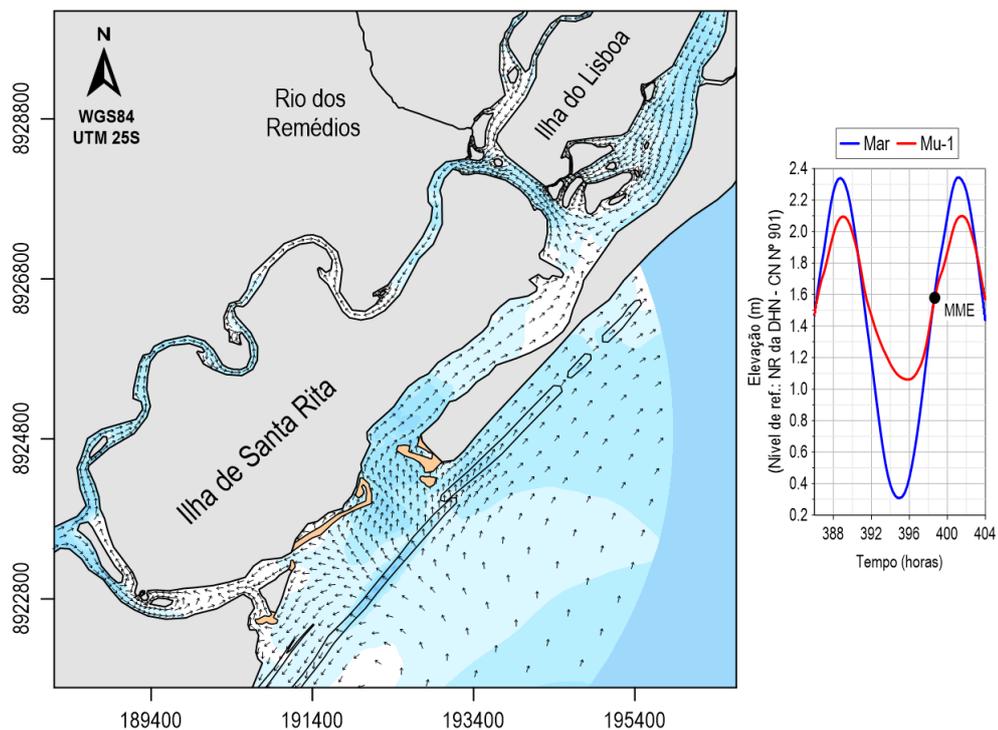


Figura 59 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de sizígia da Figura 58.

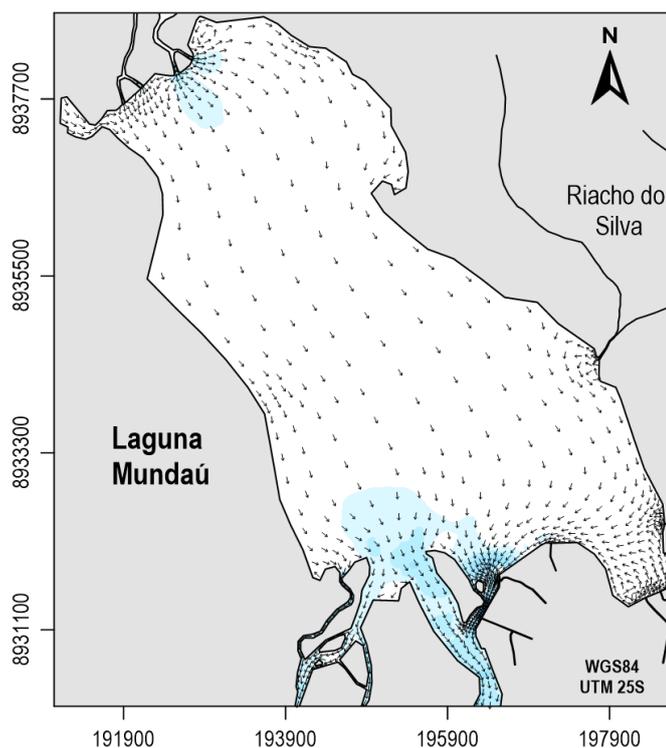


Figura 60 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de sizígia da Figura 58.

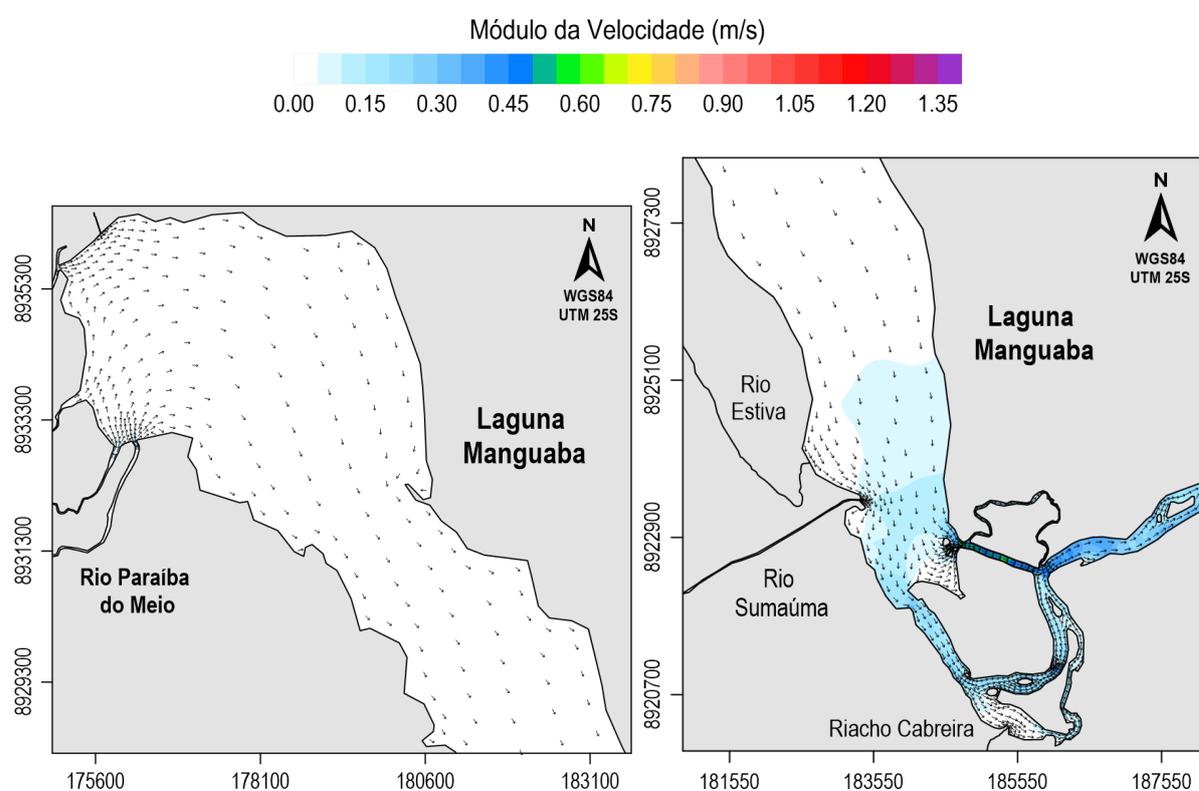


Figura 61 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de sizígia da Figura 49.

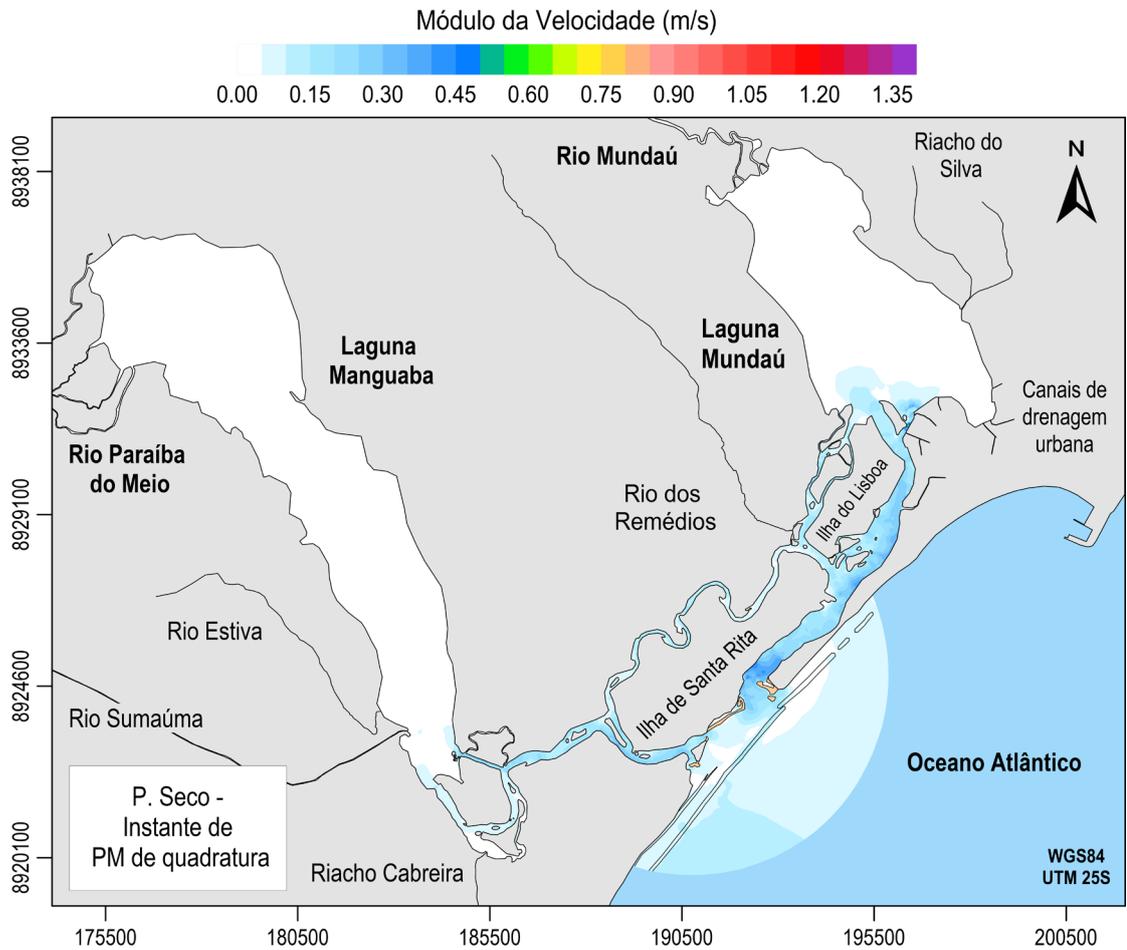


Figura 62 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 09h00 (369 h), em referência a uma PM de maré de quadratura no período seco.

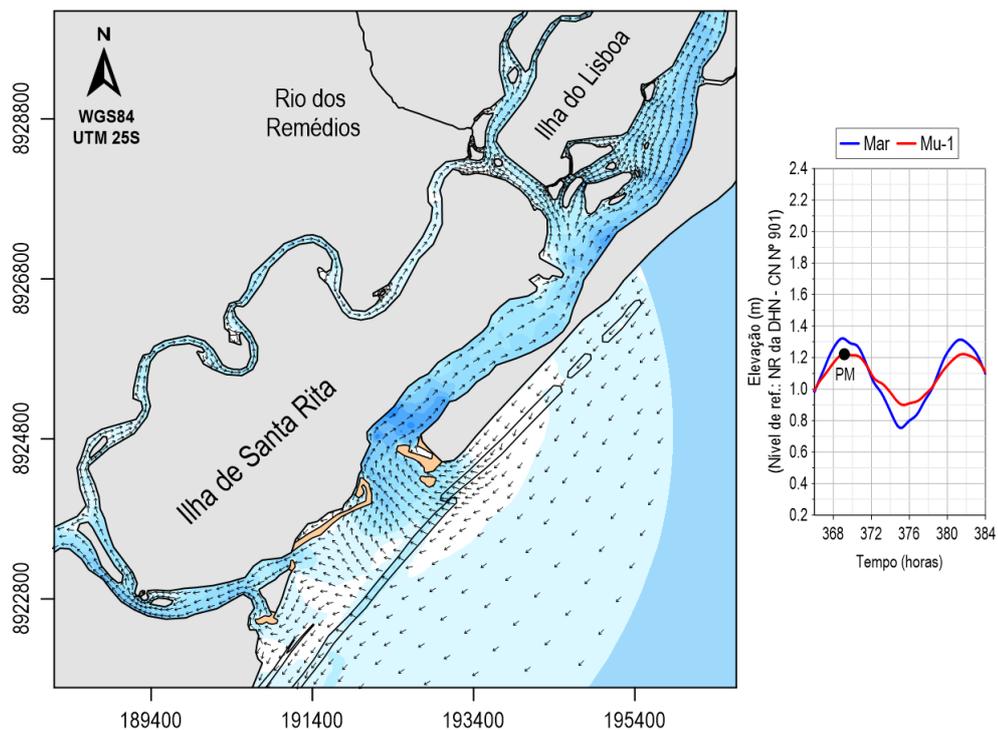


Figura 63 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de quadratura da Figura 62.

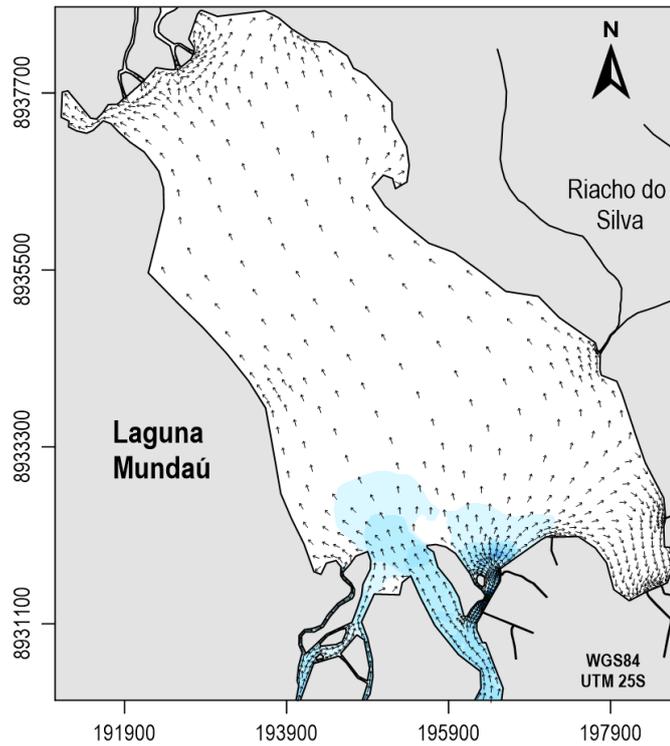


Figura 64 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de quadratura da Figura 62.

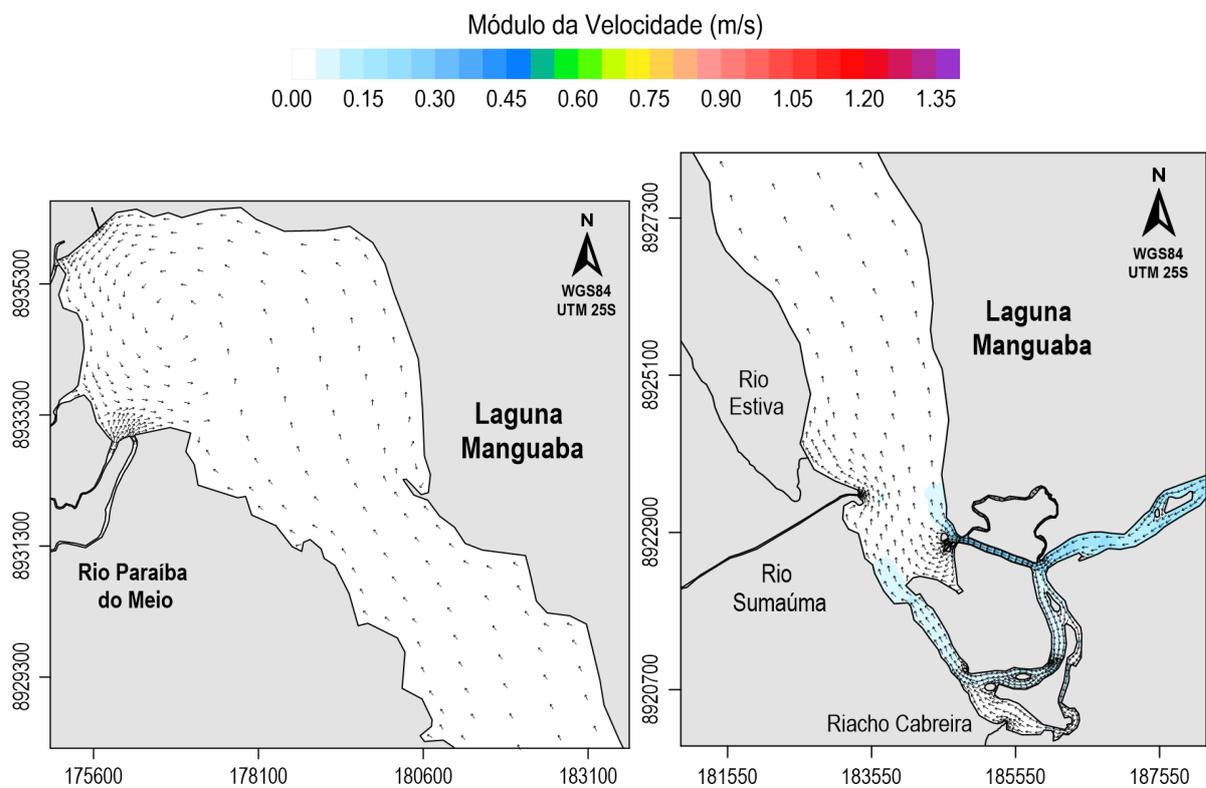


Figura 65 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de PM de maré de quadratura da Figura 62.

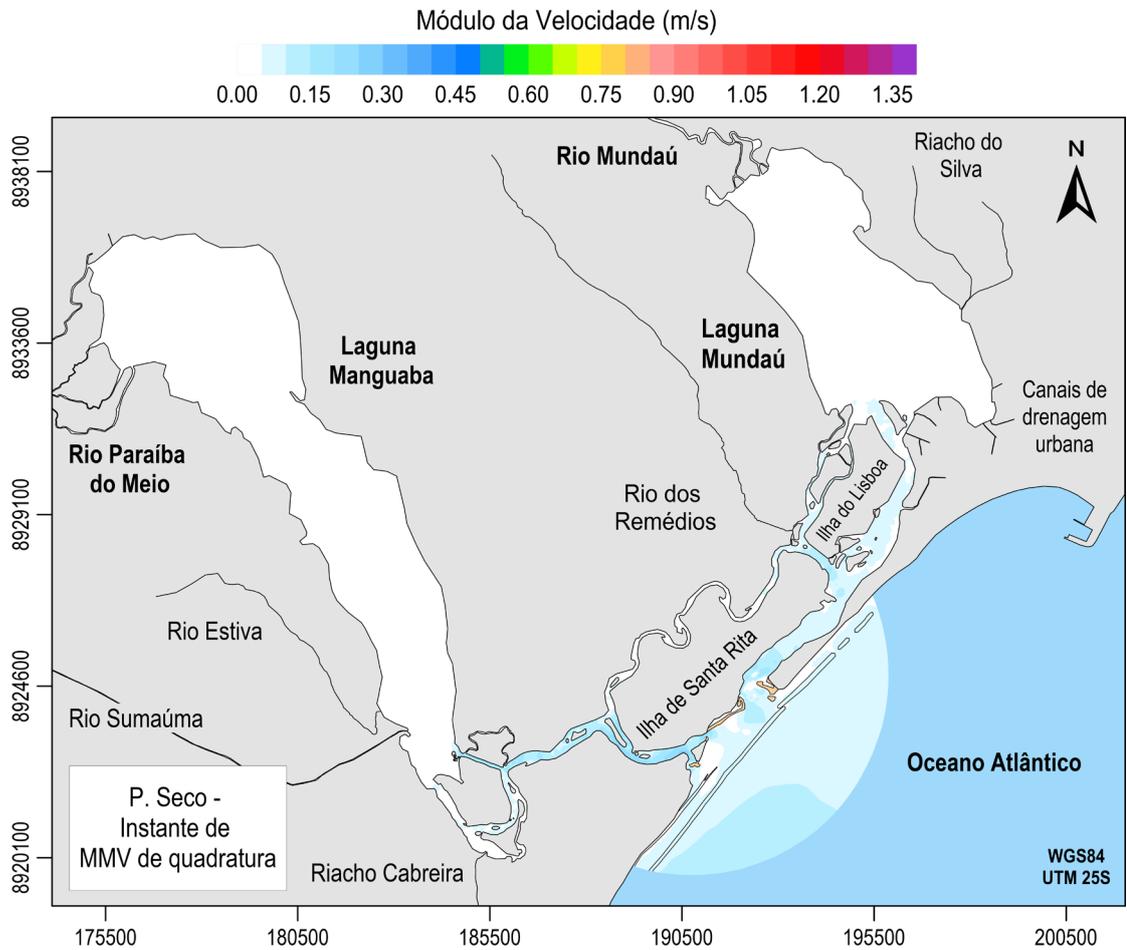


Figura 66 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 12h30 (372.5 h), em referência a uma MMV de maré de quadratura no período seco.

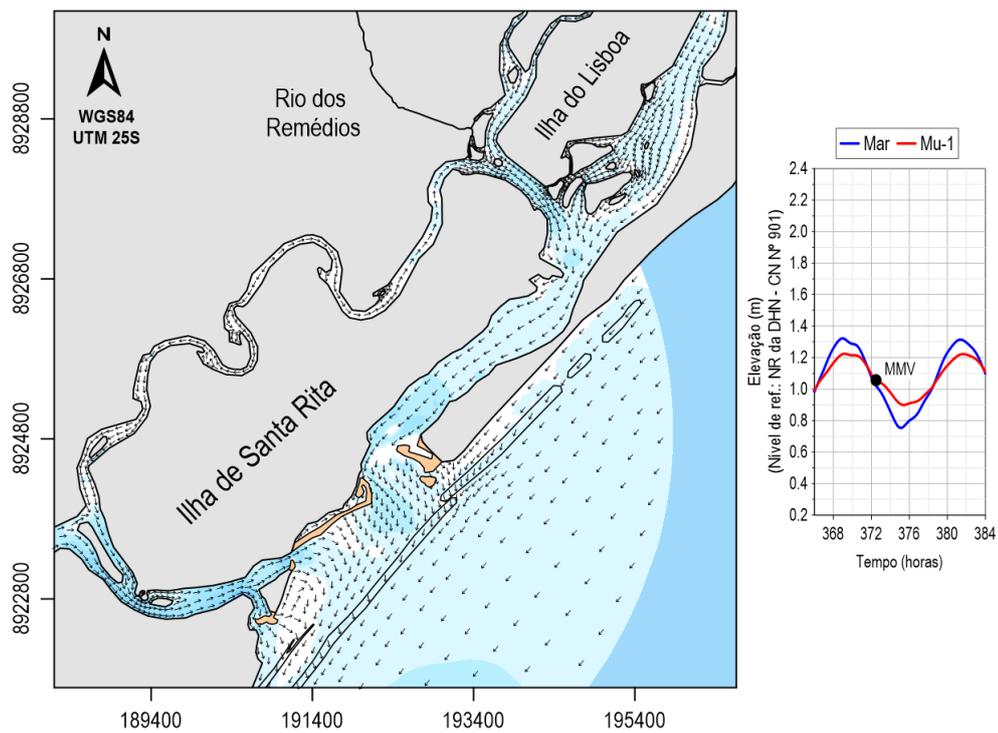


Figura 67 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de quadratura da Figura 66.

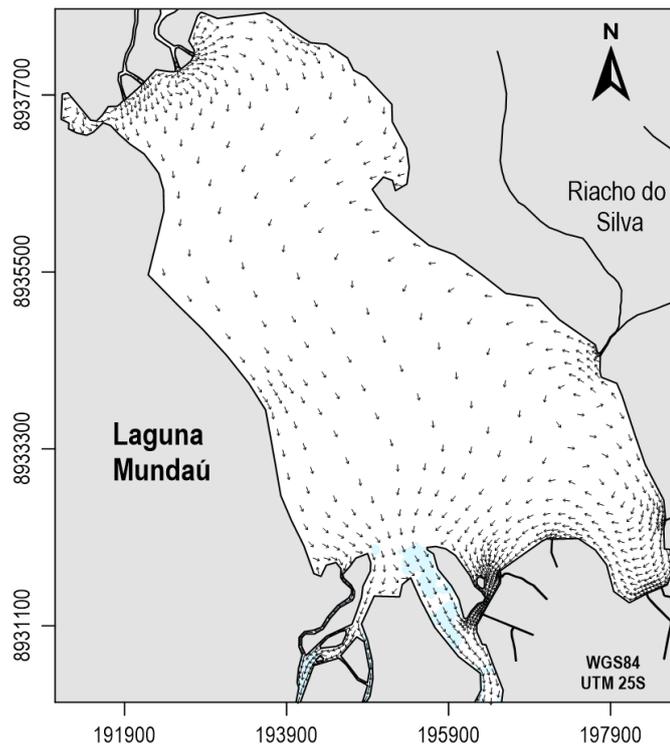


Figura 68 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de quadratura da Figura 66.

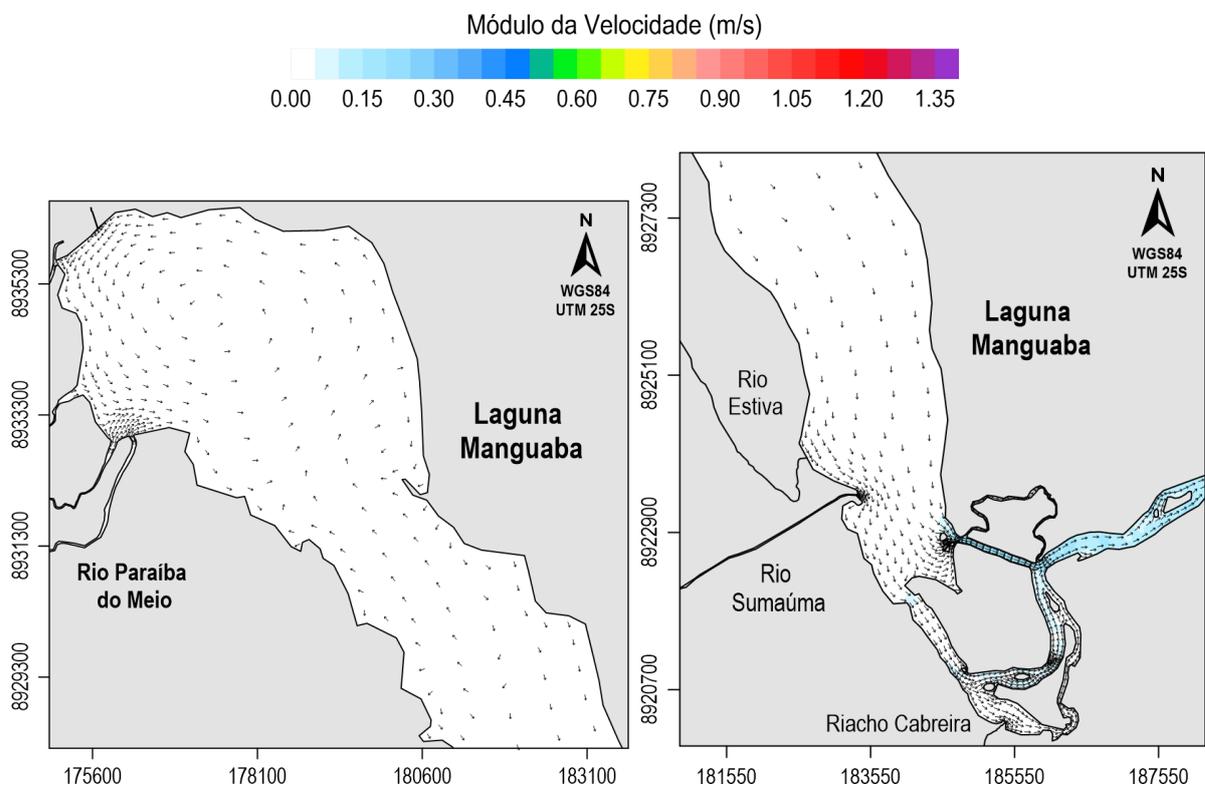


Figura 69 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MMV de maré de quadratura da Figura 66.

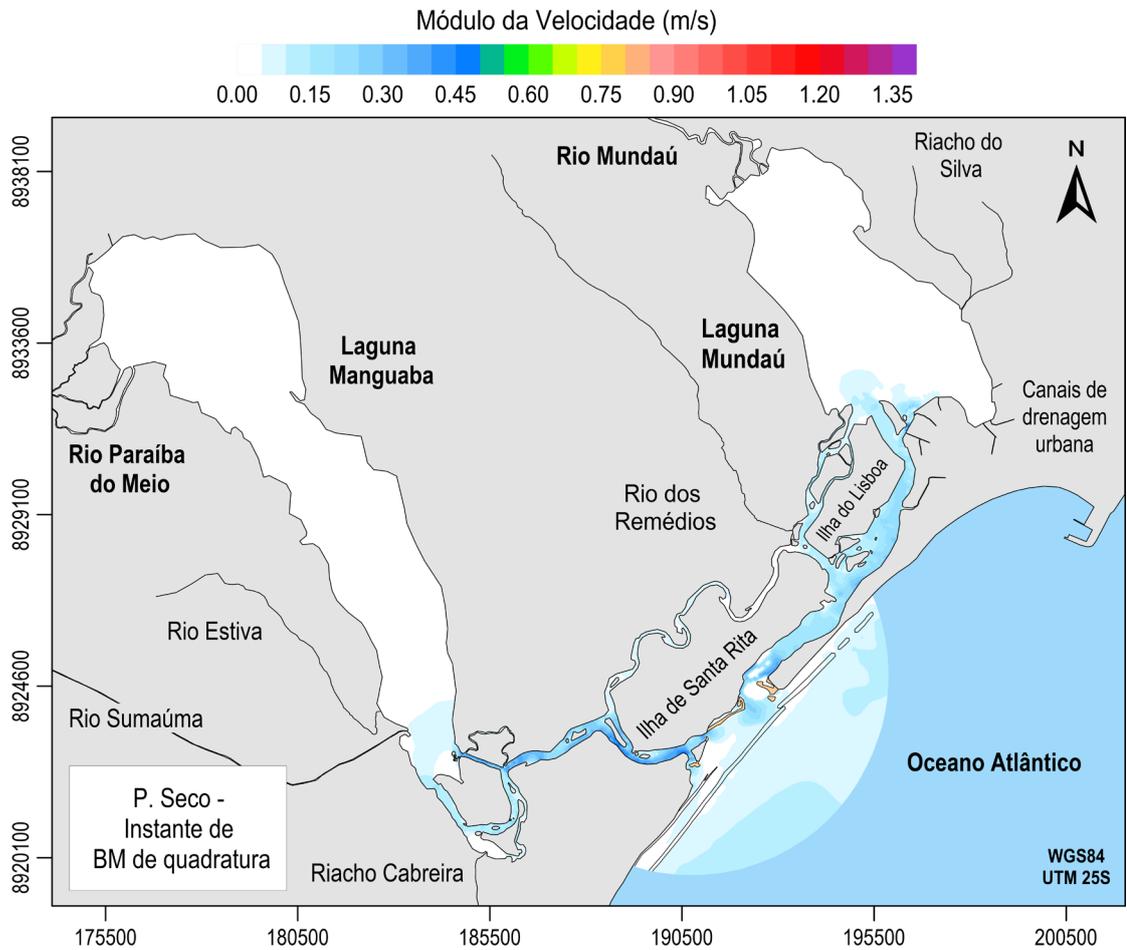


Figura 70 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 15h30 (375.5 h), em referência a uma BM de maré de quadratura no período seco.

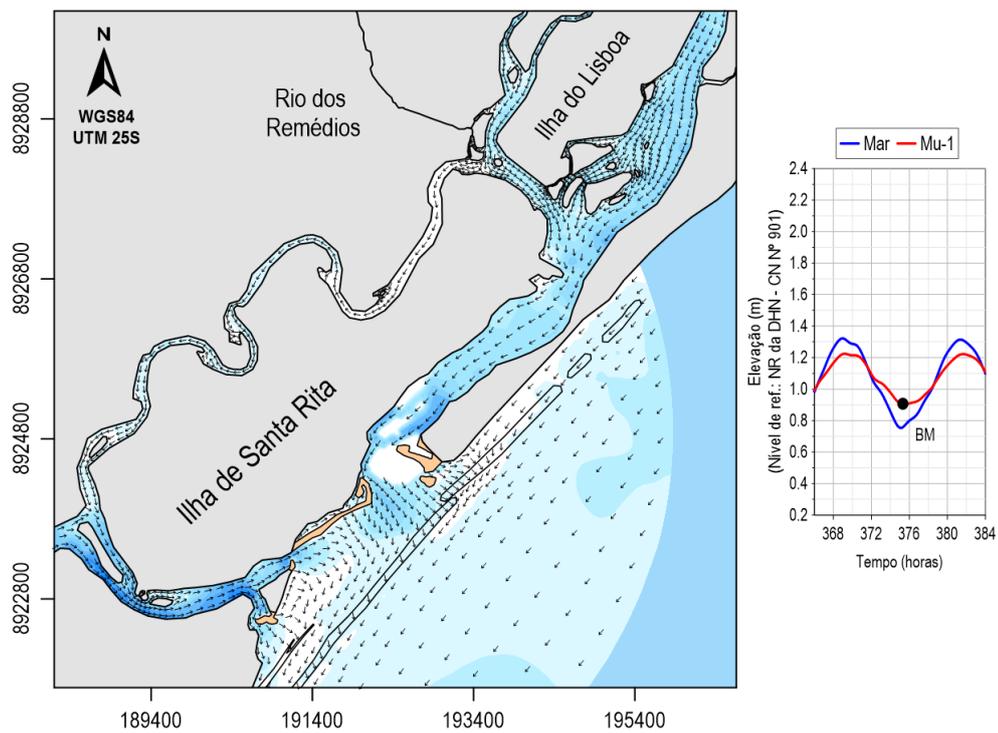


Figura 71 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de quadratura da Figura 70.

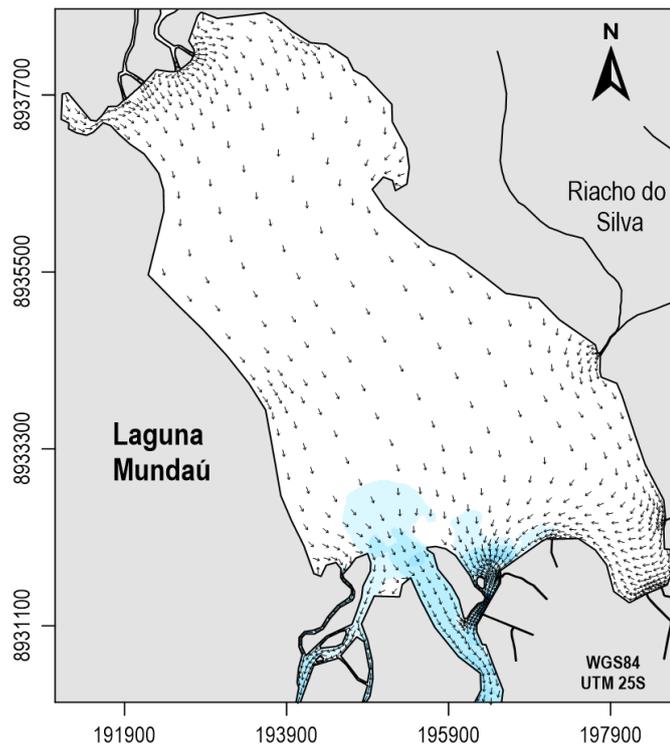


Figura 72 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de quadratura da Figura 70.

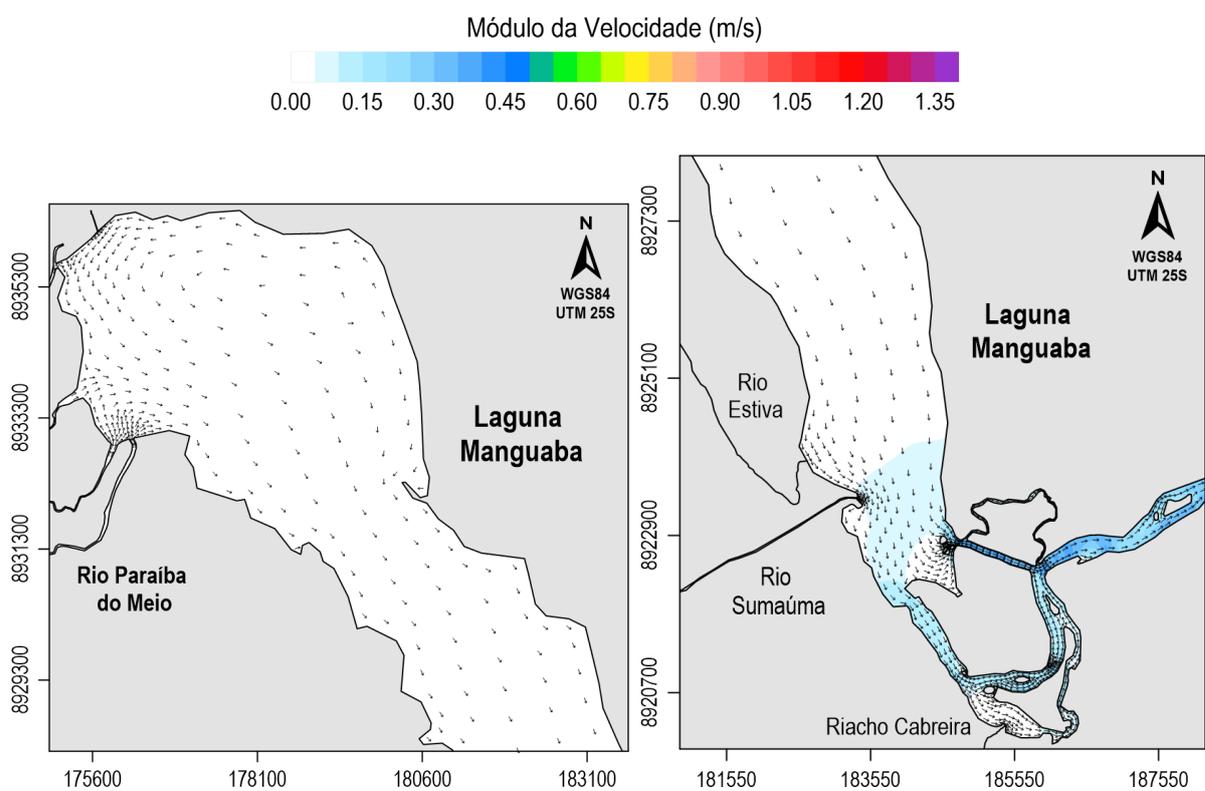


Figura 73 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de BM de maré de quadratura da Figura 70.

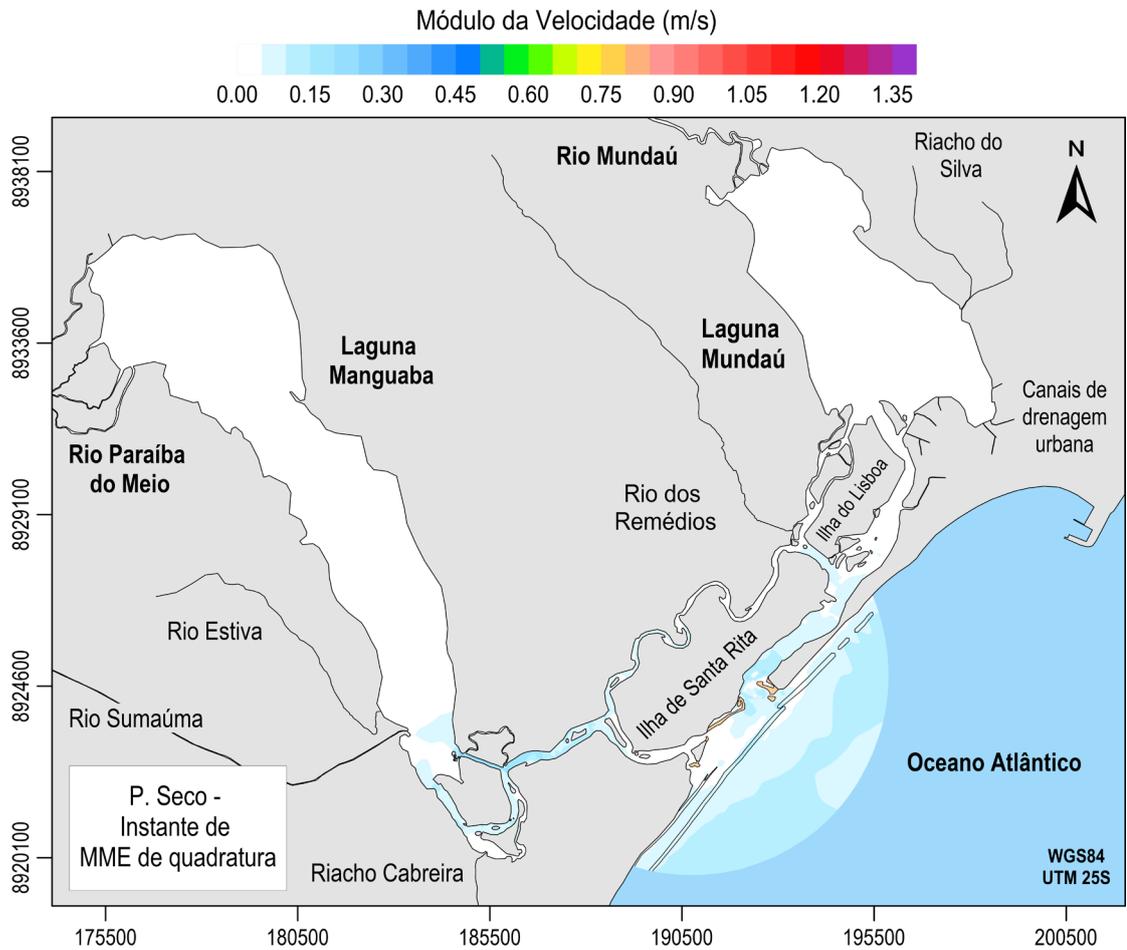


Figura 74 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes, no instante 16/10/2018 19h00 (379 h), em referência a uma MME de maré de quadratura no período seco.

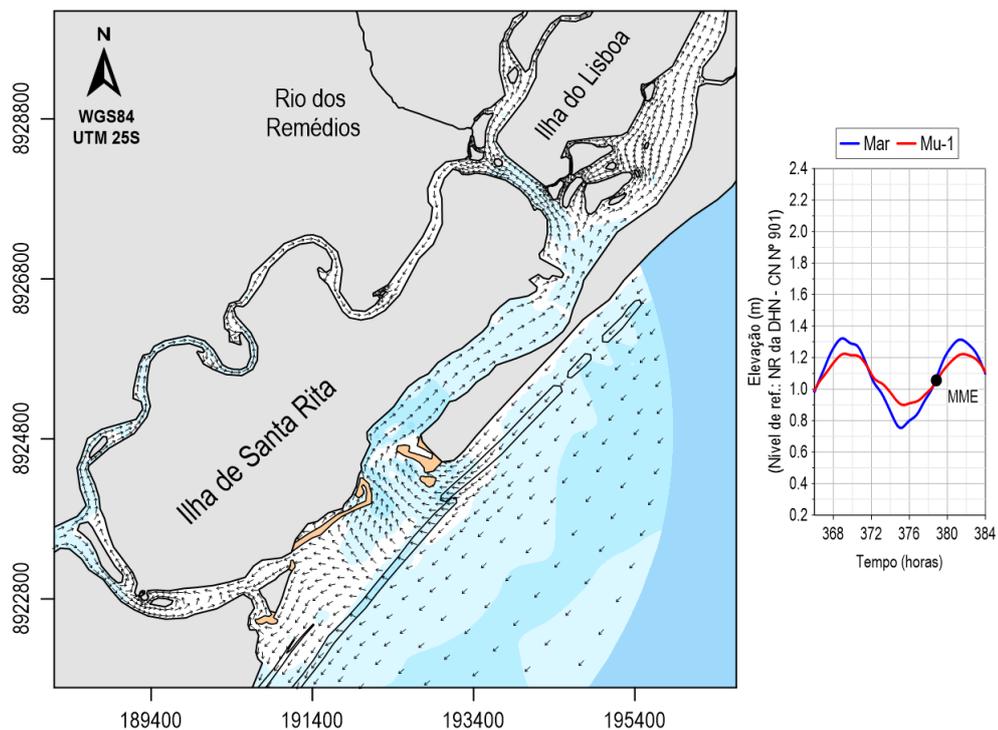


Figura 75 - Mapa de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na embocadura, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de quadratura da Figura 74.

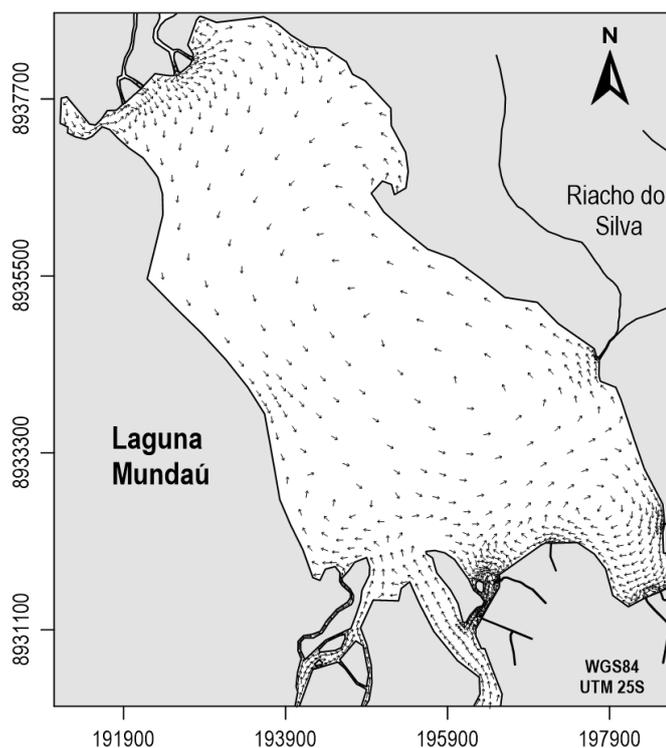


Figura 76 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Mundaú, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de quadratura da Figura 74.

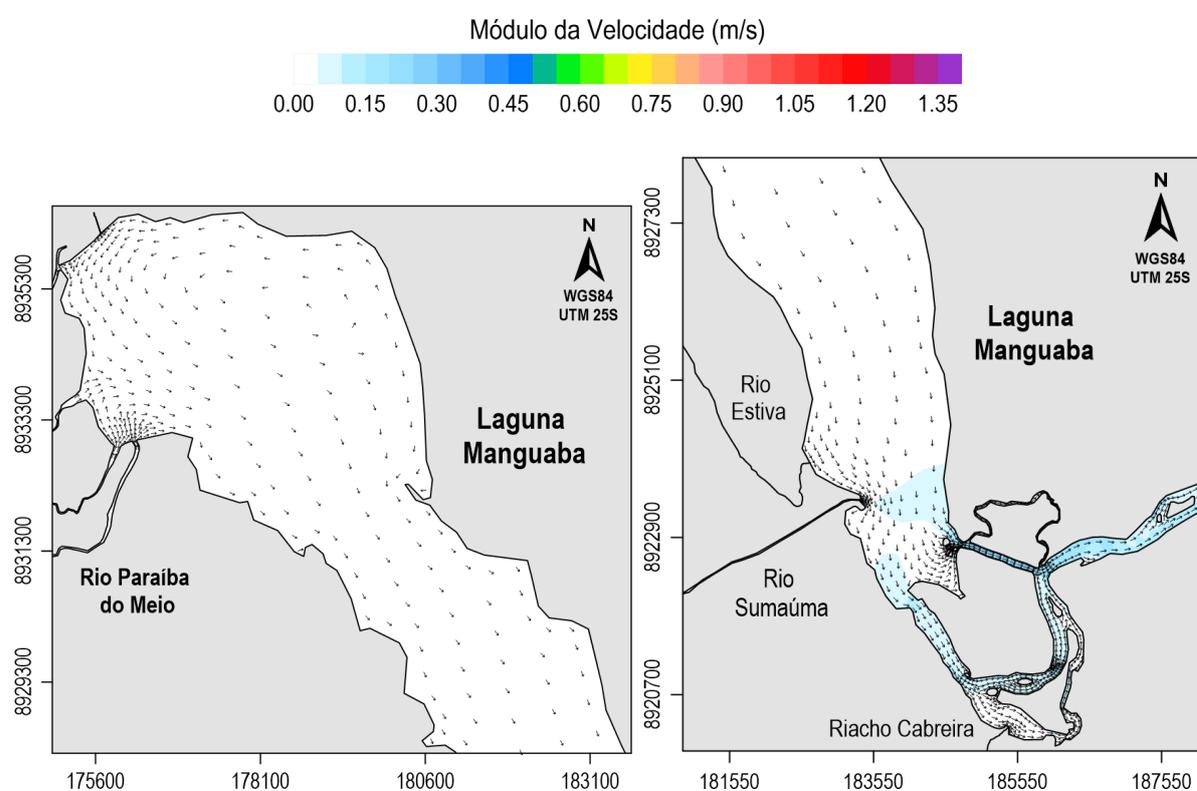


Figura 77 - Mapas de isolinhas de módulo da velocidade das correntes na laguna Manguaba, com a inclusão de vetores das correntes, referido ao mesmo instante de MME de maré de quadratura da Figura 74.

De modo geral, a circulação hidrodinâmica na laguna Mundaú é regida principalmente pelas marés, sendo fortemente influenciada em momentos de grandes descargas fluviais,

conforme será exposto nos resultados das séries temporais de módulo da velocidade das correntes, e das séries temporais de vazões e de volumes resultantes de enchente e vazante. Os ventos também são relevantes, principalmente, durante o período seco, contribuindo para a geração de vórtices, isto é, células circulatórias na laguna, como será apresentado na análise das correntes residuais. Nesta laguna, as maiores velocidades ocorreram na região próxima aos canais de comunicação, como pode ser visualizado na Figura 46. Por exemplo, no trecho mais estreito, ao sul, obteve-se o valor máximo de 1.4 m/s, em uma enchente de maré de sizígia. A estação “Mu Sul”, que se encontra a algumas centenas de metros desse local, registrou a velocidade máxima de 0.18 m/s, em ambos os períodos. Como pode ser verificado nos mapas, existe um significativo gradiente de velocidades nesta região, devido às variações expressivas na largura e na batimetria.

Na região norte, as velocidades foram mais intensas no período chuvoso, por conta das maiores descargas do rio Mundaú. Na estação “Mu Norte” obteve-se a velocidade máxima de 0.2 m/s, em referência ao período chuvoso, enquanto no período seco, 0.03 m/s. A região sudeste apresentou velocidades bem baixas, em ambos os períodos, alcançando, na estação “Mu Sudeste”, o valor máximo de 0.017 m/s no período chuvoso. Na estação “Mu Centro”, considerando ambos os períodos, a velocidade média foi de 0.04 m/s, e a máxima de 0.1 m/s, em virtude do pico de descarga do rio Mundaú. Mais detalhes podem ser visualizados na Figura 78, com a exposição das séries temporais de módulo da velocidade das correntes desta estação. É relevante mencionar que os resultados de módulo da velocidade das correntes possuem sinal, positivo e negativo, para indicar o sentido das correntes. Sendo assim, da Figura 78 até a Figura 83, as enchentes nas estações “Mu Centro”, “Ma Centro”, “Mu-1” e “Mu-2” possuem sinal positivo, ao passo que as vazantes, sinal negativo. O oposto ocorre nas estações “Ma-1” e “Ma-3”. Com base nos resultados da estação “Mu Centro”, é possível perceber que as velocidades nas vazantes do período chuvoso foram um pouco mais intensas em comparação ao período seco. Já em relação as enchentes, observou-se valores mais intensos ocorrendo no período seco. Em resumo, com exceção dos resultados iniciais do período chuvoso, pode-se dizer que as amplitudes das velocidades foram bem semelhantes ao se comparar os períodos simulados.

Na laguna Manguaba, as marés são consideravelmente reduzidas. Deste modo, as descargas fluviais e os ventos desempenham papel muito relevante na circulação hidrodinâmica. No período chuvoso, por exemplo, as descargas do rio Paraíba do Meio impulsionaram o fluxo em direção aos canais de comunicação, reduzindo ainda mais a influência das marés. Já no período seco, pode-se notar mais claramente a influência dos ventos na circulação hidrodinâmica, principalmente, ao norte da laguna. Da mesma forma como na laguna Mundaú, de modo geral, as

maiores velocidades ocorreram na região sul, próximo aos canais de comunicação, como pode ser observado na Figura 46 e na Figura 54. Na estação “Ma Sul”, o máximo foi de ≈ 0.2 m/s, em uma enchente de maré de sizígia no período seco. Em contrapartida, na região norte observou-se velocidades bem reduzidas, com exceção dos locais próximos à foz do rio Paraíba do Meio. Na estação “Ma Norte”, relativo ao período chuvoso, o valor máximo foi de 0.025 m/s, como consequência do pico de descarga do rio Paraíba do Meio. Já no período seco, a velocidade máxima foi 0.014 m/s. Na estação “Ma Centro”, cuja coluna de água média foi igual a 3.1 m, a velocidade média foi de 0.015 m/s, e a máxima, 0.036 m/s. Mais detalhes podem ser visualizados na Figura 79, com a exposição das séries temporais de módulo da velocidade das correntes desta estação. As principais diferenças entre os períodos simulados, mencionadas para a laguna Mundaú, também são válidas para a laguna Manguaba.

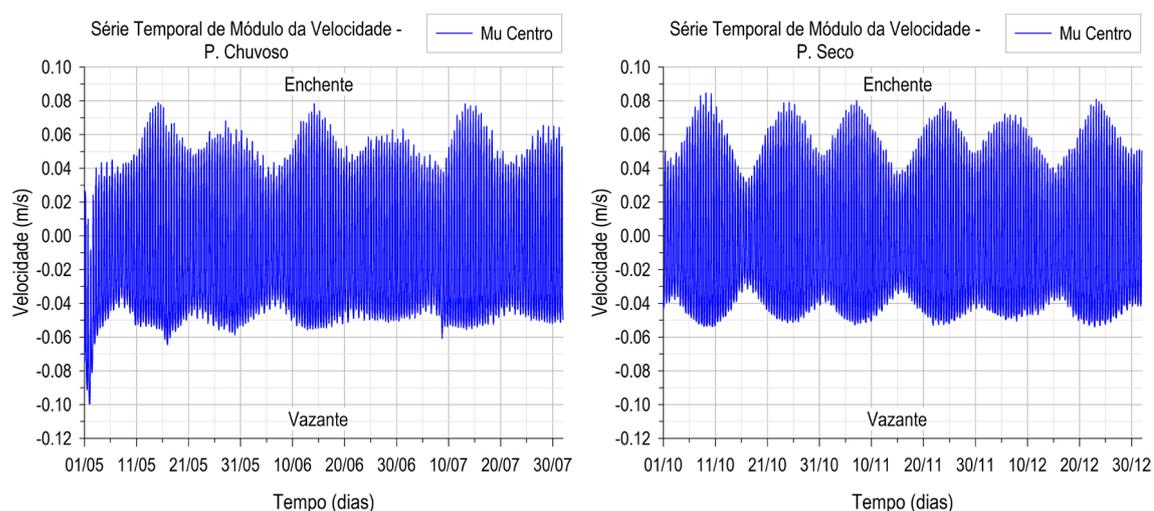


Figura 78 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Mu Centro”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.

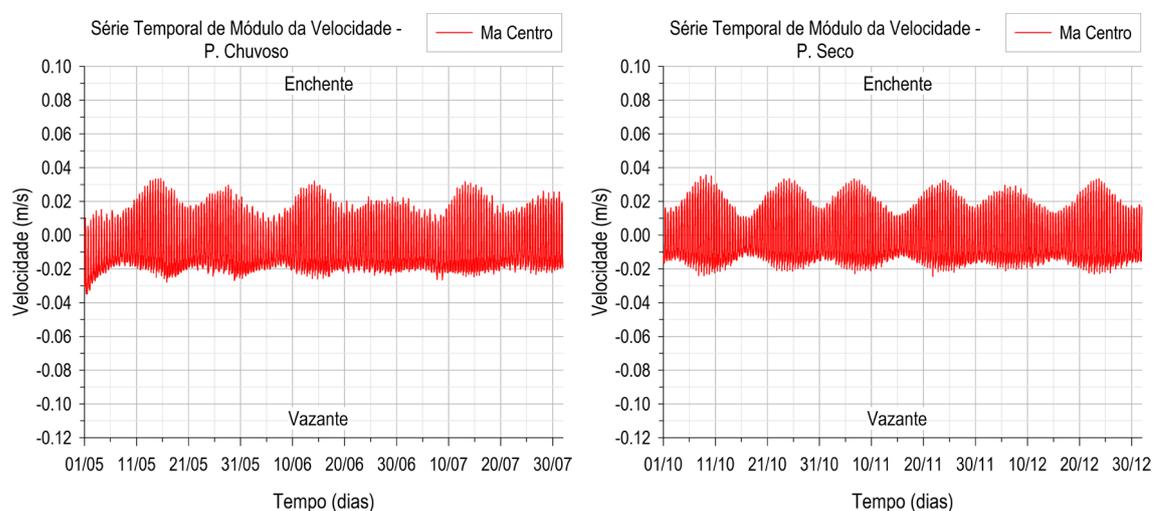


Figura 79 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Ma Centro”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.

Na região dos canais de comunicação, observou-se a ocorrência de velocidades intensas na embocadura do canal da laguna Mundaú, como também no canal da laguna Manguaba, entre a estação “Ma-1” e a “Ma-2”, bem como no trecho entre a laguna e a estação “Ma-3”. Como a força de atrito varia diretamente com o quadrado da velocidade da corrente, e inversamente com a profundidade, pode-se dizer que essas regiões são responsáveis por boa parte da dissipação da energia da maré, assim como as regiões bem rasas, como, por exemplo, alguns trechos dos canais ao sul da laguna Manguaba. Com base nisso, apresentam-se, da Figura 80 até a Figura 83, as séries temporais de módulo da velocidade das correntes para as estações “Mu-1” e “Ma-1”, na região da embocadura do canal da laguna Mundaú, e do canal da laguna Manguaba, respectivamente, como também para as estações “Mu-2” e “Ma-3”, no interior dos respectivos canais de comunicação.

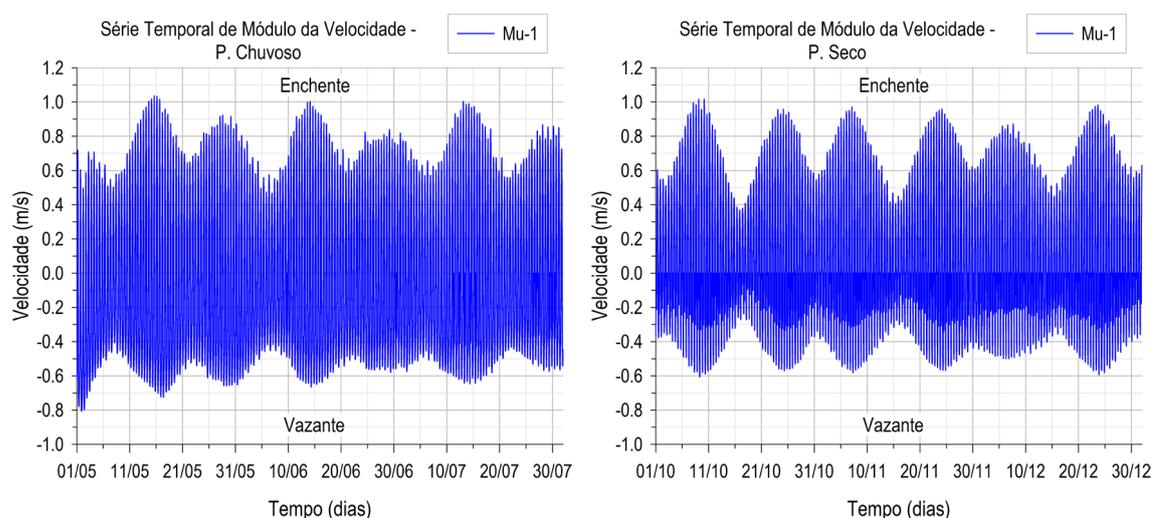


Figura 80 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Mu-1”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.

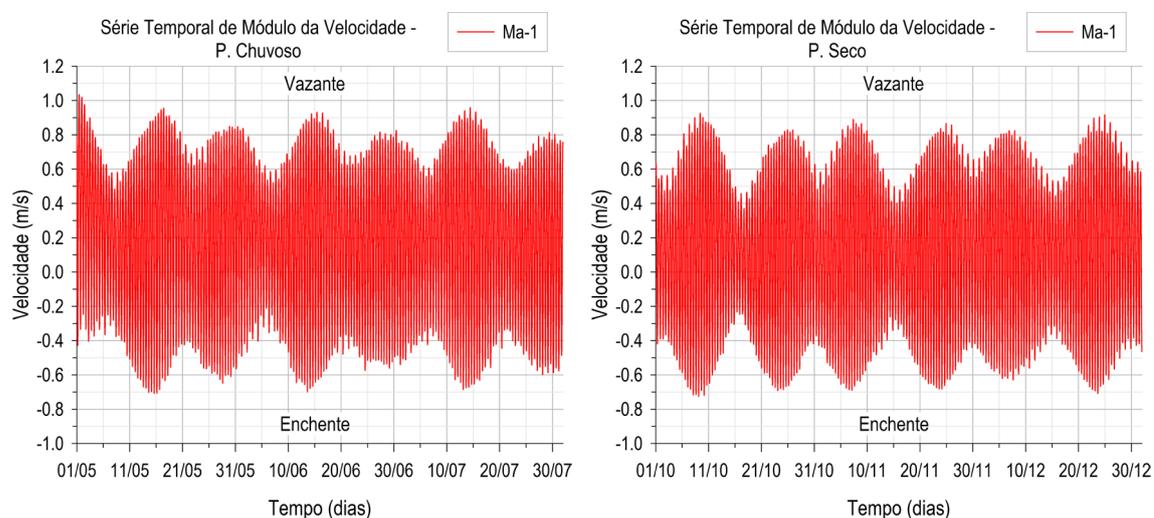


Figura 81 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Ma-1”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.

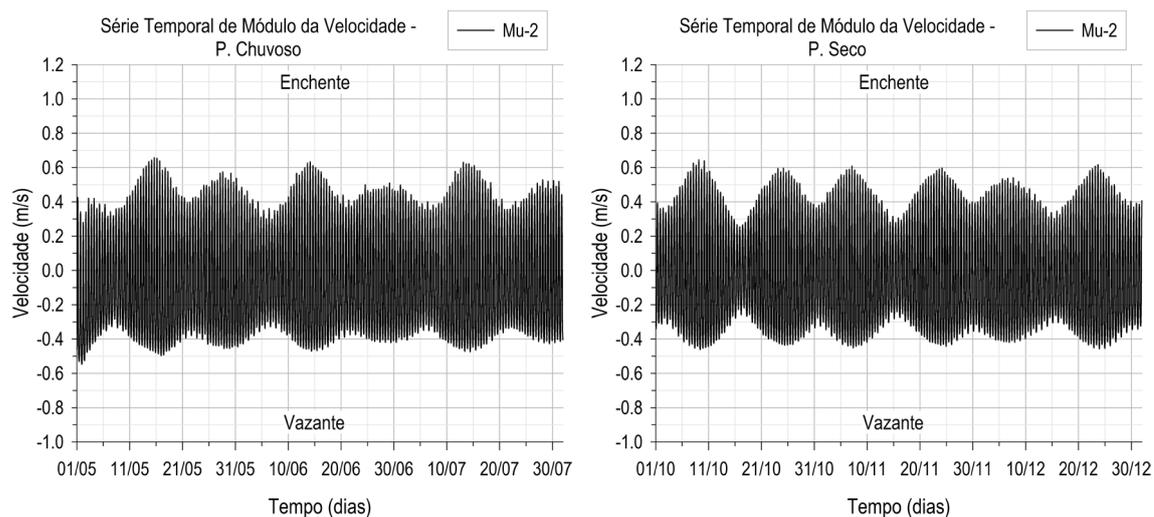


Figura 82 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Mu-2”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.

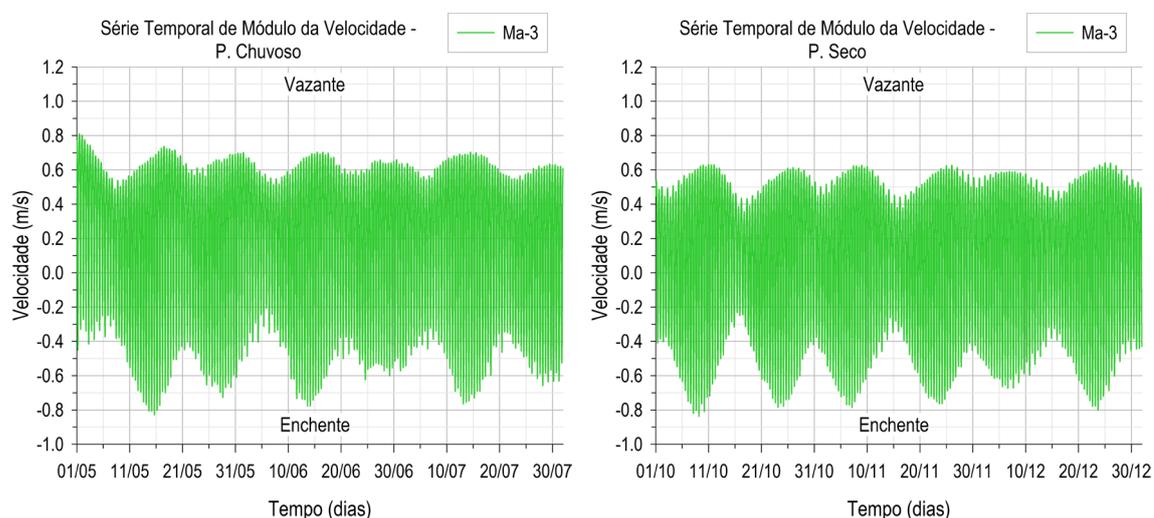


Figura 83 - Séries temporais de módulo da velocidade das correntes na estação “Ma-3”, em referência ao período chuvoso, à esquerda, e ao período seco, à direita.

Ao se analisar os mapas, em conjunto com os gráficos, percebe-se claramente a grande variação espacial e temporal das velocidades nos principais canais de comunicação. No canal da laguna Mundaú, estações “Mu-1” e “Mu-2”, as velocidades mais intensas ocorreram nas enchentes, nas quais foram observadas as maiores diferenças entre os ciclos de maré de sizígia e de quadratura. A maior velocidade na estação “Mu-1” foi de 1.04 m/s, enquanto na estação “Mu-2”, 0.66 m/s, ambas ocorridas em uma enchente de maré de sizígia no período chuvoso. As principais diferenças entre os períodos chuvoso e seco foram observadas nas vazantes, com velocidades mais intensas ocorrendo no período chuvoso. Como consequência do grande aporte fluvial para a laguna Mundaú, foram obtidas as maiores velocidades nas vazantes, na estação “Mu-1”, 0.81 m/s, enquanto na estação “Mu-2”, 0.55 m/s.

No canal da laguna Manguaba, devido as suas características físicas, há uma grande

restrição à passagem do fluxo de água, como será evidenciado nas análises das séries temporais de vazões e de volumes resultantes. Em função disso, observou-se a ocorrência de velocidades intensas na maior parte de sua extensão, à exceção do trecho de maior largura ao sul da laguna. Na estação “Ma-1”, de modo geral, as maiores velocidades foram obtidas nas vazantes, com o máximo de 1.03 m/s, ocorrido no início do período chuvoso. Já para as enchentes, o máximo foi de 0.73 m/s. Na estação “Ma-3”, percebe-se que as diferenças de velocidades nas enchentes, ao se comparar os ciclos de maré de sizígia e de quadratura, foram bem mais expressivas do que nas vazantes, em ambos os períodos. Como pode-se observar na Figura 83, a velocidade máxima foi de 0.84 m/s, em uma enchente de maré de sizígia no período seco.

Além dos principais canais de comunicação, é válido destacar ainda o canal ao norte da Ilha de Santa Rita. Neste canal, a indução de correntes esteve sujeita às variações de nível d'água nos extremos opostos do canal. Em razão de pequenas diferenças entre os níveis d'água, em associação com as características físicas do canal – que é, de modo geral, estreito, sinuoso e raso – constatou-se velocidades pouco intensas. Por exemplo, a velocidade máxima na estação “Ca-2” foi de 0.32 m/s, em uma enchente – correntes no sentido Nordeste (NE). Como se verá adiante, isso teve consequências relevantes para a renovação das águas. A seguir, tendo como base os resultados obtidos, são analisadas as correntes residuais, com o intuito de detalhar ainda mais a circulação hidrodinâmica no interior das lagunas.

➤ **Correntes Residuais**

A Figura 84 apresenta os mapas de isolinhas de velocidade das correntes residuais, com a inclusão de vetores representando o sentido dessas correntes no interior das lagunas. As correntes residuais refletem o escoamento resultante, e são calculadas com base na média temporal das velocidades. Sendo assim, foram selecionados dois ciclos de maré de sizígia em cada período. No período chuvoso, no intervalo de tempo de 16/05/2018 19h30 até 17/05/2018 20h30, enquanto no período seco, de 07/11/2018 06h00 até 08/11/2018 07h00. Observa-se que os vetores possuem a mesma dimensão e, portanto, não indicam a intensidade das correntes. Além disso, a densidade de vetores apresentada é muito menor do que a quantidade de pontos de cálculo.

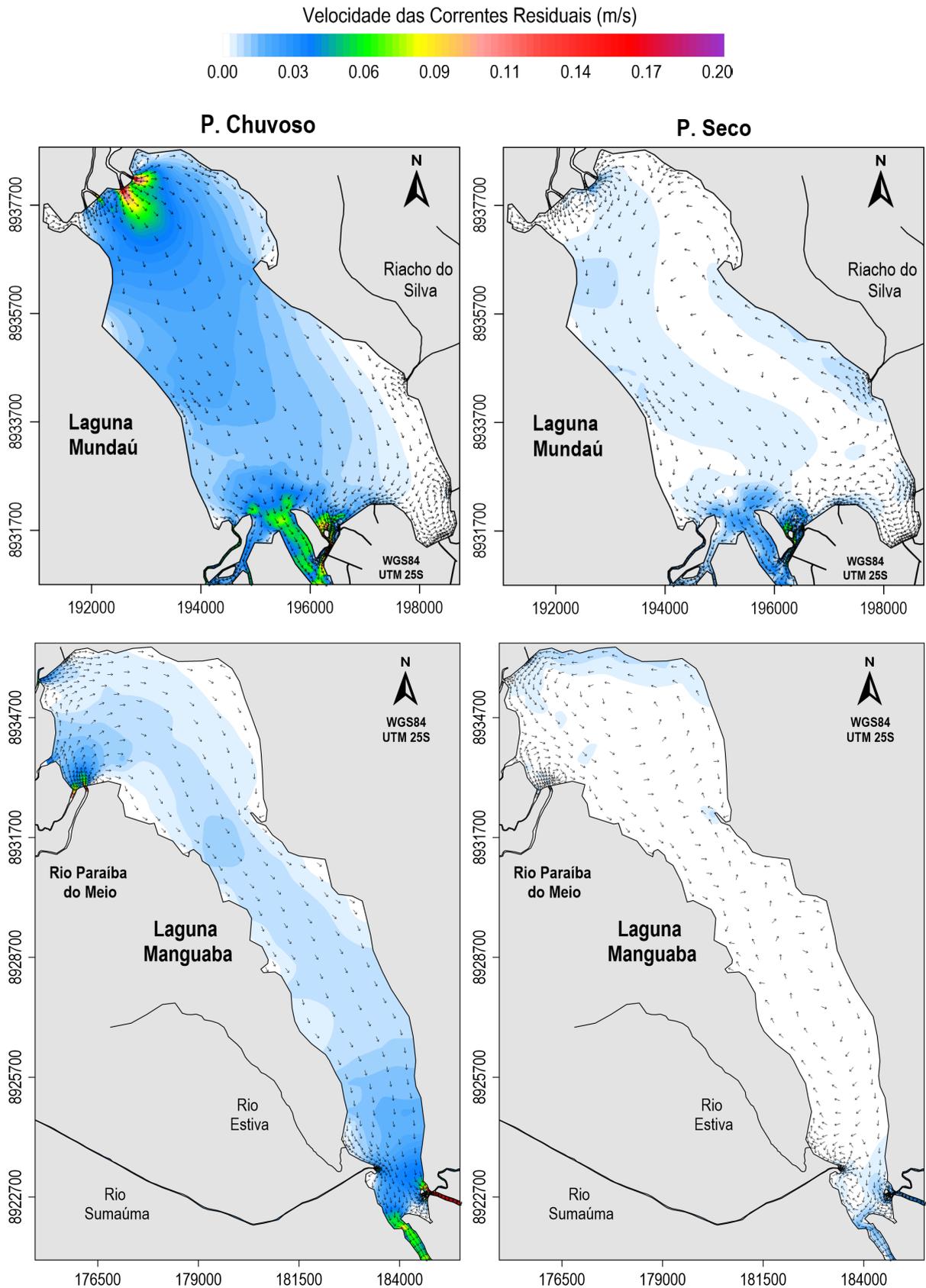


Figura 84 - Mapas de isolinhas de velocidade das correntes residuais, com a inclusão de vetores representando o sentido dessas correntes no interior das lagoas. À esquerda, referente ao período chuvoso, no intervalo de tempo de 16/05/2018 19h30 até 17/05/2018 20h30; à direita, referente ao período seco, de 07/11/2018 06h00 até 08/11/2018 07h00.

Em referência ao período chuvoso, observou-se, em grande parte da extensão da laguna Mundaú, que o sentido do escoamento resultante foi para os canais de comunicação. Tais resultados são coerentes, pois se trata de um período com maiores descargas fluviais. Observa-se que no intervalo de tempo selecionado o aporte fluvial médio do rio Mundaú foi de $91.5 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto do rio Paraíba do Meio, $43.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Nesta laguna, as correntes residuais foram mais intensas na margem oeste, em função, dentre outros fatores, da batimetria e da proximidade com os canais de comunicação, enquanto que na margem oposta, pode-se observar maior efeito dos ventos na indução de correntes em direção à cabeceira da laguna. No intervalo de tempo selecionado, o vento foi proveniente de Sudeste (SE), com velocidade média de 3.5 m/s , considerando todas as estações de vento. Na região sudeste constatou-se vórtices no sentido anti-horário. Nesta região, o sentido das correntes residuais apresentou correlação com a direção dos ventos. Quando estes se originaram mais próximos a Este (E), observou-se rotação no sentido horário. No entanto, na ocorrência de ventos mais próximos de Sudeste (SE), constatou-se vórtices no sentido anti-horário. Independentemente do sentido, ocorreram velocidades residuais muito baixas, o que pode ser interpretado como um indicativo de que a mistura e a renovação das águas ocorrem de forma mais lenta nesta região. O mesmo pode ser dito sobre a região noroeste desta laguna.

Na laguna Manguaba, de modo geral, o sentido do escoamento residual foi para os canais de comunicação durante o período chuvoso e, por isso, a ocorrência de vórtices foi pequena durante este período, sendo observado, de modo mais expressivo, na região norte, próximo à margem leste. Nota-se que nesta porção da laguna, ao longo do período chuvoso, ocorreram correntes residuais de baixa intensidade e vórtices no sentido anti-horário, especialmente, nos momentos de menor descarga fluvial e maior intensidade dos ventos. Diante desses resultados, pode-se dizer que as águas presentes neste local tendem a permanecer por mais tempo no interior da laguna. Em síntese, pôde-se verificar como a circulação hidrodinâmica das lagunas, durante o período chuvoso, foram significativamente influenciadas pelas descargas fluviais.

Quanto ao período seco, em referência à laguna Mundaú, observou-se que as velocidades das correntes residuais foram menores em comparação ao período chuvoso. A diminuição das descargas fluviais possibilitou observar melhor a influência dos ventos na indução de correntes no interior desta laguna. No intervalo de tempo selecionado, o vento foi proveniente de Este (E), com velocidade média de 4.4 m/s , considerando todas as estações de vento. Quanto às vazões, o valor médio para o rio Mundaú foi de $3.71 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto para o rio Paraíba do Meio, $2.28 \text{ m}^3/\text{s}$. Enquanto no período chuvoso o sentido do escoamento resultante foi preferencialmente para os canais de comunicação, no período seco, porém, passou a ser um vórtice em

grande escala, no sentido anti-horário, ou seja, na margem leste prevaleceram correntes indo em direção à cabeceira da laguna, enquanto na margem oeste, indo em direção aos canais de comunicação. Autores como ANA (2013), Souza (2017), Brito Jr., Fragoso Jr e Larson (2018) e Sant'Ana (2019) também observaram esse padrão, que influencia no espalhamento de constituintes presentes em cada margem. Destaca-se a célula de circulação localizada à frente do Riacho do Silva. As águas presentes nessa região tendem a ficar por mais tempo circulando pela laguna, o que, por consequência, resultaria em um maior T_R . Na região sudeste, considerando intervalo de tempo selecionado, constatou-se que o sentido das correntes residuais foi horário. Em ambos os períodos, essa região revelou correntes de baixa intensidade e predominância de movimentos em ambos os sentidos. Como já mencionado, essa condição não favorece a mistura e a renovação das águas.

Na laguna Manguaba, a porção norte apresentou vórtices no sentido anti-horário, e este foi consideravelmente mais acentuado em comparação ao período chuvoso. Com a redução das vazões, as correntes nessa região foram significativamente influenciadas pelos ventos. Quanto mais próximo de Este (E) e mais intensos os ventos eram, maiores eram os vórtices. Em contrapartida, ventos menos intensos atenuaram a dimensão dos vórtices. Por meio desses resultados, pode-se afirmar que as águas dessa região serão aquelas com maior T_R nesta laguna. É interessante notar que as correntes residuais foram convergentes, na margem oeste, e divergentes, na margem oposta. Entre a região norte e central da laguna, as correntes residuais, na margem oeste, foram para o centro da laguna, enquanto na margem oposta, para o norte. Entre a região central e sul, a montante da foz do rio Estiva, as correntes residuais também seguiram para o centro da laguna na margem oeste. Na margem oposta, dirigiram-se para os canais de comunicação. Com base nessas análises, é possível inferir que o T_R das águas na margem leste, entre a região central e sul, deve ser menor do que na margem oposta. Ressalta-se que as correntes residuais apresentadas, para os respectivos períodos, referem-se a intervalos de tempo específicos, não representando necessariamente uma condição média para o período seco ou chuvoso.

➤ **Séries Temporais de Vazões e de Volumes Resultantes – em seções selecionadas nos respectivos canais de comunicação, conforme a Figura 37**

Por fim, apresentam-se da Figura 85 até a Figura 88, as séries temporais de vazões e de volumes resultantes em seções selecionadas nos canais de comunicação das lagunas Mundaú e Manguaba, no intervalo de tempo de 01/05/2018 00h00 até 25/05/2018 04h00, para o período chuvoso, e de 01/10/2018 00h00 até 26/10/2018 20h00, para período seco.

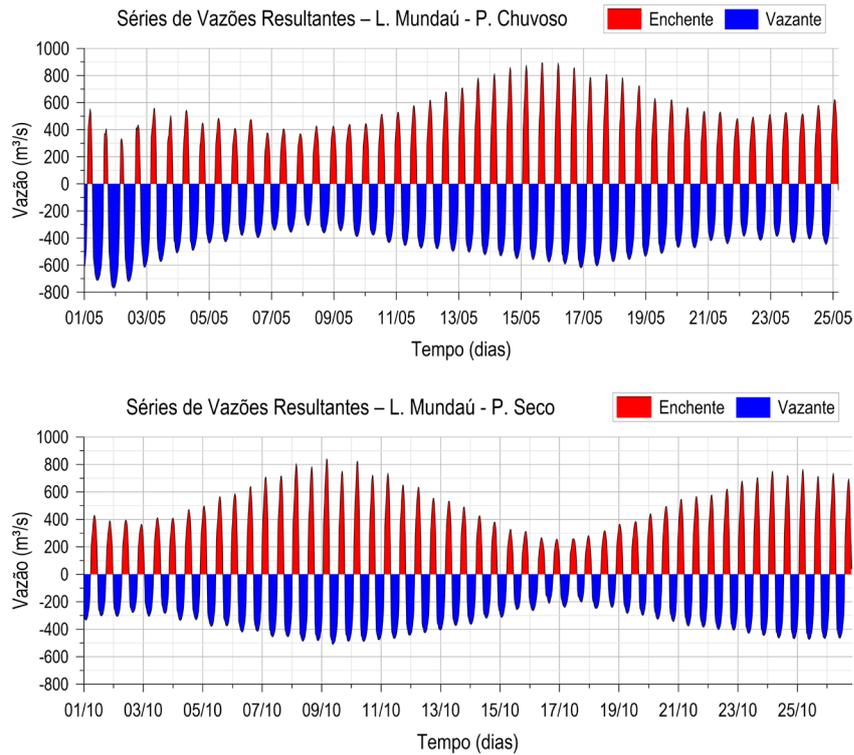


Figura 85 - Séries temporais de vazões resultantes nos canais de comunicação da laguna Mundaú, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco.

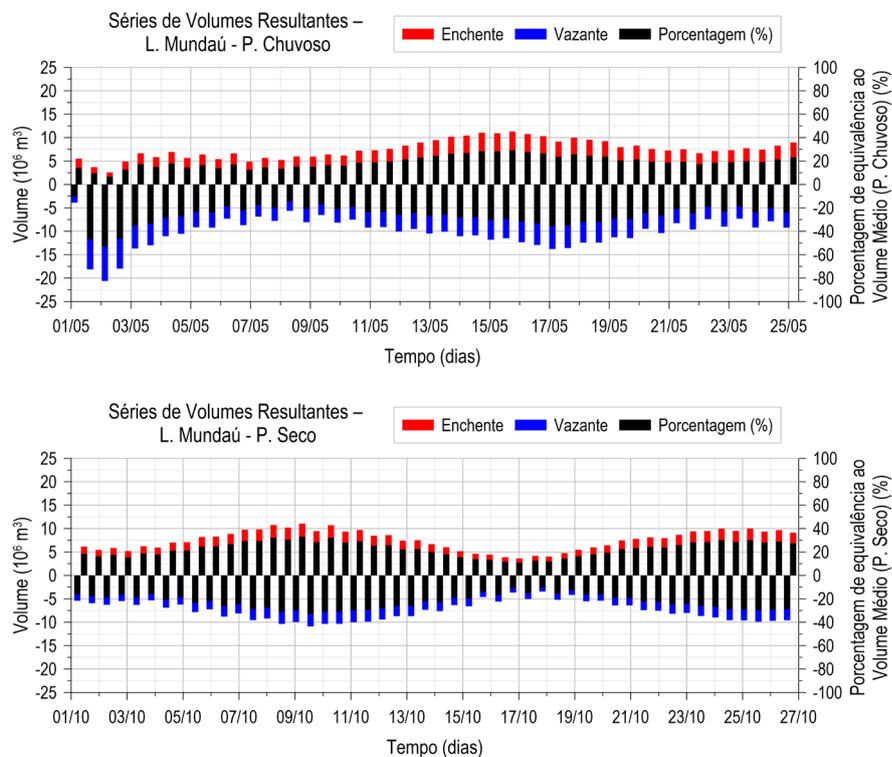


Figura 86 - Séries temporais de volumes resultantes nos canais de comunicação da laguna Mundaú, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco. Observa-se também as porcentagens de equivalência ao volume médio da laguna nos respectivos períodos.

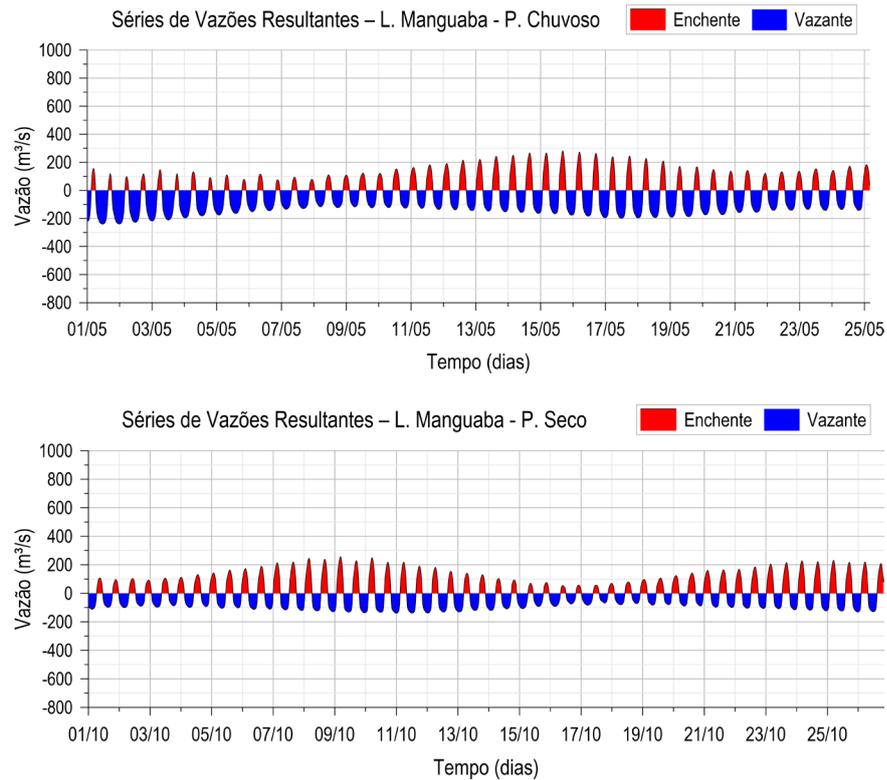


Figura 87 - Séries temporais de vazões resultantes nos canais de comunicação da laguna Manguaba, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco.

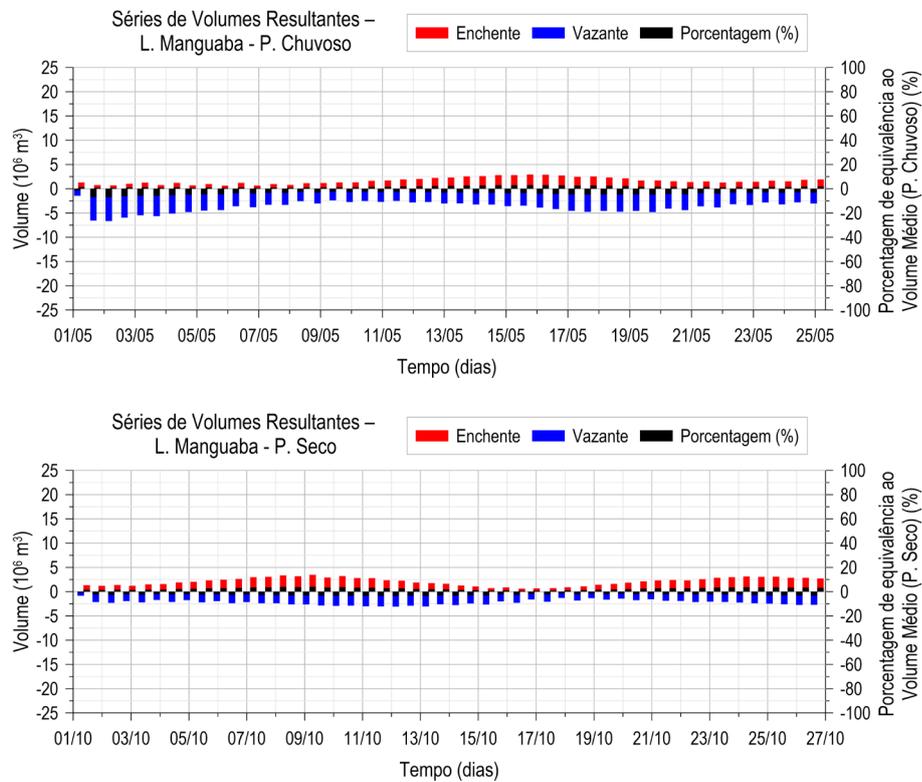


Figura 88 - Séries temporais de volumes resultantes nos canais de comunicação da laguna Manguaba, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco. Observa-se também as porcentagens de equivalência ao volume médio da laguna nos respectivos períodos.

Em ambos os períodos, ao se comparar as vazões e os volumes resultantes entre as lagoas, ficou claro que a laguna Manguaba trocou menos massas de água com os canais de comunicação/mar, como consequência da maior restrição à passagem de água. Nas lagoas, constatou-se que, com exceção das grandes descargas fluviais ocorridas no início do período chuvoso, as vazões nas enchentes de maré de sizígia foram, de modo geral, mais intensas do que as vazantes. Percebe-se, também, a maior duração das vazantes em relação as enchentes, principalmente, em momentos de maior descarga fluvial. Nas marés de quadratura, as enchentes na laguna Mundaú também foram mais intensas do que as vazantes. Na laguna Manguaba, porém, verificou-se o contrário, ou seja, as vazantes foram mais intensas do que as enchentes, com maiores diferenças observadas no período chuvoso.

Referentemente ao período chuvoso, destaca-se que a vazão máxima de enchente na laguna Mundaú foi de $894 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto na laguna Manguaba, $282 \text{ m}^3/\text{s}$, valor menor que um terço do calculado para a laguna Mundaú. Considerando todo o período chuvoso, constatou-se, relativo às enchentes de maré de sizígia, que as vazões máximas variaram dentro da faixa de valores expostos no intervalo de tempo selecionado. Quanto às vazantes de maré de sizígia, as vazões máximas variaram de 471 a $770 \text{ m}^3/\text{s}$, para a laguna Mundaú, e de 152 a $240 \text{ m}^3/\text{s}$, para a laguna Manguaba. Quanto aos ciclos de maré de quadratura, obteve-se, para a laguna Mundaú, o intervalo de vazões máximas de 343 a $495 \text{ m}^3/\text{s}$, para as enchentes, e de 294 a $388 \text{ m}^3/\text{s}$, para as vazantes. Já para laguna Manguaba, o intervalo foi de 61 a $123 \text{ m}^3/\text{s}$, para as enchentes, e de 123 a $143 \text{ m}^3/\text{s}$, para as vazantes.

Ao observar as séries temporais de volumes resultantes por ciclo de maré do período chuvoso, pode-se perceber que os volumes nas vazantes foram maiores do que nas enchentes, o que é coerente, por se tratar de um período com maiores descargas fluviais. Como se pode notar nos primeiros dias de simulação, as diferenças entre os volumes de enchentes e vazantes foram muito mais expressivas do que nos ciclos posteriores, principalmente, na laguna Mundaú. Nesta laguna, como consequência do aporte fluvial de $\approx 460 \text{ m}^3/\text{s}$, e vazão máxima de vazante de $770 \text{ m}^3/\text{s}$, verificou-se o maior volume nas vazantes, com valor de $20.60 \times 10^6 \text{ m}^3$, e o menor volume nas enchentes.

Nos gráficos de séries temporais de volumes resultantes, as porcentagens indicam a razão entre os volumes, de enchentes e de vazantes, e o volume médio de cada laguna nos respectivos períodos. Desta forma, para a laguna Mundaú, o valor de $20.60 \times 10^6 \text{ m}^3$ correspondeu a $\approx 53\%$, ou seja, o volume nessa vazante foi equivalente a mais de 50% do volume médio da laguna no período chuvoso. Esses resultados expressão como as grandes descargas do rio Mundaú influenciam na circulação hidrodinâmica desta laguna. Nota-se que o Tempo de Recorrência

calculado para o pico de descarga do rio Mundaú foi equivalente a ≈ 3 anos, o que significa dizer, que um evento desta magnitude ocorre frequentemente.

Na laguna Manguaba, o maior volume na vazante foi de $6.65 \times 10^6 \text{ m}^3$, relacionado a vazão máxima de vazante de $240 \text{ m}^3/\text{s}$, e correspondeu a $\approx 7\%$ do volume médio da laguna no período. É válido destacar, com base na batimetria adotada, que o principal canal de comunicação da laguna Manguaba, em termos de vazão, foi o canal mais curto e mais estreito, próximo à margem leste. As vazões que atravessaram esse canal representaram, em média, 56% das vazões resultantes, considerando ambos os períodos. Outro ponto relevante, se refere às porcentagens. A longo prazo, para cada laguna, a média das porcentagens, em relação às enchentes, tende a ser equivalente a razão entre o prisma de maré médio e o volume médio da laguna. Desta forma, a porcentagem média das enchentes para a laguna Mundaú vai se aproximar de 23% , enquanto para a laguna Manguaba, de 3% .

No período seco, as séries temporais de vazões resultantes foram, de certa forma, similares ao período chuvoso, em termos das enchentes de maré de sizígia – exceção feita ao evento de grande descarga fluvial. De modo geral, as vazões máximas nas vazantes foram menos intensas no período seco, como era de se esperar, devido à redução das descargas fluviais. Nas figuras é possível visualizar, para os ciclos de maré de quadratura, a ocorrência das vazões máximas de menor intensidade, considerando ambos os períodos. Visualiza-se, também, em relação aos ciclos de maré sizígia, os valores mais intensos ocorridos no período seco. Em síntese, considerando todo o período seco, constatou-se, para a laguna Mundaú, que as vazões máximas nas marés de sizígia variaram na faixa de 600 a $842 \text{ m}^3/\text{s}$, nas enchentes, e de 411 a $510 \text{ m}^3/\text{s}$, nas vazantes. Em referência às marés de quadratura, obteve-se a faixa de valores de 257 a $437 \text{ m}^3/\text{s}$, nas enchentes, e de 203 a $358 \text{ m}^3/\text{s}$, nas vazantes. Relativo à laguna Manguaba, as vazões máximas nas marés de sizígia variaram na faixa de 174 a $258 \text{ m}^3/\text{s}$, nas enchentes, e de 121 a $140 \text{ m}^3/\text{s}$, nas vazantes. Para as marés de quadratura, a faixa de valores foi de 55 a $114 \text{ m}^3/\text{s}$, nas enchentes, e de 67 a $115 \text{ m}^3/\text{s}$, nas vazantes.

Quanto às séries temporais de volumes resultantes, observou-se, para a laguna Manguaba, o maior e o menor volume de enchente, considerando ambos os períodos. Deste modo, os valores foram: $3.46 \times 10^6 \text{ m}^3$, equivalente a $\approx 4\%$ do volume médio da laguna no período seco, e $0.60 \times 10^6 \text{ m}^3$, correspondente a 0.7% . Já para a laguna Mundaú, obteve-se o segundo maior valor, como também o segundo menor valor, sendo eles: $11.04 \times 10^6 \text{ m}^3$, equivalente a $\approx 33\%$ do volume médio da laguna no período, e $3.62 \times 10^6 \text{ m}^3$, correspondente a $\approx 11\%$. Pelos gráficos, pode-se verificar também, para as duas lagunas, os menores volumes obtidos nas vazantes, de

ambos os períodos. Com base nas informações apresentadas, são discutidos, em seguida, os resultados das simulações de T_R , $T_{R\%}$ e I_A .

6.2 Análises dos Modelos de Tempos Hidráulicos Característicos (THC)

Nesta seção são apresentados os resultados dos modelos de T_R , $T_{R\%}$ e I_A por meio da exposição de mapas de isolinhas e gráficos de séries temporais – estes, somente para $T_{R\%}$ e I_A . Relativo à $T_{R\%}$, observa-se que os mapas apresentados se referem aos seguintes tempos, em dias, decorridos da simulação: 1, 7, 15, 30, 45, 60 e 75. Quanto aos gráficos, exibem os resultados das seguintes estações: “Mu Norte”, “Mu Centro”, “Mu Sul” e “Mu Sudeste”, para a laguna Mundaú; e “Ma Norte”, “Ma Centro” e “Ma Sul”, para a laguna Manguaba. Nos canais de comunicação, as estações selecionadas foram: “Mu-2”, “Ca-1”; “Ma-2”, “Ma-4” e “Ca-2”. Os resultados são apresentados e discutidos de forma comparativa, analisando as diferenças entre os períodos chuvoso e seco. Assim, inicialmente, discute-se os resultados para laguna Mundaú, depois para laguna Manguaba e, por último, para a região dos canais de comunicação. Entre as análises de $T_{R\%}$ e I_A serão apresentados dados de qualidade de água para caracterizar a qualidade das águas doces afluentes, que contribuem para a renovação das águas do CELMM. Os parâmetros citados foram: OD, DBO_5 , Fósforo Total, Nitrogênio – Amoniacal e Nitrato, ou ainda, o Total.

6.2.1 Tempo de Residência (T_R)

Os T_R das massas de água no interior das lagoas foram calculados ao final de 92 dias de simulação para cada período. Como mencionado na metodologia, o T_R se refere ao tempo despendido para que a partícula, ou massa de água, atravesse, ou não, a seção de controle. Caso a partícula não tenha saído do interior das lagoas, o valor do T_R , no local de lançamento da partícula, será igual ao tempo de simulação, ou seja, 92 dias.

▪ Laguna Mundaú

A Figura 89 apresenta os mapas de isolinhas de T_R ao final de 92 dias de simulação, à esquerda, para período chuvoso, e à direita, para o período seco. Na laguna Mundaú, em referência ao período chuvoso, os valores de T_R foram, em sua maioria, abaixo de 2 dias, isto é, as águas foram rapidamente exportadas devido às grandes descargas do rio Mundaú. Como o escoamento, durante as vazantes, ocorreu preferencialmente pela margem oeste, por conta, dentre outras razões, da batimetria e da proximidade com os canais de comunicação, os valores de T_R foram bem menores nessa margem em comparação com a margem oposta, no qual constatou-se valores acima de 45 dias. Tamanha diferença nos valores de T_R pode ser explicada

analisando-se a trajetória das partículas inicialmente presentes na margem leste. Com o pico de descarga do rio Mundaú, as massas de água da margem leste foram impulsionadas em direção a região sudeste e, posteriormente, com a redução das vazões, e por efeito das marés e dos ventos, essas águas foram direcionadas a região central, contornando a margem leste. Variando entre essas regiões, em função das forçantes ambientais, as massas de água foram progressivamente sendo exportadas ao longo do tempo. Na região sudeste, apontada como uma região em que circulação hidrodinâmica não favorece a renovação das águas, obteve-se T_R de até 60 dias. Valores ainda maiores foram observados na região noroeste, alcançando 86 dias. A partir desses resultados, e considerando que o Tempo de Recorrência da vazão máxima no rio Mundaú foi de ≈ 3 anos, e que a estimativa da média das vazões máximas anuais afluentes à laguna Mundaú correspondeu a $432 \text{ m}^3/\text{s}$, pode-se dizer que o rio Mundaú possui significativa capacidade de exportar grande parte das águas da laguna Mundaú, em poucos dias, durante as estações chuvosas.

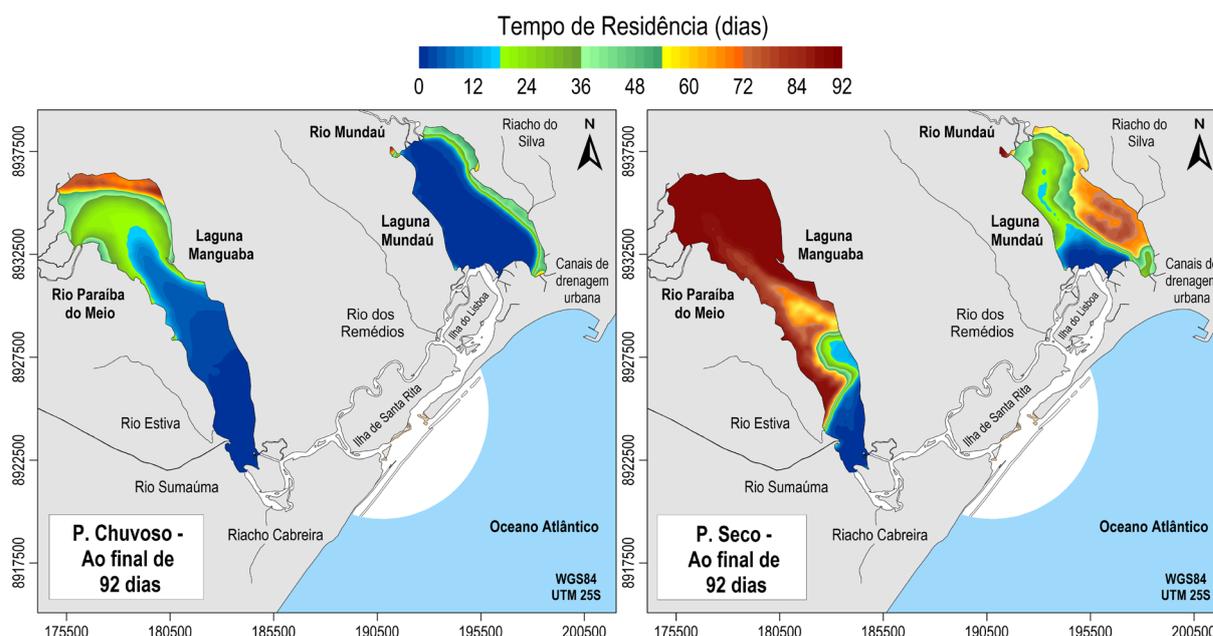


Figura 89 - Mapas de isolinhas de Tempo de Residência (T_R) ao final de 92 dias de simulação, à esquerda, para período chuvoso, e à direita, para o período seco.

No período seco, com a redução significativa das vazões, observou-se, em algumas regiões, um incremento bem acentuado nos valores de T_R . Nesta laguna, a análise das correntes residuais indicou que a região localizada à frente da foz do Riacho do Silva apresentaria elevado T_R , o que foi constatado nesta simulação, no qual se obteve valores de ≈ 80 dias. Na região central e leste, o local de maior T_R irá variar em função da condição inicial da simulação, bem como das forçantes ambientais ao longo desta. Pode-se destacar, no entanto, que os maiores valores tendem a ocorrer dentro dos limites demarcados pela isolinha de T_R igual a 65 dias.

Como essa região está sob influência do Riacho do Silva, o aporte de cargas poluidoras por este riacho, provenientes da região urbana de Maceió, tendem a permanecer por mais tempo no interior da laguna, afetando negativamente a qualidade de água, principalmente, a montante da foz.

Na região sudeste ocorreram valores menores, entre 26 e 50 dias. Verificou-se maior exportação dessas massas de água durante os ciclos de maré de quadratura, com ventos provenientes de Este-Nordeste (ENE) e de Este (E). Observa-se que após a exportação, parte dessas massas de água, que se encontravam no canal de comunicação, retornaram para a laguna durante as marés enchentes. Na região noroeste constatou-se os maiores T_R nesta laguna, alcançando 92 dias. Os padrões de circulação hidrodinâmica não favoreceram a exportação das massas de água dessa região, de tal modo, que a maioria ficou contida na própria região. As regiões que apresentaram T_R elevado estão de acordo com os diversos estudos realizados, entre eles: ANA (2013), que obteve T_R superior a 80 dias na região central; Brito Jr., Fragoso Jr e Larson (2018), que encontraram T_R acima de 65 dias na porção central e leste desta laguna; e Pinheiro et al. (2021), que obtiveram entre a região central e sudeste, T_R de 63 a 90 dias.

▪ **Laguna Manguaba**

Na laguna Manguaba, em referência ao período chuvoso, observou-se um gradiente longitudinal nos valores de T_R , de modo suave, da região sul até o centro, e depois mais acentuado, do centro até o norte. Na região central, por exemplo, o T_R foi de ≈ 4 dias, em virtude das descargas fluviais mais intensas ocorridas nos primeiros dias de simulação. Destaca-se a margem ao norte, que por estar mais distante dos canais de comunicação apresentou os maiores T_R , com valores acima de 85 dias, bem próximo à margem leste. Essa faixa de valores mais elevados pode ser relacionada as correntes geradas pelas descargas do rio Paraíba do Meio, que impulsivaram as massas de água inicialmente presentes nessa região, contra a margem leste. A partir daí, essas massas de água se deslocaram progressivamente em direção aos canais de comunicação, contornando a margem leste. Os resultados obtidos corroboram com o estudo de Pinheiro et al. (2021), que observaram, considerando condições médias de descargas fluviais de junho a agosto, assim como diferentes configurações de embocadura, que a margem oeste da laguna Mundaú se renovou mais rapidamente do que margem oposta, com diferenças superiores a 50 dias; e que a região norte da laguna Manguaba, na porção leste, apresentou os maiores T_R desta laguna, alcançando 90 dias.

No período seco, uma parcela significativa das massas de água presentes na região norte permaneceram no interior da laguna, distribuídas ao longo de sua extensão, e por isso, o T_R

atribuído a essas massas de água foi equivalente ao tempo de simulação, 92 dias. Pode-se interpretar, portanto, que o T_R dessas massas de água tende a ser maior do que 92 dias. Na região norte, valores elevados de T_R ocorreram não somente por causa da maior distância em relação aos canais de comunicação, mas também devido à circulação hidrodinâmica que proporcionou, por forte influência dos ventos, um maior T_R das massas de água nessa região, se deslocando, preferencialmente, em sentido anti-horário. Cunha et al. (2021) também constataram valores altos nessa região, com T_R ultrapassando 200 dias. Deste modo, a região norte é um local crítico para o aporte de poluição, pois as cargas poluidoras provenientes, por exemplo, do rio Paraíba do Meio e do canal de drenagem urbana de Pilar tendem a permanecer por um tempo prolongado nesta região, degradando a qualidade de água nesta porção da laguna.

Ao se analisar a região central, os T_R variaram entre 57 e 92 dias. Altos valores de T_R estão associados a processos que degradam a qualidade de água, tal como a eutrofização, conforme relatado, de modo geral, por Oliveira e Kjerfve (1993), Melo-Magalhães et al. (2009), Costa et al. (2010), Maioli et al. (2011), Cotovicz Jr. et al. (2012), Brito Jr., Fragoso Jr e Larson (2018), entre outros. Entre a região central e sul da laguna, nota-se claramente que a margem oeste apresentou T_R bem mais elevado em comparação à margem oposta, com diferenças acima de 85 dias. Ao se analisar a trajetória das partículas ao longo da simulação do período seco, observou-se que, entre a região central e sul, as partículas foram preferencialmente exportadas pela margem leste. Na margem oposta, as partículas que se encontravam a montante da foz do rio Estiva foram, em sua maioria, direcionadas para o centro da laguna, ao longo da margem oeste. Aquelas a jusante da foz foram, em sua maioria, exportados em menos de 20 dias. Isso explica a grande diferença nos valores de T_R nas proximidades dessa região. Com base nas forçantes ambientais adotadas no período seco, pode-se inferir, a partir da circulação hidrodinâmica, que a região próxima ao centro, na margem oeste, é suscetível à piora da qualidade da água, pois seria influenciada pelas cargas poluidoras lançadas nesta margem, tanto provenientes de montante quanto de jusante.

6.2.2 Tempos de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$)

Conforme definido na metodologia, seção 5.4.2, a simulação da $T_{R\%}$ tem o propósito de avaliar, em porcentagem, a renovação das águas promovida pela mistura de águas “novas”, que entram pelos rios, canais de maré e via precipitação, com as águas presentes no domínio de interesse desde o início da simulação. Em um dado instante e local, por exemplo, se o valor de $T_{R\%}$ indicar 70%, significa que 70% das águas seriam águas “novas”, que entraram nas lagunas e canais de comunicação após o início da simulação, e o restante, 30%, se referem àquelas que

já se encontravam nestes locais desde o início da simulação. Vale dizer que maior renovação não significa, necessariamente, melhoria da qualidade da água, pois as águas “novas” que afluem podem trazer diversos poluentes, piorando a qualidade da água já presente no local.

▪ Laguna Mundaú

Na laguna Mundaú, os resultados do período chuvoso após o primeiro dia de simulação, Figura 90, à direita, mostram que a região norte apresentou, em grande parte de sua extensão, renovação quase completa da água. Na região central, o efeito da renovação foi mais evidente a oeste, pelas razões já mencionadas nas análises do T_R . Na estação “Mu Centro”, Figura 97, o valor da T_R , nesse instante, foi de 88%. Isso indica que, nesse local e momento, 88% das águas são “novas”, e o restante, 12%, são as águas que já se encontravam no domínio de interesse. A distribuição espacial da T_R nesse primeiro dia pode ser considerada um bom exemplo de como são intensas as misturas de massas de água afluentes com aquelas já presentes, quando ocorrem grandes descargas fluviais.

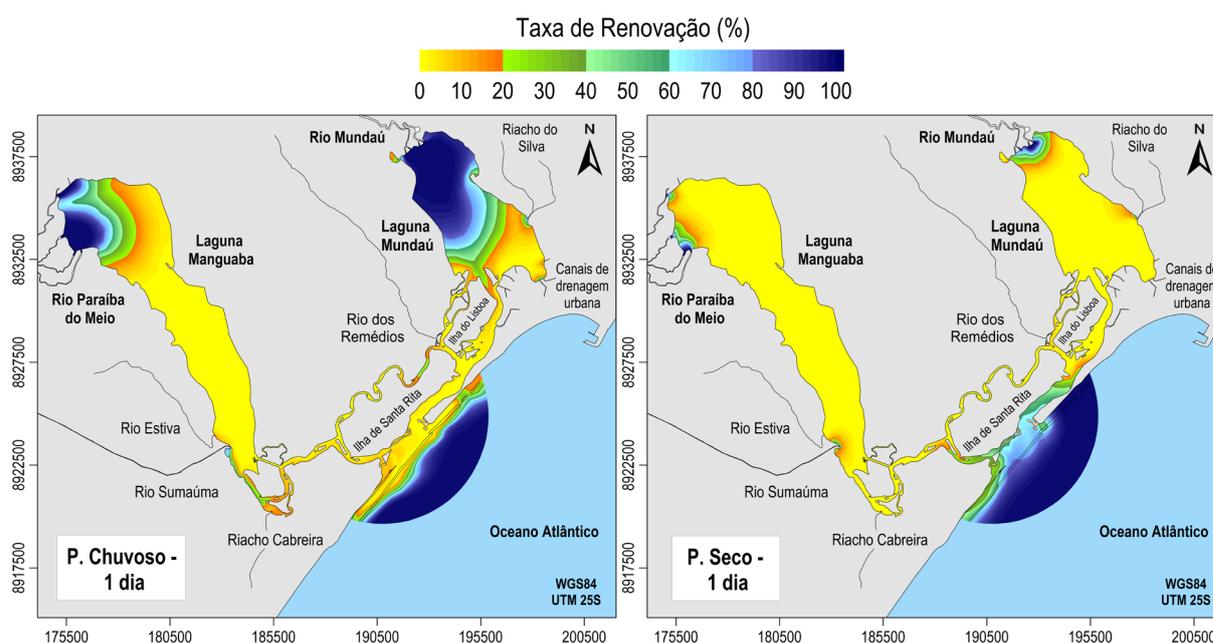


Figura 90 - Taxa de Renovação (T_R) após 1 dia de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.

Após o sétimo dia de simulação, Figura 91, obteve-se a T_R mínima de 48% na laguna. Na região sudeste observou-se as menores T_R , indicando que as massas de água desta região tendem a se misturar mais lentamente com as águas “novas” afluentes, devido, principalmente, à predominância de baixa velocidade das correntes. Pelas mesmas razões, a região noroeste, apontada como um dos locais de maior T_R nesta laguna, apresentou a T_R mínima de 73%, mesmo estando bem próxima da foz do rio Mundaú. Com 15 dias, Figura 92, a laguna alcançou

um nível avançado de renovação, com valor mínimo de $\approx 83\%$ observado na região sudeste. Após 30 dias, Figura 93, a renovação foi praticamente completa, com diferenças visuais pouco perceptíveis em comparação aos tempos posteriores.

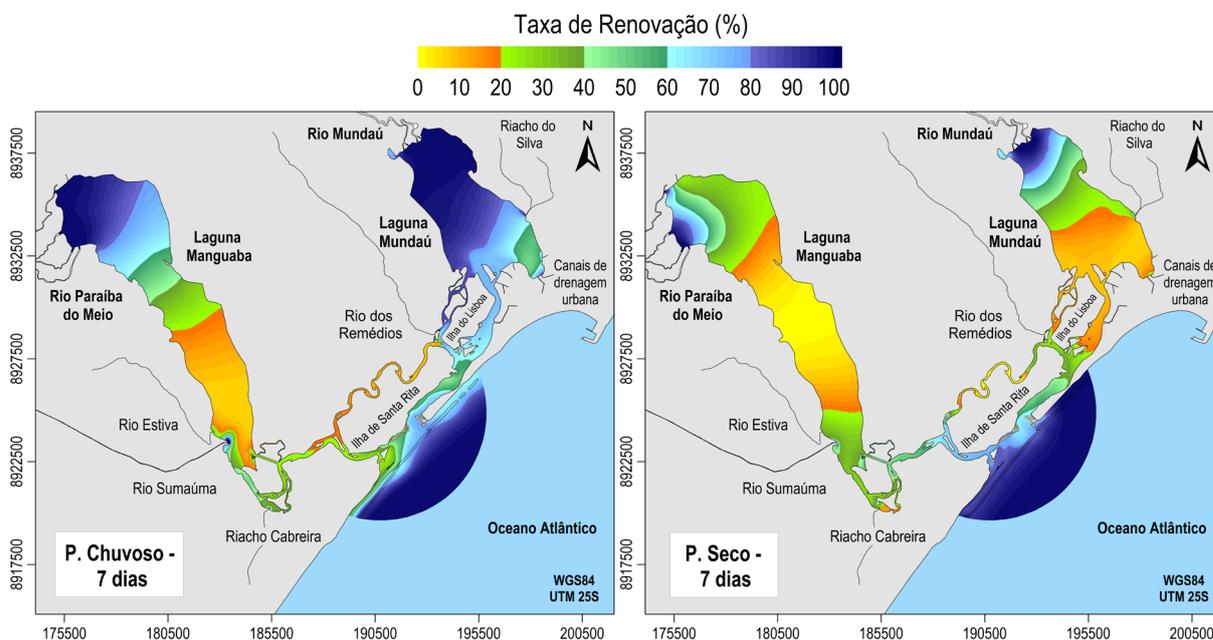


Figura 91 - Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) após 7 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.

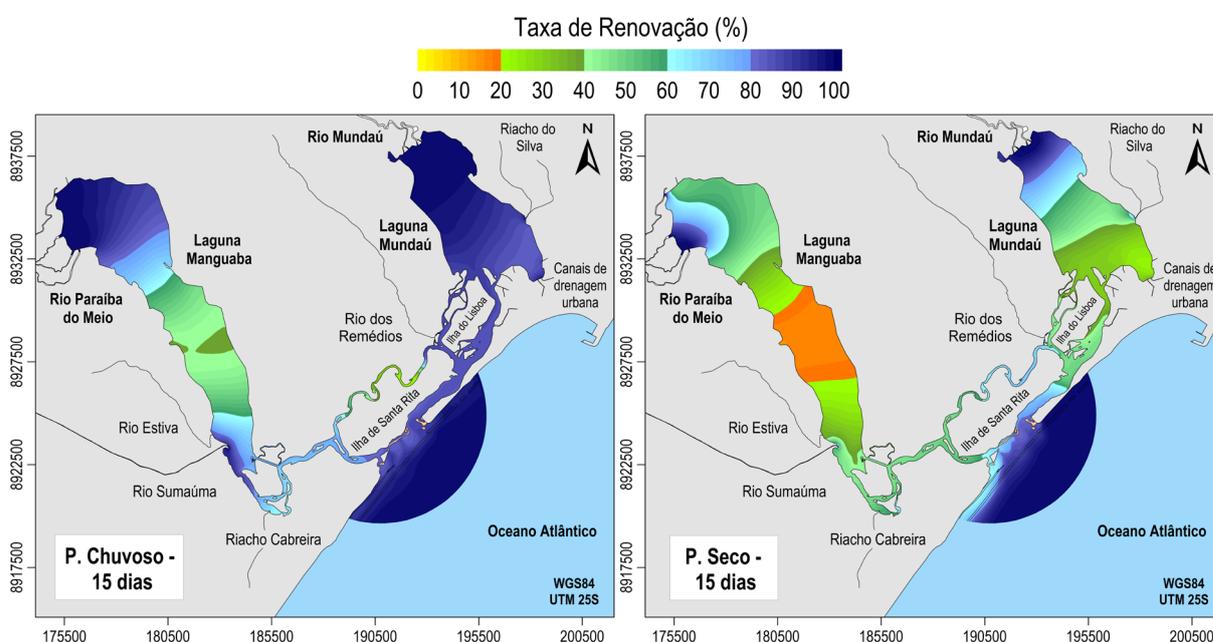


Figura 92 - Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) após 15 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.

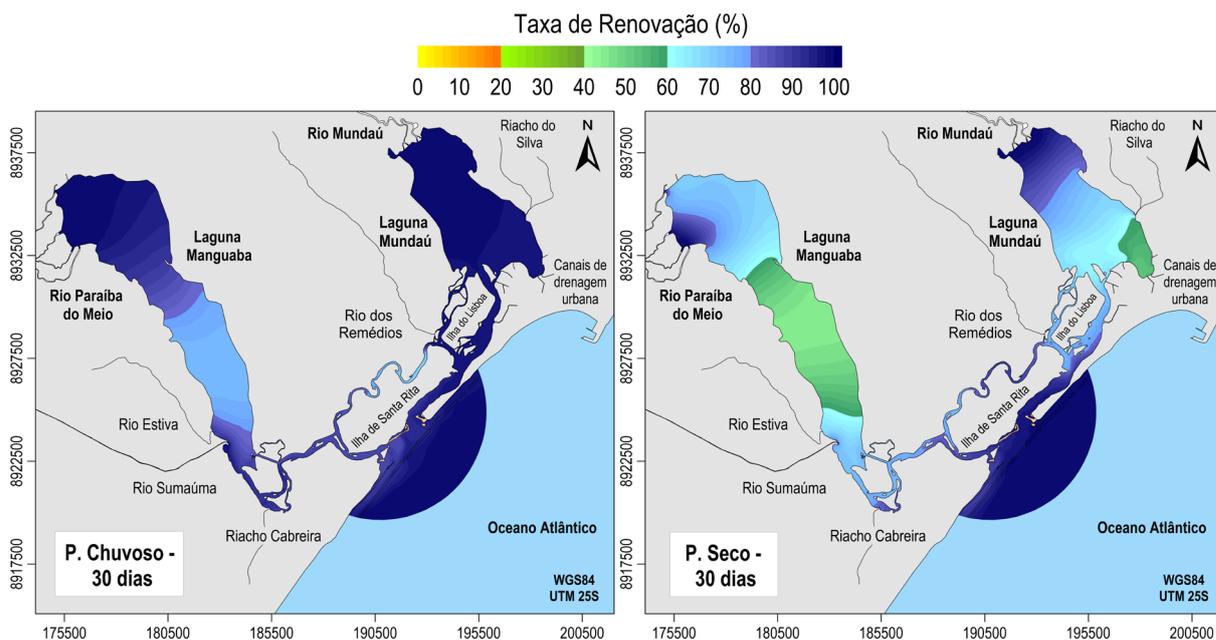


Figura 93 - Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) após 30 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.

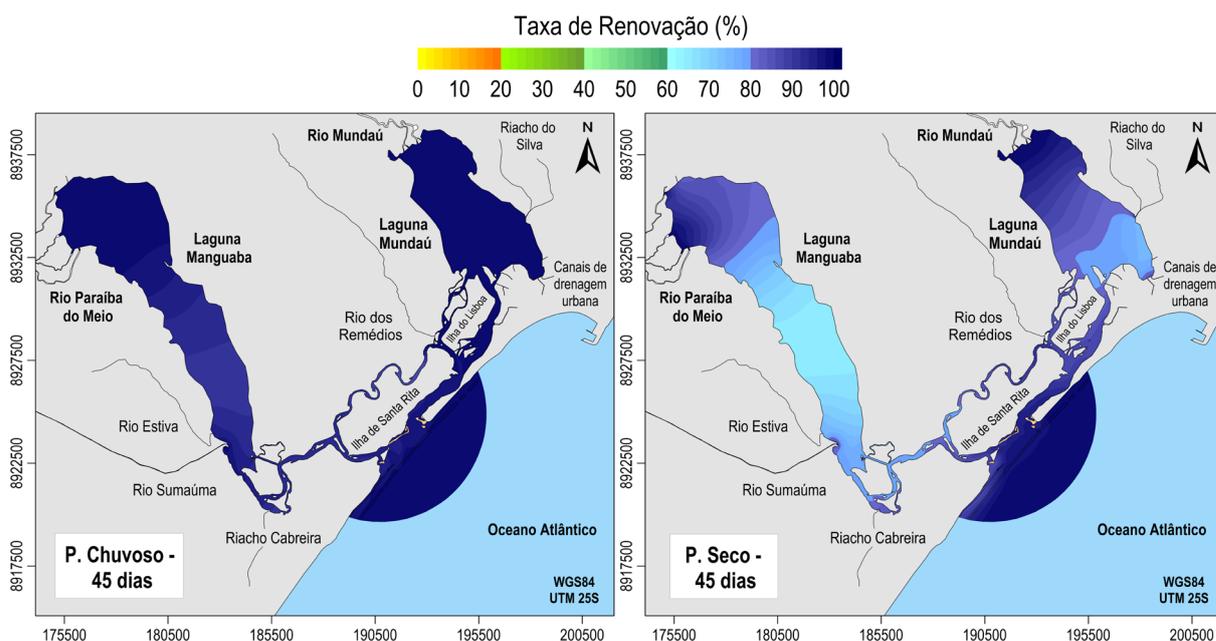


Figura 94 - Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) após 45 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.

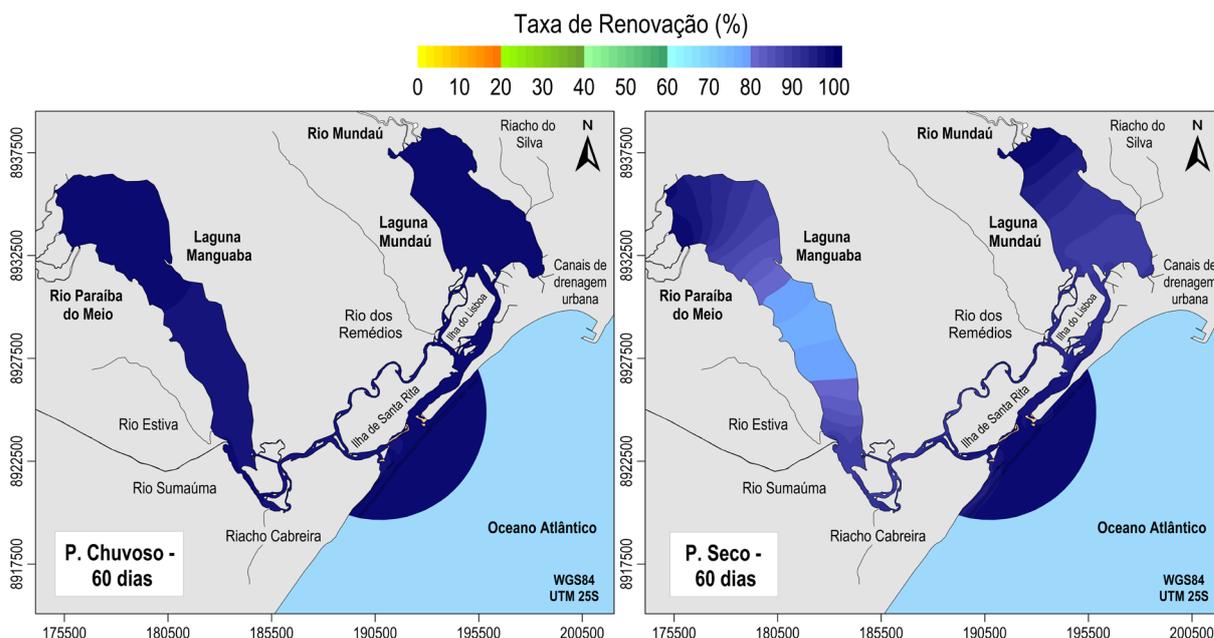


Figura 95 - Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) após 60 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.

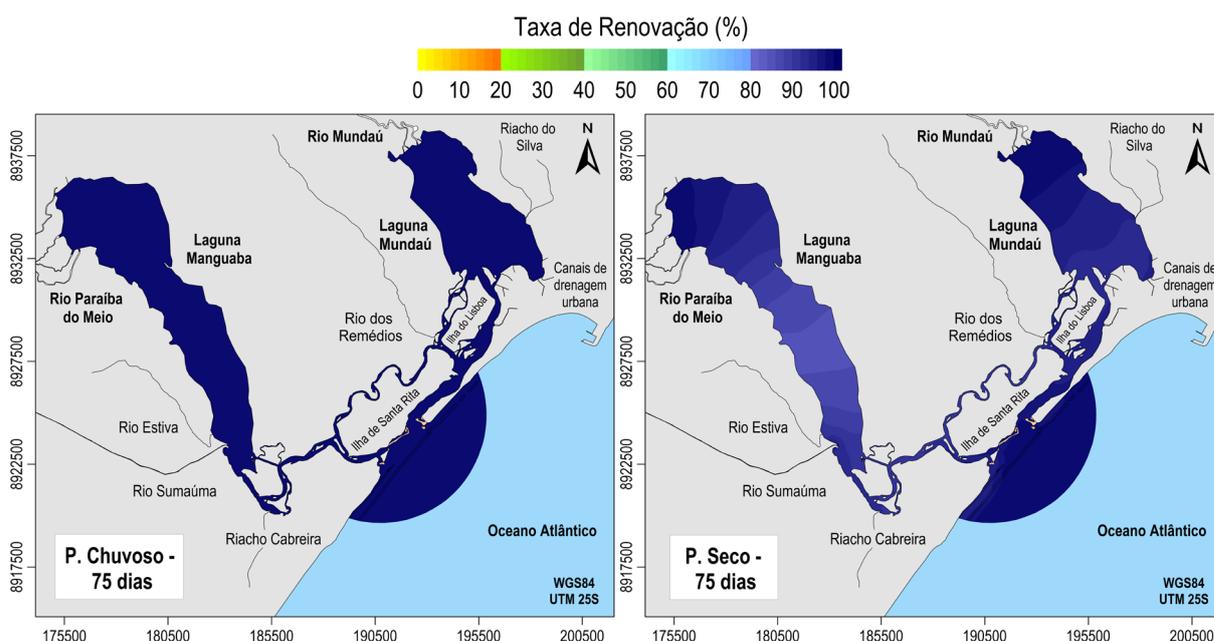


Figura 96 - Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) após 75 dias de simulação, para o período chuvoso, à esquerda, e para o período seco, à direita.

Em oposição ao cenário chuvoso, o período seco apresentou descargas fluviais consideravelmente menores, influenciando significativamente a renovação das águas. Como se percebe na Figura 90, à direita, após o primeiro dia de simulação, a $T_{R\%}$ na região norte apresentou valores mais acentuados nas áreas bem próximas à foz do rio Mundaú, alcançando $\approx 24\%$ na estação “Mu Norte”, conforme exposto na Figura 98. Após 7 dias, a $T_{R\%}$ na estação “Mu Centro” foi de $\approx 20\%$, valor médio por ciclo de maré. Mesmo o rio Mundaú apresentando vazões próximas da mínima, Q95%, percebeu-se a relevância das águas fluviais para a renovação da

área central. Nota-se que as águas salinas também são importantes para a renovação, no entanto, para que a renovação promovida pelo mar alcance o interior da laguna é necessário que antes as águas do canal de comunicação sejam parcialmente renovadas, o que demandou alguns ciclos de maré, tendo em vista que a simulação foi iniciada em maré de quadratura.

Com 15 dias, a menor $T_{R\%}$ ocorreu na região sudeste, com o valor de 23%. Este local apresenta condições propícias a desenvolver problemas de qualidade de água, pois além de ser uma região que se renova lentamente, ainda é influenciada pelas contribuições dos canais de drenagem urbana de Maceió, que promovem parte da renovação das águas dessa região. Após 30 dias, a $T_{R\%}$ na estação “Mu Centro” foi de 75%, valor médio por ciclo de maré, e foram necessários cerca de 56 dias para alcançar a $T_{R\%}$ de 90%, o mesmo valor obtido com cerca de um dia de simulação do período chuvoso. Ao final de 60 dias, a menor $T_{R\%}$ ocorreu na região sudeste, com o valor de 89%. Em síntese, a renovação no período seco foi bem mais lenta em comparação com o período chuvoso.

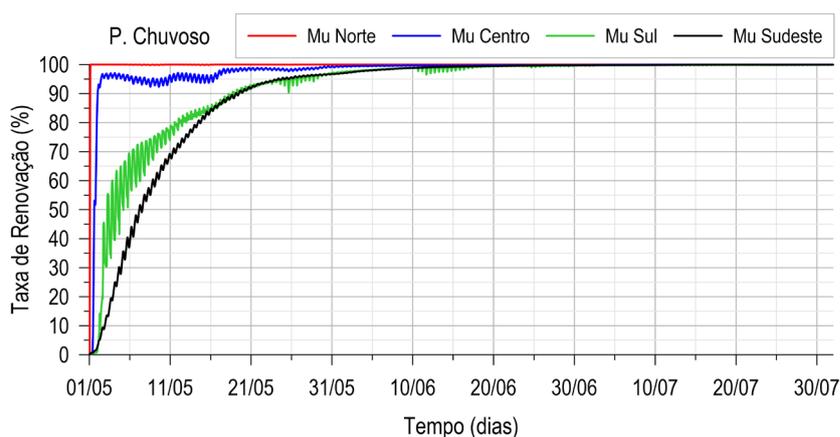


Figura 97 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.

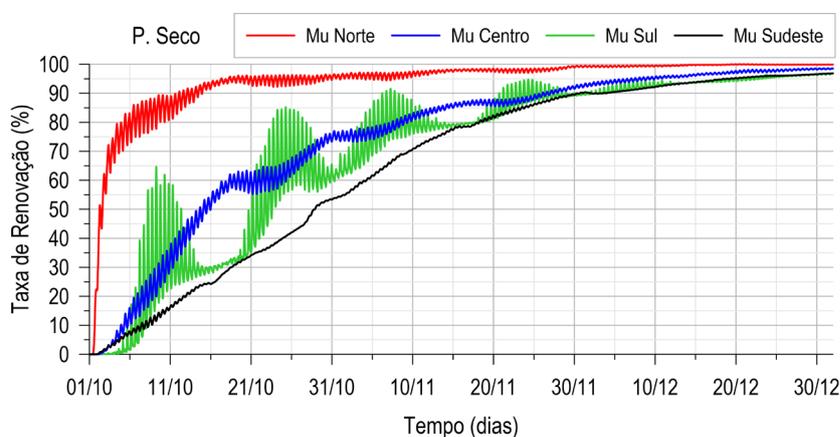


Figura 98 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.

A rápida capacidade de renovação da laguna Mundaú durante estações chuvosas também foi constatada por Lima (2017). A autora simulou a Taxa de Renovação durante o período de julho e agosto de 2014, utilizando-se de vazões médias mensais e diárias. Os valores encontrados revelaram que, após 14 dias, a laguna Mundaú atingiu renovação quase completa, considerando a média histórica de vazões. Com dados diários, foram necessárias 6 semanas para renovação completa. Larsson e Nilsson (2014) estimaram o tempo de 19 dias e 42 dias, com base no prisma maré de sizígia e quadratura, respectivamente, para renovação de 99% das águas da laguna Mundaú, em referência ao período de fevereiro de 2014. Tanto no estudo de Lima (2017) quanto neste aqui, ficou demonstrada a grande relevância do rio Mundaú para a renovação das águas desta laguna. As diferenças expressivas observadas entre os períodos chuvoso e seco corroboram com os resultados encontrados por ANA (2013) e Pinheiro (2020).

▪ **Laguna Manguaba**

Após o primeiro dia de simulação do período chuvoso, Figura 90, à esquerda, a $TR\%$ obtida na estação “Ma Norte” foi de 45%, conforme exposto na Figura 99. Devido ao formato alongado desta laguna, a região norte se encontra distante dos canais de comunicação e, por isso, suas águas são renovadas, principalmente, pelo rio Paraíba do Meio, com contribuição, em menor escala, dos canais de drenagem urbana do município de Pilar. Nesta região, maior renovação da água pode indicar também piora na qualidade de água já presente no local, caso a qualidade das águas doces afluentes seja pior do que aquelas que já se encontram no local. Após 7 dias, o valor obtido na estação “Ma Centro” foi de 26%. Nesse momento, a menor $TR\%$ ocorreu próxima à região sul, com o valor de 6%. Observou-se que o aumento nas descargas fluviais afetou negativamente a renovação da região sul, devido a uma maior atenuação das marés. Dessa forma, a estação “Ma Sul” apresentou, nesse momento, uma $TR\%$ de apenas 10%, valor médio por ciclo de maré. Além disso, a renovação foi proporcionada, em maior escala, pelo rio Sumaúma, atuando principalmente na margem oeste e nos canais de comunicação. Com 15 dias, a região próxima ao centro apresentou valores de $\approx 40\%$. Após 30 dias, obteve-se, entre a região central e sul, o mínimo de $\approx 75\%$. A título de comparação, esse foi o valor calculado na estação “Mu Centro”, no período seco, após o mesmo intervalo de tempo. Ao final de 45 dias, a $TR\%$ mínima foi de $\approx 91\%$, alcançando, após 60 dias, uma condição avançada de renovação, com valor mínimo de $\approx 97\%$.

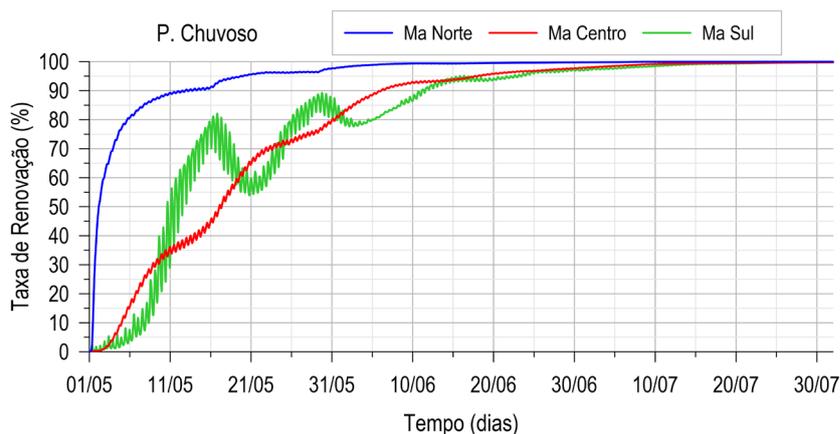


Figura 99 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.

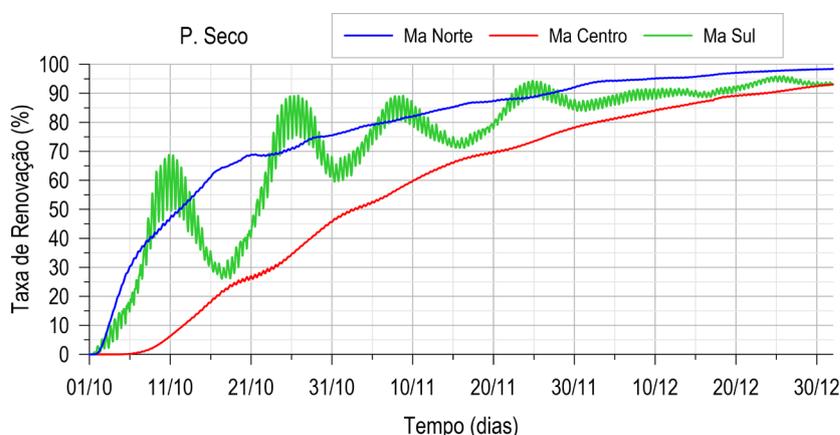


Figura 100 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.

Ao se comparar os resultados do T_R e da $T_{R\%}$, percebe-se nos resultados iniciais uma situação oposta. A região norte apresentou os T_R mais altos, no entanto, foi rapidamente renovada, enquanto a região sul da laguna apresentou T_R baixo, porém, demorou mais tempo para se renovar. Por conta do pico de descarga fluvial, as massas de água presentes entre a região central e sul foram impulsionadas em direção aos canais de comunicação, e saíram da laguna em um período curto de tempo. Essas águas foram pouco renovadas. As águas a montante da região central foram direcionadas a esta região. Com a redução das vazões, as águas presentes entre a região central e sul foram progressivamente sendo renovadas, enquanto eram direcionadas em direção aos canais de comunicação. Como apresentado, nota-se que é mais vantajoso analisar a renovação das águas sob mais de uma perspectiva, pois os resultados de cada modelo auxiliam no entendimento geral da questão.

No período seco, após o primeiro dia de simulação, Figura 90, à direita, as maiores $T_{R\%}$ ocorram nas áreas próximas à foz dos rios Paraíba do Meio e Sumaúma. Após 7 dias, a região norte se encontrava em estágio mais avançado de renovação. Na porção sul da laguna, por

influência das marés e do rio Sumaúma, a $T_R\%$ na estação “Ma Sul” foi de 37%, valor médio por ciclo de maré. Na região central, as massas d’água ainda se encontravam “isoladas”, isto é, sem contato efetivo com as águas parcialmente renovadas, de modo que, a $T_R\%$ na estação “Ma Centro” não alcançou 2%. Com 15 dias, a região próxima do centro apresentou valores variando de 16 a 18%, enquanto nas estações “Ma Norte” e “Ma Sul”, os valores eram de 61% e 35%, respectivamente, conforme exposto na Figura 100. Observa-se que, nesta última estação, já se tinha alcançado $T_R\%$ de 60%, valor médio por ciclo de maré. Mesmo após 45 dias, o centro da laguna ainda não tinha alcançado 70%. A tendência natural é que a região central demore mais a se renovar, pois é aquela mais distante das principais fontes de água “nova”, além de ser mais profunda do que as regiões norte e sul da laguna. A pouca eficiência na renovação da região central está relacionado a um índice de estado trófico mais crítico, comparado ao restante da laguna, como será discutido nas análises da IA. Após 92 dias, a menor $T_R\%$ foi observada entre as regiões central e sul da laguna, com o valor de 92%.

Segundo Lima (2017), com dados históricos de vazão do rio Paraíba do Meio foram necessários 30 dias para obter uma taxa mínima de 63%, em 94% da área laguna Manguaba. Com dados diários, mesmo após 2 meses de simulação, ainda se observou áreas com menos de 63% de renovação, o que demonstra o significativo papel das descargas fluviais para a renovação das águas desta laguna, como observado nos resultados deste estudo. Larsson e Nilsson (2014) estimaram o tempo de 97 dias e 119 dias, com base no prisma maré de sizígia e quadratura, respectivamente, para renovação de 99% das águas desta laguna, em referência ao período de fevereiro de 2014. Esses autores concluíram, assim como Pinheiro (2020), que a renovação praticamente completa da laguna Manguaba demanda um tempo bem maior para ocorrer em comparação a laguna Mundaú. Tal condição pode ser explicada, por exemplo, pela razão entre o prisma de maré médio e o volume médio calculados para a laguna Manguaba, que correspondeu a $\approx 13\%$ do valor calculado para a laguna Mundaú, como visto na seção 6.1.3.

▪ Região do Canais de Comunicação

No período chuvoso, a renovação das águas do canal de comunicação da laguna Mundaú ocorreu de forma mais rápida do que no período seco, devido à ação conjunta das marés e das grandes descargas do rio Mundaú. Por outro lado, maiores vazões do rio Paraíba do Meio ocasionaram uma renovação mais lenta no canal da laguna Manguaba. Em comparação ao período chuvoso, o período seco apresentou menores diferenças entre as $T_R\%$ dos canais de comunicação. Na região dos canais, o local em que a $T_R\%$ progrediu mais lentamente foi o trecho ao norte da Ilha de Santa Rita, conforme apresentado na Figura 101 e na Figura 102, através da estação

“Ca-2”. Como mencionado antes, as velocidades das correntes neste canal foram baixas, principalmente, no período chuvoso. Isso dificultou a renovação durante este período. Além disso, esta região recebeu parte das águas que saíram da laguna Manguaba, e que ainda se encontravam pouco renovadas, o que contribuiu para que a $T_{R\%}$ apresentasse valores menores em comparação aos outros locais da região dos canais de comunicação. Na estação “Ca-2”, após 7 dias de simulação, tanto no período chuvoso quanto no seco, a renovação ainda não tinha ultrapassado os 20%. No período chuvoso, somente após 30 dias foi possível alcançar o valor médio de 80%, o mesmo valor obtido na estação “Ma Centro”, como pode ser observado na Figura 101 e na Figura 99.

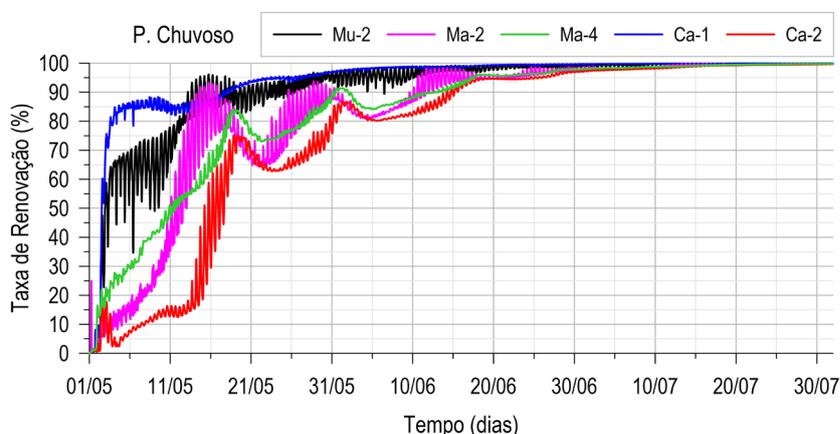


Figura 101 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) no período chuvoso, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.

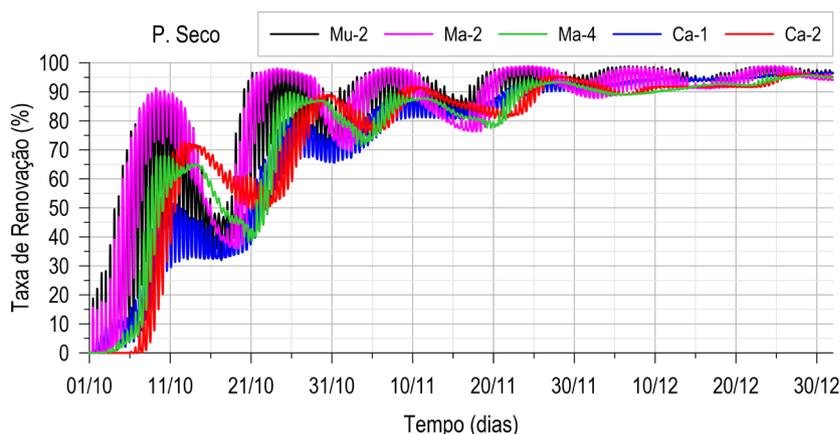


Figura 102 - Séries temporais de Taxa de Renovação ($T_{R\%}$) no período seco, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.

➤ Caracterização da Qualidade das Águas Doces Afluentes

Tendo em vista a relevância das águas doces para a renovação das águas do CELMM, apresenta-se, na Tabela 20, um resumo dos dados de qualidade de água obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), expondo o número de amostras, valores mínimos, máximos e as medianas

dos parâmetros OD, DBO₅, Nitrogênio Amoniacal, Nitrato e Fósforo Total. Observa-se que os valores desses parâmetros se encontram no Apêndice B. A partir da análise dessas informações, destaca-se o parâmetro Fósforo Total, que apresentou altas concentrações, de modo geral, bem acima dos limites da classe 3 de qualidade de águas doces, cujo concentração máxima para tributários diretos de ambiente lântico é de 0.075 mg/L, conforme disposto na Resolução CO-NAMA nº 357/2005. Deste modo, principalmente por causa deste parâmetro as águas doces afluentes poderiam ser classificadas na classe 4, a pior das cinco classes existentes. Com base na Tabela 21, que expõe a avaliação, em porcentagem, do atendimento dos dados do IMA-AL (2012, 2013, 2016) às classes de qualidade de águas doces, observou-se também que até mesmo a classe 4 não é atendida em diversos momentos, pois a concentração de OD apresentou valores inferiores a 2 mg/L, refletindo o elevado consumo de oxigênio na decomposição da matéria orgânica proveniente dos efluentes lançados. De modo geral, estes dados demonstram que os principais rios que contribuem para a renovação das águas CELMM apresentam suas águas comprometidas pela poluição, seja por efluentes domésticos, industriais, ou ainda, pela presença expressiva do nutriente fósforo, cuja uma das fontes é a utilização de fertilizantes nas áreas de cultivo.

Tabela 20 - Resumo dos dados de qualidade de água obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), disponibilizados no Apêndice B. Nota-se que a localização dos pontos de amostragem encontra-se na Figura 33. Observa-se que valores limites dos parâmetros, relativo a cada classe de qualidade, foram apresentados na Tabela 1, na seção 3.5.

Dados de Qualidade de Água - IMA-AL (2012, 2013, 2016)					
Parâmetros	Valores	Locais de Amostragem			
		R. Mundaú, ± 200 m da Foz na L. Mundaú (P1)	L. Manguaba, ± 200 m da Foz do R. Salgado e do R. Paraíba do Meio (P17 e P18)	L. Manguaba, foz do R. Sumaúma (P14)	L. Mundaú, Canal da Levada (P6) – Região sudeste da Laguna
OD (mg/L O₂)	Nº Am.	13	18	7	12
	V. Mín.	2.0	0.4	0.9	2.3
	V. Máx.	6.7	13.3	7.1	8.7
	Mediana	3.0	5.6	1.2	4.6
DBO₅ (mg/L O₂)	Nº Am.	11	17	4	11
	V. Mín.	< 2	< 2	< 2	< 2
	V. Máx.	30	14	21	16
	Mediana	2	< 2	< 2.5	< 2
Nitrogênio Amoniacal (mg/L N)	Nº Am.	11	20	10	11
	V. Mín.	0.01	0.01	0.01	0.01
	V. Máx.	0.91	0.33	0.43	0.47
	Mediana	0.07	0.05	0.04	0.05
Nitrato (mg/L N)	Nº Am.	11	20	10	11
	V. Mín.	0.11	0.1	0.09	0.19
	V. Máx.	1.06	1.31	0.99	0.76
	Mediana	0.36	0.38	0.29	0.37
Fósforo Total (mg/L P)	Nº Am.	10	18	9	10
	V. Mín.	0.09	0.15	0.11	0.08
	V. Máx.	2.55	3.10	3.28	1.99
	Mediana	0.84	0.99	0.59	0.78

Tabela 21 - Avaliação, em porcentagem, do atendimento dos dados do IMA-AL (2012, 2013, 2016) às classes de qualidade de águas doces. Observa-se que valores limites dos parâmetros, relativo a cada classe de qualidade, foram apresentados na Tabela 1, na seção 3.5.

Porcentagem de atendimento às classes de qualidade de águas doces (%)					
Parâmetros	Classes	Locais de Amostragem			
		R. Mundaú, ± 200 m da Foz na L. Mundaú (P1)	L. Manguaba, ± 200 m da Foz do R. Salgado e do R. Paraíba do Meio (P17 e P18)	L. Manguaba, foz do R. Sumaúma (P14)	L. Mundaú, Canal da Levada (P6) – Região sudeste da Laguna
OD (mg/L O ₂)	1	23	33	14	25
	2	23	53	29	33
	3	46	72	29	67
	4	92	89	43	100
DBO₅ (mg/L O ₂)	1	64	71	75	73
	2	64	71	75	82
	3	82	76	75	91
Nitrogênio Amoniacal (mg/L N)	1	100	100	100	100
	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
Nitrato (mg/L N)	1	100	100	100	100
	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
Fósforo Total (mg/L P)	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0

6.2.3 Idade da Água (I_A)

Enquanto a TR% tende ao valor de 100%, e o alcança, caso o modelo seja executado por tempo suficiente, a I_A converge para valores médios, em cada local, em função das forçantes ambientais. Desta forma, como mencionado na seção 5.4.3, a I_A representa, em média, por quanto tempo as águas de um dado local estão dentro do domínio de modelagem, e pode ser interpretada como sendo o tempo médio para renovar cerca de 50% das águas de uma determinada região. Antes de apresentar os resultados, observa-se, conforme mencionado na metodologia, que as condições iniciais para o período chuvoso foram geradas previamente, a fim de representar adequadamente as variações de I_A no início da simulação. Além disso, a I_A também foi simulada nos meses de agosto e setembro, com o propósito de gerar condições iniciais apropriadas para o período seco.

No período chuvoso, o mês de maio foi o que melhor representou uma estação chuvosa, pois as vazões médias mensais dos rios Mundaú e Paraíba do Meio foram maiores que as médias anuais. Com base nisso, a Figura 103, à esquerda, apresenta o mapa de isolinhas de I_A para os instantes de menor I_A nas estações “Mu Centro” e “Ma Centro”, no mês de maio. À direita, para os instantes de maior I_A nas lagunas, no mesmo mês. Já a Figura 104, à esquerda, se refere aos instantes de menor I_A nas estações “Mu Centro” e “Ma Centro”, no período seco. À direita, para os instantes de maior I_A nas lagunas, no mesmo período. Observa-se nos mapas, a divisão em linha tracejada, indicando que os instantes de tempo são distintos para cada laguna.

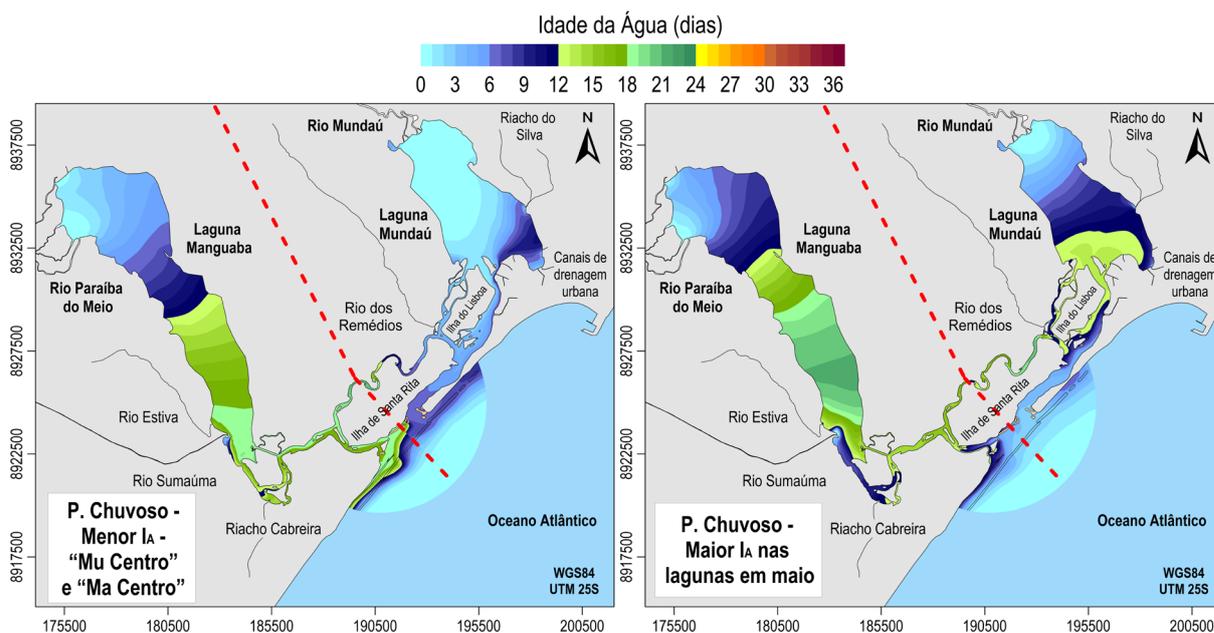


Figura 103 - Mapas de isolinhas de Idade da Água (I_A) em referência ao período chuvoso. À esquerda, para os momentos de menor I_A na estação "Mu Centro", no tempo 02/05/2018 03h00; e na estação "Ma Centro", no tempo 05/05/2018 05h00. À direita, a maior I_A em maio, na laguna Mundaú, no tempo 29/05/2018 06h00; e na laguna Manguaba, no tempo 24/05/2018 12h00.

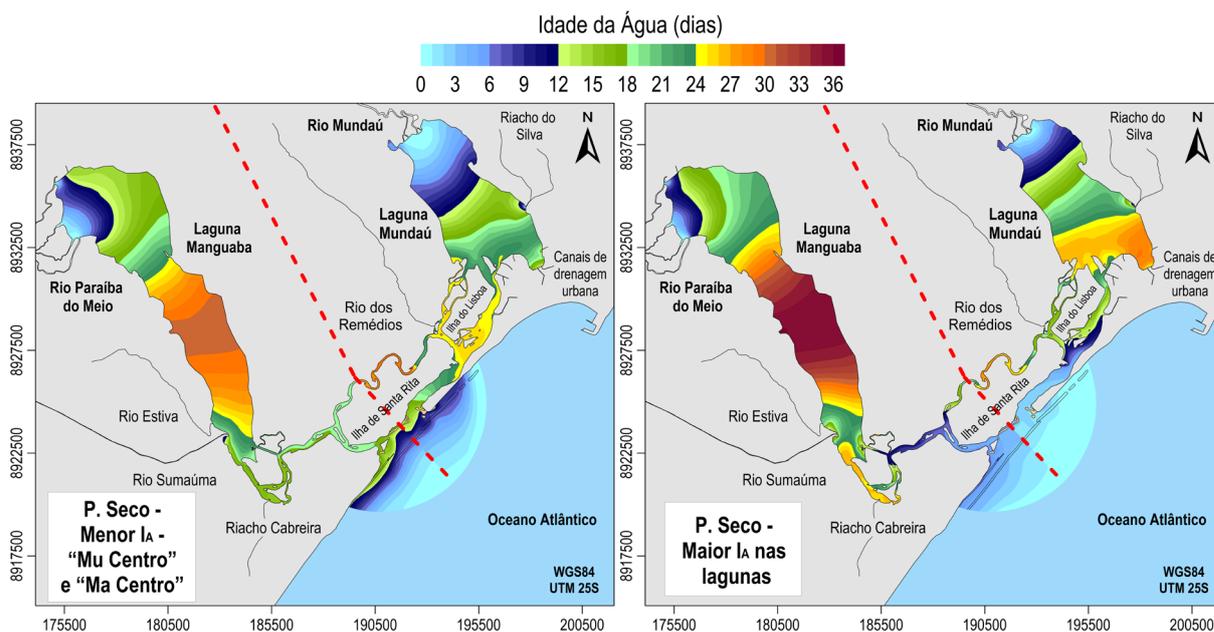


Figura 104 - Mapas de isolinhas de Idade da Água (I_A) em referência ao período seco. À esquerda, para os momentos de menor I_A na estação "Mu Centro", no tempo 22/12/2018 01h00; e na estação "Ma Centro", no tempo 02/10/2018 08h00. À direita, a maior I_A na laguna Mundaú, no tempo 22/10/2018 15h00; e na laguna Manguaba, no tempo 20/11/2018 03h00.

▪ Laguna Mundaú

No período chuvoso, a região central da laguna Mundaú foi rapidamente renovada ao longo dos primeiros dias de simulação, devido às intensas descargas do rio Mundaú. Por conta disso, a menor I_A na estação "Mu Centro" foi de 0.6 dias, conforme pode ser observado na

Figura 103, à esquerda, bem como na Figura 105, que apresenta as séries temporais de I_A nesta laguna, no respectivo período. Em maio, a I_A média na estação “Mu Centro” foi de ≈ 5 dias. Desta forma, as águas que passam por esse local, ao longo do mês de maio, estão, em média, há ≈ 5 dias circulando pelo domínio de modelagem. Pode-se dizer que em um mês com forçantes ambientais semelhantes às que ocorreram em maio, seria necessário, em média, 5 dias para renovar ao menos 50% das águas da região central.

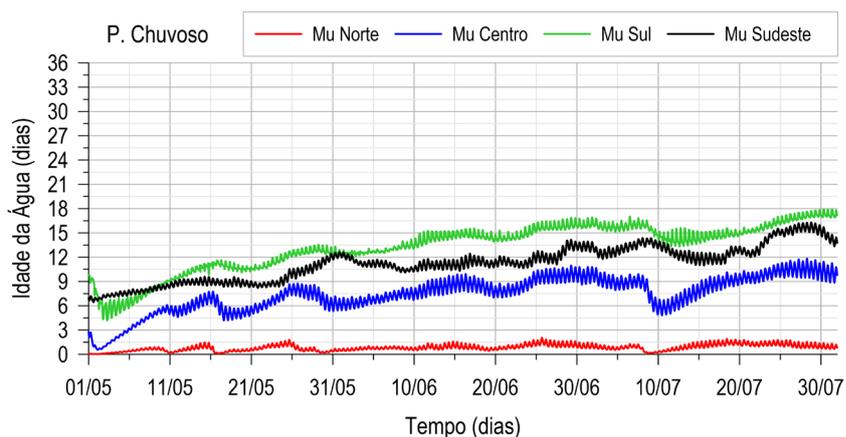


Figura 105 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.

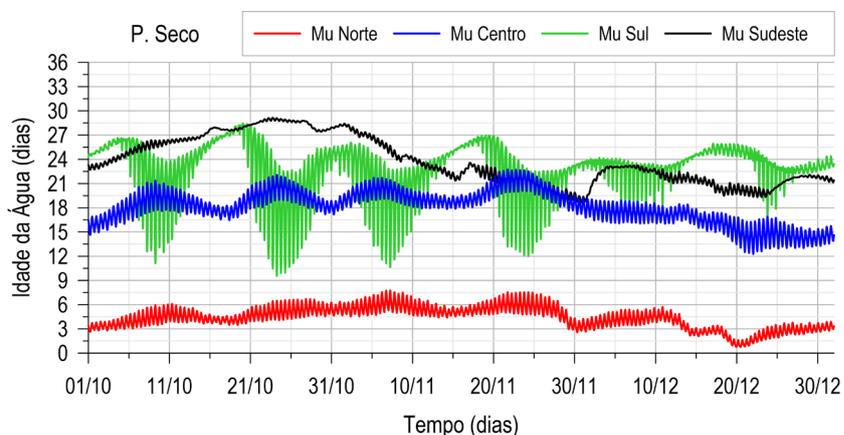


Figura 106 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.

A estação “Mu Norte” apresentou $I_A \leq 2$ dias, devido à proximidade com o rio Mundaú, que proporcionou, em pouco tempo, a renovação das águas desta região. Na região sul, assim como em parte do canal de comunicação, constatou-se I_A mais elevadas em comparação ao restante da laguna, o que significa dizer, que as águas nessas regiões estão a mais tempo circulando no domínio de modelagem. Para o mês de maio, a maior I_A na estação “Mu Sul” foi de ≈ 13 dias. Para entender os resultados, deve-se observar que as duas principais fontes de água “nova” para esta laguna são o rio Mundaú e o mar. Deste modo, as regiões próximas destas

fontes tendem a apresentar as menores I_A . Por outro lado, os locais mais distantes das fontes relevantes de água “nova” tendem a apresentar maiores I_A , pois são renovados mais lentamente. Ao longo do tempo, as águas com maior I_A transitam pela laguna e canais de comunicação, em função das marés, das descargas do rio Mundaú e dos ventos. Nesse equilíbrio dinâmico, as águas de maior I_A prevaleceram entre o sul da laguna e parte dos canais de comunicação. Observa-se que, caso existisse alguma contribuição fluvial relevante na região sul da laguna, os resultados seriam diferentes, prevalecendo baixos valores de I_A nessa região. Nota-se que a I_A na estação “Mu Sudeste” foi, de modo geral, menor do que na região sul, devido, principalmente, as vazões dos canais de drenagem urbana de Maceió.

No período seco, a menor vazão média mensal do rio Mundaú ocorreu em novembro, mesmo período em que se obteve a maior I_A na estação “Mu Centro”, como pode ser observado na Figura 106. A partir dos resultados obtidos, pode-se dizer que em um mês com forçantes ambientais semelhantes às que ocorreram em novembro, seria necessário, em média, ≈ 20 dias para renovar ao menos 50% das águas da região central. Como pode ser observado na Figura 106, a I_A na região central tende a aumentar durante os ciclos de maré de sizígia, devido a maior influência das águas vindas da região sul, que possuem maior I_A , enquanto nas marés de quadratura, tende a diminuir, por influência das águas de montante, que possuem menor I_A . Na laguna, a estação “Mu Sul” foi aquela que apresentou a maior variação de I_A , devido à influência tanto das águas vindas do mar, que proporcionaram uma I_A mínima de 9.6 dias, quanto das águas vindas da região sudeste, quando se obteve o máximo de 28.5 dias.

Na estação “Mu Norte”, ainda considerando o mês de novembro, obteve-se I_A média de 5.5 dias, indicando que, sob condições de descargas fluviais próximas da mínima, $Q_{95\%}$, esta estação foi capaz de atingir $TR_{\%}$ de 50% em pouco dias. Na região noroeste, identificada como um dos locais de maior TR nesta laguna, obteve-se uma I_A máxima de ≈ 8 dias. Embora as massas de água tenham permanecido por um longo tempo nesta região, demorou um pouco mais de uma semana para renovar pelo menos 50% das águas desta região. Na margem leste, pode-se observar a influência das águas “novas” do Riacho do Silva para a renovação da região bem rasa a montante da foz, conforme exposto na Figura 104. Esta região, portanto, tende a ser mais afetada pelos poluentes que chegam através desse Riacho.

Nas proximidades da região sudeste, local em que se predominam correntes de baixa velocidade, observou-se a ocorrência dos maiores valores de I_A nesta laguna, com o máximo de 29 dias. Isso revela que em períodos secos, semelhantes ao que foi simulado, as águas mais “velhas” no interior da laguna tendem a ocorrer nesse local. Na região sul e parte do canal de comunicação, os valores variaram consideravelmente em função, principalmente, das marés,

alternando entre a presença de águas vindas do mar, mais “jovens”, e águas vindas da região sudeste, mais “velhas”. A região identificada com os maiores valores de I_A merece atenção, devido à proximidade com a margem leste, e a influência das contribuições dos canais de drenagem urbana de Maceió, como mencionado anteriormente. Em relação às águas destes canais, pode-se dizer que elas são poluídas pela presença de esgotos sanitários, como apontado pelos dados de qualidade do IMA-AL (2012, 2013, 2016). Lira (2019) analisou a qualidade de água desses canais de drenagem urbana, e os classificou, com base no Índice de Qualidade de Água (IQA), em ruim, com valores variando de 41 a 46. Além disso, os enquadrou em classe 3 de qualidade de água, segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005. Cita-se, por exemplo, que o OD variou de 2.46 a 2.96 mg/L; a DBO_5 , de 3.10 a 4.60 mg/L; enquanto o Nitrogênio Total, de 7.98 a 8.2 mg/L; já o Fósforo Total, de 0.88 a 2.29 mg/L.

Antes de dicutir os resultados para a laguna Manguaba, é relevante relacionar alguns aspectos do T_R com os da I_A . Enquanto o T_R se refere ao tempo necessário para que as parcelas de massas de água, independentemente de sua $T_{R\%}$, atravessem ou não a seção de controle do domínio de interesse, a I_A engloba a renovação da água ao longo do tempo, indicando, em média, por quanto tempo as águas estão dentro do domínio de modelagem. Por exemplo, as massas de água que iniciaram a simulação do período seco na posição localizada à frente da foz do Riacho do Silva, apresentaram T_R de ≈ 80 dias. Nesses 80 dias, as forçantes ambientais promoveram a mistura e a renovação dessas massas de águas, alcançando, por exemplo, ao final de 30 dias, uma $T_{R\%}$ acima de 50%. A I_A fornece resultados que permitem determinar, ao longo da simulação, o tempo necessário para renovar as massas de água que tendem a permanecer por mais tempo no interior das lagunas.

▪ **Laguna Manguaba**

Na laguna Manguaba, a menor I_A na estação “Ma Norte” foi de ≈ 2 dias, e ocorreu no segundo dia de simulação do período chuvoso. Na mesma estação, a I_A média, referente ao mês de maio, foi de ≈ 5 dias. Nota-se que as vazões médias mensais do rio Paraíba do Meio, no período chuvoso, estiveram abaixo das médias históricas, resultando em maiores I_A . Na região norte, na margem leste, concentraram-se as massas de água de maior T_R , com valores acima de 80 dias. Por meio da I_A , pode-se dizer, porém, que as águas presentes nesta margem estiveram no domínio de modelagem por ≈ 9 dias durante o mês de maio.

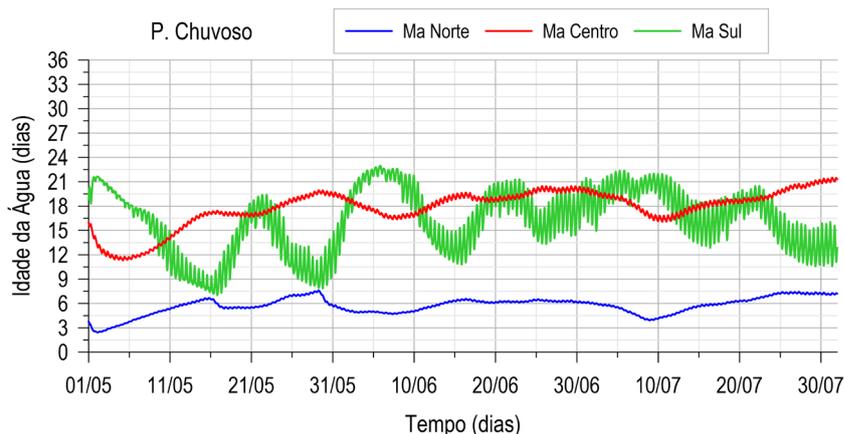


Figura 107 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período chuvoso, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.

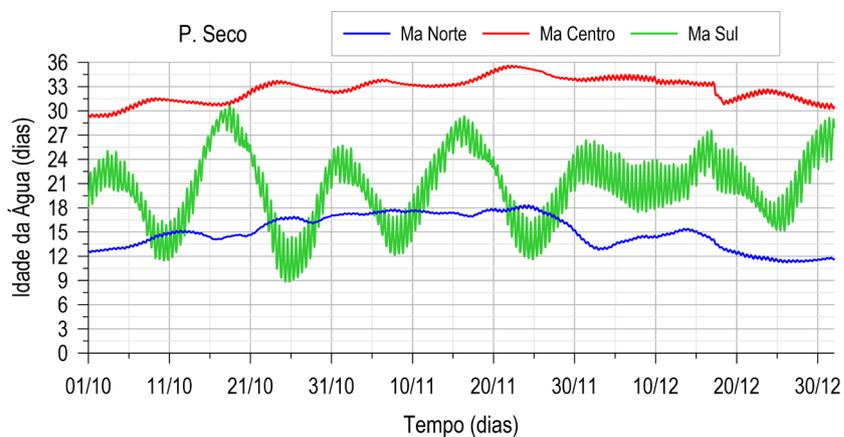


Figura 108 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Manguaba.

Na estação “Ma Centro”, ainda se referindo ao mês de maio, a I_A média foi de ≈ 16 dias. Através da Figura 107, observa-se claramente a redução da I_A nos primeiros dias de simulação. A menor I_A obtida nesta estação foi de ≈ 11 dias, e ocorreu 4 dias após o pico de descarga do rio Paraíba do Meio. Como pode ser visualizado na Figura 103, à direita, as águas mais “velhas”, durante o mês de maio, concentraram-se entre a região central e sul, especialmente, na margem leste, com uma I_A máxima de ≈ 22 dias. Esse resultado é coerente, pois as correntes residuais, durante a estação chuvosa, são de norte para o sul, o que significa dizer, que as águas da região norte são mais “jovens”, enquanto aquelas entre a região central e sul, são as mais “velhas”. Na estação “Ma Sul”, os valores variaram significativamente ao longo da simulação, em função, principalmente, das descargas fluviais e das marés. Nesta estação, de modo geral, as maiores I_A ocorreram nas vazantes dos ciclos de maré de quadratura, com a maior presença de águas mais “velhas” vindas de montante. As menores I_A foram observadas nas enchentes dos ciclos de maré de sizígia, com a presença de águas mais “jovens” provenientes, principalmente, do rio Sumaúma, mas também do mar.

No período seco, a estação “Ma Centro” apresentou I_A máxima de ≈ 36 dias. Isso significa, que é nas proximidades dessa região que predominaram as águas mais “velhas”, considerando todo o CELMM, como pode ser observado na Figura 104, à direita. Nota-se que não se trata necessariamente da residência das águas nessa região, mas sim, que ao passarem por este local, em um dado instante, as águas já se encontram dentro do domínio de modelagem por, em média, ≈ 36 dias. Cita-se, ainda, que para forçantes ambientais semelhantes às que ocorreram em novembro, seria necessário um pouco mais de 1 mês para renovar ao menos 50% das águas da região central. Por apresentar as maiores I_A , esta região merece atenção, principalmente, a margem oeste, que pode ser influenciada por cargas poluidoras provenientes tanto de montante quanto de jusante. Portanto, este é um local no qual se recomenda o monitoramento da qualidade de água. Na estação “Ma Norte”, a I_A máxima foi de ≈ 18 dias. Este valor foi próximo do dobro do valor máximo alcançado no período chuvoso, demonstrando como a redução das descargas fluviais afetou consideravelmente a renovação das águas da região norte. Na parte sul, os valores variaram consideravelmente ao longo do tempo, pelas razões explicadas anteriormente, com exceção de que as águas mais “jovens”, neste período, são, em sua maioria, provenientes do mar. Com isso, é possível inferir que uma melhor qualidade de água tende a ocorrer na presença de águas mais “jovens”, enquanto o contrário, tende a ocorrer na presença de águas mais “velhas”.

Pinheiro et al. (2021), com base em Pinheiro (2021), observaram que a região sudeste da laguna Mundaú, tanto em relação ao período chuvoso quanto ao seco, apresentou as maiores I_A nesta laguna. No período chuvoso, com valores um pouco acima de 30 dias, enquanto no período seco, um pouco maiores que 40 dias. Em relação à laguna Manguaba, no período chuvoso, as maiores I_A ocorreram na região sul, com ≈ 52 dias, enquanto no período seco, entre a região central e sul, com 71 dias. Destaca-se alguns fatores que ajudam a explicar os valores mais elevados encontrados nesses estudos. Os autores admitiram uma extensa área de fronteira aberta, no entanto, não foram consideradas as correntes costeiras, o que claramente influenciou nos resultados, pois as águas que saíram do CELMM não foram direcionadas ao longo da costa, mas tenderam a retornar para os canais de comunicação/lagunas. Além disso, na laguna Manguaba, a maior atenuação das marés em comparação aos valores medidos, em associação com a desconsideração do rio Sumaúma, provocaram I_A mais altas na região sul.

▪ Região do Canais de Comunicação

Na região dos canais de comunicação, a faixa de variação da I_A foi maior no período seco do que no chuvoso, como pode ser observado nas séries temporais de I_A expostas na Figura 109

e na Figura 110. Isso ocorreu devido ao maior gradiente de I_A entre as águas das lagoas e do mar, conforme exposto nos mapas apresentados anteriormente. No período chuvoso, por exemplo, o efeito da intensa descarga do rio Mundaú foi percebido nas estações “Ca-1” e “Mu-2”. Nesta última, que se encontra a 12.3 km da foz do rio, o valor de I_A foi um pouco inferior a 3.5 dias, enquanto na estação “Ca-1”, obteve-se I_A de ≈ 2 dias, o menor valor nesta estação. Os resultados do período seco indicaram com mais clareza que as maiores I_A ocorreram nos ciclos de maré de quadratura, em razão da maior influência das águas que saíram do interior das lagoas. Na estação “Ma-2”, por exemplo, a I_A máxima foi de ≈ 28 dias, por causa da passagem das águas “velhas” provenientes da laguna Manguaba. Nos ciclos maré de sizígia, no entanto, ocorreram os menores valores. Na mesma estação, a I_A mínima no período seco foi de ≈ 2 dias, ocasionado pela presença das águas vindas do mar.

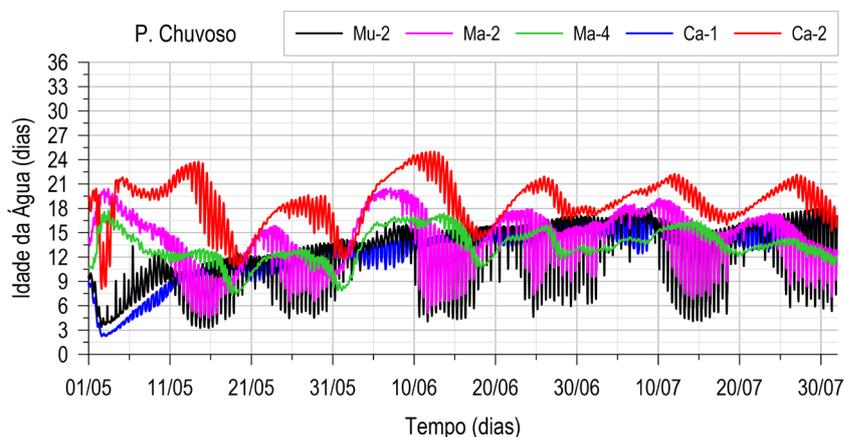


Figura 109 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período chuvoso, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.

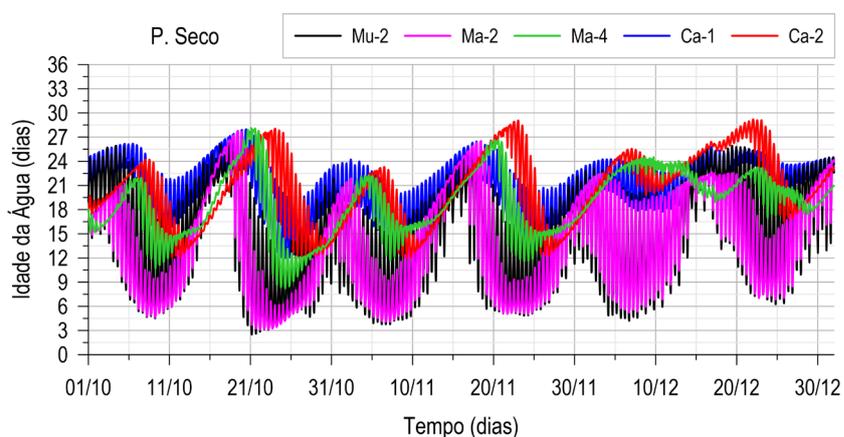


Figura 110 - Séries temporais de Idade da Água (I_A) no período seco, referentes às estações localizadas nos canais de comunicação.

Da mesma forma como destacado nas análises da $TR\%$, cita-se também a I_A na estação “Ca-2”, localizada no canal ao norte da Ilha de Santa Rita. Nesta região, a renovação das águas ocorreu mais lentamente em comparação aos outros locais da região dos canais de comunicação,

como já comentado anteriormente. Menciona-se também a influência das águas da laguna Manguaba nesta região. Uma parcela das águas “velhas” que saíram desta laguna foi direcionada para este canal, aumentando ainda mais os valores de I_A . Por conta disso, na estação “Ca-2”, o valor máximo, no período chuvoso, foi igual a 25 dias, enquanto no período seco, ≈ 29 dias, o mesmo valor alcançado na região sudeste da laguna Mundaú.

6.2.3.1 A Idade da Água (I_A) e o Índice de Estado Trófico

De modo geral, com base em ANA (2006) e Cotovicz Jr. et al. (2012), o aporte de efluentes domésticos e industriais é menor na laguna Manguaba em comparação com a laguna Mundaú. No entanto, pela circulação hidrodinâmica da laguna Manguaba, esta laguna tende a acumular mais poluentes do que a laguna Mundaú. Como resultado, a laguna Manguaba possui um alto índice de estado trófico. Melo-Magalhães et al. (2009) constataram, em um período seco, estado eutrófico nas regiões norte e sul da laguna Manguaba, enquanto na região central, estado hipertrófico, com base nas concentrações de clorofila *a* e fósforo total. No período chuvoso, observou-se estado eutrófico apenas na região sul. Na laguna Mundaú, todas as estações apresentaram estado hipertrófico, em ambos os períodos. Pelos resultados dos autores, pode-se interpretar que as regiões com maior densidade total de fitoplâncton (cél./L) – na laguna Manguaba, nas proximidades da região central, e na laguna Mundaú, a região sudeste – foram as mesmas que apresentaram os maiores valores de I_A , indicando que a I_A auxilia na identificação das regiões mais propícias a estados tróficos mais críticos.

A correlação positiva entre as áreas que apresentam maiores I_A e estados tróficos mais críticos também pode ser estabelecida a partir do estudo de Lins et al. (2018). Neste, os autores empregaram técnicas de sensoriamento remoto, em conjunto com dados medidos de refletância e clorofila *a*, para estimar a variabilidade espaço-temporal da clorofila *a*, bem como do estado trófico do CELMM, no período de 2002 a 2016. Observou-se que o estado trófico da laguna Mundaú variou entre mesotrófico e supertrófico, com predominância anual do estado eutrófico. Constatou-se ainda que a região localizada entre o centro da laguna e seus canais de comunicação apresentou, de modo geral, as maiores concentrações médias de clorofila *a* e, por isso, foi aquela que teve maior porcentagem temporal no estado supertrófico. Na laguna Manguaba, a situação foi mais crítica, com o estado trófico variando de eutrófico a hipertrófico. As maiores concentrações médias de clorofila *a* ocorreram na região entre o centro e o sul da laguna, na qual se obteve maior porcentagem temporal no estado hipertrófico. Em contrapartida, constatou-se na região norte, as menores concentrações médias e a predominância do estado eutrófico. Com base nessas informações, pode-se dizer que a I_A mostrou ser, por meio deste estudo, um

THC capaz de fornecer resultados mais significativos quanto à mistura e a renovação das massas de água, em diferentes setores das lagunas, além de indicar as regiões com maior possibilidade de apresentarem estados tróficos mais críticas. Deste modo, recomenda-se a sua aplicação nas futuras análises de THC.

Em síntese, com base nos resultados obtidos e nos estudos de Lima (2017), ANA (2013), Pinheiro et al. (2021), entre outros, pode-se dizer que os períodos chuvosos, com a recorrência de grandes descargas fluviais, proporcionam a renovação e a exportação das massas de água em um tempo bem menor em comparação aos períodos secos. Assim como os rios auxiliam na exportação de poluentes presentes nas lagunas, eles também os introduzem, de forma que, ao longo do tempo, não há uma melhoria efetiva da qualidade, com base em Lins (2017), quando cita: “Durante o período de monitoramento por satélite (2002 a 2016), não se observou uma tendência de mudança do estado trófico do CELMM, indicando que existe certa resiliência do sistema e uma condição de estabilidade”. Portanto, é importante reduzir o aporte de poluição provenientes das bacias hidrográficas, a fim de se alcançar uma melhor de qualidade de água nos rios e nas lagunas. No que se refere à laguna Manguaba, considerando a tendência de acúmulo de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (COSTA et al., 2010, COTOVICZ Jr. et al., 2012; LINS, 2017), seria benéfico aumentar as trocas de água com o mar, auxiliando na exportação desses constituintes. Tal aumento poderia ser feito com dragagem, desobstruindo os canais de comunicação da laguna com o mar.

6.3 Análises dos Modelos de Salinidade

Com o intuito de retratar a mistura de águas doces e salinas ao longo do espaço e do tempo, esta seção apresenta os resultados das simulações de salinidade, por meio da exposição de mapas de isolinhas de salinidade, como também gráficos de séries temporais para algumas estações selecionadas.

➤ Período Chuvoso

Conforme apresentado na seção 5.5.1, realizou-se uma pré-modelagem durante os 30 dias que antecederam o início do período chuvoso. Ao final dessa simulação, obteve-se a condição inicial para o período chuvoso, apresentada na Figura 111. Nota-se que nesse momento o sistema lagunar encontra-se em condição de maré vazante. Em consequência do aumento acentuado nas vazões do rio Mundaú, observou-se que a laguna Mundaú mudou de um ambiente salobro para doce em mais da metade de sua área. A estação “Mu Centro” registrou, nesse momento, 0.4 ups, enquanto a estação “Mu Sul”, 1.2 ups, conforme apresentado na Figura 112, que retrata os últimos 10 dias de simulação da pré-modelagem do período chuvoso. Na laguna

Manguaba, a salinidade da região central reduziu-se gradualmente, por conta do menor aporte fluvial, além do maior volume de água presente nesta laguna. Ao final da pré-modelagem, o valor obtido na estação “Ma Centro” foi de 1.2 ups, conforme apresentado na Figura 113. Em resumo, a salinidade ficou abaixo de 5 ups nas lagunas e canais de comunicação.

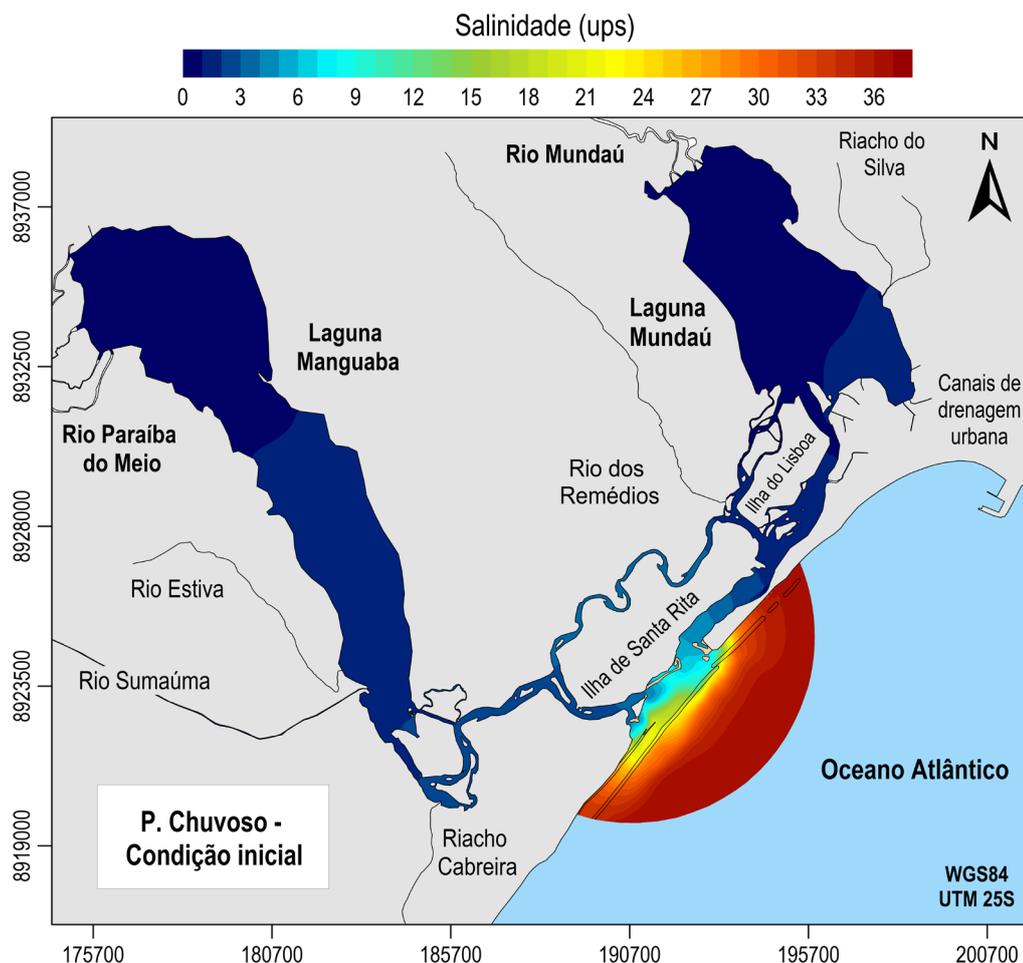


Figura 111 - Isolinhas de salinidade ao final da pré-modelagem do período chuvoso, correspondente a condição inicial do período chuvoso, no instante de tempo 01/05/2018 00h00.

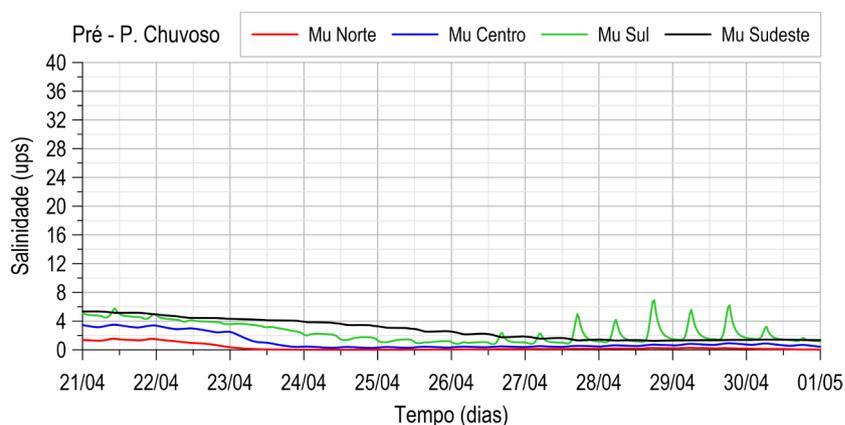


Figura 112 - Séries temporais de salinidade nos últimos 10 dias de simulação da pré-modelagem do período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Mundaú.

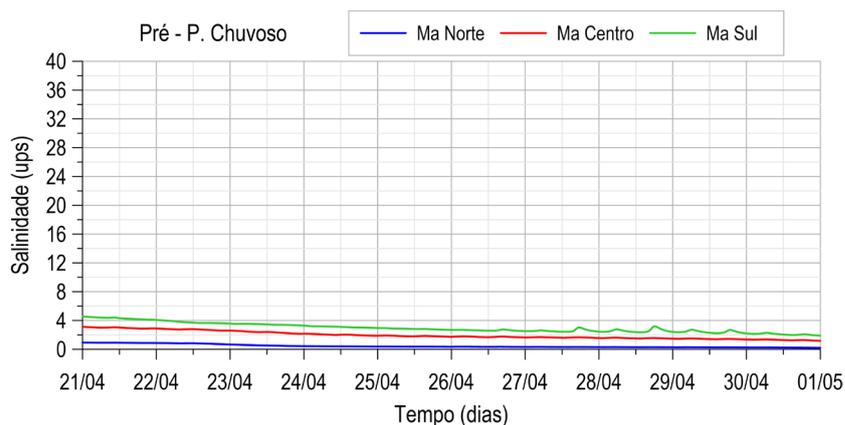


Figura 113 - Séries temporais de salinidade nos últimos 10 dias de simulação da pré-modelagem do período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.

Ao longo do período chuvoso, observou-se a permanência de baixos valores de salinidade na região central da laguna Mundaú, e os maiores valores ocorrendo na região sul. Na estação “Mu Centro”, em referência ao mês de maio, obteve-se o valor mínimo de 0.02 ups, máximo de 0.95 ups, e ocorrência temporal de 47% de águas com salinidade menor ou igual a 0.5 ups, ou seja, águas doces, segundo a classificação da Resolução CONAMA nº 357/2005. Considerando todo o período chuvoso, a salinidade na estação “Mu Centro” ficou abaixo de 1.6 ups. A Figura 114 apresenta as séries temporais de salinidade nas estações “Mu Norte”, “Mu Centro”, “Mu Sul” e “Mu Sudeste”. A Figura 115 se refere às estações “Mu-1”, “Mu-2” e “Mu-3”, localizadas no canal de comunicação.

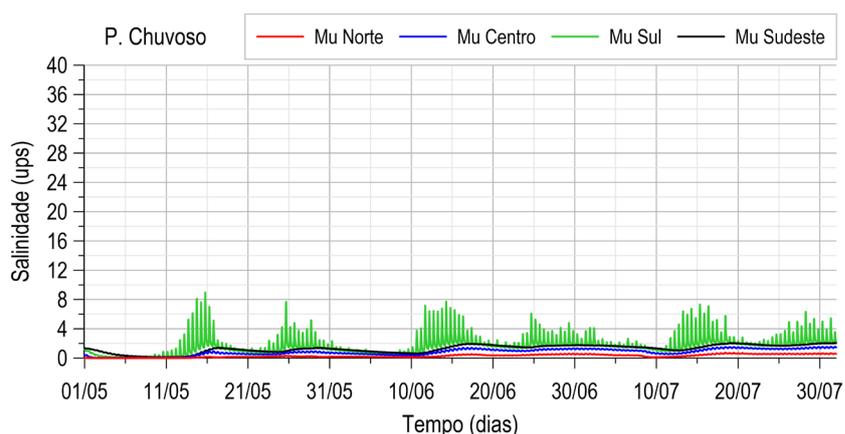


Figura 114 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Mundaú.

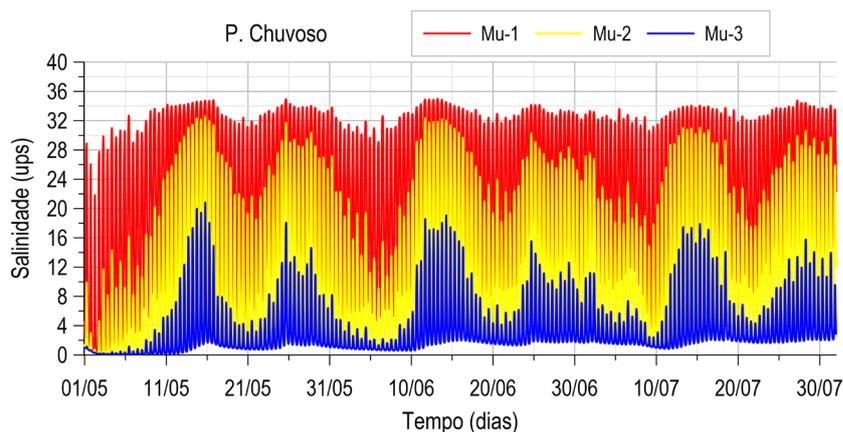


Figura 115 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Mundaú.

Destaca-se as principais razões pelas quais a salinidade se manteve baixa nesta laguna ao longo da simulação. A primeira devido à ocorrência de outros picos de descarga fluvial, que foram, no entanto, inferiores ao ocorrido no primeiro dia. A segunda, em virtude da excursão da maré, isto é, a distância percorrida pelas massas de água durante as marés enchentes. Devido às dimensões do principal canal de comunicação, em associação com as velocidades e duração das enchentes, a presença de águas mais salinas ficou restrita à região sul da laguna. Em decorrência disso, a estação “Mu Sul” registrou, nesse período, a salinidade máxima de ≈ 9 ups, conforme exposto na Figura 116. Por fim, as correntes residuais foram mais intensas durante o período chuvoso e, em sua grande maioria, direcionadas aos canais de comunicação, se opondo à intrusão salina. Nota-se que o valor máximo obtido na estação “Mu-3”, mais próxima a esta laguna, foi de ≈ 21 ups.

Em referência à laguna Manguaba, as estações “Ma Norte” e “Ma Centro” apresentaram valores inferiores a 1.2 ups. Observa-se que nos meses de junho e julho prevaleceram águas doces nessas regiões. Em razão da forte atenuação das marés, apenas a parte sul apresentou valores mais elevados, alcançando o máximo de 6.7 ups na estação “Ma Sul”. Na estação “Ma-3”, mais próxima a esta laguna, o valor máximo foi de ≈ 30 ups, e o mínimo de ≈ 0.3 ups. A Figura 117 apresenta as séries temporais de salinidade nas estações “Ma Norte”, “Ma Centro” e “Ma Sul”. A Figura 118 se refere às estações “Ma-1”, “Ma-2” e “Ma-3”, localizadas no canal de comunicação.

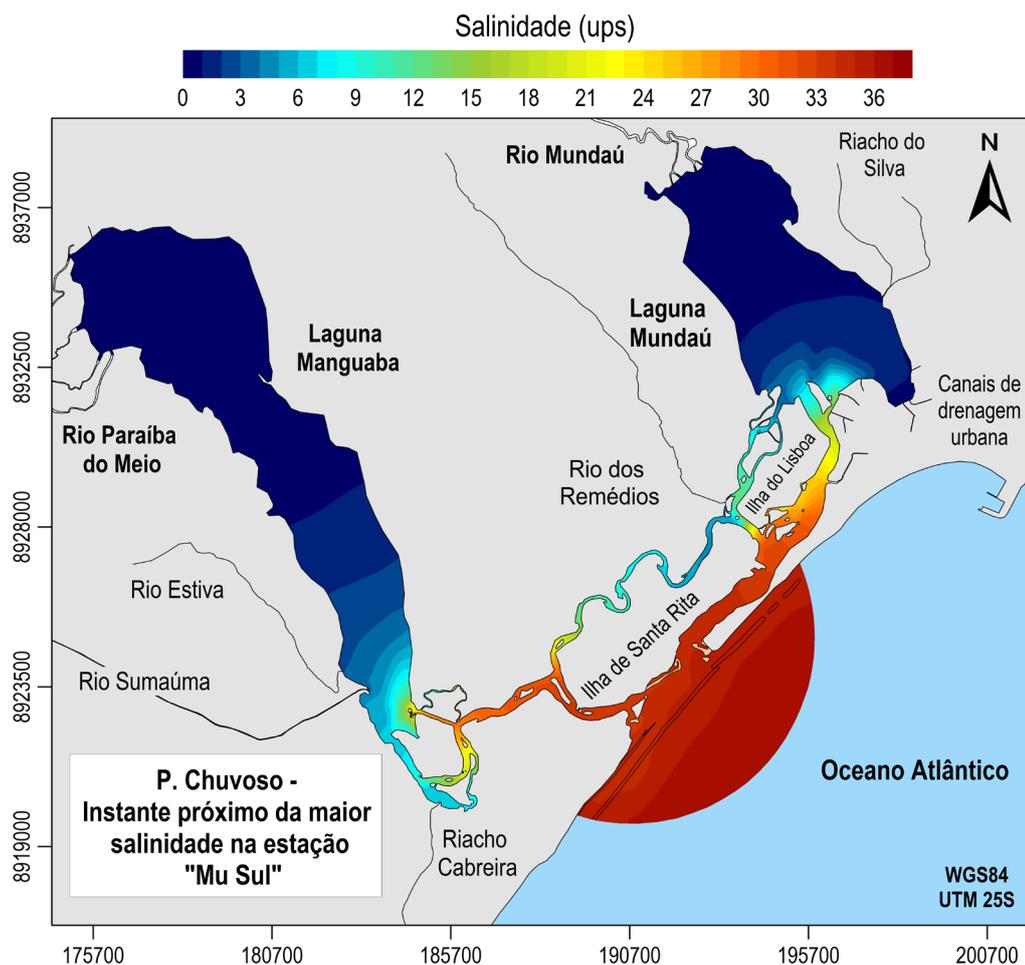


Figura 116 - Isolinhas de salinidade no instante de tempo 15/05/2018 18h00, correspondente ao instante de tempo próximo no qual se obteve a maior salinidade na estação "Mu Sul".

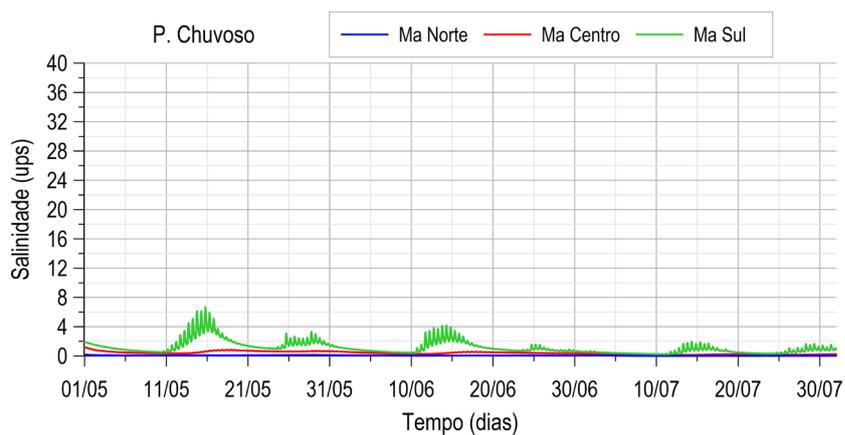


Figura 117 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.

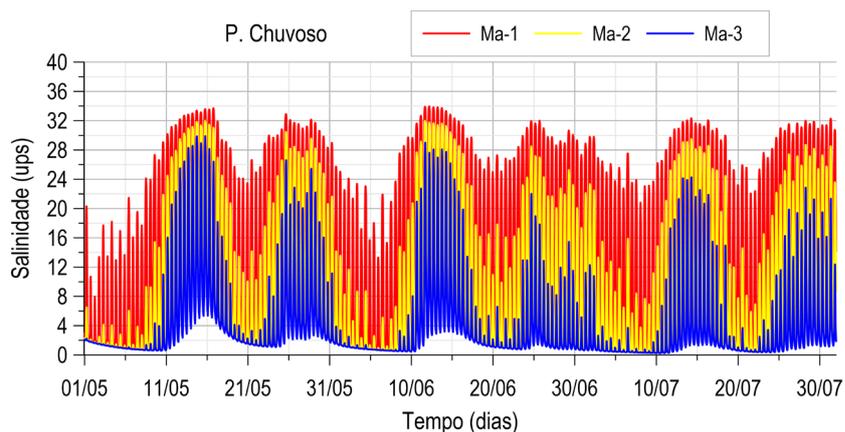


Figura 118 - Séries temporais de salinidade no período chuvoso, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Manguaba.

A fim de sintetizar os resultados obtidos, apresenta-se, na Figura 119, o mapa de isolinhas de ocorrência, em porcentagem, de águas salobras, isto é, com salinidade superior a 0.5 ups e inferior a 30 ups. No mapa, as regiões na cor azul escuro indicam a ocorrência de 100% de águas doces ou então salinas.

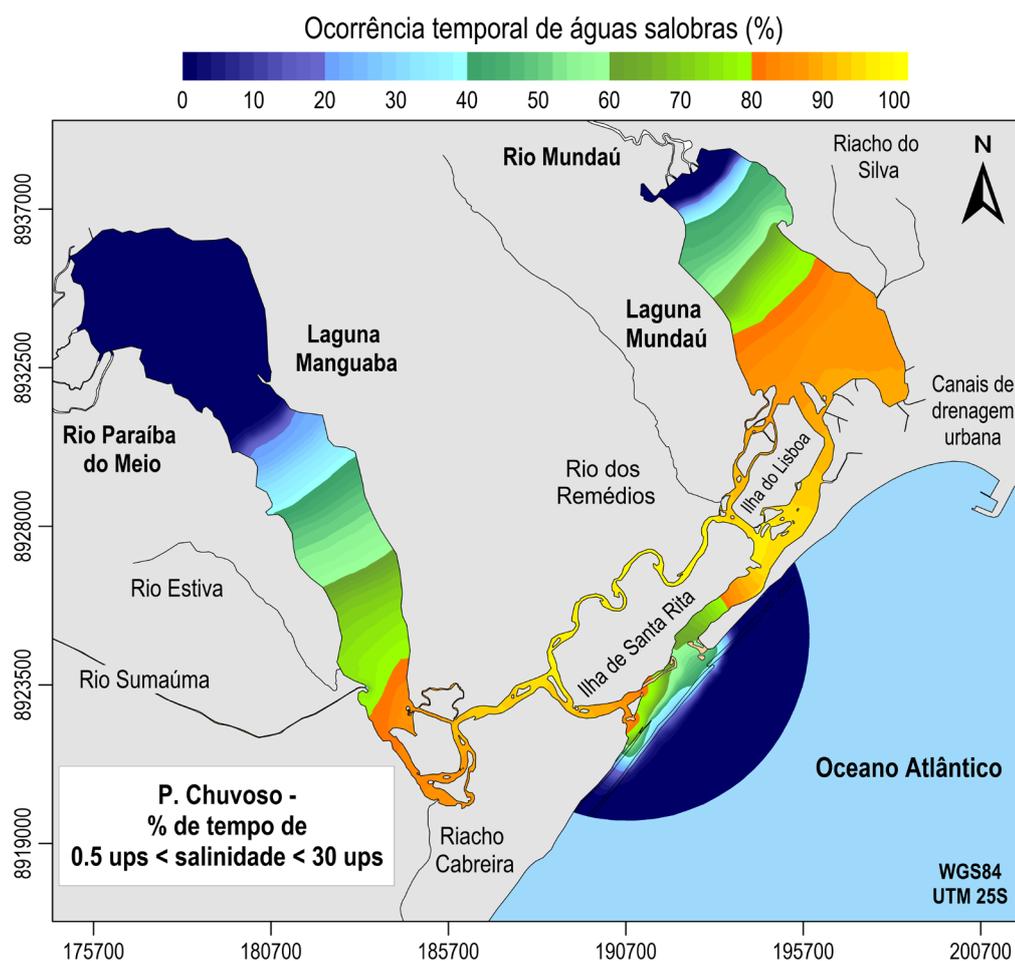


Figura 119 - Isolinhas de ocorrência temporal de águas salobras, isto é, com salinidade superior a 0.5 ups e inferior a 30 ups, em referência ao período chuvoso, de 01/05/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00. As regiões na cor azul escuro indicam que, em 100% do tempo, prevaleceram águas doces ou então salinas.

A partir desses resultados, pode-se dizer que a estação “Mu Centro” apresentou valor de $\approx 78\%$, ou seja, em cerca de 22% do tempo predominaram águas doces. Na laguna Manguaba, as estações “Ma Centro” e “Ma Sul” apresentaram valores baixos de salinidade, porém, acima de 0.5 ups em 30% e 80% do tempo, respectivamente. Observa-se ainda o efeito que as descargas fluviais causaram na salinidade da embocadura. Nesta região, as águas salobras foram mais frequentes do que as salinas. Percebe-se também que, por efeito das correntes costeiras de deriva, as águas que deixaram as lagunas foram direcionadas preferencialmente para sudoeste.

Os resultados obtidos estão de acordo com as informações apresentadas no referencial teórico, a respeito da ocorrência de salinidade próxima de 0 ups na laguna Mundaú (OLIVEIRA e KJERFVE, 1993; SILVA, 2009). Cotovicz Jr (2012) e Costa et al. (2010) mencionam que em períodos chuvosos foram observadas condições de água doce a oligohalina (0.5 a 5 ups) na laguna Manguaba, e condições variando de água doce a mesohalina (5 a 18 ups) na laguna Mundaú. Costa et al. (2010) detalham ainda a média e o desvio padrão dos valores, tendo como referência o mês de agosto de 2006. Segundo estes, a laguna Mundaú apresentou salinidade de 2.66 ± 2.57 ups, enquanto a laguna Manguaba, 0.15 ± 0.03 ups, e os canais de comunicação, 11.2 ± 5.60 ups. Valores baixos de salinidade também foram observados pelo IMA-AL (2012, 2013, 2016), conforme será exposto na Tabela 22, na discussão dos resultados para o período seco. Com base nos dados do IMA-AL, relativo ao mês de julho de 2012, pode-se dizer que a média dos valores obtidos na laguna Mundaú foi igual a 0.7 ups; enquanto na laguna Manguaba, 1.5 ups; já nos canais de comunicação, 13.4 ups.

Uma consequência ambiental e social da redução da salinidade na laguna Mundaú é o impacto causado no molusco sururu (*Mytella charruana*), com a redução significativa ou até o desaparecimento do molusco por um determinado tempo (BRITO Jr., FRAGOSO Jr e LARSON, 2018; CUNHA et al., 2021; NUNES et al., 2021). Com intuito de correlacionar a salinidade e os impactos ao sururu, tendo como base que a faixa ideal de salinidade para sobrevivência e reprodução desse molusco na laguna Mundaú é de 5 a 15 ups (RIBAS, JUNKES e RODRIGUES (2019), apresenta-se, na Figura 120, o mapa de isolinhas de ocorrência, em porcentagem, de águas com salinidade nessa faixa de valores. No mapa, nota-se que as regiões na cor azul escuro indicam a ocorrência de 100% de águas com salinidade abaixo de 5 ups, ou então, superiores a 15 ups. A partir desses resultados, pode-se destacar, em relação à laguna Mundaú, que o valor obtido na estação “Mu Sul” foi inferior a 3%, indicando que nesse local, mais de 97% do tempo houve predomínio de águas com salinidade inferior a 5 ups. Esse mapa retrata como as condições de salinidade no período chuvoso foram desfavoráveis à sobrevivência do sururu. Quanto à laguna Manguaba, apenas a região bem próxima ao canal de comunicação

apresentou valores variando nessa faixa, em cerca de 1 a 11% do tempo. Só foi possível observar maiores porcentagens no canal de comunicação da laguna Mundaú, alcançando o máximo de 47%.

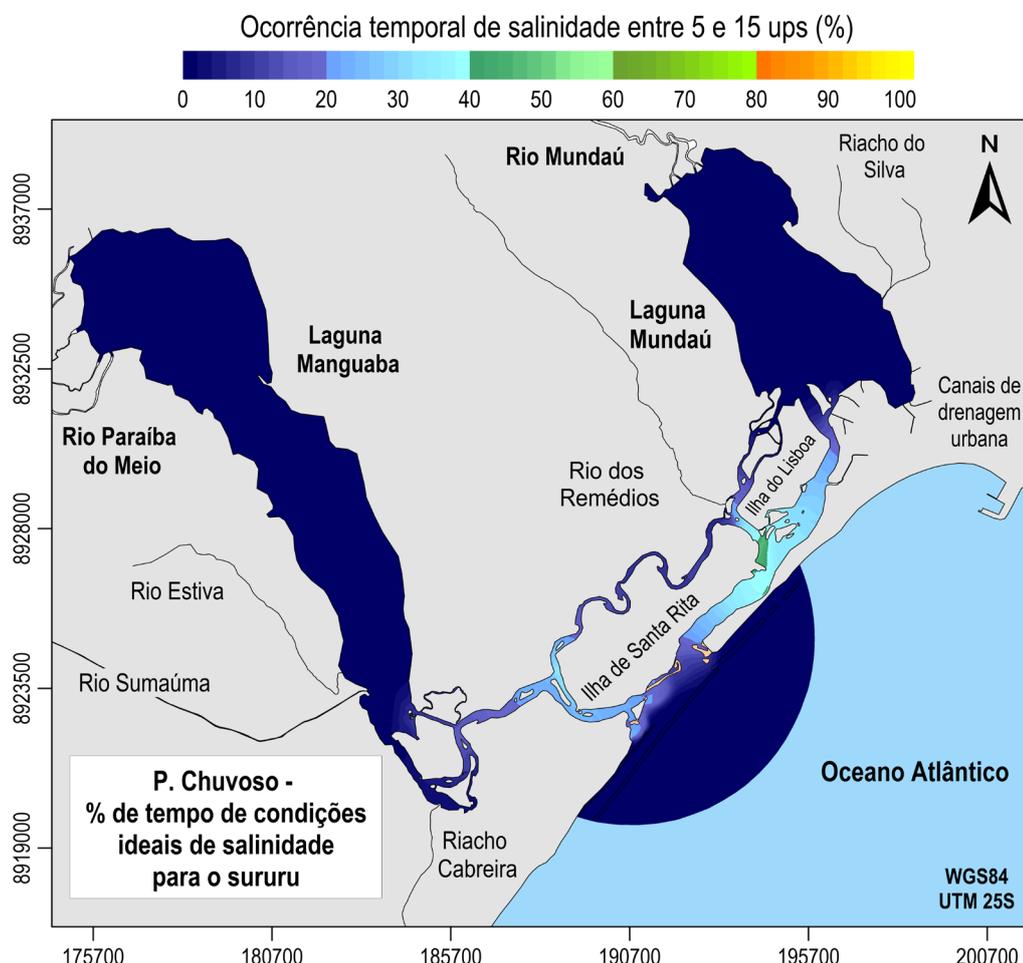


Figura 120 - Isolinhas de ocorrência temporal de águas com salinidade entre 5 e 15 ups, em referência ao período chuvoso, de 01/05/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00. Nota-se que essa faixa de salinidade é considerada a ideal para o sururu na laguna Mundaú. No mapa, as regiões na cor azul escuro indicam a ocorrência de 100% de águas com salinidade abaixo de 5 ups, ou então, superior a 15 ups.

➤ Período Seco

O período seco ocorreu dois meses após o final do período chuvoso. Desta forma, as condições iniciais para o período seco foram obtidas por meio de uma pré-modelagem dos meses de agosto e setembro. Os resultados dessa pré-modelagem são discutidos a seguir, destacando, na Figura 121, a condição inicial adotada nesta simulação, que foi equivalente ao resultado obtido ao final do período chuvoso.

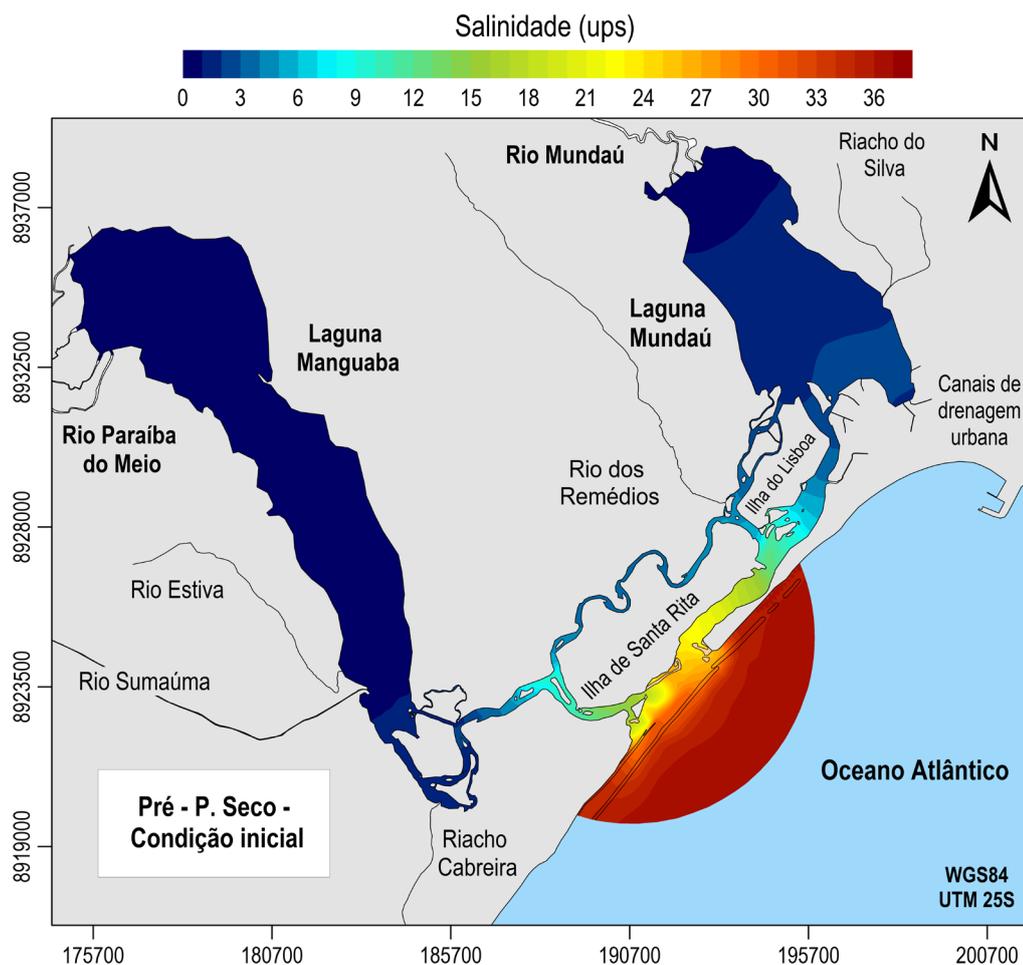


Figura 121 - Isolinhas de salinidade ao final do período chuvoso, correspondente a condição inicial da pré-modelagem do período seco, no instante de tempo 01/08/2018 00h00.

A Figura 122 apresenta as séries temporais de salinidade nas estações “Mu Norte”, “Mu Centro”, “Mu Sul” e “Mu Sudeste”, referentes à pré-modelagem do período seco. A Figura 123 mostra os resultados nas estações “Ma Norte”, “Ma Centro” e “Ma Sul”.

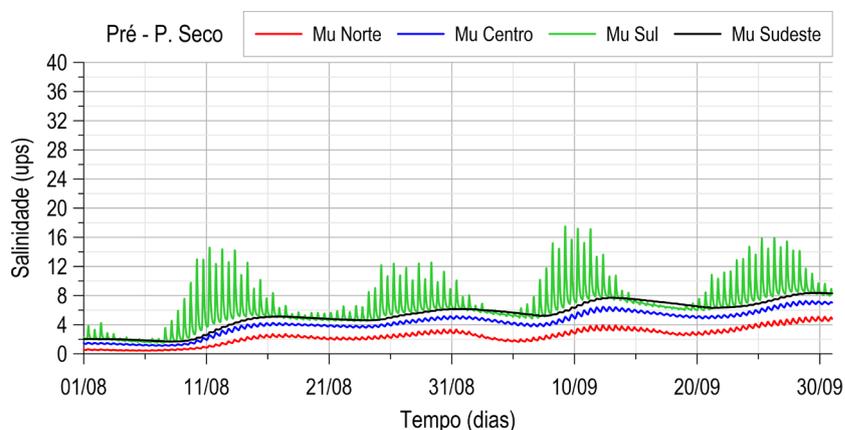


Figura 122 - Séries temporais de salinidade na pré-modelagem do período seco, referentes as estações localizadas na laguna Mundaú.

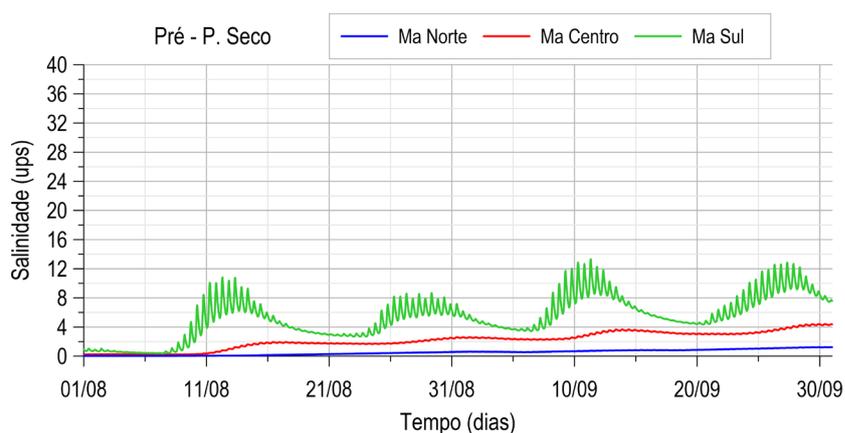


Figura 123 - Séries temporais de salinidade na pré-modelagem do período seco, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.

Percebe-se que o aumento da salinidade ocorreu de forma gradual na estação “Mu Centro”, até alcançar o valor de ≈ 7 ups ao final da simulação. Na estação “Mu Sul”, o máximo foi de 17.5 ups, enquanto no período chuvoso, não ultrapassou 9 ups. Em síntese, o incremento da salinidade nesta laguna esteve diretamente relacionado à redução das vazões do rio Mundaú. Os resultados evidenciam que a queda na salinidade pode ocorrer em poucos dias, contudo, o retorno aos valores pré-estação chuvosa pode demandar, em função das forçantes ambientais, alguns meses para ocorrer, como observado nessa simulação. Na laguna Manguaba, o valor máximo obtido na estação “Ma Centro” foi de 4.4 ups, conforme exposto na Figura 123. Na estação “Ma Sul”, os valores variaram entre 0.4 e 13.3 ups. Quanto aos canais de comunicação, destaca-se que a salinidade máxima na estação “Ma-3” foi de ≈ 33 ups. A Figura 124 apresenta os resultados ao final dessa pré-modelagem. Essa foi a condição inicial adotada para a simulação do período seco.

No decorrer da simulação do período seco, observou-se que a redução das vazões nos meses de outubro e novembro levou ao aumento mais acentuado da salinidade. Ao final de novembro e durante o mês de dezembro, no entanto, a salinidade reduziu-se por causa do aumento da descarga fluvial e da precipitação. A Figura 125 apresenta as séries temporais de salinidade nas estações da laguna Mundaú, enquanto a Figura 126 retrata os valores em seu canal de comunicação. Nesta laguna, a região sul, como era de se esperar, apresentou maior salinidade, seguido da região sudeste. Na estação “Mu Centro”, o valor máximo foi de ≈ 18 ups, conforme exposto na Figura 127. Nesse momento, o valor obtido na estação “Mu Norte” foi de ≈ 16 ups. Com base nos resultados dos períodos chuvoso e seco, pode-se perceber como a região central mudou de uma condição que variava de água doce a oligohalina (0.5 a 5 ups) para mesohalina (5 a 18 ups), em concordância com o estudo de Oliveira e Kjerfve (1993).

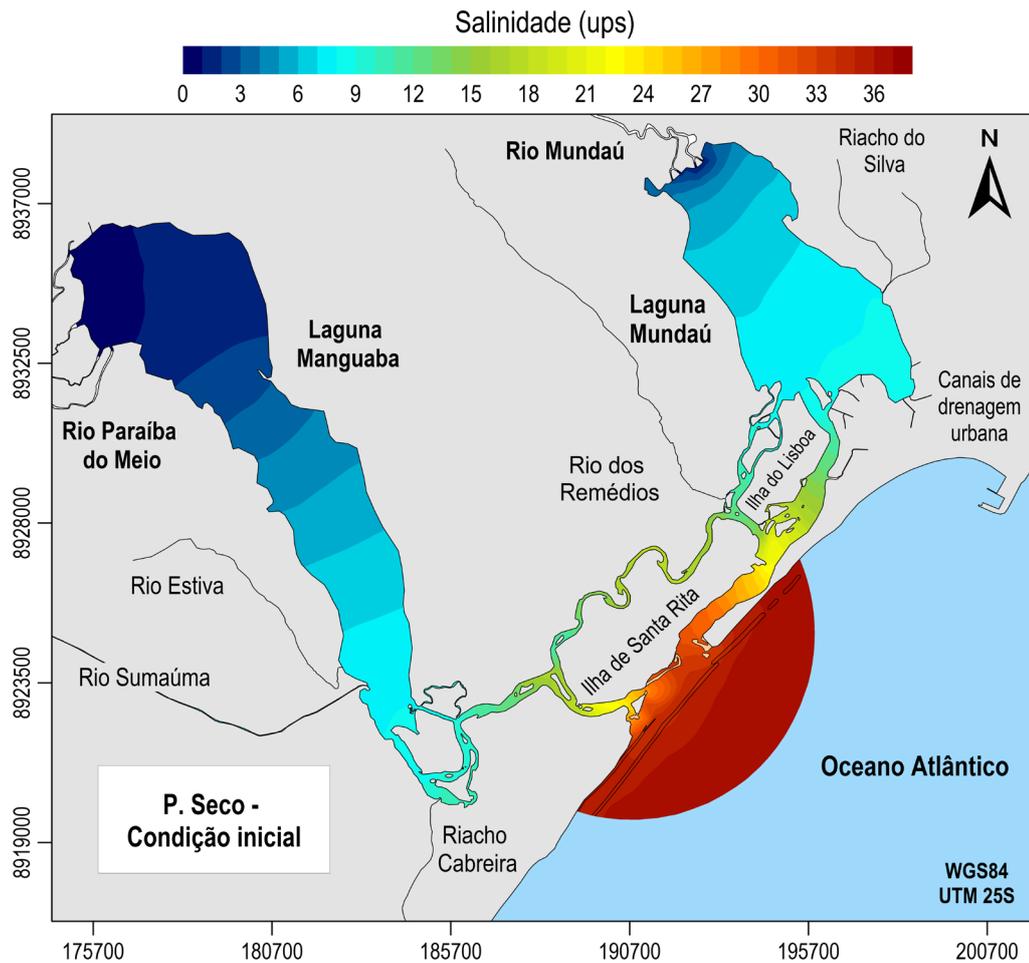


Figura 124 - Isolinhas de salinidade ao final da pré-modelagem do período seco, correspondente a condição inicial do referido período, no instante de tempo 01/10/2018 00h00.

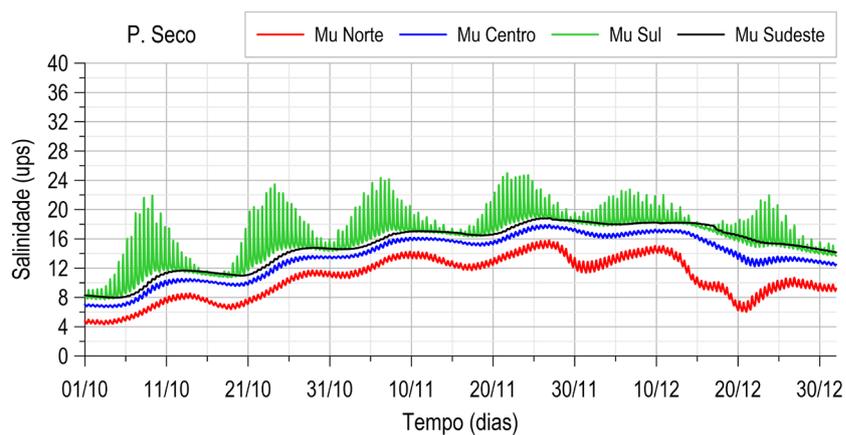


Figura 125 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes às estações localizadas na laguna Mundaú.

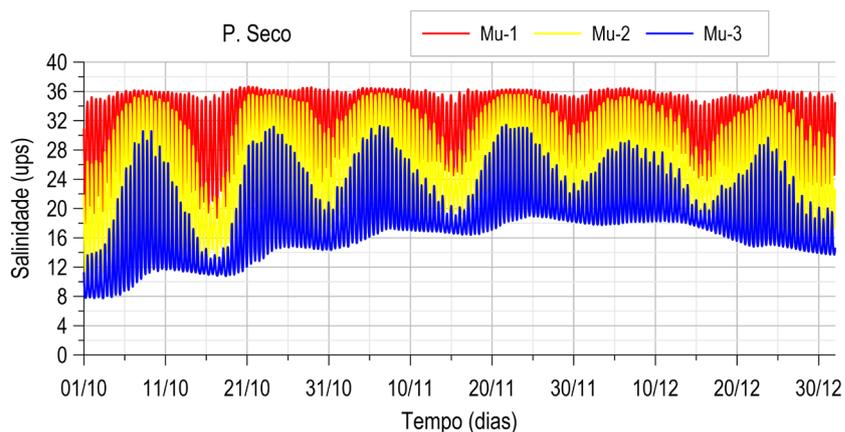


Figura 126 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Mundaú.

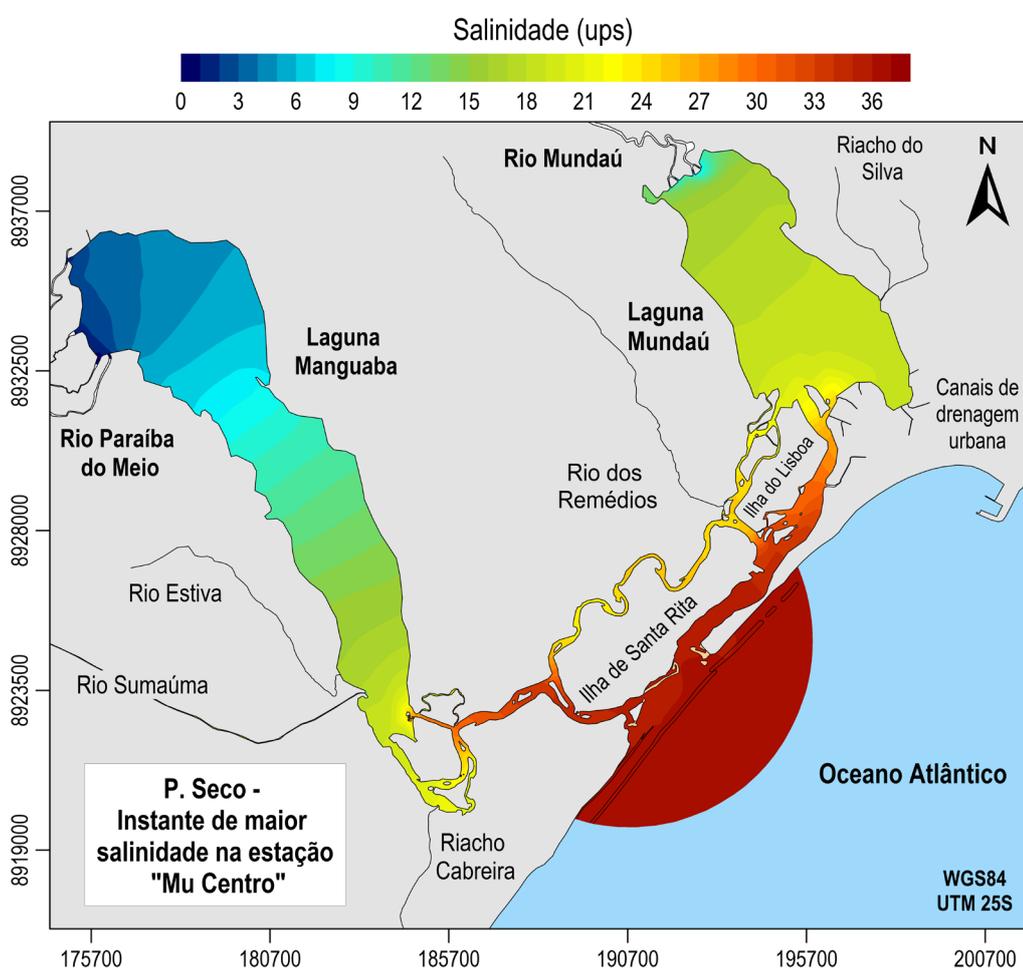


Figura 127 - Isolinhas de salinidade no instante de tempo 26/11/2018 21h00, correspondente ao momento de maior salinidade na estação “Mu Centro”.

Na laguna Manguaba, a salinidade máxima na estação “Ma Centro” foi de ≈ 11 ups, como pode ser observado na Figura 128, e ocorreu próximo do instante retratado na Figura 127. Pela sua geometria alongada, foi possível notar a ocorrência de um gradiente acentuado entre as regiões norte e sul. A diferença entre essas regiões alcançou o máximo de 19 ups, e mínimo de

≈ 5 ups, com base nos resultados das estações “Ma Norte” e “Ma Sul”. Quanto ao canal de comunicação da laguna Manguaba, a Figura 129 expõe os resultados obtidos.

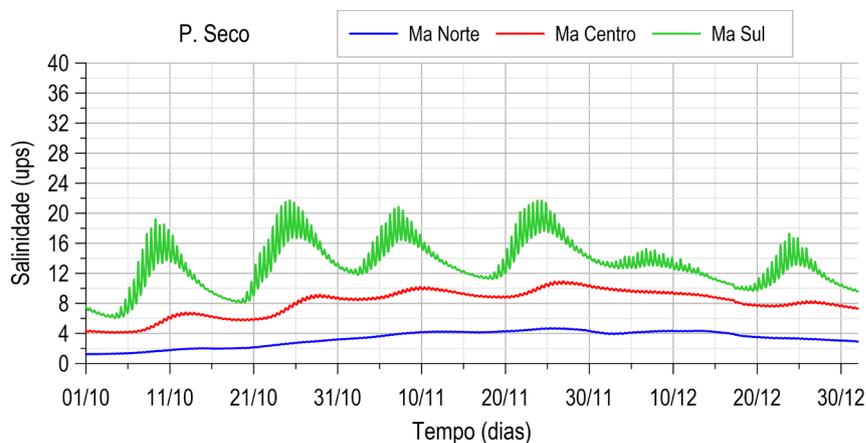


Figura 128 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes as estações localizadas na laguna Manguaba.

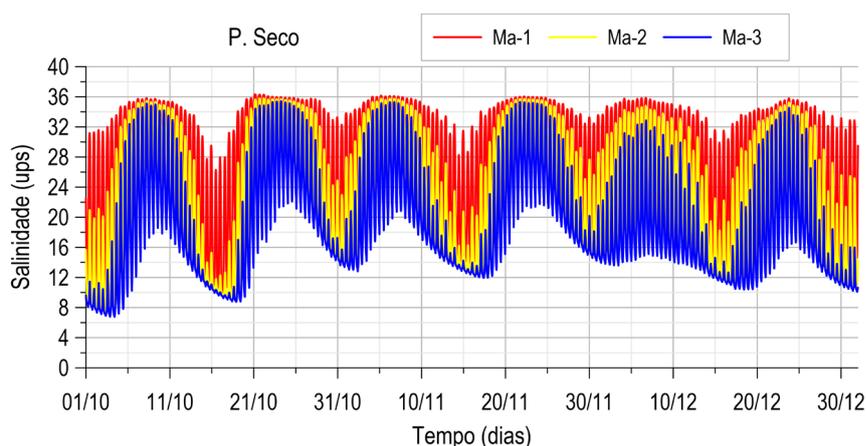


Figura 129 - Séries temporais de salinidade no período seco, referentes as estações localizadas no canal de comunicação da laguna Manguaba.

Na literatura, alguns estudos já mencionaram a ocorrência de altos valores de salinidade na laguna Mundaú. Larsson e Nilsson (2014) observaram valores variando, principalmente, na faixa de 5 a 25 ups na margem leste da laguna Mundaú, acima da foz do Riacho do Silva, nos meses de fevereiro e março de 2014. Já na laguna Manguaba, os valores, em sua maioria, variaram na faixa de 1.5 a 25 ups, próximo da cidade de Marechal Deodoro, na margem oeste ao sul. De acordo com Cotovicz Jr (2012) e Costa et al. (2010), durante a estação seca de fevereiro de 2008, o valor médio e desvio padrão de salinidade na laguna Mundaú foram de 13.2 ± 7.8 ups, enquanto na laguna Manguaba, 4.7 ± 2.6 ups, e nos canais de comunicação, 30.6 ± 5.5 ups.

A Tabela 22 resume os dados de salinidade obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), que estão contidos no Apêndice B, apresentando o número de amostras, valores mínimos, máximos e as medianas. A partir dessas informações, a salinidade máxima observada na região central

da laguna Mundaú (Ponto P4) foi de 25.6 ups, no mês de março de 2013. Esse valor se enquadra na classificação polihalina (18 a 30 ups). A mediana correspondeu a 10.5 ups, considerando todos os dados, e a 17.7 ups, apenas com dados dos períodos secos. Relativo à laguna Manguaba, observou-se a inexistência de gradiente de salinidade no período chuvoso, enquanto no período seco, um gradiente bem mais acentuado. Ocorreram valores elevados próximo à foz do rio Paraíba do Meio, locais P17 e P18, ocasionados provavelmente pela presença de efluentes com alta concentração de sais dissolvidos.

Tabela 22 - Resumo dos dados de salinidade obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), disponibilizados no Apêndice B. Nota-se que a localização e a denominação dos pontos de amostragem encontram-se na Figura 33 e no Quadro 5.

Salinidade (ups) – Pontos de amostragem no CELMM (IMA-AL)									
Local	Nº Am.	V. Mín.	V. Máx.	Mediana	Local	Nº Am.	V. Mín.	V. Máx.	Mediana
P1	13	< 0.1	21.2	2.0	P11	13	7.3	27.8	16.3
P2	13	< 0.1	31.0	9.6	P12	13	7.1	28.0	15.5
P3	13	0.2	24.9	12.4	P13	13	2.0	36.5	24.4
P4	13	< 0.1	25.6	10.5	P14	12	< 0.1	22.9	< 0.1
P5	13	0.7	26.4	13.2	P15	13	4.4	24.6	10.5
P6	13	3.0	27.1	15.5	P16	12	2.2	22.7	8.8
P7	13	5.9	31.1	19.8	P17	12	< 0.1	22.1	5.7
P8	13	2.4	29.4	13.4	P18	12	0.5	20.4	5.0
P9	12	4.2	37.1	33.8	P19	12	< 0.1	25.3	8.6
P10	13	12.3	35.9	26.9					

Assim como foi feito nas análises do período chuvoso, apresenta-se, na Figura 130, o mapa de isolinhas de ocorrência, em porcentagem, de águas com valores de salinidade entre 5 e 15 ups, considerada a faixa ideal para o sururu na laguna Mundaú. No mapa, nota-se que as regiões na cor azul escuro indicam a ocorrência de 100% de águas com salinidade abaixo de 5 ups, ou então, superior a 15 ups. A partir disso, pode-se destacar, relativo à laguna Mundaú, que a região central apresentou valores próximos de 55%, indicando que cerca de 45% do tempo houve predomínio de águas com salinidade acima 15 ups. A região norte apresentou condições mais adequadas ao sururu, pois a salinidade se manteve na faixa ideal em mais de 90% do tempo. Em oposição, a estação “Mu Sul” apresentou valores em torno de 33%. Menciona-se que valores baixos de salinidade, como também altos, são prejudiciais ao sururu (PEREIRA et al., 2003). Deste modo, devido à grande variação sazonal da salinidade nesta laguna, dado em função da intensidade das descargas fluviais, pode-se perceber a significativa resiliência que esse molusco possui, pois suporta condições desfavoráveis de salinidade tanto no período chuvoso quanto no período seco. Na laguna Manguaba, a região bem ao norte não ultrapassou o valor de 5 ups, enquanto ao sul, na estação “Ma Sul”, por exemplo, os valores de salinidade ficaram no intervalo de 5 a 15 ups em 76% do tempo. De modo geral, o valor de 100% foi

observado apenas na região entre o centro e o sul dessa laguna.

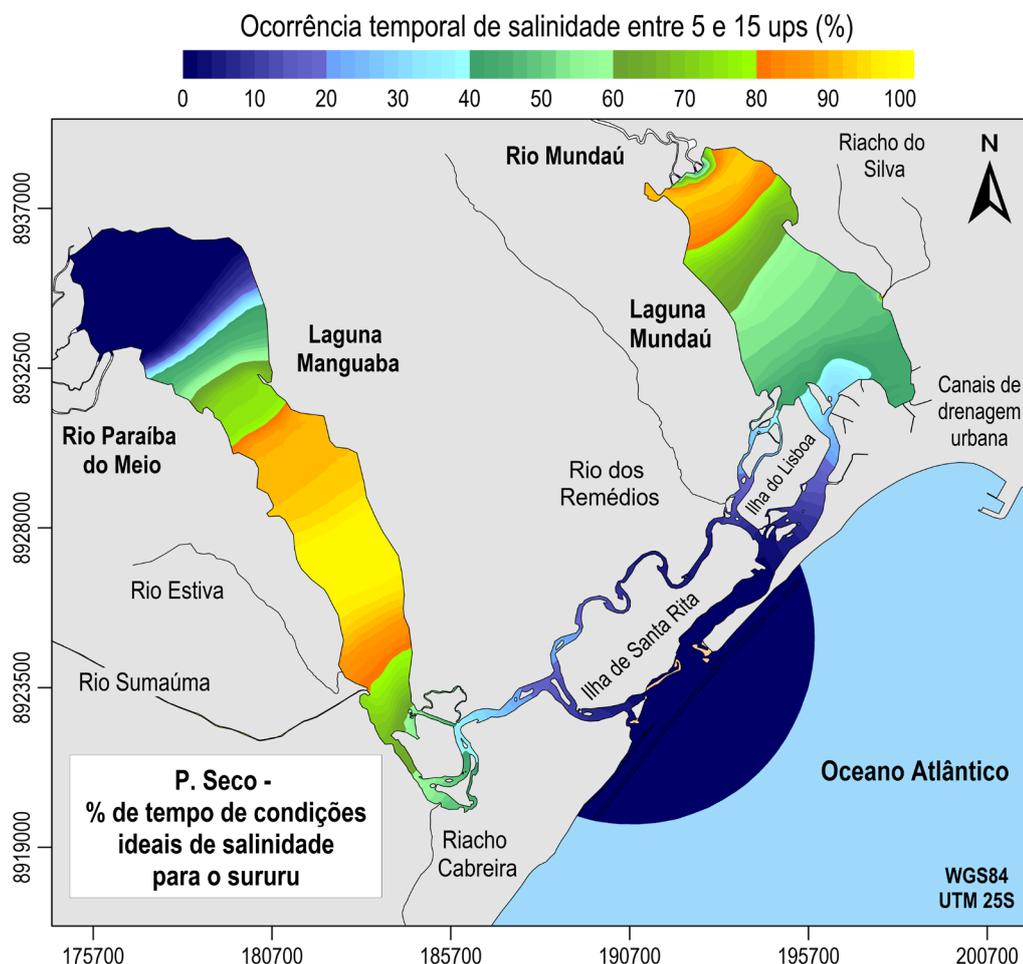


Figura 130 - Isolinhas de ocorrência temporal de águas com salinidade entre 5 e 15 ups, em referência ao período seco, de 01/10/2018 00h00 até 01/01/2019 00h00. Nota-se que essa faixa de salinidade é considerada a ideal para o sururu na laguna Mundaú. No mapa, as regiões na cor azul escuro indicam a ocorrência de 100% de águas com salinidade abaixo de 5 ups, ou então, superior a 15 ups.

6.4 Análises dos Modelos de Temperatura

A Figura 131 apresenta as séries temporais de temperatura média na coluna d'água, nos respectivos períodos simulados, em referência as estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, além das temperaturas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. Ao se observar os resultados, percebe-se claramente a influência da sazonalidade nos valores de temperatura da região central das lagoas. No período chuvoso (outono-inverno) ocorreu o resfriamento das águas, e as temperaturas nas estações “Mu Centro” e “Ma Centro” estiveram, na maior parte do tempo, acima dos valores considerados nos rios e no mar. No período seco (primavera-verão), as águas da região central das lagoas foram mais quentes do que as águas do mar, e mais frias do que as águas dos rios, em praticamente toda a simulação. O mar possui uma maior inércia térmica, ou seja, maior resistência para mudar de temperatura. Por essa razão, a estação “Mar”, que possui

profundidade média de um pouco mais de 17 m, apresentou uma amplitude térmica menor do que a região central das lagunas, que possuem profundidade média inferior a 3.5 m. No período chuvoso, a amplitude térmica na estação “Mar” foi de 2.3°C (de 26.1 a 28.4°C); na estação “Mu Centro”, 3.5°C (de 26.0 a 29.6°C); e na estação “Ma Centro”, 3.5°C (de 26.5 a 30.0°C). Já no período seco, os valores foram, respectivamente, 1.4°C (de 26.7 a 28.1°C); 3.3°C (de 27.2 a 30.5°C); e 2.5°C (de 27.4 a 29.9°C). Nas condições de contorno adotadas para os rios Mundaú e Paraíba do Meio, os valores de amplitude térmica foram: 2.2°C (de 25.9 a 28.1°C), no período chuvoso, e 2.1°C (de 28.3 a 30.4°C), no período seco.

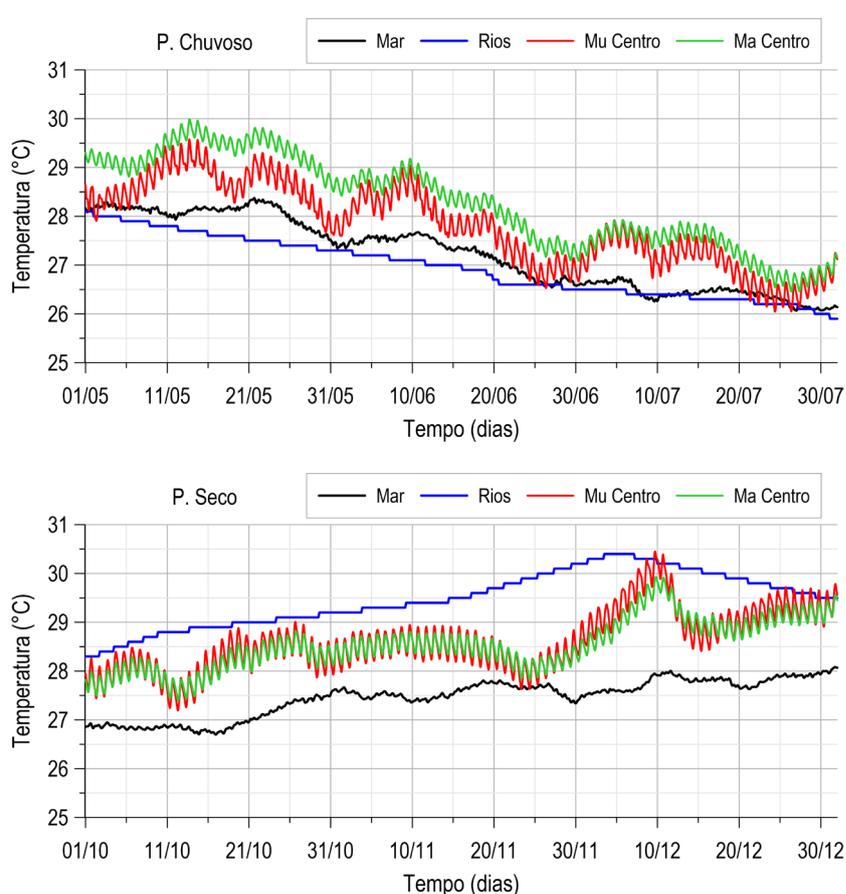


Figura 131 - Séries temporais de temperatura nas estações “Mar”, “Mu Centro” e “Ma Centro”, além dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, em referência aos respectivos períodos chuvoso e seco.

Em termos espaciais, a Figura 132 apresenta, em referência ao período chuvoso, o mapa de isolinhas de temperatura, à esquerda, para o instante de menor temperatura na estação “Mu Centro”, enquanto, à direita, para o instante de maior temperatura na referida estação. Observa-se que a menor temperatura ocorreu posteriormente a maior temperatura, conforme exposto na Figura 131. Já relativo ao período seco, a Figura 133 expõe os resultados, à esquerda, para o instante de menor temperatura na estação “Mu Centro”, enquanto, à direita, para o instante de maior temperatura na referida estação.

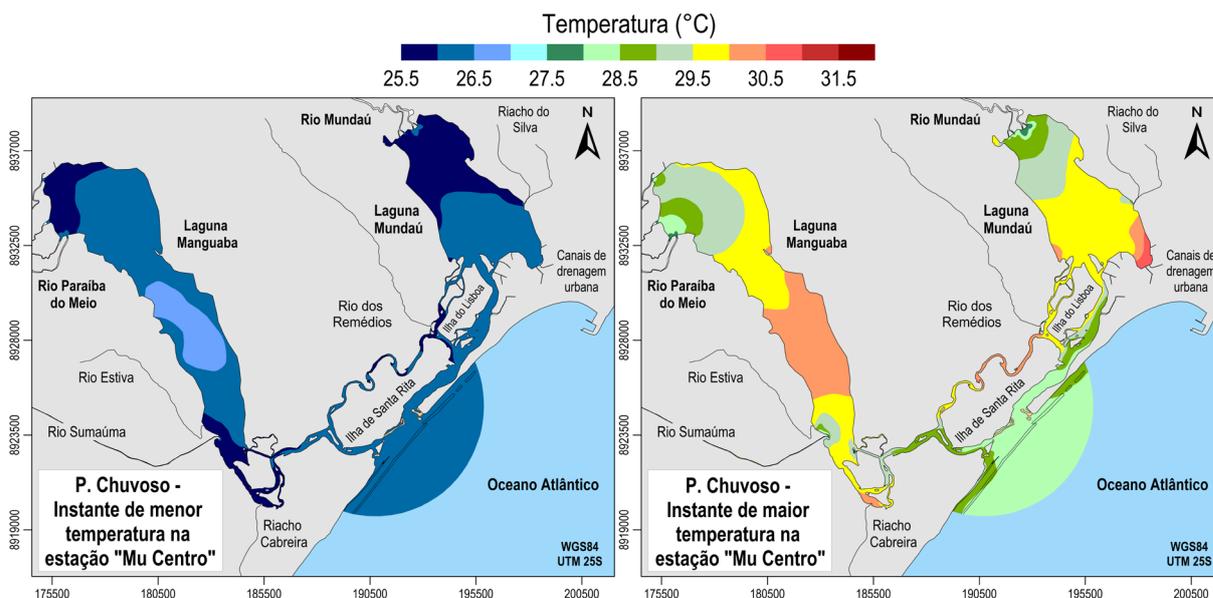


Figura 132 - Mapas de isolinhas de temperatura em referência ao período chuvoso. À esquerda, para o instante de menor temperatura na estação “Mu Centro”, no tempo 24/07/2018 09h00. À direita, para o instante de maior temperatura na mesma estação, no tempo 13/05/2018 17h00.

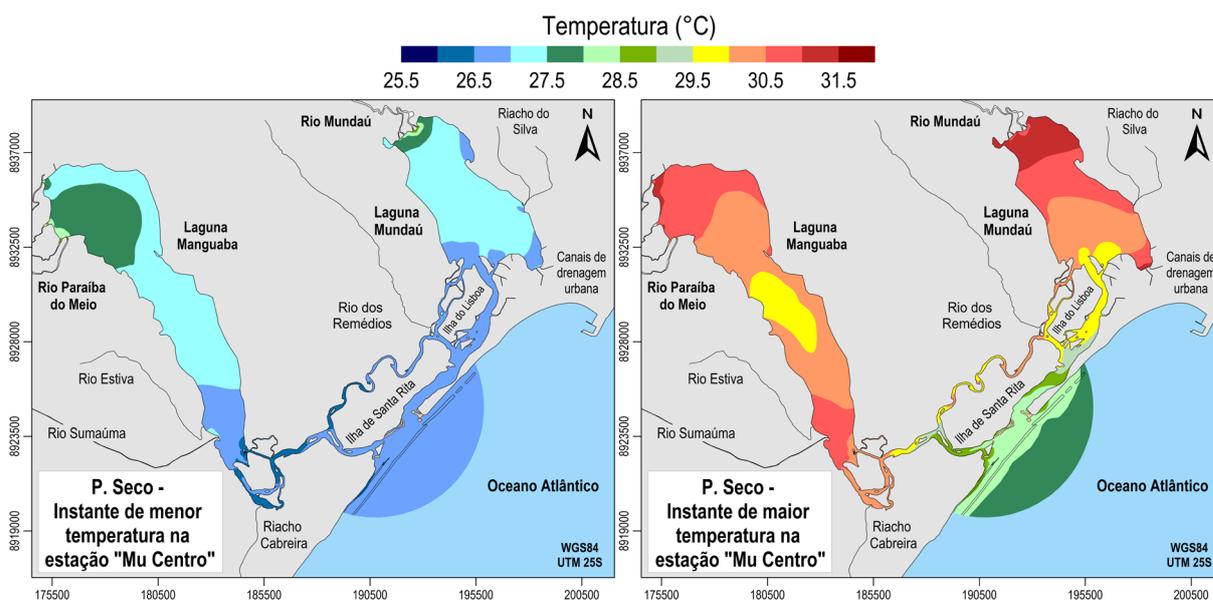


Figura 133 - Mapas de isolinhas de temperatura em referência ao período seco. À esquerda, para o instante de menor temperatura na estação “Mu Centro”, no tempo 12/10/2018 07h30. À direita, para o instante de maior temperatura na mesma estação, no tempo 09/12/2018 17h00.

A partir desses resultados, destaca-se que a temperatura apresentou pequena variação espacial no interior das lagoas. Na lagoa Manguaba, por exemplo, as maiores diferenças obtidas entre as estações “Ma Norte” e “Ma Sul”, em um mesmo instante de tempo, foi de 1.4°C no período chuvoso, e 1.5°C no período seco. Na lagoa Mundaú, estações “Mu Norte” e “Mu Sul”, as diferenças foram: 2.2°C no período chuvoso, e 1.9°C no período seco. Vale destacar que, do mar até o interior das lagoas, os gradientes de densidade devido à temperatura são pequenos em relação aos gradientes gerados pela salinidade, especialmente, no período

chuvoso. Como consequência, a influência da temperatura na circulação hidrodinâmica é bem menor em comparação à salinidade. Para auxiliar na compreensão das diferenças espaciais e temporais de temperatura, apresenta-se a Tabela 23, que resume os dados de temperatura obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), que estão contidos no Apêndice B, apresentando o número de amostras, valores mínimos, máximos e as medianas.

Tabela 23 - Resumo dos dados de temperatura obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016), disponibilizados no Apêndice B. Nota-se que a localização e a denominação dos pontos de amostragem encontram-se na Figura 33 e no Quadro 5.

Temperatura (°C) – Pontos de amostragem no CELMM (IMA-AL, 2012, 2013, 2016)									
Local	Nº Am.	V. Mín.	V. Máx.	Mediana	Local	Nº Am.	V. Mín.	V. Máx.	Mediana
P1	12	20.1	31.2	28.0	P11	12	25.0	31.5	29.1
P2	12	25.0	31.8	29.0	P12	12	27.2	33.6	29.2
P3	12	23.0	35.5	29.0	P13	12	26.2	31.1	28.7
P4	12	24.0	30.3	28.7	P14	11	24.8	29.5	28.0
P5	12	25.0	31.2	28.3	P15	12	26.4	30.6	28.9
P6	12	24.0	32.0	29.1	P16	11	26.8	31.9	29.7
P7	12	25.0	31.0	29.0	P17	11	26.2	33.2	31.0
P8	12	24.0	30.6	28.5	P18	11	26.0	34.0	30.2
P9	11	27.0	30.5	28.5	P19	11	21.0	32.4	29.1
P10	12	24.0	30.0	28.8					

Os resultados das modelagens foram, de modo geral, coerentes com dados medidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016). Cita-se, por exemplo, o local P4 (L. Mundaú, Centro Geográfico) cujo valor da mediana dos dados correspondeu a 28.7°C, valor bem próximo de 28.3°C, obtido a partir dos resultados da estação “Mu Centro”, considerando ambos os períodos. Da mesma forma ocorreu com a temperatura máxima. Na Tabela 23, alguns valores chamam a atenção, por exemplo, o local P1 (Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú), com o mínimo de 20.1°C; o local P19 (Riacho Cabreira), com o mínimo de 21.0°C; e ainda o local P3 (L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia), com o máximo de 35.5°C. Tendo em vista que a variação espacial da temperatura ocorre numa faixa estreita, de alguns poucos graus, conforme observado pela ANA (2012c), os valores mencionados acima são, de certa forma, duvidosos. Por exemplo, no dia em que se obteve o valor de 20.1°C (Local P1), foi medido também no local mais próximo, P3 (L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia), a temperatura de 29°C, enquanto no local P2 (L. Mundaú, em frente Fernão Velho), 29.8°C. Com base nessas informações, o gradiente entre o local P3 e P1 seria de 8.9°C, valor pouquíssimo provável de ter ocorrido, e bem acima dos gradientes observados nas modelagens. Além disso, essas temperaturas foram medidas em fevereiro de 2012, de modo que o valor de 20.1°C não seria coerente com as condições desse período.

É válido observar que os resultados foram representativos dos padrões de temperatura graças a estratégia de modificar os valores de umidade relativa do ar da estação meteorológica

MACEIÓ-A303 (INMET), limitando o valor mínimo a 80%. Conforme mencionado na seção 5.5.2, o modelo de temperatura é bem sensível aos valores dessa variável climática, de modo que, a inserção direta dos dados dessa estação deve ser evitada, pois provocariam um resfriamento excessivo das lagunas, devido à grande perda de calor para a atmosfera. Por meio de uma futura calibração e validação do modelo de temperatura, será possível definir melhor os valores de umidade relativa do ar, como também os parâmetros do modelo. Os resultados dos modelos hidrodinâmicos, de salinidade e de temperatura foram utilizados como dados de entrada para as simulações da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes, que serão analisadas em seguida.

6.5 Análises da Dispersão e Decaimento de Plumais de Coliformes Termotolerantes

As simulações da dispersão e decaimento de plumais de coliformes termotolerantes foram realizadas com o propósito de analisar dois cenários nos respectivos períodos. O primeiro cenário retratando os valores de colimetria segundo as condições de esgotamento sanitário mencionadas na seção 4.3 “Saneamento Básico – Panorama do Esgotamento Sanitário”. O segundo cenário, no entanto, retrataria as mudanças na colimetria supondo a execução de ações para a melhoria do esgotamento sanitário nas bacias contribuintes. Neste cenário, considerou-se uma redução de 90% nas concentrações admitidas no primeiro cenário. Os valores de concentração adotados em cada cenário encontram-se na Tabela 16, na seção 5.5.4.2. Diante do exposto, apresentam-se os resultados da modelagem de decaimento bacteriano, expressos por meio do T_{90} , além dos resultados espaciais gerados no primeiro cenário. Logo após, expõem-se os dados de colimetria obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016) e da ANA (2012c), e realiza-se a análise destes em relação à Legislação e aos resultados das simulações. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados do segundo cenário.

Um dos fatores mais importantes para a modelagem de decaimento bacteriano é a radiação solar. Temperatura e salinidade também influenciam, porém, de forma menos significativa. A taxa de decaimento bacteriano pode ser expressa pelo tempo característico T_{90} , já mencionado na seção 5.4.3. De acordo com Rosman (2023), em um dado instante, o T_{90} representa o tempo requerido para decaimento de uma ordem de grandeza na quantidade de bactérias, se a radiação solar se mantiver constante. A Figura 134 apresenta os valores de T_{90} calculados para a região da foz do canal de drenagem urbana P28_ANA, ao sul da laguna Mundaú. Nesta figura, nota-se que por volta de 12h00 ocorreu o menor valor T_{90} , indicando rápido decaimento bacteriano, pois foi o momento de maior radiação solar. À noite, a radiação solar foi igual a zero, resultando em maiores valores de T_{90} e, conseqüentemente, em um decaimento mais lento.

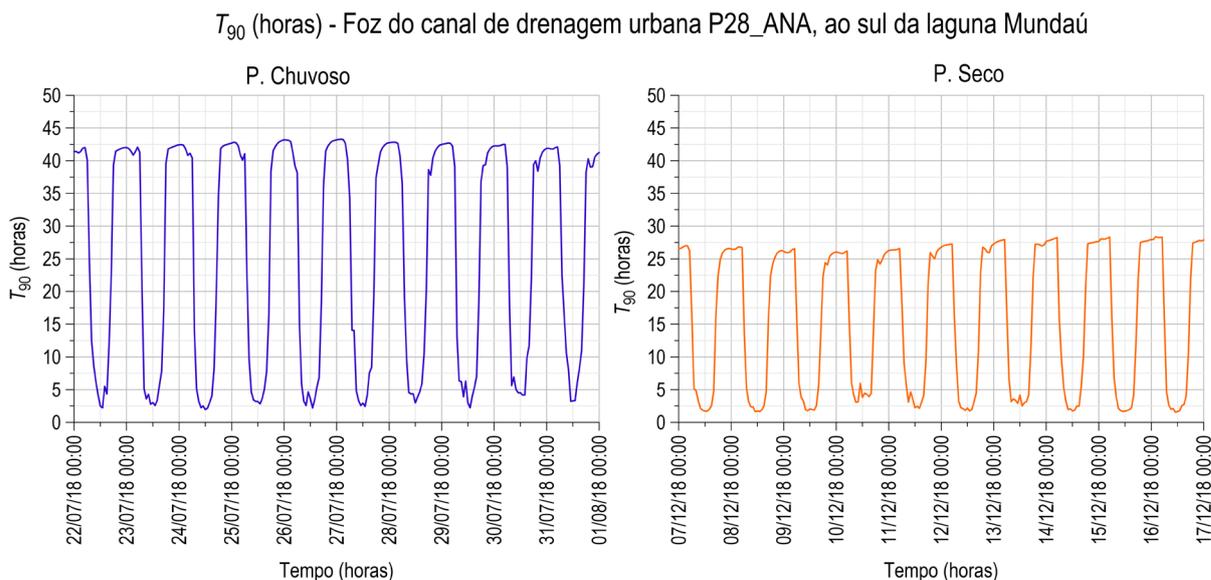


Figura 134 - Valores de T_{90} , em horas, referentes à foz do canal de drenagem urbana P28_ANA, ao sul da laguna Mundaú. Nota-se, à esquerda, os valores no período chuvoso, de 22/07/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00, enquanto que, à direita, no período seco, de 07/12/2018 00h00 até 17/12/2018 00h00.

Os valores mínimos de T_{90} ocorreram no período seco, por conta, principalmente, da maior radiação solar durante este período. Além disso, o período seco também apresentou maiores valores de salinidade e temperatura, que contribuíram para que os valores máximos de T_{90} fossem menores em comparação ao período chuvoso. Outro fator que colaborou para menores valores de T_{90} no período seco foi a maior transparência da coluna d'água, devido à diminuição da concentração de sedimentos em suspensão, ocasionada pela redução das descargas fluviais. Isso proporcional uma maior penetração da radiação solar na coluna d'água.

Como destacado, a menor taxa de decaimento bacteriano ocorre durante à noite. Conforme relatado por Ribas, Junkes e Rodrigues (2019) é no período noturno, mais especificamente durante a madrugada, que os pescadores se dirigem à laguna Mundaú para realizar a extração do sururu (*Mytella charruana*) do fundo desta laguna. Nesse processo, os pescadores realizam dezenas ou centenas de mergulhos, sem equipamentos adequados (NEVES e CANTALICE, 2017) e, possivelmente, ingerem uma fração dessa água. Caso não existissem diversos pontos de lançamentos de esgotos no entorno da laguna, especialmente, no município de Macaíó, a ingestão dessa água não ofereceria grandes riscos, em termos de doenças de veiculação hídrica por transmissão feco-oral. Contudo, a presença de esgotos na água pode significar, também, a presença de microrganismos patogênicos causadores de enfermidades tais como a cólera, febre tifoide, giardíase, hepatite infecciosa, entre outras (VON SPERLING, 2014; METCALF E EDDY, 2016).

Tendo em vista que a extração de sururu se enquadra em atividades de recreação de contato primário, pode-se utilizar a Resolução CONAMA nº 274/2000 para avaliar as condições

de balneabilidade dessa laguna, com base no parâmetro coliforme termotolerantes. Desta Resolução, que classifica as águas como *próprias* ou *impróprias* às atividades de recreação de contato primário, utilizou-se a categoria *própria* e subcategoria *satisfatória*, cujo valor limite é $1.0E+3$ NMP/100 mL. Diante dessas informações, apresentam-se os resultados do primeiro cenário, nos respectivos períodos.

➤ **1º Cenário: Variabilidade espacial e temporal da colimetria segundo as condições de esgotamento sanitário mencionadas na seção 4.3 “Saneamento Básico – Panorama do Esgotamento Sanitário”**

Da Figura 135 até a Figura 137, apresentam-se, em referência ao período chuvoso, os mapas de isolinhas de probabilidade de passagem das plumas efluentes com valores de colimetria acima $1.0E+3$ NMP/100 mL. Relativo ao período seco, os resultados são expostos a partir da Figura 138 até a Figura 140. Esses mapas têm a intenção de indicar as áreas mais críticas em termos de balneabilidade. Em outras palavras, essas áreas apresentariam risco mais significativo à saúde dos pescadores, por oferecerem condições impróprias ao banho em uma parcela considerável de tempo. Nos mapas, nota-se que as regiões na cor branca apresentaram colimetria abaixo de $1.0E+3$ NMP/100 mL em 100% do tempo, isto é, condições satisfatórias em todo o tempo.

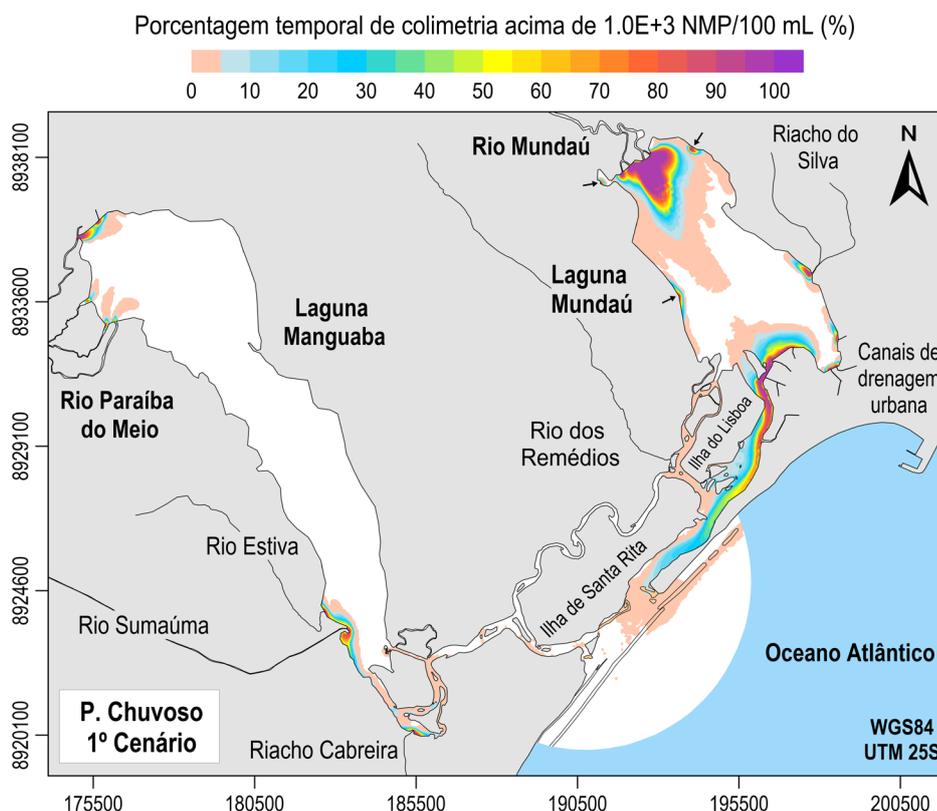


Figura 135 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 1º cenário do período chuvoso, de 01/05/2018 00h00 até 01/08/2018 00h00.

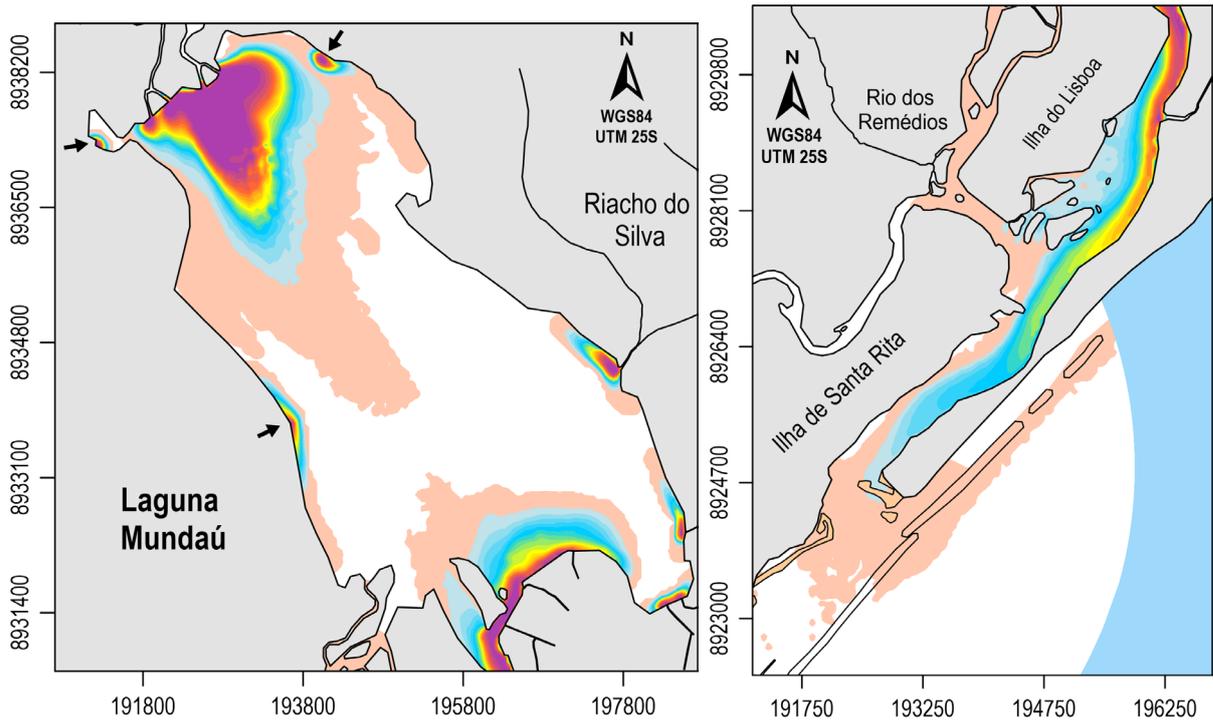


Figura 136 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 1º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.

Porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL (%)

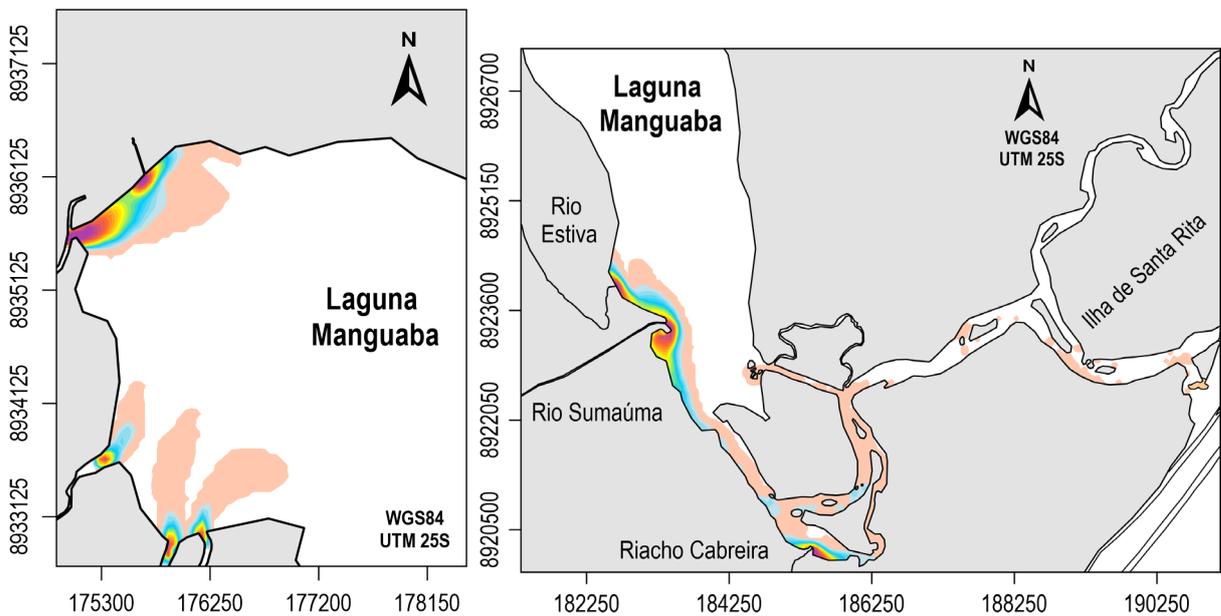


Figura 137 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 1º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.

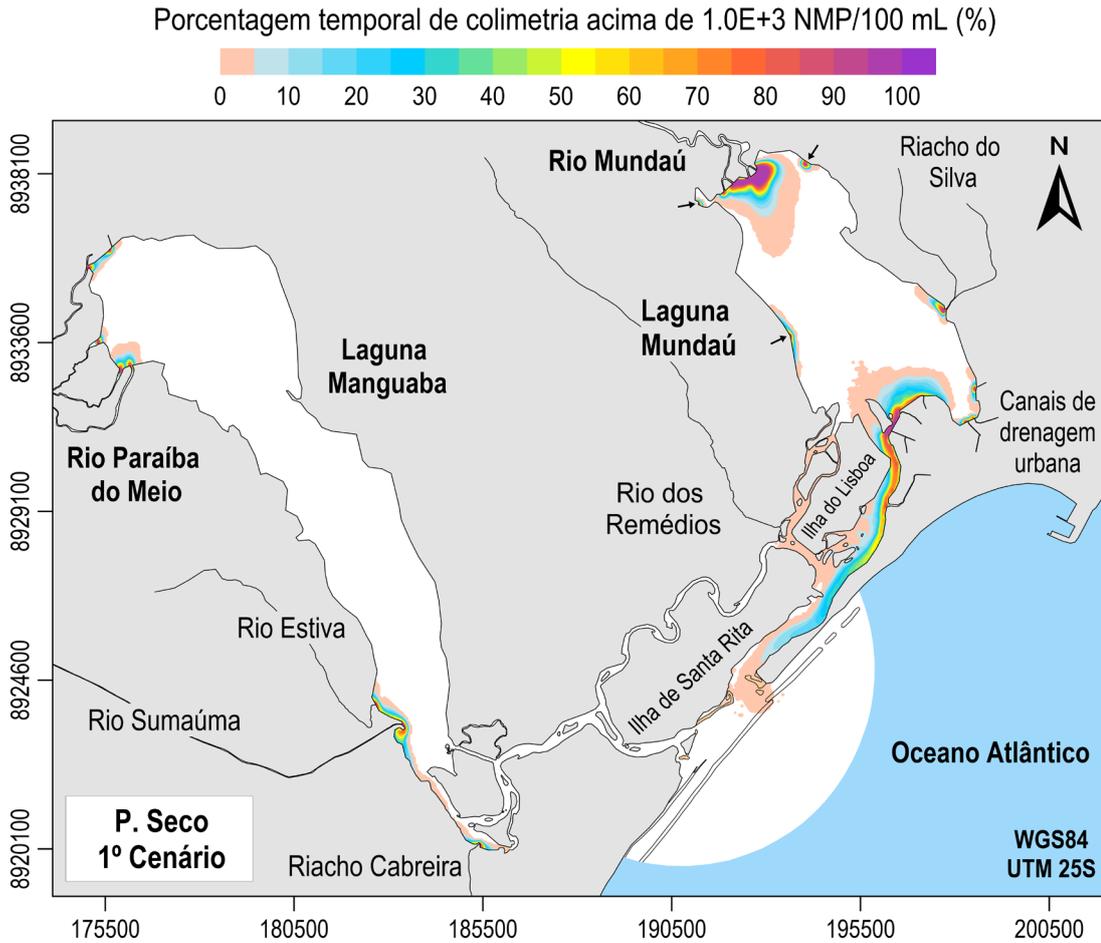


Figura 138 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 1º cenário do período seco, de 01/10/2018 00h00 até 01/01/2019 00h00.

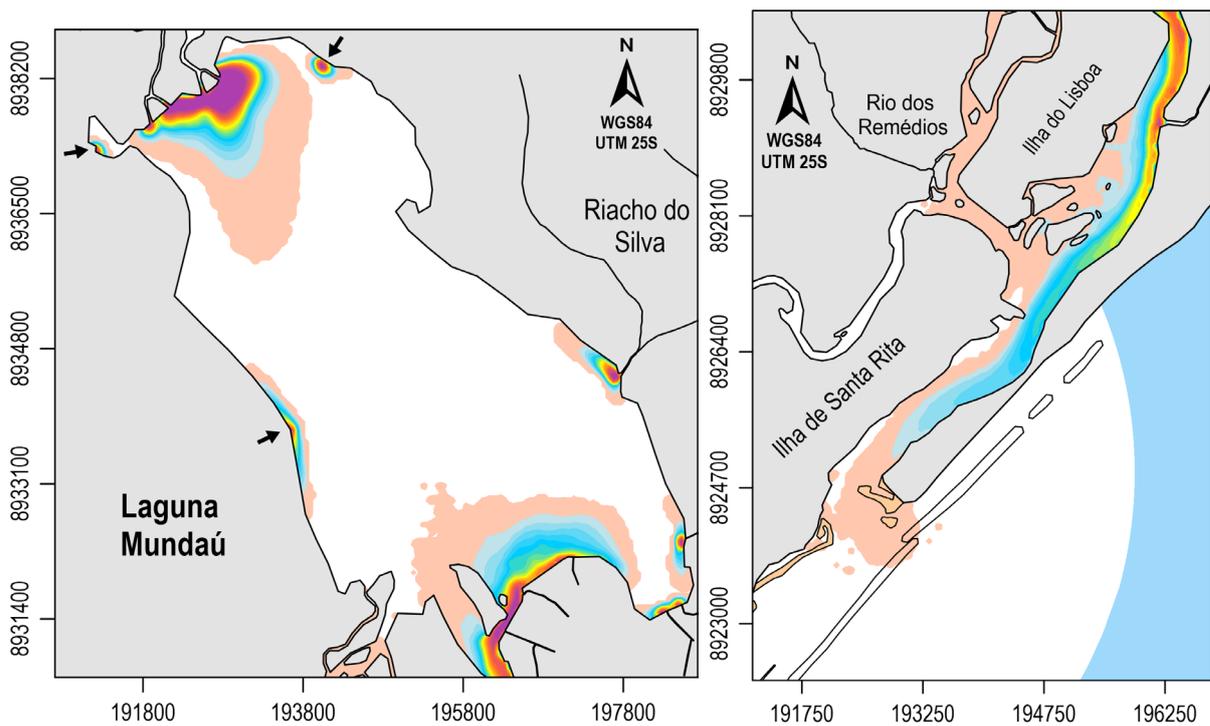


Figura 139 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 1º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.

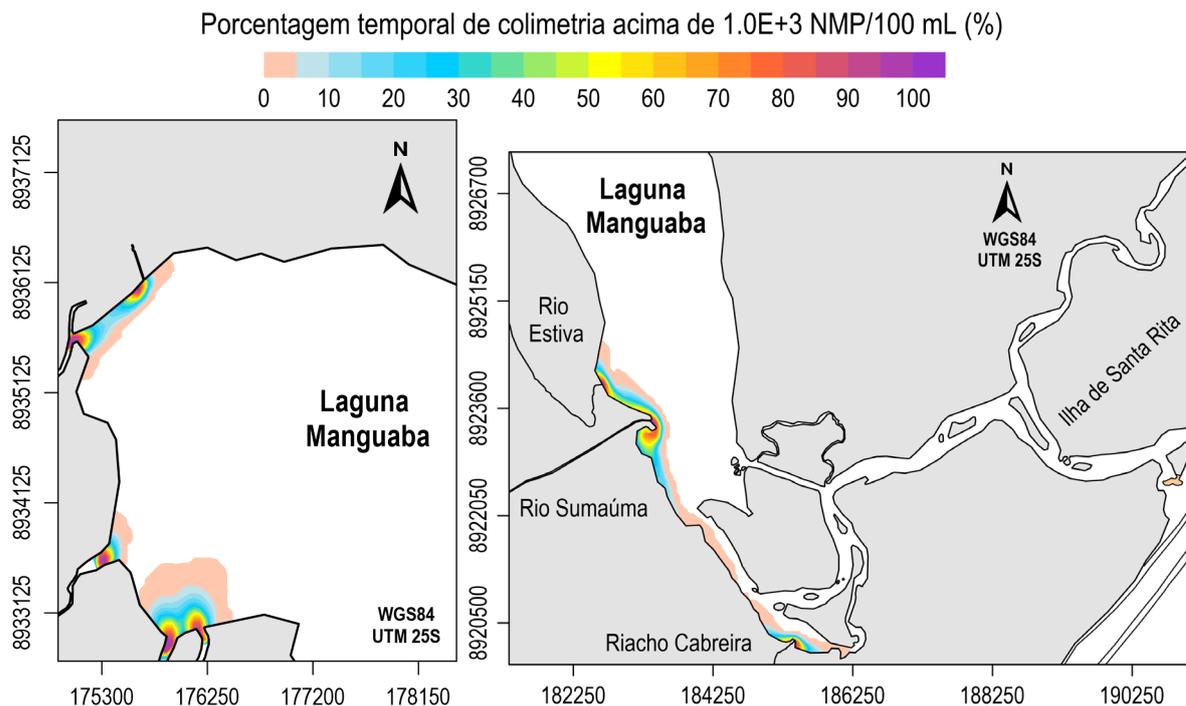


Figura 140 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 1º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.

Com o intuito de expressar as concentrações obtidas e embasar a discussão dos resultados, apresentam-se, da Figura 141 até a Figura 143, os mapas de isolinhas de colimetria no instante de tempo 07/11/2018 04h00, retratando uma preamar (PM) de maré de sizígia. Da Figura 144 até a Figura 146, por sua vez, se refere a condição de baixa-mar (BM), no mesmo dia, às 11h00.

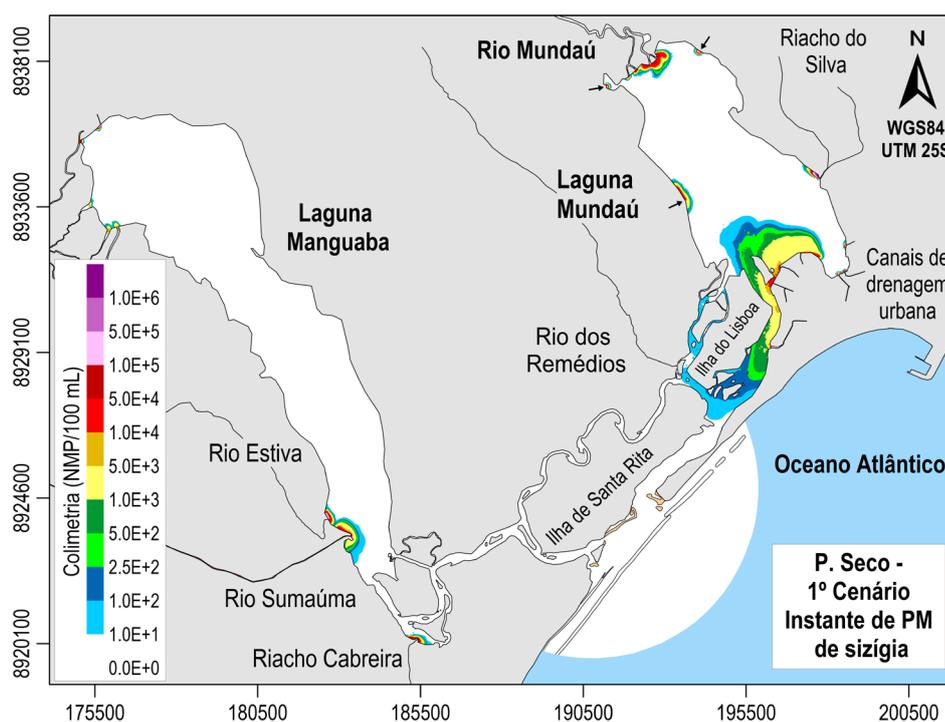


Figura 141 - Mapa de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00.

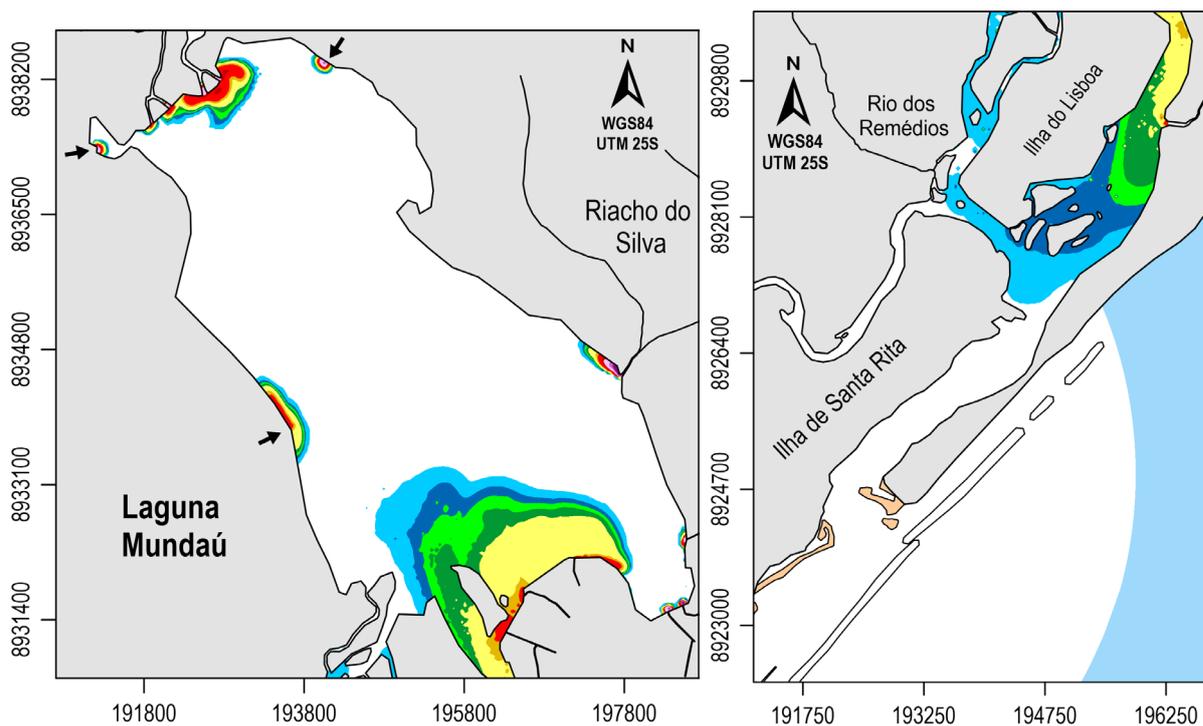


Figura 142 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.

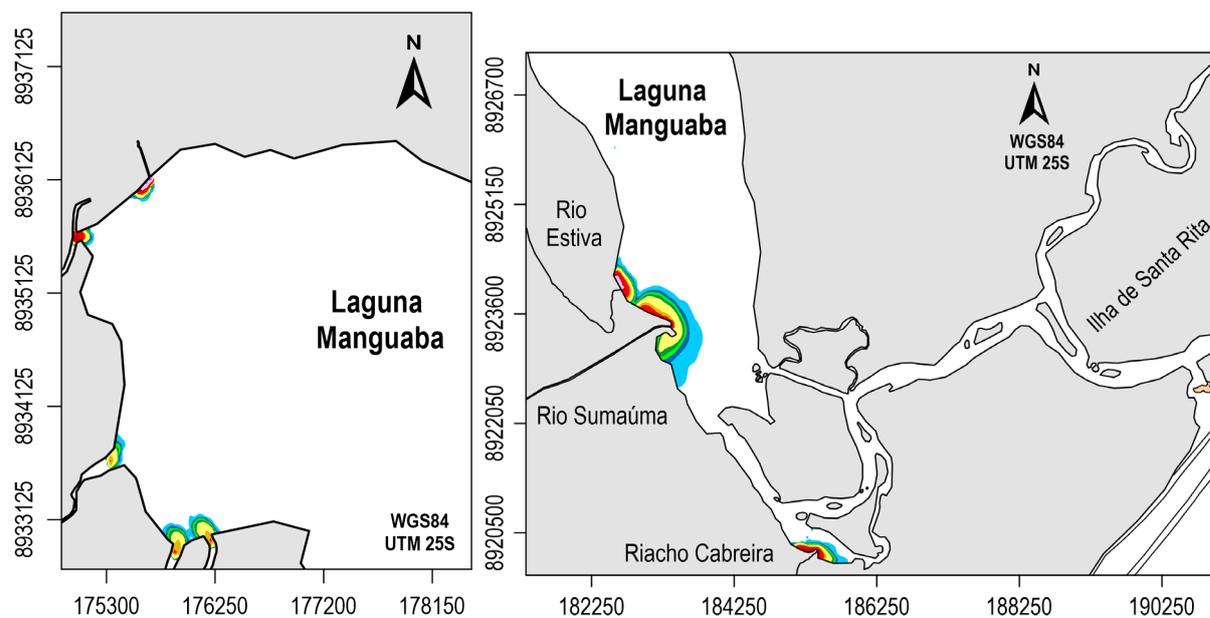
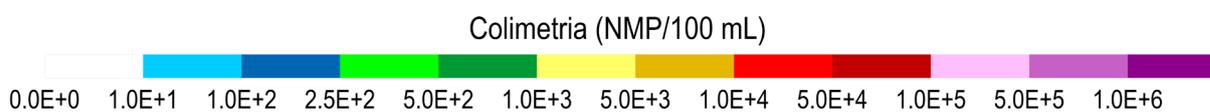


Figura 143 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.

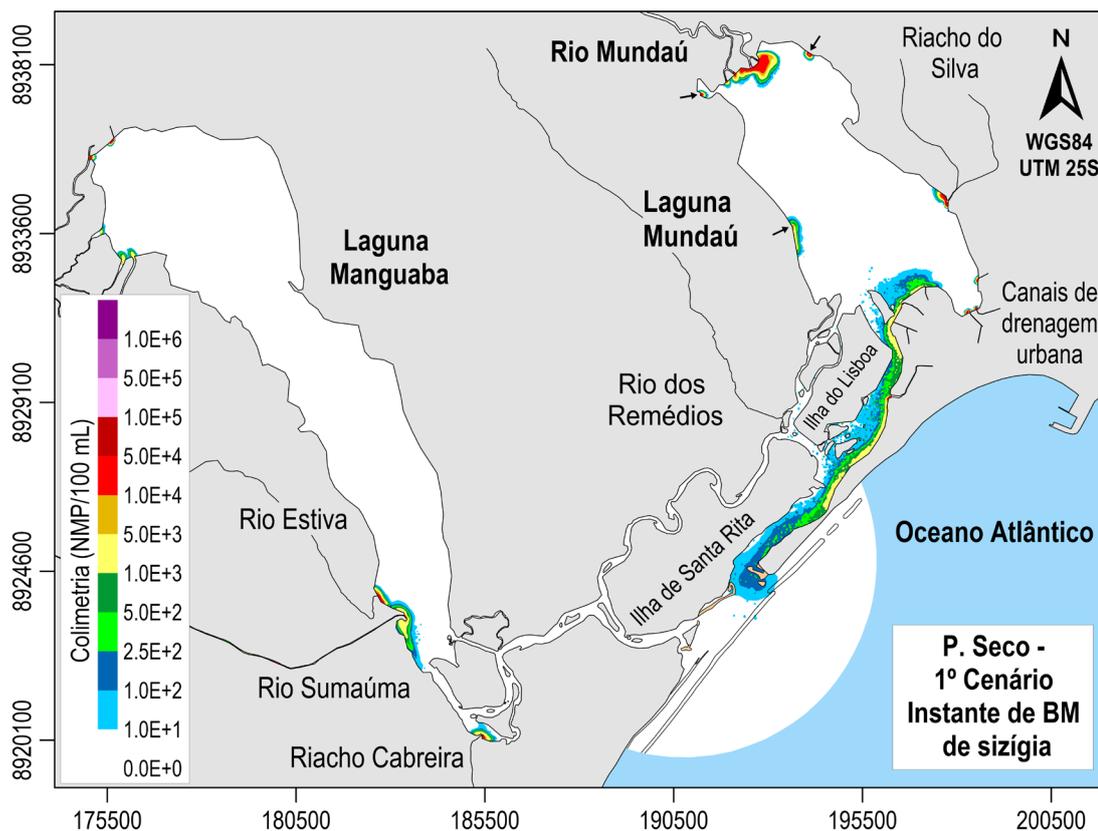


Figura 144 - Mapa de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00.

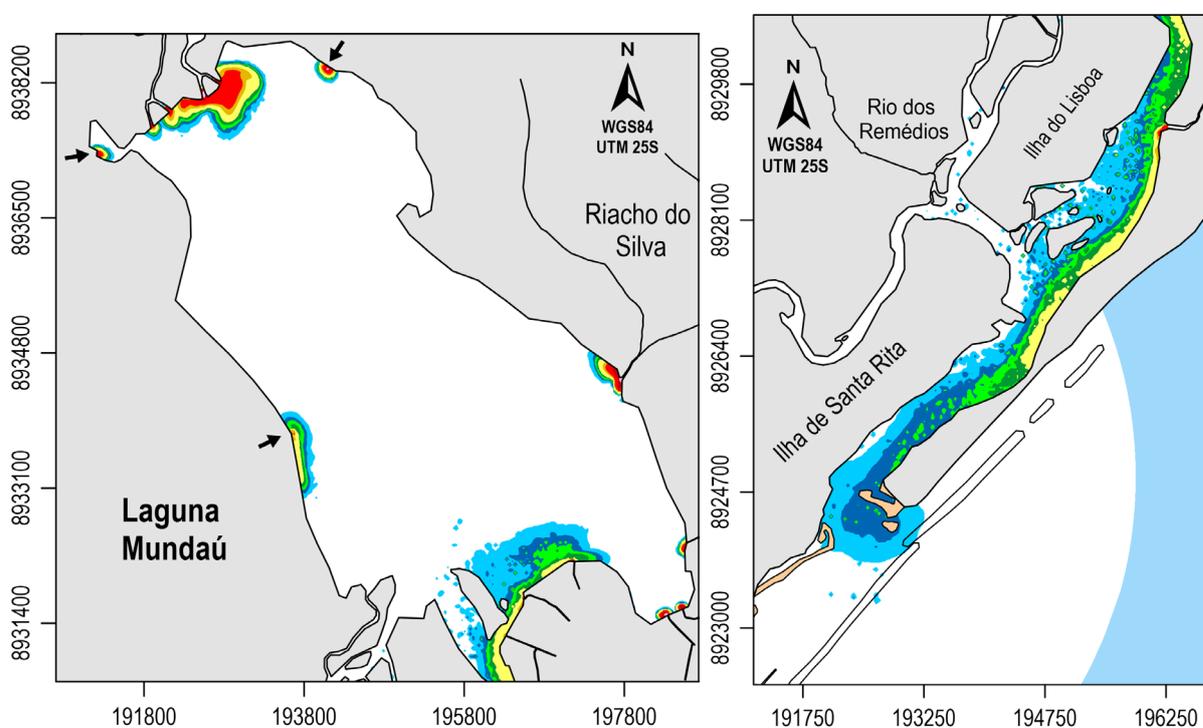


Figura 145 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação.

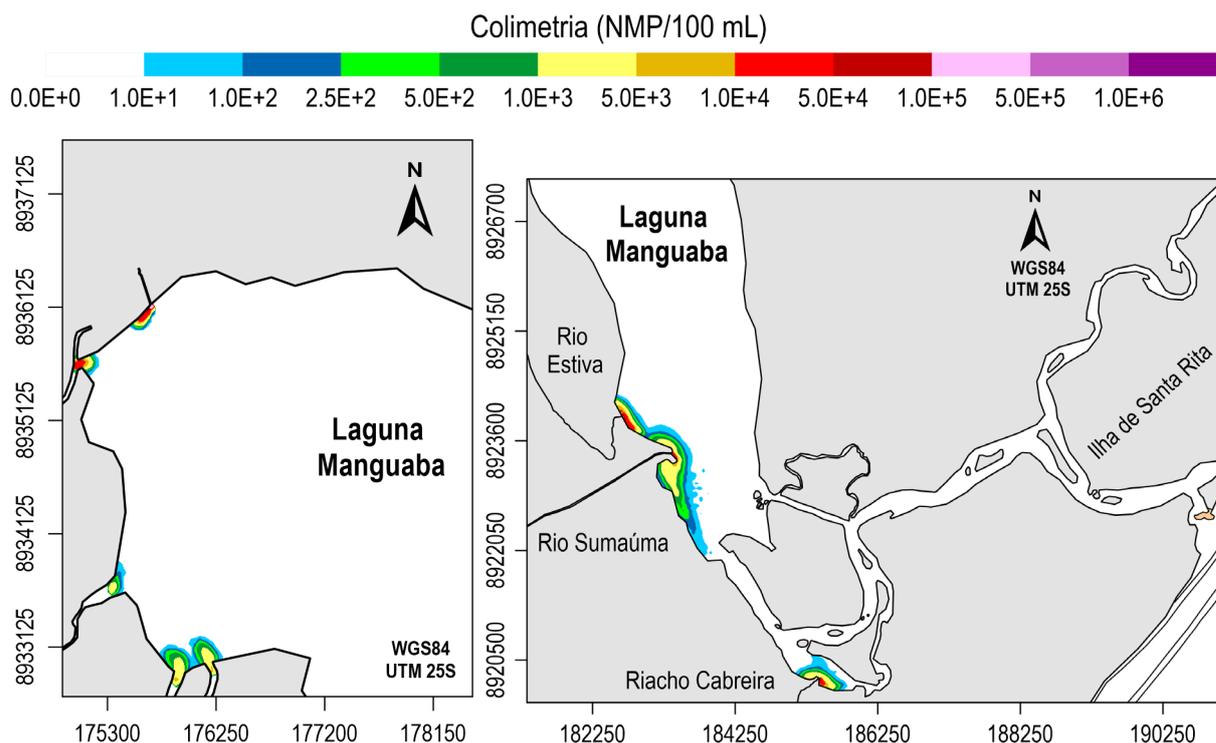


Figura 146 - Mapas de isolinhas de colimetria no 1º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação.

Na laguna Mundaú, a região sul, incluindo parte do canal de comunicação, apresentou elevada porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL. A qualidade de água dessa região foi consideravelmente influenciada pela presença dos canais de drenagem urbana, com lançamentos provenientes dos bairros Vergel do Lago, Ponta Grossa e Trapiche da Barra, conforme exposto na Figura 6, na seção 4.3. Na região sul, próximo ao canal de comunicação, como também no próprio canal, as correntes foram intensas, ocasionando grande dispersão da pluma. Por conta disso, diversos locais dessa região apresentaram concentrações acima do limite em mais de 75% do tempo, principalmente, no período seco. Na embocadura do canal de comunicação da laguna Mundaú, observou-se que no momento em que a pluma alcançou essa região, a diluição e o decaimento bacteriano já tinham proporcionado a redução das concentrações, o que resultou em valores, em sua maioria, abaixo de 5% no período chuvoso, e no período seco, na faixa de 0 a 3%. A partir das fontes de poluição consideradas na modelagem, pode-se dizer que a região da embocadura apresenta condições satisfatórias em praticamente todo o tempo. O mesmo pode ser dito quanto aos canais localizados ao norte da Ilha do Lisboa, que apresentaram porcentagens abaixo de 0.5% em ambos os períodos.

Os resultados são condizentes com as informações de Andrade, Oliveira e Guimarães Jr (2016). Os autores obtiveram o valor de $5.0E+3$ NMP/100 mL na região sul da laguna Mundaú, como também em seu canal de comunicação. Na região sudeste, próximo à foz dos canais de

drenagem urbana, o valor obtido foi de $1.6E+4$ NMP/100 mL. Essas regiões estão inseridas na área de abrangência do Sistema de Disposição Oceânica, conforme mencionado na seção 4.3, no entanto, continuam a poluir a laguna com o lançamento de esgotos brutos.

Ao norte desta laguna, as altas concentrações no rio Mundaú influenciaram negativamente a qualidade de água desta região, principalmente, no período chuvoso, em que a radiação solar foi menor, assim como a transparência da água, a salinidade e a temperatura. As áreas próximas à foz do rio Mundaú apresentaram colimetria acima do limite em mais de 90% do tempo, em ambos os períodos, indicando o predomínio de condições *impróprias* de balneabilidade. Na margem leste, na área próxima à foz do Riacho do Silva, observou-se, em razão da circulação hidrodinâmica, que as plumas se deslocaram mais em direção ao norte da laguna do que no sentido oposto, considerando ambos os períodos. No período seco, devido a uma maior taxa de decaimento, a área de influência de valores acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL foi menor se comparada ao período chuvoso, apesar de terem sido adotadas concentrações maiores no período seco.

Na região noroeste da laguna ocorrem os lançamentos de efluentes por parte do município de Santa Luzia do Norte. Pelos resultados encontrados, percebe-se que o decaimento bacteriano foi o suficiente para reduzir as concentrações de coliformes termotolerantes antes que as massas de água fossem exportadas dessa região. Em frente à região urbana do município de Coqueiro Seco, percebe-se como as correntes de enchente e vazante influenciaram diretamente no sentido de deslocamento da pluma. Tendo como base a análise das correntes residuais, pode-se observar, de modo geral, maior porcentagem de ocorrência de valores acima do limite na região entre o ponto de lançamento e os canais de comunicação. De modo geral, a situação na margem oeste é menos crítica do que na margem leste. Ainda assim, em momentos de maior descarga do rio Mundaú a parcela noroeste pode apresentar condições *impróprias* de balneabilidade.

Esse cenário de déficit de coleta e tratamento dos esgotos, principalmente, nas regiões leste e sul da laguna Mundaú, influencia na qualidade de vida e na saúde da população do entorno (TAMANO et al. 2015; ARAÚJO e MARISCO, 2018). Segundo o estudo elaborado pelo Instituto Trata Brasil denominado “*Esgotamento Sanitário Inadequado e Impactos na Saúde da População - Atualização do diagnóstico da situação nas 100 maiores cidades brasileiras*” (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012), que abrangeu dados de 2008 a 2011, Maceió foi classificada entre as 10 piores cidades, tendo em vista o baixo índice de coleta de esgotos no município, atrelado às altas taxas de internações por diarreias, altos gastos no Sistema Único de

Saúde (SUS) e grande presença de crianças entre 0 e 5 anos nas internações por diarreias⁸.

Na margem sul da laguna Mundaú, a região do bairro do Vergel do Lago, especificamente a “Favela Sururu de Capote”, se destaca pela convergência de três aspectos: realização das atividades de extração e beneficiamento do sururu, em um ambiente com condições inapropriadas de moradia e com saneamento básico precário (RIBAS, JUNKES e RODRIGUES, 2019; MESSIAS, 2020). Em um ambiente insalubre como este, a contaminação dos moluscos, durante sua manipulação, é algo totalmente plausível. No estudo realizado por Normande, Alencar e Bezerra (1998) foi constatado que das 24 amostras de sururu beneficiadas (sem conchas), adquiridas em supermercados e feiras livres, 100% apresentaram não conformidade para o consumo, com base nos padrões em vigor na época para coliformes a 45°C (NMP/g). Silva et al. (2002) avaliaram as condições higiênico-sanitárias de pescados e moluscos, incluindo o sururu, comercializados na cidade de Maceió, e concluíram que 100% das amostras estavam contaminadas por coliformes a 45°C (NMP/g), e 80% continham a presença de *Salmonella sp*, que deveria estar ausente (SANTOS, 2009). Outros autores, tal como Coutinho et al. (2014), também mencionaram a presença desses microrganismos, e ressaltaram que as condições precárias de higiene na cadeia produtiva do sururu podem ocasionar graves riscos à saúde dos consumidores.

Na laguna Manguaba, as áreas mais críticas foram próximas à cidade de Pilar, ao norte, assim como ao sul, perto da foz do rio Sumaúma. Tendo em vista que o contingente populacional no entorno da laguna Manguaba é bem menor se comparada à laguna Mundaú, pode-se dizer que mais de 90% da área da laguna Manguaba apresenta condições *satisfatórias* de balneabilidade. Como visto na metodologia, a cidade de Pilar possui baixo índice de tratamento dos esgotos, cerca de 5%, o que acarreta em lançamentos que comprometem a qualidade de água nas margens da laguna. Nas proximidades desse município, análises feitas pelo IMA-AL (2012, 2013, 2016) revelaram a presença de altas concentrações de coliformes termotolerantes, cerca de 16 vezes superior ao limite, conforme será exposto na Tabela 24. Com base nos mapas apresentados, nota-se que nas áreas próximas à foz do Paraíba do Meio, principalmente, aquela mais distante da cidade de Pilar, ocorreu uma grande dispersão da pluma no período chuvoso. Porém, pelas menores concentrações de coliformes termotolerantes, os valores estiveram abaixo do limite na maior parte do tempo. No período seco, contudo, se observou valores mais elevados, porém, limitado a região mais próxima à foz.

Na região sul da laguna, a presença de esgoto nos rios Estiva, Sumaúma e Riacho Cabreira comprometeu a qualidade das águas na margem oeste, principalmente, no período chuvoso. Na

⁸ Segundo o estudo, “diarreias” são infecções gastrointestinais causadas por agentes patógenos como bactérias, vírus e protozoários.

região da foz do rio Sumaúma observou-se que houve maior dispersão da pluma na direção paralela às margens da laguna, em virtude dos padrões de circulação hidrodinâmica dessa região. Lira (2019) analisou a qualidade de água de diversos rios e canais do entorno das lagoas, e obteve o valor de $4.3E+4$ NMP/100 mL na amostra coletada em um canal de drenagem urbana do município de Marechal Deodoro. Tal valor é um indicativo de que as margens da laguna Manguaba, perto dos canais afluentes, provavelmente apresentam condições *impróprias* de balneabilidade em diversos momentos.

Nos canais de comunicação ao sul da laguna Manguaba, pode-se notar que o período chuvoso, em comparação ao período seco, apresentou maior ocorrência de valores acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL. Ressalta-se que, em ambos os períodos, a porcentagem temporal de colimetria acima do limite esteve sempre abaixo de 15%, com exceção das áreas próximas ao Riacho Cabreira. Assim, com base nessas fontes de poluição, pode-se dizer que a qualidade das águas dos canais da laguna Manguaba foi pouco comprometida pelos lançamentos de efluentes provenientes das áreas urbanas.

➤ **Análises dos dados de colimetria, em relação à Legislação e aos resultados das simulações**

A fim de analisar a qualidade de água, com base nas Resoluções CONAMA nº 357/2005 e CONAMA nº 274/2000, foram obtidos dados de coliformes termotolerantes do IMA-AL (2012, 2013, 2016) e da ANA (2012c), conforme mencionado na metodologia. A Tabela 24 resume as informações obtidas do IMA-AL, contidas no Apêndice B, apresentando o número de amostras, valores mínimos, máximos e as medianas. Apresentam-se, ainda, os valores obtidos da ANA (2012c), para condições de BM e PM de maré de sizígia na laguna Mundaú. A localização e denominação dos pontos de amostragem do IMA-AL e da ANA (2012c) encontram-se na Figura 33, Figura 34 e no Quadro 5. Os dias de coleta foram mencionados na seção 5.5.3.

A partir dessas informações, gerou-se o gráfico exposto na Figura 147, à esquerda, que evidencia, em porcentagem, a quantidade de amostras do IMA-AL (2012, 2013, 2016), por local, que se encontram em conformidade com os valores limites dispostos nas referidas resoluções. Além disso, a Figura 147, à direita, apresenta o gráfico em que se avaliou, em porcentagem, a quantidade de amostras, por local, que se enquadram na categoria *imprópria*, ou seja, com valores acima de $2.5E+3$ NMP/100 mL, segundo a Resolução CONAMA nº 274/2000. Quanto às informações da ANA (2012c), a Figura 148 expõe, graficamente, os valores na BM e na PM, com o destaque para o limite adotado.

Tabela 24 - Dados de colimetria obtidos do IMA-AL (2012, 2013, 2016). Nota-se ainda os valores provenientes da ANA (2012c), relativo à laguna Mundaú. A localização e denominação dos pontos de amostragem encontram-se na Figura 33, Figura 34 e no Quadro 5. Os dias de coleta foram mencionados na seção 5.5.3.

Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)							
IMA-AL (2012, 2013, 2016)					ANA (2012c)		
Local	Nº Am.	V. Mín.	V. Máx.	Mediana	Local	Baixa-mar (BM)	Preamar (PM)
P1	12	4.0E+1	1.6E+4	5.0E+2	P1_ANA	2.4E+4	1.6E+4
P2	12	< 2.0E+1	1.1E+3	4.3E+1	P2_ANA	1.6E+4	2.4E+3
P3	12	< 2.0E+1	3.0E+3	3.0E+1	P3_ANA	5.4E+5	5.4E+5
P4	12	< 1.8E+1	1.4E+2	< 2.0E+1	P4_ANA	8.3E+4	1.4E+4
P5	12	< 1.8E+1	≥ 1.6E+4	< 2.0E+1	P5_ANA	3.5E+4	2.4E+5
P6	12	< 2.0E+1	≥ 1.6E+4	2.7E+2	P6_ANA	9.2E+4	8.5E+4
P7	12	< 2.0E+1	≥ 1.6E+4	1.5E+3	P7_ANA	2.4E+3	1.3E+3
P8	12	< 2.0E+1	≥ 1.6E+4	1.2E+2	P8_ANA	2.0E+2	2.4E+4
P9	11	< 2.0E+1	1.6E+4	2.0E+1	P9_ANA	4.5E+2	7.9E+3
P10	12	< 2.0E+1	9.0E+3	3.7E+2	P10_ANA	3.5E+2	1.3E+3
P11	12	< 2.0E+1	1.1E+3	4.0E+1	P11_ANA	2.0E+2	2.3E+3
P12	12	< 2.0E+1	3.0E+2	5.0E+1	P12_ANA	2.0E+2	2.3E+3
P13	12	< 2.0E+1	8.0E+2	4.3E+1	P13_ANA	2.4E+4	2.4E+4
P14	11	< 2.0E+1	3.0E+3	6.0E+2	P14_ANA	3.5E+4	3.5E+4
P15	12	< 2.0E+1	2.8E+3	1.2E+2	P15_ANA	7.9E+3	1.6E+4
P16	11	< 1.8E+1	8.0E+1	< 2.0E+1	P16_ANA	5.4E+4	9.2E+4
P17	11	< 2.0E+1	2.8E+3	7.0E+1	P17_ANA	5.4E+4	5.4E+5
P18	11	< 2.0E+1	≥ 1.6E+4	4.9E+2	P18_ANA	2.4E+2	5.4E+4
P19	11	< 1.8E+1	2.2E+3	2.3E+2	P19_ANA	2.4E+2	1.6E+5
					P20_ANA	2.3E+4	4.9E+3

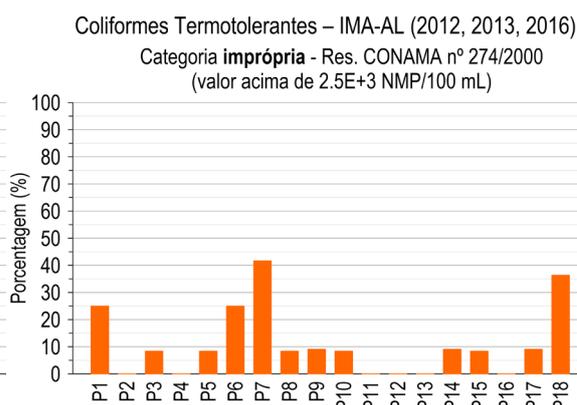
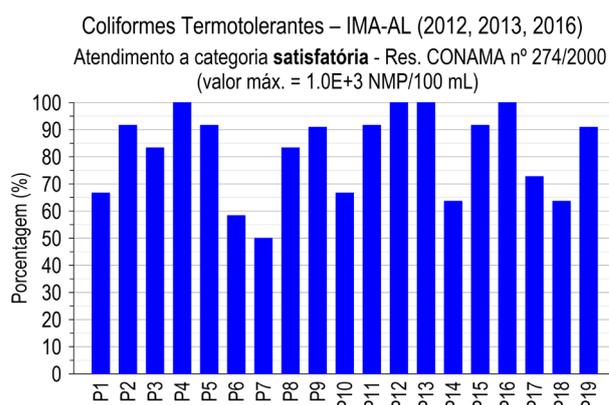


Figura 147 - Quantidade de amostras do IMA-AL (2012, 2013, 2016) que atenderam ao padrão da categoria satisfatória, gráfico à esquerda, e quantidade de amostras que se enquadraram na categoria imprópria, gráfico à direita.

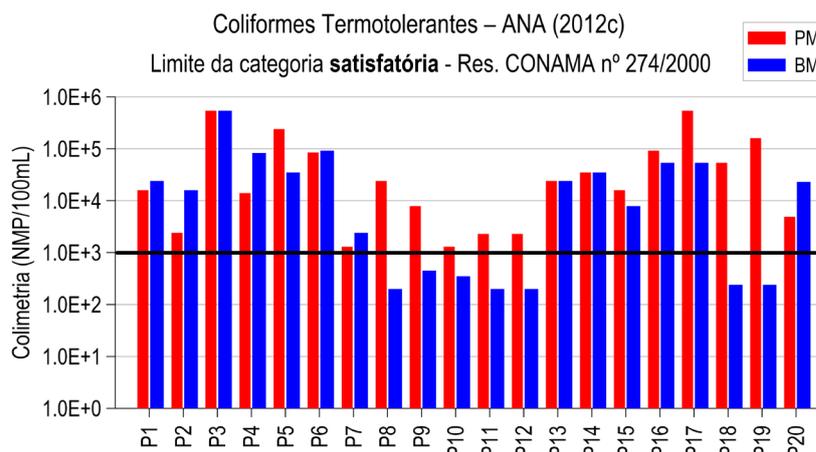


Figura 148 - Valores de colimetria obtidas pela ANA (2012c), em diversos pontos da laguna Mundaú, nas condições de maré enchente (PM) e maré vazante (BM).

Na laguna Mundaú e em parte do seu canal de comunicação, segundo o IMA-AL (2012, 2013, 2016), os locais P7 (L. Mundaú, Canal da Assembleia), região sul; P6 (L. Mundaú, Canal da Levada), região sudeste; e P1 (Rio Mundaú, \pm 200 metros da Foz na L. Mundaú) apresentaram as menores porcentagens de atendimento referentes à categoria *satisfatória*, com cerca de 50%, 58% e 67%, respectivamente. Nesses locais, o valor máximo obtido foi de, no mínimo, $1.6E+4$ NMP/100 mL. Considerando todas as estações, o local P7 foi o mais crítico, com 42% das amostras classificadas na categoria *imprópria*, isto é, com valores acima de $2.5E+3$ NMP/100 mL. Esses dados refletem a má qualidade das águas doces afluentes, como consequência das condições inadequadas de esgotamento sanitário nas bacias contribuintes.

Na laguna Mundaú, as melhores condições de balneabilidade foram encontradas na região central, local P4 (L. Mundaú, Centro Geográfico), com 100% das amostras na categoria *satisfatória*, e colimetria máxima de $1.4E+2$ NMP/100 mL. De modo geral, os resultados das simulações foram coerentes com os dados do IMA-AL (2012, 2013, 2016), pois evidenciaram as áreas mais críticas em termos de condições *impróprias* de balneabilidade. Dentre elas, as regiões próximas à foz do rio Mundaú e aos canais de drenagem urbana ao sul da laguna, incluindo parte do canal de comunicação.

Ao analisar os dados da ANA (2012c), relativo à laguna Mundaú, percebeu-se que os valores, na condição de enchente (PM), foram significativamente elevados em diversos pontos da laguna, variando numa faixa de $1.3E+3$ a $5.4E+5$ NMP/100 mL. Todos os 20 locais de coleta apresentaram valores que excederam o limite da categoria *satisfatória*. Pode-se dizer também que 75% dessas amostras seriam classificadas na categoria *imprópria*. Destaca-se que na PM, os maiores valores foram encontrados nos locais P3_ANA e P17_ANA, ambos próximos à margem leste, na região nordeste. Já os menores valores foram obtidos nos locais P7_ANA

(margem oeste, ao norte da zona urbana do município de Coqueiro Seco) e P10_ANA (região sul, próximo do canal de comunicação).

Na condição de vazante (BM), a faixa de valores ficou entre $2.0E+2$ e $5.4E+5$ NMP/100 mL. Apenas 35% das amostras atenderam ao limite de $1.0E+3$ NMP/100 mL. Além disso, cerca de 60% dos locais teriam suas águas classificadas como *impróprias*. Destaca-se que o maior valor foi obtido no local P3_ANA, seguido do local P6_ANA (margem oeste, ao norte do local P7_ANA). Em contrapartida, os menores valores foram observados nos locais P8_ANA (margem oeste, em frente à zona urbana do município de Coqueiro Seco), P11_ANA (região sul, no canal de comunicação) e P12_ANA (região sul).

Alguns desses dados são ao menos duvidosos, principalmente, no que diz respeito ao centro da laguna, locais P18_ANA e P19_ANA, nas condições de baixa-mar (BM). Como visto nas análises dos modelos hidrodinâmicos, de modo geral, as velocidades na estação “Mu Centro” foram baixas, com valor médio de 0.04 m/s. Como as coletas foram realizadas em um período diurno e com baixas vazões fluviais, haveria tempo suficiente para que a radiação solar e a salinidade reduzissem as concentrações de coliformes termotolerantes antes que a pluma alcançasse o centro da laguna. Dessa forma, seria pouco provável observar valores com ordem de grandeza de $1.0E+4$ NMP/100 mL, ou acima disso.

Na laguna Manguaba, segundo dados do IMA-AL (2012, 2013, 2016), a menor quantidade de amostras em conformidade foi observada nos locais P14 (L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma) e P18 (L. Manguaba \pm 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio), ambos com 64% das amostras classificadas na categoria *satisfatória*. O valor máximo obtido no local P14 foi de $3.0E+3$ NMP/100 mL, enquanto no P18, no mínimo, $1.6E+4$ NMP/100 mL. Nota-se, sobre este último local, que cerca de 37% das amostras seriam classificadas na categoria *imprópria*. Com base nas modelagens, os lançamentos da cidade de Pilar comprometeram consideravelmente a qualidade das águas nas margens ao norte desta laguna. Ao sul, a poluição trazida pelo rio Sumaúma degrada a qualidade nas áreas próximas à foz, conforme exposto nos resultados. O único local com 100% de atendimento foi o P16 (L. Manguaba, Ponta do Camurupim), o mais afastado dos centros urbanos. Como já comentado, com exceção das áreas próximas aos rios e canais de drenagem urbana, a área restante da laguna, que corresponde a mais de 90% da área total, deve apresentar condições *satisfatórias* de balneabilidade.

Na região dos canais de comunicação, a pior condição foi observada no local P7 (L. Mundaú, Canal da Assembleia), cujos valores já foram comentados, seguido do local P10 (L. Mundaú, em frente à BRASKEM), este com 67% de atendimento ao padrão, e valor máximo de $9.0E+3$ NMP/100 mL. Nessas regiões, as modelagens mostraram que as fortes correntes

proporcionaram grande dispersão da pluma ao longo do canal, de modo que foram observadas altas concentrações mesmo distante das fontes de poluição. Os resultados obtidos foram coerentes, em termos de ordem de grandeza, com dados do IMA-AL. Observa-se que várias amostras obtidas nesse canal estão associadas às condições de maré enchente, que proporcionaram uma maior porcentagem de atendimento à categoria *satisfatória*. Caso a maioria das amostras tivessem sido coletadas nas marés vazantes, se observaria uma porcentagem mais baixa.

Quanto as áreas que apresentaram as melhores condições, com 100% de atendimento e nenhuma amostra superior a $2.5E+3$ NMP/100 mL, destacam-se os locais P12 (L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sítio do Buraco) e P13 (L. Manguaba, Canal da Massagueira). Nota-se que a região da embocadura do canal de comunicação da laguna Mundaú, local P9 (Boca da Barra), praticamente não foi afetada pelos valores elevados constatados no canal de comunicação, o que resultou em mais de 90% de atendimento, isto é, apenas uma amostra superou o limite. Esses dados foram condizentes com os resultados encontrados, demonstrando que a diluição do efluente e o decaimento bacteriano foram capazes de reduzir consideravelmente as concentrações, proporcionando, na maior parte do tempo, condições *satisfatórias* nessa região.

➤ **2º Cenário: Variabilidade espacial e temporal da colimetria supondo a execução de ações voltadas à melhoria do esgotamento sanitário, com coleta e tratamento de parte dos esgotos, resultando na redução de 90% nas concentrações afluentes.**

Da Figura 149 até a Figura 151, apresentam-se os mapas de isolinhas de probabilidades de passagem das plumas efluentes com valores de colimetria acima $1.0E+3$ NMP/100 mL, referentes ao período chuvoso, enquanto os mapas da Figura 152 até a Figura 154, se remetem ao período seco. A fim de expressar as novas concentrações obtidas e embasar a comparação com o primeiro cenário, apresentam-se, da Figura 155 até a Figura 157, os mapas de isolinhas de colimetria, referente ao instante de tempo 07/11/2018 04h00, retratando uma PM de maré de sizígia. Da Figura 158 até a Figura 160, por sua vez, se refere à condição de BM, no mesmo dia, às 11h00.

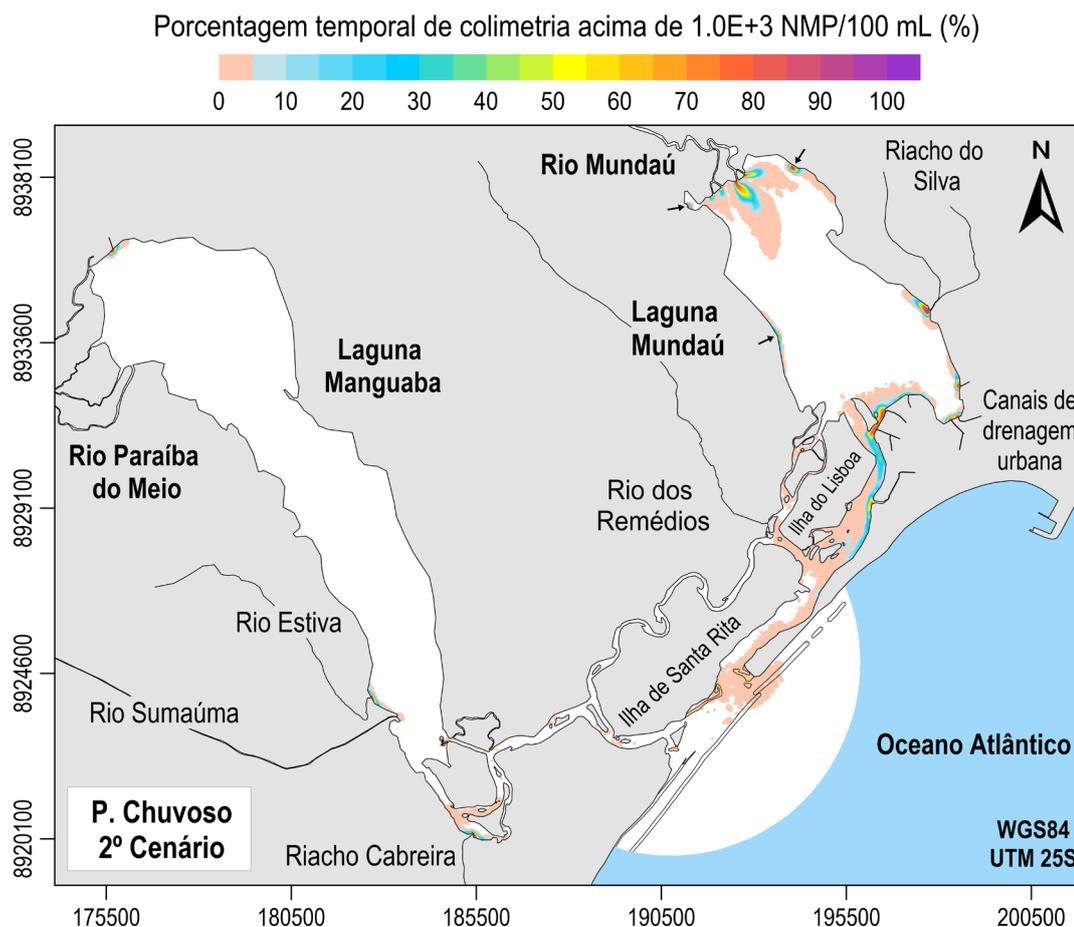


Figura 149 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 2º cenário do período chuvoso. Compare esse mapa com a Figura 135, que retrata o 1º cenário.

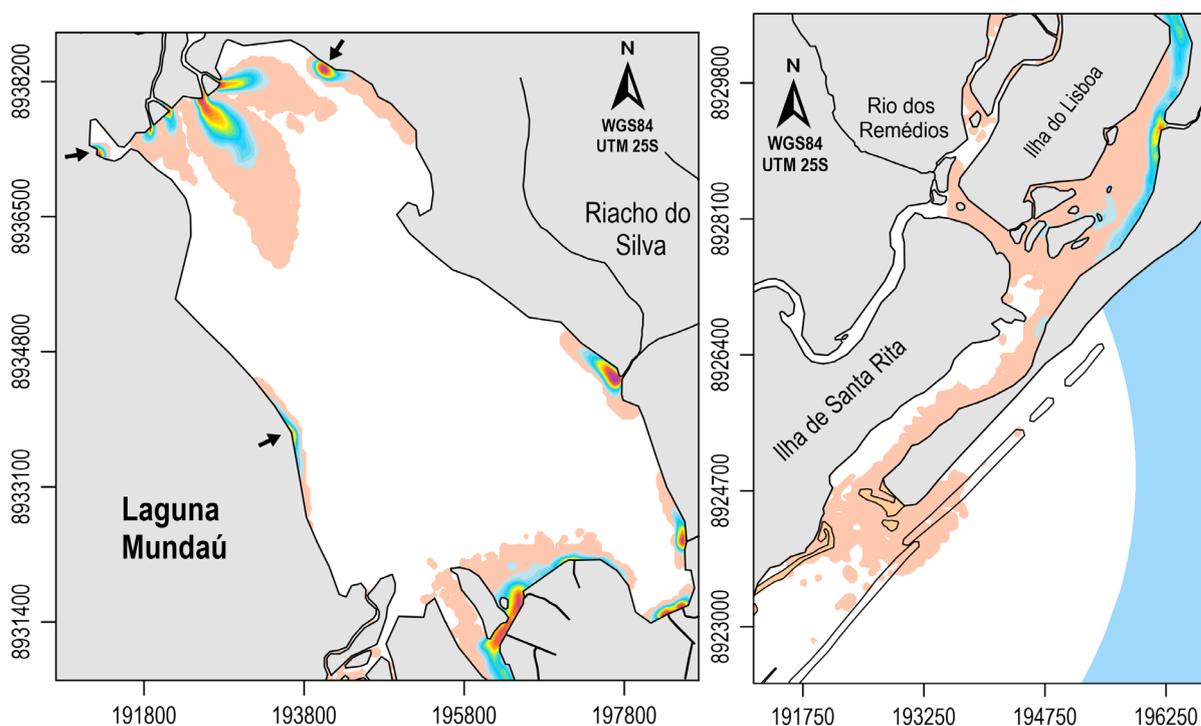


Figura 150 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 2º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 136, que retrata o 1º cenário.

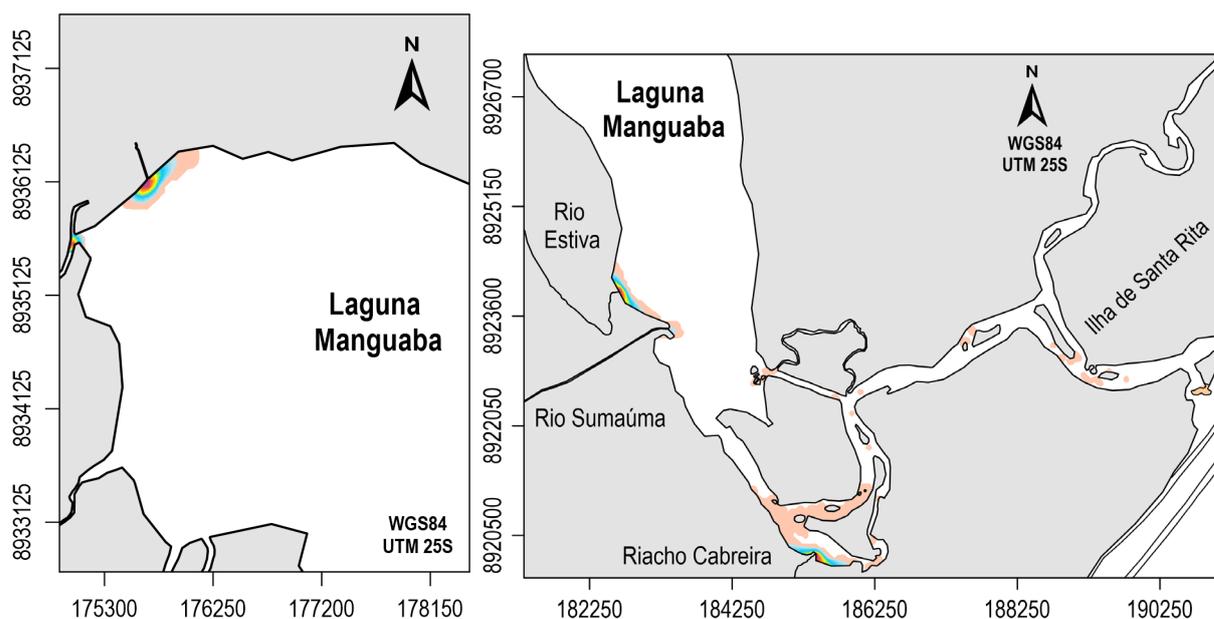


Figura 151 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 2º cenário do período chuvoso, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 137, que retrata o 1º cenário.

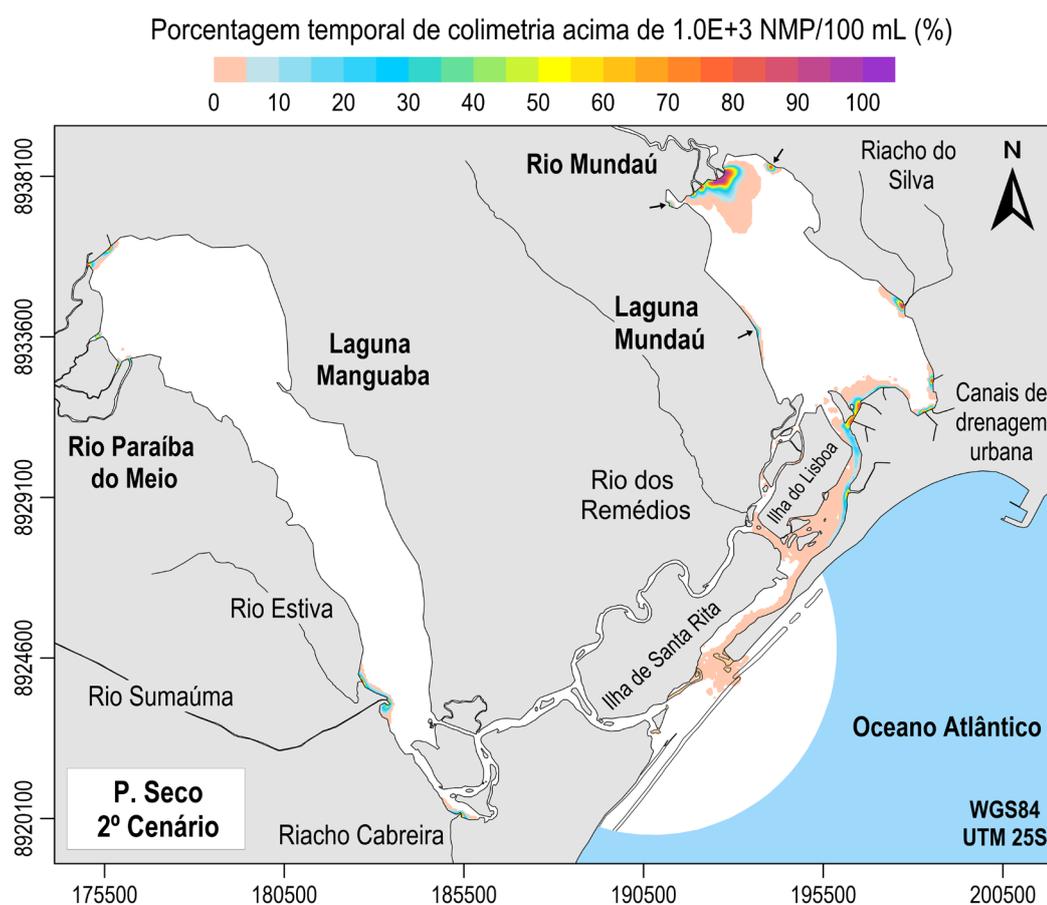


Figura 152 - Mapa de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 2º cenário do período seco. Compare esse mapa com a Figura 138, que retrata o 1º cenário.

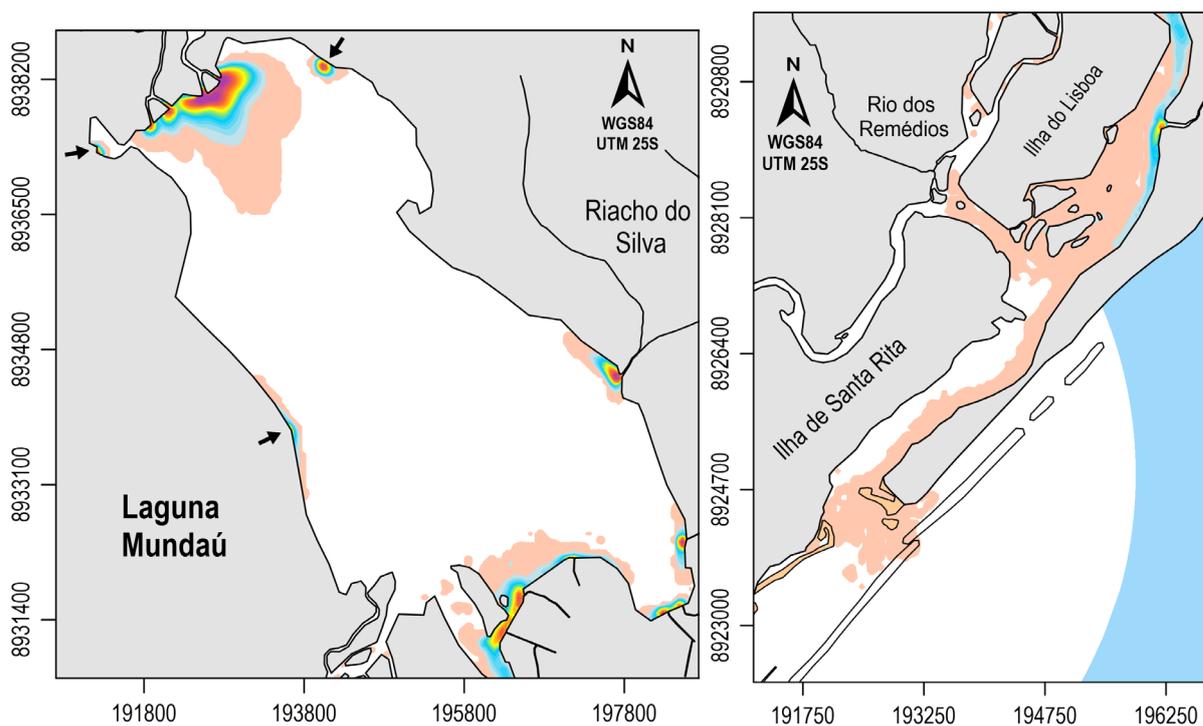


Figura 153 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 2º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 139, que retrata o 1º cenário.

Porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL (%)

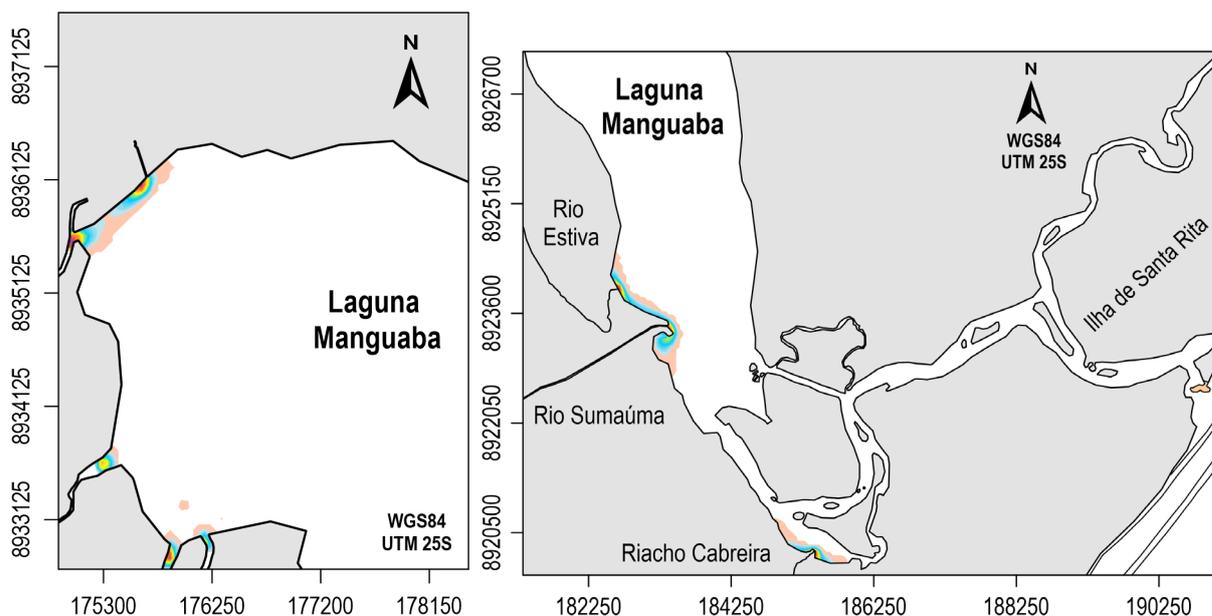


Figura 154 - Mapas de isolinhas de porcentagem temporal de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL no 2º cenário do período seco, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 140, que retrata o 1º cenário.

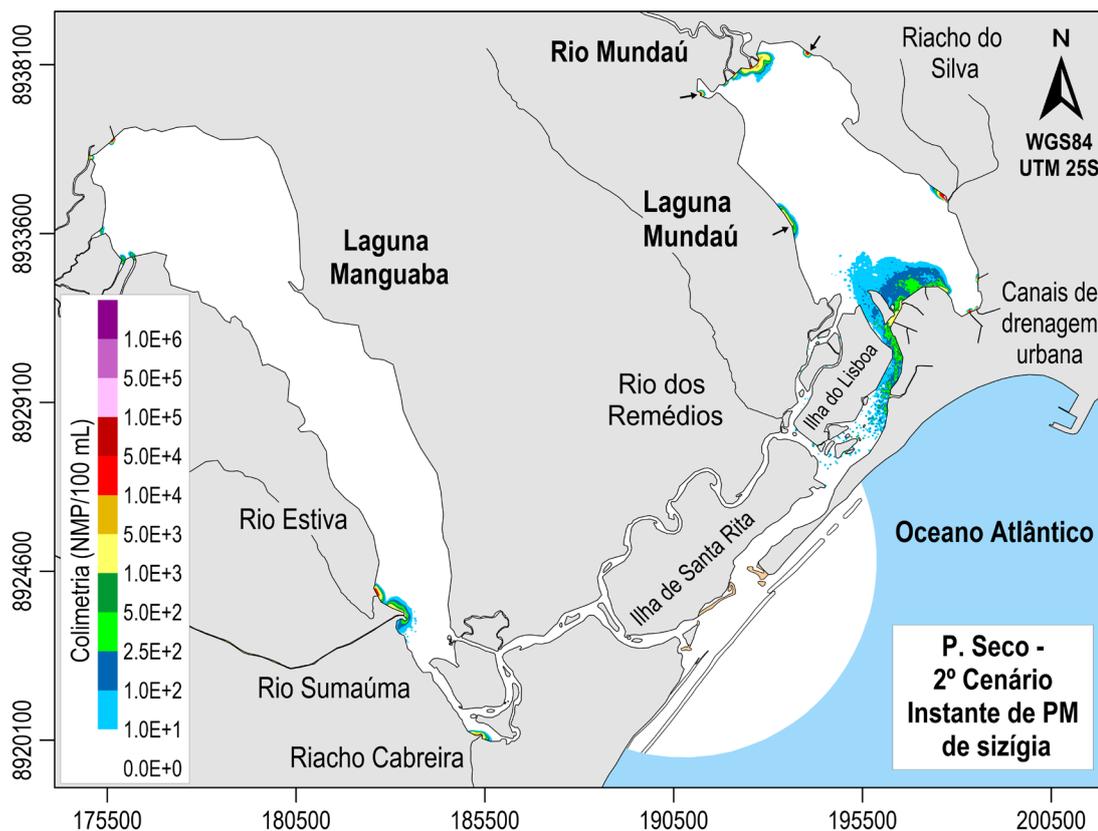


Figura 155 - Mapa de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00. Compare esse mapa com a Figura 141, que retrata o 1º cenário.

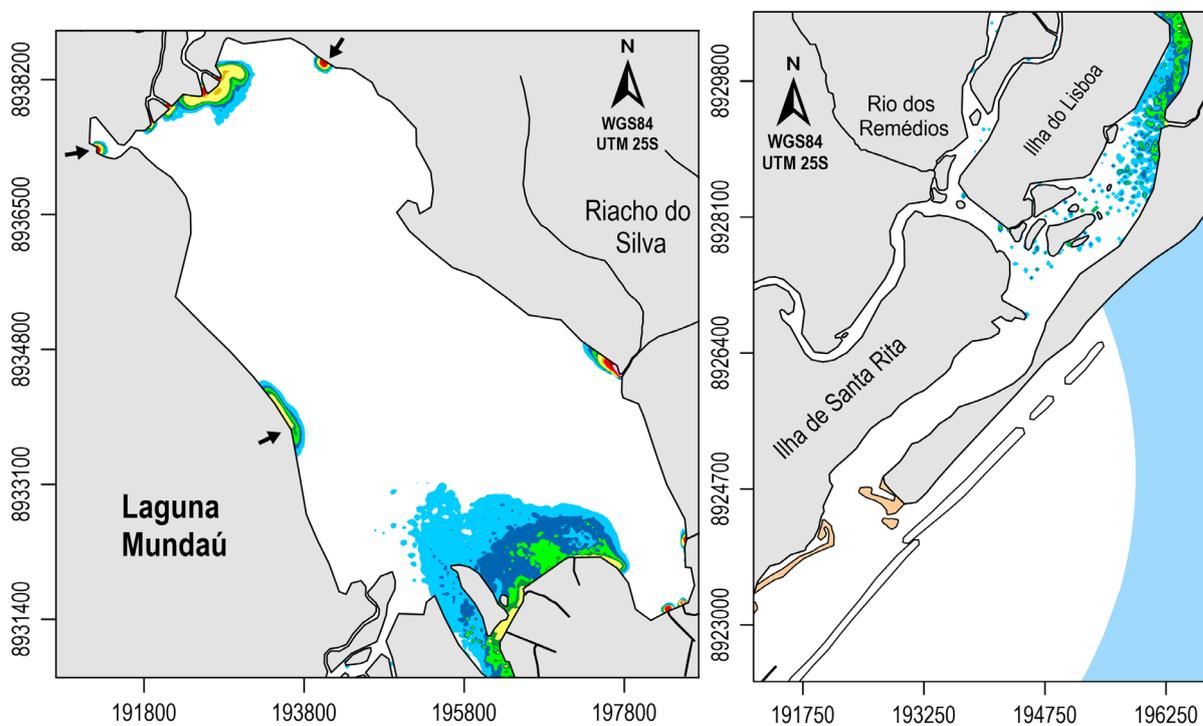


Figura 156 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 142, que retrata o 1º cenário.

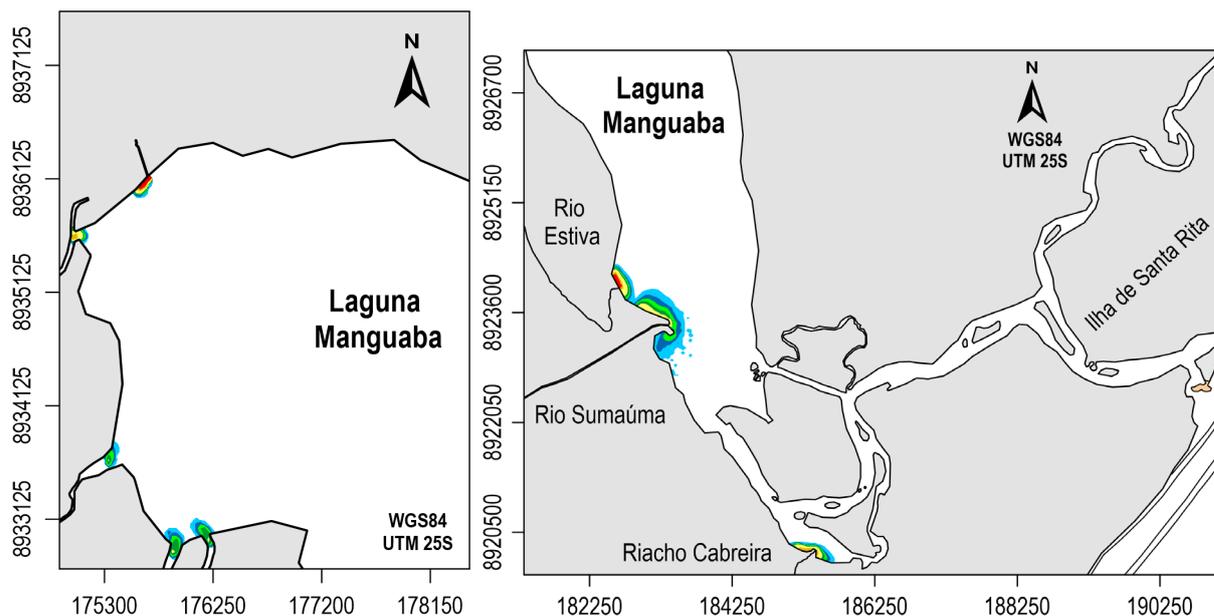


Figura 157 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de PM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 04h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 143, que retrata o 1º cenário.

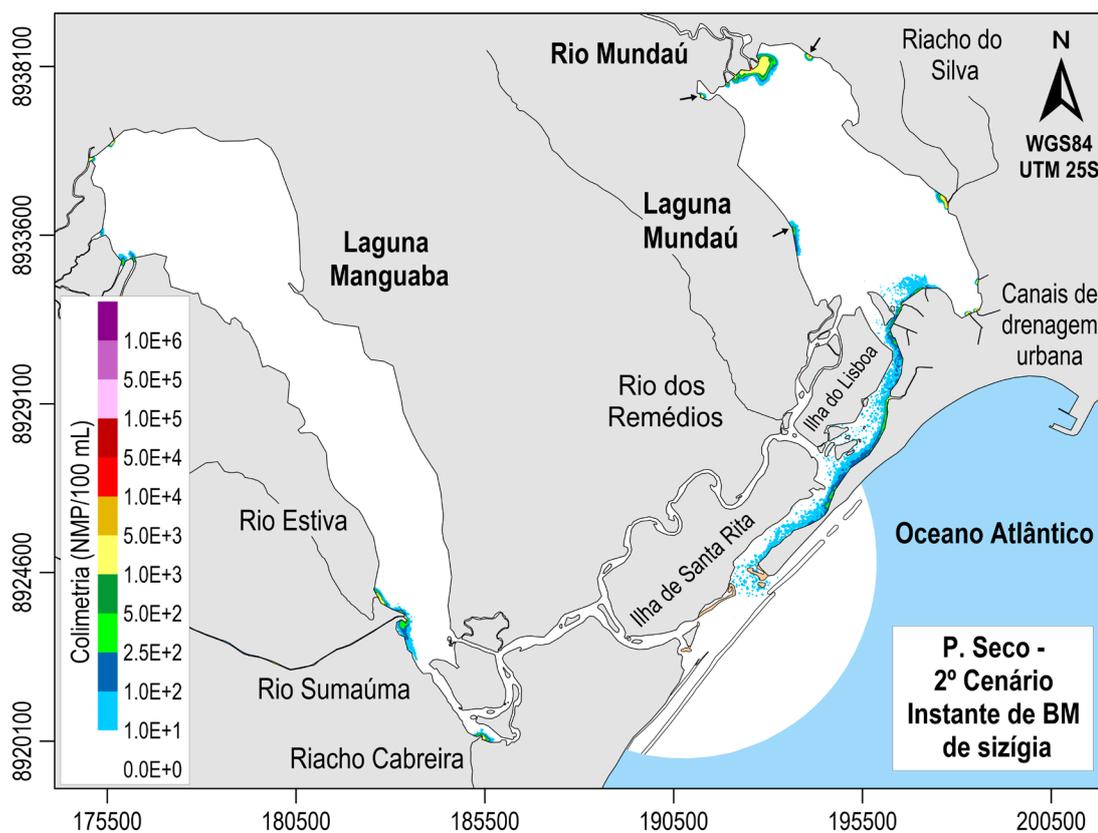


Figura 158 - Mapa de isolinhas de colimetria no 2º cenário do seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00. Compare esse mapa com a Figura 144, que retrata o 1º cenário.

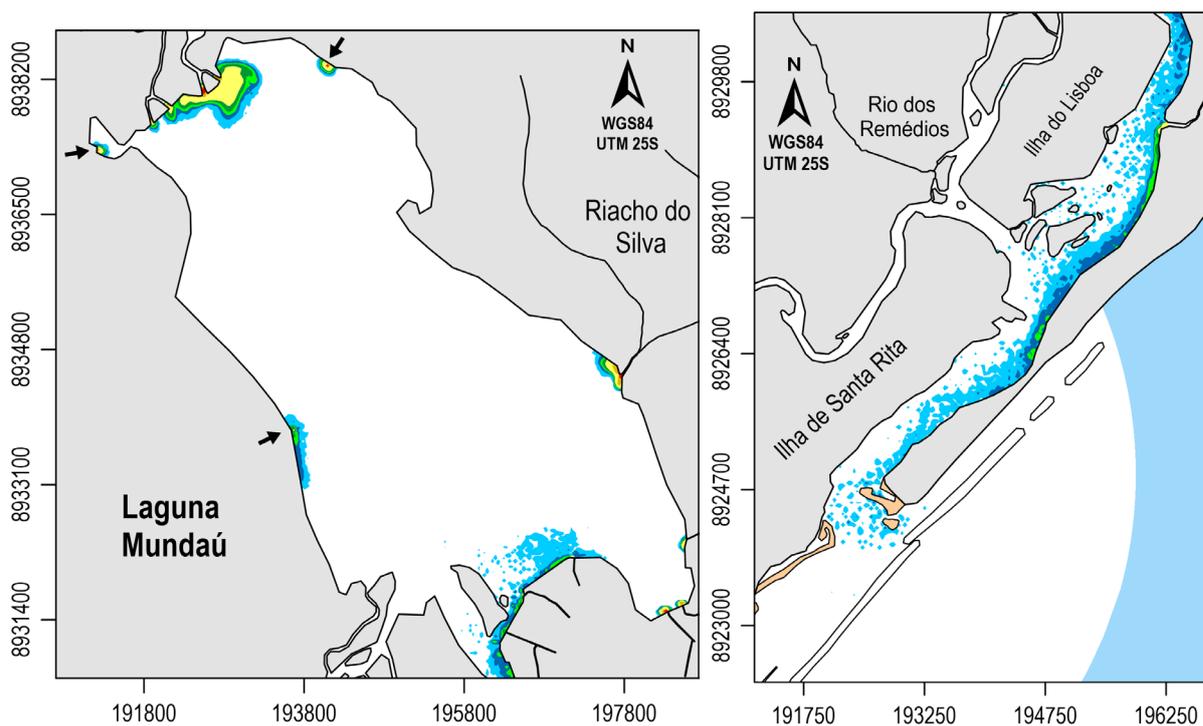


Figura 159 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Mundaú e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 146, que retrata o 1º cenário.

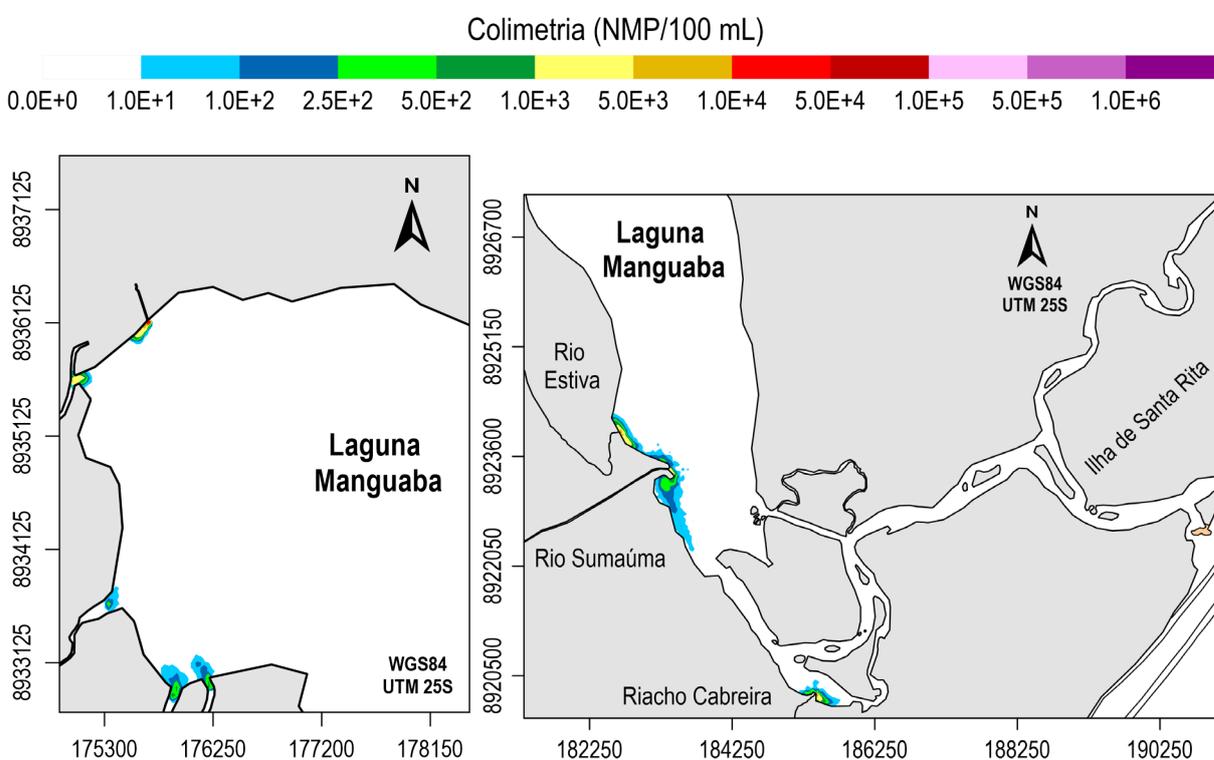


Figura 160 - Mapas de isolinhas de colimetria no 2º cenário do período seco, em referência ao instante de BM de maré de sizígia no tempo 07/11/2018 11h00, com detalhes para a laguna Manguaba e seu canal de comunicação. Compare esses mapas com a Figura 146, que retrata o 1º cenário.

Ao comparar os resultados do segundo cenário com os do primeiro, ficou evidente, em ambos os períodos, que a redução de 90% nas concentrações afluentes, de modo geral, levou a

mudanças significativas na qualidade das águas estuarinas. Por exemplo, no período chuvoso as porcentagens temporais de colimetria acima de $1.0E+3$ NMP/100 mL reduziram-se consideravelmente na região sob influência do rio Mundaú, em alguns locais ao sul da laguna Mundaú e em seu canal de comunicação. Em outras regiões dessa laguna, como na margem leste, próxima à foz do Riacho do Silva, e na região sudeste, a redução de apenas 90% demonstrou não ser o suficiente para diminuir de forma relevante a área de influência de valores de colimetria acima do limite considerado. Como essas regiões estão inseridas na área de abrangência do Sistema de Disposição Oceânica, o ideal seria que todo o esgoto fosse coletado, previamente tratado em nível preliminar e, posteriormente, lançado ao mar. Dessa forma, se evitaria poluir as margens da laguna com efluentes brutos, ou até mesmo tratados, reduzindo as áreas em condições *impróprias* de balneabilidade. O mesmo seria válido para a região sul. Ressalta-se a importância de expandir a rede coletora para as demais áreas da margem leste, inseridas na bacia de contribuição, de modo que, futuramente, possam ser contempladas na cobertura do Sistema de Disposição Oceânica. Nas outras regiões que não são atendidas por um sistema de disposição oceânica, como, por exemplo, a parcela norte de Maceió e o município de Satuba, os esgotos dessas regiões deveriam ser tratados considerando a redução significativa das concentrações de coliformes termotolerantes. Como exemplo, o emprego de lagoas de maturação ou polimento poderiam reduzir de 3 a 5 ordens de grandeza nas concentrações de coliformes termotolerantes, como menciona Von Sperling (2014).

Na laguna Manguaba, as diferenças mais expressivas foram percebidas nas áreas próximas à foz do Rio Paraíba do Meio, como também ao sul, próxima à foz do Rio Sumaúma. As zonas urbanas ao redor dessa laguna não são atendidas por um sistema de disposição oceânica, de modo que a coleta e o devido tratamento dos esgotos, antes de serem lançados nos corpos d'água, são importantes para reduzir os impactos causados na qualidade da água às margens dessa laguna.

De modo geral, os resultados gerados nas simulações demonstraram que a melhoria da qualidade das águas, em conformidade com os usos existentes e desejáveis, deve se pautar pela redução das cargas poluidoras afluentes. Nesse contexto, a implantação e expansão da rede coletora de esgotos e o tratamento destes é um passo fundamental para melhorar a qualidade dos recursos hídricos, e reduzir as condições de insalubridade a que estão expostos os pescadores e beneficiadores do sururu. Para mudar esse cenário é imprescindível que o poder público e a iniciativa privada se empenhem para prover os investimentos necessários para universalização do saneamento básico, tendo como base, caso existam, os Planos Municipais de Saneamento Básico, bem como outros estudos referentes ao tema.

7 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo alcançaram os objetivos propostos, aprofundando os conhecimentos sobre a circulação hidrodinâmica, renovação e qualidade das águas do CELMM. O entendimento dessas questões é de suma importância para sugerir práticas adequadas de gestão e gerenciamento desse sistema que está vulnerável às pressões antrópicas existentes em suas bacias de contribuição, que podem comprometer, ou então, que já comprometem a sua qualidade ambiental.

As modelagens hidrodinâmicas representaram adequadamente as variações de nível d'água medidas nas lagunas. Constatou-se que, de modo geral, as marés e os ventos são as principais forçantes da circulação hidrodinâmica, que é fortemente influenciada em momentos de grandes descargas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, como foi exposto nas séries temporais de módulo da velocidade das correntes, como também de vazões e de volumes resultantes. Verificou-se a forte atenuação da maré em direção às lagunas, principalmente, na laguna Manguaba. Os resultados demonstraram como são reduzidas as trocas de massas de água desta laguna com os canais de comunicação/mar. Relativo à velocidade das correntes no interior das lagunas, valores intensos foram obtidos nas áreas próximas aos canais de comunicação. Em contrapartida, na região sudeste da laguna Mundaú e na região norte da laguna Manguaba as velocidades foram consideravelmente baixas. Quanto aos canais de comunicação, de modo geral, as velocidades foram mais intensas no canal da laguna Manguaba. A análise das correntes residuais indicou claramente as diferenças na circulação hidrodinâmica entre os períodos chuvoso e seco. No período chuvoso, as correntes residuais foram, em sua maioria, em direção aos canais de comunicação. No período seco, porém, pôde-se observar melhor a influência dos ventos na indução de correntes, gerando vórtices nas lagunas, de modo bem expressivo na região norte da laguna Manguaba. Essas informações foram essenciais para compreender os resultados das simulações de THC.

Os THC foram caracterizados por meio do T_R , $T_{R\%}$ e I_A . Dentre os três THC, a I_A forneceu os resultados mais significativos para compreender a mistura e a renovação das águas. Deste modo, recomenda-se que a I_A seja considerada nas futuras análises de THC. Quanto aos resultados obtidos, em todas as análises foram observadas diferenças expressivas entre os períodos chuvoso e seco. No período chuvoso, os resultados de T_R mostraram que grande parte das águas da laguna Mundaú podem ser rapidamente exportadas, caso ocorra uma intensa descarga fluvial. Já na laguna Manguaba, observou-se, por efeito das vazões e dos ventos, que as águas da região norte, próximas à margem leste, apresentaram os maiores T_R desta laguna neste período.

No período seco, os maiores T_R na laguna Mundaú ocorreram na região noroeste, e em seguida, na região à frente da foz do Riacho do Silva. Na laguna Manguaba, a região norte foi a mais crítica, com predomínio de T_R igual ao tempo de simulação, com tendência a valores bem mais elevados. Quanto à $T_{R\%}$ e a I_A , observou-se, no período chuvoso, que as maiores I_A na laguna Mundaú ocorreram na região sul e em parte do canal de comunicação. Já na laguna Manguaba, as águas mais “velhas” ocorreram entre a região central e sul, especialmente, na margem leste. No período seco, as maiores I_A na laguna Mundaú foram observadas nas proximidades da região sudeste, enquanto na laguna Manguaba, nas proximidades da região central, onde se obteve a maior I_A considerando todo o CELMM. Em ambas as regiões, a renovação ocorreu lentamente, como demonstrado nas análises de $T_{R\%}$, além disso, essas áreas também foram aquelas que apresentaram os índices de estado trófico mais crítico, em cada laguna, revelando que a I_A é um THC que indica os locais mais propícios a estados tróficos mais críticos. Essas regiões merecem atenção e, portanto, recomenda-se o monitoramento de parâmetros de qualidade de água.

As simulações de salinidade retrataram a mistura das águas doces e salinas ao longo do espaço e do tempo. No período chuvoso foi observado a redução acentuada da salinidade na laguna Mundaú, devido ao pico de descarga do rio Mundaú, e a predominância de baixos valores de salinidade em ambas as lagunas. Verificou-se como as condições ambientais das estações chuvosas são adversas ao molusco sururu, o que ajuda a explicar a queda vertiginosa da população desse molusco na laguna Mundaú. Na transição do período chuvoso para o seco, observou-se o aumento gradual da salinidade. No período seco, com maior redução das descargas fluviais e da precipitação, obteve-se um aumento mais acentuado da salinidade. Ao contrário do período chuvoso, o período seco apresentou condições muito mais adequadas à sobrevivência do sururu. Na laguna Mundaú, na ocorrência de descargas fluviais mínimas, a região norte foi aquela com maior porcentagem de tempo com valores de salinidade na faixa ideal ao sururu, enquanto que ao sul, próximo aos canais de comunicação, ocorreu o oposto.

Avaliou-se as variações espaciais e temporais de temperatura. Os resultados obtidos demonstraram que as variações temporais, devido à sazonalidade, foram mais significativas do que as variações espaciais, pois, como apresentado nas simulações e nos dados medidos em campo, o gradiente espacial de temperatura é pequeno no interior das lagunas. Observou-se ainda que as lagunas apresentaram amplitude térmica um pouco maior em comparação ao mar. Em síntese, no período chuvoso, com o resfriamento das águas, as temperaturas nas regiões centrais das lagunas estiveram, na maior parte do tempo, acima dos valores considerados nos rios e no mar. Com o aumento da temperatura no período seco, as águas da região central das lagunas

foram mais quentes do que as águas do mar, e mais frias do que as águas dos rios, em praticamente toda a simulação.

Por meio das simulações da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes, observou-se, para o primeiro cenário, como as águas da laguna Mundaú nas áreas próximas à foz do rio Mundaú e aos canais de drenagem urbana, principalmente, na região sul, apresentaram condições *impróprias* de balneabilidade em uma parcela expressiva do tempo. Isso reflete a poluição pelos esgotos lançados nesta laguna, que comprometem a qualidade de água e prejudica a saúde dos pescadores. Nesta laguna, as melhores condições de balneabilidade foram observadas em sua região central. Na laguna Manguaba, constatou-se maior comprometimento nas margens próximas à foz dos rios Paraíba do Meio, Sumaúma e Estiva, além do canal de drenagem urbana de Pilar. Pelo menor contingente populacional nas bacias contribuintes, pôde-se inferir que a maior parte da área desta laguna deve apresentar condições *satisfatórias* de balneabilidade. Os dados obtidos de colimetria demonstraram a deterioração da qualidade das águas, e foram condizentes com os resultados das modelagens. Pelos resultados do segundo cenário, em que se supôs a execução de ações voltadas a redução de 90% nas concentrações admitidas no primeiro cenário, ficou evidente a melhoria na qualidade de água, demonstrando a importância da universalização da coleta e tratamento dos esgotos em prol dos recursos hídricos e da população do entorno. Ressaltou-se a necessidade do Sistema de Disposição Oceânica de Maceió atender toda população inserida em sua área de cobertura, e além disso, expandir a rede coletora, de modo a evitar que os esgotos, tratados ou não, sejam lançados na laguna Mundaú, reduzindo assim as áreas em condições *impróprias* de balneabilidade.

Conclui-se que a modelagem ambiental é uma ferramenta indispensável de suporte à gestão ambiental do CELMM. Pois, além de prover informações relevantes quanto ao diagnóstico da circulação hidrodinâmica, renovação e qualidade das águas, ainda poderá ser utilizada para prognosticar as melhorias na qualidade de água, em função da redução da poluição, como também de intervenções nos canais de comunicação e nas embocaduras, por meio de dragagens.

8 RECOMENDAÇÕES

Para futuras simulações, recomenda-se que na modelagem digital de terreno sejam utilizados dados batimétricos mais atuais disponíveis. Nesse sentido, cita-se a importância de um novo levantamento batimétrico, prioritariamente, na laguna Manguaba e em seu canal de comunicação, que apresentam dados bem defasados. A obtenção de dados medidos de elevação da superfície livre do mar possibilitaria definir melhor as condições de contorno na fronteira aberta, englobando as marés astronômicas e as variações do nível médio do mar. Para melhor caracterizar a atenuação da maré ao longo do canal da laguna Manguaba, sugere-se coletar informações quanto às variações de nível d'água nesse canal. Em associação a isso, a aquisição de dados de intensidade das correntes nos canais das lagunas proporcionaria uma calibração mais precisa do modelo, melhorando a representação da circulação hidrodinâmica.

Sobre as simulações que tratam de qualidade de água, tais como, de salinidade, temperatura e da dispersão e decaimento de plumas de coliformes termotolerantes, se faz necessário obter dados medidos – nos rios afluentes, no interior das lagunas e em seus canais de comunicação – em um período mais atual e compatível com o intervalo de tempo das simulações, afim de calibrar e validar os modelos, possibilitando representar mais fielmente as variações espaciais e temporais desses parâmetros de qualidade. Seria recomendável adquirir dados de qualidade de outros parâmetros, tais como, OD, DBO, nitrogênio e fósforo, em conjunto com medições de descargas fluviais. Essas informações constituiriam a base para futuras simulações de qualidade de água, que permitiriam avaliar, sob diferentes cenários de lançamentos de cargas poluidoras, os impactos causados na qualidade de água do CELMM.

9 REFERÊNCIAS

- ABBOT, M. B.; BASCO, D. R. **Computational Fluid Dynamics: An introduction for engineers**. London: Longman Group UK Limited, 1989.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Atlas esgotos: despolição de bacias hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf> Acesso em: 22 jun. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Coleta e análise da qualidade de sedimentos da Lagoa Mundaú (Maceió/AL)**. Brasília: ANA, 2012b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Diagnóstico e modelagem hidrodinâmica e de qualidade das águas do Complexo Estuarino da lagoa Mundaú**. Brasília: ANA, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Implementação do enquadramento em bacias hidrográficas no Brasil; Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos – Snirh no Brasil: arquitetura computacional e sistêmica. **Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos**, v.6. Brasília: ANA, 2009. Disponível em: <<https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7504/implementacao-enquadramento-ag-superf-ana-2009.pdf>> Acesso em 22 jun. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Levantamento Batimétrico na Lagoa Mundaú**. Brasília: ANA, 2012a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Monitoramento de qualidade de água na Lagoa Mundaú (Maceió/AL) – Relatório Técnico**. Brasília: ANA, 2012c.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba (CELMM)**. Brasília: ANA, 2006. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2006/CELMM.pdf>> Acesso em: 22 jun. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Portal Hidroweb**. 2022. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 15 jan. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Sistemas de Informação na gestão de águas: conhecer para decidir. **Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos**, v.8. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: <<https://capitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/120/1/Cadernos%20de%20capacita%c3%a7%c3%a3o%208%20Sistemas%20de%20informa%c3%a7ao.pdf>> Acesso em: 22 jun. 2021.
- AGUILERA, L.; SANTOS, A. L. F.; ROSMAN, P. C. C. On characteristic hydraulic times through hydrodynamic modelling: discussion and application in Patos Lagoon (RS). **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 2, p. 2456, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ambienteagua/a/jqncy6nr3rqgNPjv6X3VKQk/?lang=en>> Acesso em: 29 jun. 2021.
- ALAGOAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas**. Alagoas, 2016. Disponível em: <http://residuossolidos.al.gov.br/vgmidia/arquivos/205_ext_arquivo.pdf> Acesso em: 30 jun. 2021.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Zoneamento Ambiental da Área de Proteção Ambiental – APA de Santa Rita e Reserva Ecológica de Saco da Pedra**. Alagoas, 1993.

ALBANO, G. D. **Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático de Qualidade de Água em Represas (CE-QUAL-R1) – Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí, Sistema Cantareira**. 2004. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ALDAMA, A. **Theory and applications of two- and three-scale filtering approaches for turbulent flow simulation**. 1985. Ph.D. Thesis (Dept. of Civil Engineering) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1985.

ALVES, M. C. **Composição e acumulação da matéria orgânica (C, N, ligninas) nos sedimentos do sistema lagunar Mundaú-Manguaba, AL – Brasil**. 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

ANDRADE, E.; OLIVEIRA, A.; GUIMARÃES Jr, S. A. M. Análise da dispersão estimada de coliformes termotolerantes para os períodos de inverno e verão na Laguna Mundaú, Alagoas. **Revista Contexto Geográfico**, Maceió, v. 1, n. 2, p. 95-106, dez. 2016. Disponível em: <<https://www.seer.ufal.br/index.php/contextogeografico/article/download/6097/4346>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

ANDRADE, V. S. **Análise de Hidrodinâmica Ambiental e de Qualidade de Água na Baía de Guanabara via Modelagem Computacional**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

ARAÚJO, A. G. S.; MARISCO, L. M. O. A dinâmica da urbanização desordenada na favela Sururu de Capote: segregação socioespacial e exclusão social. **Para Onde!?**, v. 9, n. 2, p. 09-18, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.22456/1982-0003.82665>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9649**: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

BARBIER, E. B. et al. “Estuarine and Coastal Ecosystems and Their Services”. In: VAN DEN BELT, M.; COSTANZA, R. (Eds.). **Ecological Economics of Estuaries and Coasts**. v.12. Waltham, MA, USA: Academic Press, 2012. (Coleção Treatise on Estuarine and Coastal Science)

BARROS, A. H. C. et al. **Climatologia do Estado de Alagoas**. Recife: Embrapa Solos, 2012.

BARTRAM, J.; BALLANCE, R. (Eds.). **Water quality monitoring: A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes**. Londres: UNEP/WHO, 1996.

BÄUMLE, A. M. B. **Avaliação de Benefícios Econômicos da Despoluição Hídrica: Efeitos de Erros de Calibração de Modelos de Qualidade da Água**. 2005. 285 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BIAN, Z.; LIU, L.; DING, S. Correlation between Spatial-Temporal Variation in Landscape Patterns and Surface Water Quality: A Case Study in the Yi River Watershed, China. **Applied Sciences**, v. 9, n. 6, p. 1053, mar 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app9061053>> Acesso em: 29 jun. 2021.

BOCANIOV, S. A.; SCAVIA, D. Nutrient Loss Rates in Relation to Transport Time Scales in a Large Shallow Lake (Lake St. Clair, USA-Canada): Insights From a Three-Dimensional

Model. **Water Resources Research**, v. 54, n. 6, p. 3825–3840, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2017WR021876>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Editora Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 274 de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. **Diário Oficial da União**, Brasília, 25 jan. 2001. Seção 1, páginas 70-71.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 dez. 2005. Seção 1, n. 53, p. 58-63.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357 de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, 16 mai. 2011, n. 92, p.89.

BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN. **Carta Náutica do Porto de Maceió CN N° 901**. Niterói, 1977a.

BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN. **Carta Náutica Proximidades do Porto de Maceió CN N° 920**. Niterói, 1977b.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 5. ed. Brasília: Funasa, 2019.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 jan. 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab/Versao_Conselhos_Resolucao_Alta_Capa_Atualizada.pdf> Acesso em: 15 jun. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL), Ação Emergencial no Bairro Pinheiro**. v.1. Brasília: CPRM, 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático - Serviços de Água e Esgoto. Visão Geral - ano de referência 2021**. Brasília: SNS/MDR, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos_snis>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BRITO Jr., A. N.; FRAGOSO Jr, C. R.; LARSON, M. Tidal exchange in a choked coastal lagoon: A study of Mundaú Lagoon in northeastern Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, v. 17, p. 133-142, jan. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.12.005>> Acesso em: 29 jun. 2021.

BUCKMANN, M. F. Y. **A persistência do excesso de tensão no fundo como critério de estabilidade hidro-sedimentológica de canais de maré**. 2019. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CAMERON, W. M.; PRITCHARD, D. “Estuaries”. In: HILL, M.N. (Ed.). **The Sea**, v.2. New York: John Wiley and Sons, 1963, p. 306-324.

CARVALHO, A. C. B. **Trocas de sal entre a laguna de Araruama e o mar, utilizando um modelo hidrodinâmico (SiSbaHiA)**. 2018. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Geoquímica Ambiental), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. – ELETROBRAS. Diretoria de Engenharia. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2000.

CHAPMAN, D. **Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring**. 2ª. ed. Londres: UNESCO/WHO/UNEP, 1996.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatórios de Qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2021. Apêndice C – Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2022/11/Apendice-C-Significado-ambiental-e-sanitario-das-variaveis-de-qualidade-das-aguas-e-dos-sedimentos-e-metodologias-analiticas-e-de-amostragem.pdf>> Acesso em: 20 nov. 2022.

CORRÊA, G. P. **Aplicação do modelo de qualidade de água SisBaHiA® no reservatório do rio verde, RMC/PR**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CORREIA, M. D.; SOVIERZOSKI, H. H. **Ecossistemas marinhos: recifes, praias e manguezais**. Maceió: EDUFAL, 2005. (Conversando sobre ciências em Alagoas)

COSTA, T. L. F. et al. Lipídios como indicadores de fontes e distribuição de matéria orgânica particulada em um complexo estuarino-lagunar tropical (Mundaú-Manguaba, AL). **Química Nova**, v. 33, n. 9, p. 1915-1922, jan. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000900018>> Acesso em: 29 jun. 2021.

COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, n. 387, 15 mai. 1997, p. 253–260. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/387253a0>> Acesso em: 29 jun. 2021.

COTOVICZ Jr, L. C. **Aplicação de modelos (ASSETS e TRIX) para avaliação do estado trófico e cenário futuro da eutrofização do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, (AL)**. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

COTOVICZ Jr, L. C. et al. Comparação de Modelos e Índices para Avaliação do Estado Trófico do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, (AL). **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, v. 26, n. 1, p. 7-18, 2012. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/geobras/article/view/10110>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

COUTINHO, M. K. et al. **A Cada Lata: A Extração do Sururu na Lagoa Mundaú - Alagoas**. v.6. Brasília: Editora IABS, 2014. (Série Cooperação Brasil-Espanha para o desenvolvimento de Alagoas). Disponível em: <<http://editora.iabs.org.br/site/index.php/portfolio-items/13329/>> Acesso em: 30 jun. 2021.

COUTINHO, P. N. et al. **Mapa Geológico do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba para o projeto Estudo da dinâmica bioecológica do Complexo Estuarino Mundaú-Manguaba**. Maceió: CIRM-UFAL, 1988. (Relatório interno)

CROSSLAND, J. et al. (Eds.). **Coastal Fluxes in the Anthropocene: The Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Project of the International Geosphere-Biosphere Programme**. Berlin: Springer-Verlag, 2005.

- CUNHA, C. L. N. et al. Effects on circulation and water renewal due to the variations in the river flow and the wind in a Brazilian estuary lagoon complex. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2600>> Acesso em: 30 jun. 2021.
- DAFFORN, K. A. et al. Marine urbanization: An ecological framework for designing multi-functional artificial structures. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 13, n. 2, p. 82-90, mar. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1890/140050>> Acesso em: 29 jun. 2021.
- DALAZEN, J. P., CUNHA, C. L. N., ALMEIDA, R. C. Determinação das taxas de renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 887-899, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180019>>. Acesso em: 12 nov. 2021.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE – DHI. **MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM: Hydrodynamic Module**. Short Description, 2021. Disponível em: <<https://www.mikepowered-bydhi.com/download/product-documentation>>. Acesso em: 10 fev. 2021.
- DELTAIRES. **Delft-3D-FLOW**. Simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. HydroMorphodynamics. Deltaires, 2021. Disponível em: <https://content.oss.deltaires.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- DAVIES, J. H. A morphogenic approach of world shorelines. **Z. Geomorphology**, v. 8, p. 127-142, 1964.
- DIAS, N. L. Obtenção de uma solução analítica da equação de difusão – advecção com decaimento de 1ª ordem pelo método da transformação de similaridade generalizada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 181-188, jan./mar. 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v8n1.p181-188>> Acesso em: 29 jun. 2021.
- DU, J.; SHEN, J. Water residence time in Chesapeake Bay for 1980–2012. **Journal of Marine Systems**, v. 164, p. 101–111, dez. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.011>>. Acesso em: 29 jun. 2021.
- DYER, K. R. **Estuaries: A physical introduction**. 2ª ed. New York: John Wiley and Sons, 1997.
- ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A. “Usos e Reúso de Água e Geração de Efluentes”. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Manual de Conservação e Reúso de Água na Agroindústria Sucroenergética**. Brasília: ANA, 2009, p. 69-179.
- EMPRESA DE PORTOS DO BRASIL S.A – PORTOBRAS. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH). **Relatório da segunda campanha de medições hidráulicas-sedimentológicas do complexo lagunar Mundaú/Manguaba**. Rio de Janeiro: INPH, 1985. (INPH-73/85. Relatório interno).
- FAN, D. et al. Coastal morphological changes in the Red River Delta under increasing natural and anthropocene stresses. **Anthropocene Coasts**, v. 2, n. 1, p. 51-71, jun. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1139/anc-2018-0022>> Acesso em: 29 jun. 2021.
- FARIAS, M. A.; RODRIGUES, C. J.; PEREZ, A.B.A. Avaliação do efeito da salinidade na cinética de desoxigenação no ensaio da DBO. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 1, mai. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18316/rca.v13i1.3756>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

FEITOSA, R. C.; ROSMAN, P. C. C. "Emissários Submarinos de Esgoto: Aspectos de Qualidade da Água e Modelagem Computacional". In: SILVA, R.C.V. (Ed.). **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**. v. 8. Porto Alegre: ABRH/Fundação COPPETEC, 2007.

FERNANDEZ, M. A. S. **Geoquímica de metais pesados na Região dos Lagos, RJ: uma proposta de estudo integrado**. 1994. 163 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1994.

GAO, Q. et al. Numerical simulation of water age and its potential effects on the water quality in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 566, p. 484-499, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.033>>. Acesso em: 16 jul. 2021.

GAO, G., XIA, J., FALCONER, R. A., WANG, Y. Modelling Study of Transport Time Scales for a Hyper-Tidal Estuary. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2434, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w12092434>> Acesso em: 15 jul. 2021.

HEDGES, J. I.; KEIL, R. G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis. **Marine Chemistry**, v. 49, p. 81-115, 1995. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00008-F](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00008-F)> Acesso em: 29 jun. 2021.

HESPANHOL, K. M. H. **Monitoramento e diagnóstico da qualidade da água do ribeirão Morangueiro**. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Estadual de Maringá, Maringá (PR), 2009.

HOOKE, R. L.; DUQUE, J. F. M.; PEDRAZA, J. Land transformation by humans: A review. **GSA Today**, v. 22, n. 12, p. 4-10, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1130/GSAT151A.1>> Acesso em: 29 jun. 2021.

HOWLADAR, M. F. et al. The water quality and pollution sources assessment of Surma river, Bangladesh using, hydrochemical, multivariate statistical and water quality index methods. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 12, fev. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100523>> Acesso em: 29 jun. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Esgotamento Sanitário inadequado e impactos na saúde da população: Atualização do diagnóstico da situação nas 100 maiores cidades brasileiras**. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/drsai/Book-Trata-B.pdf>> Acesso em: 28 jun. 2021.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2023**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/03/Versao-Final-do-Relatorio_Ranking-do-Saneamento-de-2023-2023.03.10.pdf>. Acesso em: 10 abril. 2023.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF LIMNOLOGY. The Venice system for the classification of marine waters according to salinity. In: SYMPOSIUM ON THE CLASSIFICATION OF BRACKISH WATERS, Venice, 8-14 abr. 1958. **Anais...** [S.l.]: Archives Oceanography and Limnology, 1958.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

KJERFVE, B. *Comparative oceanography of coastal lagoons*. In: WOLFE, D. (Ed.) **Estuarine variability**. New York: Academic Press, 1986, p. 63-81.

KJERFVE, B. *Costal Lagoons*. In: KJERFVE, B. (Ed.) **Costal Lagoon Processes**. Amesterdan: Elsevier Science Publishers, 1994, p. 1-8.

- KJERFVE, B. et al. Hydrology and Salt Balance in a Large, Hypersaline Coastal Lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 42, n. 6, p. 701–725, jun. 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0045>> Acesso em: 28 jun. 2021.
- KJERFVE, B.; MAGILL, K. E. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. **Marine Geology**, v. 88, n. 3–4, p. 187–199, ago. 1989. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90097-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90097-2)> Acesso em: 30 jun. 2021.
- KJERFVE, B.; KNOPPERS, B. *Tidal Choking in a Coastal Lagoon*. In: PARKPR, B. (ed.). **Tidal Hydrodynamics**. New York: Wiley, 1991, p. 169–179.
- KNOPPERS, B. *Aquatic Primary Production in Coastal Lagoons*. In: KJERFVE, B. (Ed.) **Coastal Lagoons Processes**. Amsterdam: Elsevier, 1994, p. 243–286.
- KNOPPERS, B.; KJERFVE, B.; CARMOUZE, J.P. Trophic state and water turn-over time in six choked coastal lagoons in Brazil. **Biogeochemistry**, v. 14, n. 2, p. 149–166, jan. 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00002903>> Acesso em: 30 jun. 2021.
- KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E. D.; ABRÃO, J. J. (Eds.). **Environmental geochemistry of coastal lagoon systems of Rio de Janeiro, Brazil**. Niterói: Eduff/Finep, 1999, v.6.
- KUMMU, M. et al. Over the hills and further away from coast: Global geospatial patterns of human and environment over the 20th–21st centuries. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 3, mar. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034010>> Acesso em: 28 jun. 2021.
- LARSSON, L.; NILSSON, S. **Hydrodynamic Modeling of the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon System, Brazil**. 2014. 85 f. Master thesis (Water Resources Engineering, Lund University, Lund, 2014).
- LESSA, D. S. A.; SOUZA, A. P. M.; FRAGOSO Jr, C. R. Calibração de um modelo matemático hidrodinâmico e de salinidade no complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba. In: XIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, Aracajú, 08–11 nov. 2016. **Anais...** Disponível em: <<https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=750>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- LIMA, A. C. C. **Condições Hidrodinâmica e estimativas do tempo de residência no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba (AL) através de modelagem computacional**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.
- LIMA, E. C. R. **Qualidade de Água da Baía de Guanabara e Saneamento: Uma Abordagem Sistêmica**. 2006. 183 f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- LIMA, L. S. **Acoplamento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para prognóstico ambiental detalhado de longo prazo**. 2016. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- LINS, R. C. **Avaliação espaço-temporal da clorofila-a em um sistema estuarino-lagunar utilizando sensoriamento remoto e técnicas estatísticas multivariadas**. 2017. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- LINS, R. C. et al. A Multivariate Analysis Framework to Detect Key Environmental Factors Affecting Spatiotemporal Variability of Chlorophyll-a in a Tropical Productive Estuarine-Lagoon System. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 853, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs10060853>> Acesso em: 30 jun. 2021.

LIRA, T. K. S. **A qualidade da água em riachos do complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba – CELMM**. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais), Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, 2019.

LIU, S et al. Wind Effects on the Water Age in a Large Shallow Lake. *Water*, v. 12, n. 5, p. 1246, abr. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w12051246>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

LONDE, L. R. et al. Water residence time affecting phytoplankton blooms: study case in Ibitinga Reservoir (São Paulo, Brazil) using Landsat/TM images. **Brazilian Journal of Biology**, v. 76, n. 3, p. 664--672, jul./set. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1519-6984.23814>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

LOUCKS, D. P. et al. **Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications**. Paris: UNESCO, 2005.

MACEIÓ. Secretaria de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente. **Plano de Saneamento Básico do Município de Maceió/AL – PMSB**. Maceió, 2017. Disponível em: <http://www.se-det.maceio.al.gov.br/servicos/pmsb/pdf/pmsb/fase2/etapa6/relatorio_final.pdf> Acesso em: 30 jun. 2021.

MACHADO, E. C. **Relatório do subprojeto estudos integrados da dinâmica bioecológica do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba**. Maceió: CIRM-UFAL, 1989.

MACHADO, E. S.; KNAPIK, H.G.; BITENCOURT, C.C.A. Considerações sobre o processo de enquadramento dos corpos de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 261-269, mar./abr. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019181252>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

MELO-MAGALHÃES, E. M. et al. Determination of eutrophic regions on Mundaú/Manguaba lagoons, Alagoas, Brazil, through studies with phytoplanktonic community. **Brazilian Journal of Biology**, v. 69, n. 2, p. 1-10, mai. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1519-69842009000200006>>. Acesso em: 23 set. 2021.

MELO-MAGALHÃES, E. M. **Influência da Eutrofização do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba (Alagoas-Brasil) sobre a Comunidade Fitoplanctônica**. 253 f. Tese (Doutorado em Oceanografia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

MAIOLI, OLG. et al. Distribution and sources of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in suspended particulate matter in water from two Brazilian estuarine systems. **Continental Shelf Research**, v. 31, n. 10, p. 1116-1127, jul. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.04.004>>. Acesso em: 22 set. 2021.

MARQUES, R. C.; LEMOS, R. P. L.; RODRIGUES, M. N. Processo de ocupação e uso do solo da paisagem caeté aos dias atuais. In: NORMANDE, E. (Org.). **Apoio à proteção ambiental em Alagoas: uma experiência de cooperação técnica**. Maceió: SEPLAN/IMA/GTZ, 2000.

MARSOOLI, R. et al. Residence Time of a Highly Urbanized Estuary: Jamaica Bay, New York. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 6, n. 2, abr. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/jmse6020044>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

MENDES, V. A. et al. (Orgs.). **Geologia e recursos minerais do estado de Alagoas: escala 1:250.000**. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2017.

MESSIAS, M. I. C. S. **Análise ambiental e epidemiológica do aglomerado subnormal sururu de capote em Maceió, Estado de Alagoas, Brasil**. 2020. 82 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Análise de sistemas Ambientais), Centro Universitário CESMAC, Maceió, 2020.

- METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- MIRANDA, L. B. et al. **Fundamentals of Estuarine Physical Oceanography**. Singapore: Springer Singapore, vol.8, 2017.
- MONSEN, N. E. et al. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. **Limnology and Oceanography**, v. 47, n. 5, p. 1545-1553, set. 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.5.1545>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- NAHON, I. M. **Sistema de Apoio à Análise de Outorga de Lançamento de Efluentes para a Variável Demanda Bioquímica de Oxigênio: Estudo de Caso da Bacia do Alto Iguaçu**. 2006. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- NEVES, S. L. C.; CANTALICE, J. D. A. Cadeia produtiva do sururu: levantamento de demandas relacionadas a qualidade de vida dos trabalhadores. In: SEMANA DE DESIGN DA UFAL, Maceió, 29-01 nov./dez. 2017. **Anais...** Disponível em: <<https://proceedings.science/avia/avia-semana-design/papers/cadeia-produtiva-do-sururu--levantamento-de-demandas-relacionadas-a-qualidade-de-vida-dos-trabalhadores>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- NEWTON, A. et al. Sustainability of future coasts and estuaries: A synthesis. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 183, p. 271-452, dez. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.11.017>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- NICHOLS, M.M.; BIGGS, R.B. Estuaries. In: DAVIS, R.A. (Ed.). **Coastal Sedimentary Environments**. New York: Springer-Verlag, 1985. p. 77-186.
- NIXON, S. W. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. **Ophelia**, v. 41, n. 1, p. 199-219, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- NIXON, S. W. Nutrient dynamic, primary production and fisheries yields of lagoons. **Oceanologica Acta, Special issue**, v. 5, p. 357-371, 1982. Disponível em: <<https://archimer.ifremer.fr/doc/00246/35748/>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- NOBRE, R. C. M.; NOBRE, M.; ROTUNNO FILHO, O. C. Modelo de Circulação Hidrodinâmica Aplicado ao Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba. In: I CONGRESSO SOBRE APROVEITAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM PAÍSES DE IDIOMA PORTUGUÊS, ABES/APRH, Rio de Janeiro, 17-20 abr. 2000. **Anais...** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321340335_MODELO_DE_CIRCULACAO_HIDRODINAMICA_APLICADO_AO_COMPLEXO_ESTUARINO_LAGUNAR_MUNDAU_MANGUABA>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- NORMANDE, A. C. L.; ALENCAR, A. N.; BEZERRA, A. R. Caracterização higiênico-sanitária de sururu (*Mytella charruana*) in natura e beneficiado, proveniente da Lagoa Mundaú, Maceió-AL. **Boletim de Estudos de Ciências do Mar**, Maceió, n. 10, p. 155-162, 1998.
- NUNES, A. et al. Modeling the salinity dynamics of a choked coastal lagoon and its impact on the Sururu mussel (*Mytella falcata*) population. **Regional Studies in Marine Science**, v. 45, n. 101807, jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101807>> Acesso em: 15 jun. 2021.
- OHREL, R. L.; REGISTER, K.M. (Eds.). **Volunteer Estuary Monitoring Manual, A Methods Manual**. 2ª ed. Washington, DC: USEPA, 2006, cap. 14.
- OLIVEIRA A. M. **Hidrodinâmica do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba em apoio à proteção ambiental em Alagoas**. Maceió: SEPLANDES-GTZ, 2000.

- OLIVEIRA, A. M. **Advection and Dispersion Processes in a Coastal Lagoon System: Mundaú-Manguaba, Brazil**. 1993. 131 f. Tese (Doutorado em Ciência Marinha), Universidade da Carolina do Sul, Columbia, 1993.
- OLIVEIRA, A. M.; CAVALCANTE, G. H. Identificação das áreas críticas ao fluxo entre o estuário e as lagoas Mundaú-Manguaba com dragagens corretivas. **Boletim de Estudos de Ciências do Mar**, Maceió, p. 103-120, 1998.
- OLIVEIRA, A.; BAPTISTA, A.M. Diagnostic modeling of residence times in estuaries. **Water Resources Research**, v. 33, n. 8, p. 1935-1946, ago. 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/97WR00653>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 37, n. 6, p. 575-591, dez. 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1006/ecss.1993.1074>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- OPPA, L. F. **Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do Rio Vacacaí Mirim**. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- PAES-LEME, R. B.; ACCETTA, D.; SCHILITZ, P. Calibração de Modelo Hidrodinâmico Bidimensional de Alta Resolução do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba - AL: Análise Em Benefício do Desenvolvimento do Molusco *Mytella Falcata* (D' Orbigny, 1846). In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Maceió, 27-01 nov./dez. 2011. **Anais...** Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=1234>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- PELLING, M.; BLACKBURN, S. (Eds.). **Megacities and the Coast: Risk, Resilience and Transformation**. London/New York: Routledge, 2013.
- PEREIRA, O. M. et al. Estimativa da produção de *Mytella falcata* e de *M. guyanensis* em bancos naturais do estuário de Ilha Comprida SP Brasil. **Boletim Do Instituto De Pesca**, n. 29, p. 139-149, 2003. Disponível em: <<https://www.pesca.sp.gov.br/Pereira.pdf>> Acesso em: 29 jun. 2021.
- PEREIRA, T. R. A. **Impacto da Descarga de Efluentes Sanitários dos Rios sobre a Qualidade das Águas da Baía de Guanabara**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosistemas), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- PEREIRA-BARROS, J.B. As condições ambientais do sururu *Mytella falcata* (Mollusca, Mytilidae) vinte anos depois. **Boletim de Estudos de Ciências do Mar**, v. 6, n. 117, 1987.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS. **Levantamento Batimétrico na Área da Lagoa Manguaba (AL)**. Salvador (BA): PETROBRÁS, 2011.
- PHAM VAN, C. et al. Numerical Simulation of Water Renewal Timescales in the Mahakam Delta, Indonesia. **Water**, v. 12, n. 4, p. 1017, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w12041017>>. Acesso em: 16 jul. 2021.
- PINHEIRO, M. K. R. Circulação hidrodinâmica e renovação das águas no complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba para diferentes configurações de embocaduras. 2020. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- PINHEIRO, M. K. R. et al. Water Renewal in the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon Complex (Alagoas, Brazil) under Different inlet configurations. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7 n. 2, p. 295–306, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24914>>. Acesso em: 04 set. 2021.

- PIRES, L. B. **Estudo das correntes para os períodos seco e chuvoso do litoral norte da Bahia**. 2017. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.
- POND, S.; PICKARD, G. L. **Introductory Dynamical Oceanography**. 2^a ed. Oxford: Pergamon Press, 1983.
- POURMOZAFFAR, S. et al. The role of salinity in physiological responses of bivalves. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 3, p. 1548-1566, ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/raq.12397>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- PRITCHARD, D. W. “Estuarine circulation patterns”. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, v. 81, n. 717, 1955.
- QI, H. et al. Water age prediction and its potential impacts on water quality using a hydrodynamic model for Poyang Lake, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 13, p. 13327–13341, jul. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-016-6516-5>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- REIS, J. S. A. **Modelagem matemática da qualidade da água para o alto Rio das Velhas/MG**. 2009. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- RIBAS, D. S. L.; JUNKES, J. A.; RODRIGUES, D. F. (Orgs.). **Saúde nunca veio aqui**. Rio de Janeiro: Bonecker, 2019.
- RIBEIRO, M. A.; KNOPPERS, B.; CARREIRA, R. S. Fontes e distribuição de matéria orgânica sedimentar no Complexo Estuarino-Lagunar de Mundaú-Manguaba/AL, utilizando esteróis e alcoóis como indicadores. **Química Nova**, v. 34, n. 7, p. 1111-1118, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000700002>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- ROSMAN, P. C. C. “Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos”. In: ROSMAN, P. C. C., ALMEIDA, A. B.; EIGER, S. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**. 3 ed. Porto Alegre: ABRH, 1997, cap. 3, p. 238-348.
- ROSMAN, P. C. C. **Modeling Shallow water bodies via filtering techniques**. 1987. Ph.D. Thesis (Dept. of Civil Engineering) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1987.
- ROSMAN, P. C. C. (ed.) **Referência Técnica do SisBaHiA®**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2023. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>> Acesso em: 15 jan. 2023.
- ROVERSI, F. **Estudo hidrodinâmico e de renovação das águas do sistema Estuarino de Santos**. 2012. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Water renewal analysis of the Santos Estuarine System using computational modeling. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 3, p. 566-585, set. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- SANT’ANA, D. O. **Estudos das condições hidrodinâmicas e avaliação do tempo de residência do complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba**. 2019. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- SANTOS, R. C. L. et al. Aplicação de índices para avaliação da qualidade da água da Bacia Costeira do Sapucaia em Sergipe. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 33-46, jan./fev. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017159832>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

- SANTOS, T. M. M. **Análise química e microbiológica do sururu (*Mytella falcata*) com e sem leite de coco**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.
- SANTOS, S. S. **O Cultivo da Cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: uma análise comparativa dos efeitos da mecanização no estado de São Paulo**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável), Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- SÃO PAULO (Cidade). Superintendência de projetos e de obras. **Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-PAI-WU”**. São Paulo, SP: PMSP, 1999.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo: DAEE, 2005.
- SAWYER, C. N.; MCCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. **Chemistry for Environmental and Engineering Science**. 5ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- SILVA, C. G. S. et al. “Ambientes de Sedimentação Costeira e Processos Morfodinâmicos Atuantes na Linha de Costa”. In: BAPTISTA NETO, J.A.; PONZI, V.R.A.; SICHEL, S.E. (Orgs.). **Introdução à Geologia Marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 175-218.
- SILVA, D. F. **Análise de aspectos climatológicos, agroeconômicos, ambientais e de seus efeitos sobre a bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL e PE)**. 2009. 216 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- SILVA, L. M. D. **Análise de Circulação Hidrodinâmica e de Qualidade de Água no Sistema Estuarino do Rio Paraíba do Norte, PB**. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- SILVA, M. C. D. et al. Avaliação da qualidade microbiológica de pescado comercializado em Maceió, AL. **Higiene alimentar**, v. 16, n. 96, p. 60-64, mai. 2002.
- SILVA, N. P. S. **A Sensibilidade de Modelos de Transporte de Calor quanto ao Parâmetro Umidade Relativa do Ar – Aplicação na Lagoa Rodrigo de Freitas, RJ**. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- SOUZA, A. P. M. **Avaliação do Efeito do Assoreamento na Hidrodinâmica e no Tempo de Residência de um Complexo Estuarino Lagunar Tropical**. 2017. 51 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.
- SOUZA, C. S. **Biodegradação de efluentes sanitários no estuário do Rio Poxim em Aracaju/SE**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.
- SOUZA, V. A. A.; PIZELLA, D.G. The Brazilian surface freshwater framework in union-dominated rivers: challenges and prospects for water quality management. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v. 56, n. 1, p. 1-15, mar. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200707>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- TAMANO, L. T. O. et al. Socioeconomia e saúde dos pescadores de *Mytella falcata* da Lagoa Mundaú, Maceió-AL. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, Belém, v. 10, n. 3, p. 699-710, set./dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1981-81222015000300011>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- TIAN, X.; ROBERTS, P. J. W.; DAVIERO, G. J. Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. IV: Stratified Flowing Water. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 4,

pp. 411-419, 2006. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:4\(411\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:4(411))> Acesso em: 20 jun. 2021.

TORRES, C. A. A. **A expansão urbana de Maceió e seus reflexos ambientais na Laguna Mundaú**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

TOSIC, M. et al. Hydrodynamic modeling of a polluted tropical bay: Assessment of anthropogenic impacts on freshwater runoff and estuarine water renewal. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 695–714, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.104>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. M. *Gestão da água no Brasil*. Brasília: UNESCO, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 1998.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

USEPA (Estados Unidos da América). Office of the Science Advisor. Council for Regulatory Environmental Modeling. **Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models**. Washington, DC: USEPA, 2009. Disponível em: <<https://www.epa.gov/measurements-modeling/guidance-document-development-evaluation-and-application-environmental-models>> Acesso em 30 jun. 2021.

VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. 1ª ed. Belo Horizonte: DESA / Editora UFMG, 2007.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: DESA / Editora UFMG, 2014.

VREBOS, D.; BEAUCHARD, O.; MEIRE, P. The impact of land use and spatial mediated processes on the water quality in a river system. **Science of The Total Environment**, v. 601-602, p. 365-373, dez. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.217>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

WANG, Q. et al. A review of surface water quality models. **The Scientific World Journal**, v. 2013, n. 3, p. 231768, jun. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2013/231768>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

WHO (Ed.). **Guidelines for drinking - water quality**. 4. ed. Genebra: WHO, 2017. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>> Acesso em: 28 jun. 2021.

WMO (Ed.). **Planning of water quality monitoring systems**. Technical Report Series n. 3. Genebra: WMO, 2013. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7821> Acesso em: 28 jun. 2021.

YÁÑEZ-ARANCIBIA, A. Lagunas costeras y estuarios: cronología, criterios y conceptos para una clasificación ecológica de sistemas costeros. **Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural**, v. 39, p. 35-54, 1987. Disponível em: <<http://repositorio.fcien-cias.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11154/142868/39VLagunasCosteras.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

YUAN, W. et al. Exploring the survival threshold: a study of salinity tolerance of the nonnative mussel *Mytella charruana*. **Journal of Shellfish Research**, v. 29, n. 2, p. 415-422, ago 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2983/035.029.0218>>. Acesso em: 29 jun. 2021.

YUAN, W. et al. Synergistic Effects of Salinity and Temperature on the Survival of Two Nonnative Bivalve Molluscs, *Perna viridis* (Linnaeus 1758) and *Mytella charruana* (d'Orbigny

1846). **Journal of Marine Biology**, n. 1, p. 1-14, jul. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2016/9261309>>. Acesso em: 29 jun. 2021.

ZHAO, F. et al. New insights into eutrophication management: Importance of temperature and water residence time. **Journal of Environmental Sciences**, v. 111, p. 229-239, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.02.033>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

APÊNDICE A – PARÂMETROS CONSIDERADOS NO MH, MQA, MTE E MTL

✓ Modelo Hidrodinâmico (MH): 2DH

✓ Modelo de Transporte Euleriano (MTE): Taxa de Renovação ($T_R\%$) e Idade da Água (I_A)

* No Modelo de I_A , o valor de T_{90} = Tempo da simulação

✓ Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA): Salinidade e Temperatura

SisBaHIA 11 MQA - Modelos de Qualidade de Água

Título: P. CHUVOSO_SALINIDADE E TEMPERATURA

Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros: Fronteiras | Condições Internas | Fontes | Condição Inicial | Infiltração | Absorção | Observações | Resultados

Hidrodinâmicos | Reações Cinéticas

Malha: Nome: MALHA_CELMM, Nós: 14533, Elementos: 3227

Dispersão Turbulenta | Filtragem | Interface dissipativa

Tipos de Coeficientes:

- Apenas Valores Constantes
- Função da Hidrodinâmica + Valores Constantes

Valores Constantes:

- Dxx: 0.000E-01
- Dxy (=Dyx): 0.000E-01
- Dyy: 0.000E-01

Escala da Dispersão:

- Longitudinal: 1.0000
- Transversal: 1.0000

Modelo Hidrodinâmico: P. CHUVOSO_M_H_ACOPLADO_SAL_TEMP

Simulação do Modelo Hidrodinâmico:

- Instante Inicial (s): 0.0000
- Instante Final (s): 7948800.0000
- Int. de Tempo (s): 1800.0000

Data Inicial: 01/05/2018

Tipo de Escoamento:

- 3D
- Nivel Z:
- Modelo Baroclínico
- Profundidade (m):

Simulação:

- Instante Inicial (s): 0.0000
- Instante Final (s): 7948800.0000
- Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados: P. CHUVOSO_SALINIDADE E TEMPERATURA

Calcula usando:

- Espessura da Camada: 1.0000
- Num. Peclet Máximo: 0.2500
- Considera Advecção Meio Poroso

* No Modelo de Temperatura, o Num. Peclet Máx. = 50

Executa | Verificar | Visualizar Malha...

Início: 16:18 | Projeto: Dissertação de Mestrado - CELMM | 10/08/2023 16:19

Dispersão Turbulenta | Filtragem | Interface dissipativa

Termos de Filtragem Espacial:

- Inclui permitindo difusão negativa
- Não inclui
- Inclui sem permitir difusão negativa

Termos de Filtragem Temporal:

- Inclui permitindo difusão negativa
- Não inclui
- Inclui sem permitir difusão negativa

Escala dos termos:

- Filtro espacial em X: 1.0000
- Filtro espacial em Y: 1.0000
- Filtro temporal: 1.0000

Dispersão Turbulenta | Filtragem | Interface dissipativa

Valores:

- Nenhuma vez
- Uma vez a cada 1 passo(s) de tempo
- 1 vezes a cada passo de tempo
- Peso de Ponderação: 0.1000

Salinidade | Temperatura

Valores Limites:

- Mínima: 0.0000E-01
- Máxima: 3.7000E+01

Dispersão Turbulenta | Filtragem | Interface dissipativa

Valores:

- Nenhuma vez
- Uma vez a cada 1 passo(s) de tempo
- 1 vezes a cada passo de tempo
- Peso de Ponderação: 0.1000

Salinidade | Temperatura

Valores Limites:

- Mínimo: 0.0000E-01
- Máximo: 3.5000E+01

✓ Modelo de Transporte Lagrangeano (MTL): Tempo de Residência

SisBaHIA 11 MTL - Modelos de Transporte Lagrangeano

Título: P. CHUVOSO_TEMPO DE RESIDÊNCIA

Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros: Fontes | Campo Próximo - Emissários | Marcar Regiões | Fronteira | Barreira | Contenção & Recolhimento | Observações | Resultados

Malha: Nome: MALHA_CELMM, Nós: 14533, Elementos: 3227

Dados Hidrodinâmicos | Dados de Onda | Transporte | Concentração

Simulação do Modelo Hidrodinâmico:

- Instante Inicial (s): 0.0000
- Instante Final (s): 7948800.0000
- Int. de Tempo (s): 1800.0000

Data Inicial: 01/05/2018

Tipo de Escoamento:

- 3D
- Nivel Z:
- Profundidade (m):

Considera Advecção Meio Poroso:

Fração Mínima de Massa: 1.0000E-03

Executa | Verificar | Visualizar Malha...

Início: 16:26 | Projeto: Dissertação de Mestrado - CELMM | 10/08/2023 16:27

Dados Hidrodinâmicos | Dados de Onda | Transporte | Concentração

Modo de Transporte:

- Apenas Advectivo
- Advectivo e Difusivo

Desvio Aleatório:

- Termos Filtragem: Amplitude: 1.0000
- Difusão e Dispersão: Longitudinal: 1.0000, Transversal: 1.0000

Transporte Condicionado:

- Variável Condicionante do Transporte
- Condicionado por Velocidade
- Condicionado por Tensão no Fundo, só por corrente
- Condicionado por Tensão no Fundo, por corrente e onda

Dados Hidrodinâmicos | Dados de Onda | Transporte | Concentração

Calcula a concentração:

Subdivisões: 40, Mínima detectável: 1.000E-06

Distribuição das Partículas:

- Quantidade (massa)
- Concentração

■ Campo Próximo - Emissários: Dispersão e Decaimento de Plumhas de Coliformes Termotolerantes

Dados Hidrodinâmicos | Dados de Onda | Transporte | Concentração

Modo de Transporte:

- Apenas Advectivo
- Advectivo e Difusivo

Desvio Aleatório:

- Termos Filtragem: Amplitude: 1.0000
- Difusão e Dispersão: Longitudinal: 3.0000, Transversal: 2.0000

Transporte Condicionado:

- Variável Condicionante do Transporte
- Condicionado por Velocidade
- Condicionado por Tensão no Fundo, só por corrente
- Condicionado por Tensão no Fundo, por corrente e onda

Dados Hidrodinâmicos | Dados de Onda | Transporte | Concentração

Calcula a concentração:

Subdivisões: 40, Mínima detectável: 1.000E+00

Distribuição das Partículas:

- Quantidade (massa)
- Concentração

APÊNDICE B – DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA OBTIDOS DO IMA-AL

Locais de Amostragem		Coordenadas Geográficas		01/02/2012								
		Lat. (S)	Long. (O)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	09° 35' 46.7"	35° 48' 03.3"	12h38	500	< 0.1	-	2.0	0.01	0.11	2.55	20.1
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	09° 35' 44.9"	35° 47' 00.5"	12h55	80	6.8	-	8.9	0.01	0.11	0.29	29.8
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	09° 36' 22.3"	35° 48' 06.7"	12h30	20	5.5	-	7.5	0.01	0.10	2.48	29.0
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	09° 37' 23.1"	35° 46' 57.0"	12h19	< 20	7.0	-	1.0	0.01	0.20	0.54	28.0
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	09° 38' 04.9"	35° 47' 20.2"	12h24	20	7.3	-	6.8	0.01	0.17	1.89	28.5
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	09° 39' 15.7"	35° 44' 57.6"	13h10	170	10.2	-	2.3	0.01	0.19	0.92	30.0
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	09° 39' 33.9"	35° 46' 04.8"	13h20	500	11.7	-	4.8	0.01	0.20	0.12	28.5
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	09° 40' 57.0"	35° 47' 39.0"	12h05	110	13.5	-	4.0	0.01	0.10	0.84	29.2
P9	Boca da Barra.	09° 43' 01.1"	35° 48' 15.6"	13h41	< 20	4.2	-	7.1	0.01	0.10	0.89	28.0
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	09° 40' 56.7"	35° 46' 11.7"	13h27	500	35.9	-	5.4	0.01	0.10	0.44	28.5
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	09° 41' 40.5"	35° 49' 00.2"	8h39	40	9.3	-	3.6	0.02	0.09	2.06	29.1
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sítio do Buraco.	09° 41' 33.9"	35° 48' 49.6"	8h30	80	9.4	-	4.1	0.01	0.11	0.87	29.3
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	09° 43' 36.3"	35° 50' 27.5"	8h54	20	7.1	-	3.4	0.01	0.12	0.76	28.7
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma.	09° 43' 37.0"	35° 53' 07.0"	9h58	800	< 0.1	-	1.2	0.01	0.11	1.73	28.6
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	09° 43' 01.5"	35° 53' 28.4"	9h13	110	6.3	-	5.0	0.01	0.11	1.78	28.7
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	09° 38' 45.1"	35° 54' 49.7"	9h28	20	6.2	-	3.9	0.01	0.17	3.09	29.5
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	09° 38' 04.0"	35° 57' 31.5"	9h06	130	2.6	-	2.3	0.01	0.90	1.81	29.7
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	09° 36' 57.7"	35° 57' 37.2"	9h49	≥ 16000	1.9	-	1.3	0.01	0.10	0.74	29.1
P19	Riacho Cabreira	09° 45' 21.74"	35° 52' 01.76"	10h30	130	< 0.1	-	1.1	0.01	0.10	1.25	29.1

Locais de Amostragem		14/03/2012								25/04/2012						
		Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	10h04	2200	< 0.1	25	2.9	0.07	0.50	0.50	29.5	9h47	40	2.0	10	2.1	0.08
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	10h15	< 20	31.0	29	3.8	0.07	0.68	0.68	28.0	9h54	130	5.5	< 2	6.3	0.06
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	9h39	70	7.6	3	4.9	0.06	1.10	1.10	29.0	9h29	< 20	12.4	9	3.8	0.06
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	9h48	< 20	< 0.1	< 2	4.5	0.03	0.83	0.83	29.0	9h20	< 20	10.5	< 2	6.8	0.09
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	9h29	80	9.4	30	3.6	0.02	0.37	0.91	28.0	9h10	< 20	13.2	< 2	5.1	0.10
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	10h44	3000	12.6	< 2	4.0	0.05	0.28	0.67	28.5	10h24	20	15.5	< 2	5.5	0.11
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	11h02	< 20	17.2	< 2	4.3	0.03	0.29	0.39	28.5	10h40	3000	19.8	5	3.5	0.11
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	11h24	270	6.7	2	4.5	0.03	0.35	2.37	29.0	9h52	500	6.4	< 2	5.0	0.05
P9	Boca da Barra.	11h50	20	35.9	< 2	4.8	0.02	0.38	0.01	29.0	11h00	40	33.7	< 2	6.4	0.05
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	11h10	40	29.2	< 2	4.1	0.02	0.22	0.05	29.0	12h55	1700	17.0	< 2	4.9	0.03
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	9h19	110	13.5	< 2	6.0	0.01	0.26	0.08	29.7	8h53	< 20	16.3	< 2	4.0	0.09
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sito do Buraco.	9h16	20	13.4	< 2	6.2	0.02	0.26	0.72	29.9	8h59	< 20	15.1	< 2	2.7	0.07
P13	L. Manguaba, Canal da Massaguaira.	9h31	800	24.0	< 2	6.5	0.01	0.31	0.68	28.7	9h11	< 20	31.5	3	3.2	0.08
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumáuma.	10h21	1700	< 0.1	21	2.5	0.01	0.27	0.16	28.0	10h00	1100	< 0.1	-	-	0.07
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	13h06	< 20	7.5	< 2	11.8	0.06	0.20	0.06	30.5	10h09	300	9.1	< 2	-	0.03
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	12h06	< 20	5.1	< 2	11.8	0.05	0.23	0.07	31.9	10h25	< 20	7.5	< 2	8.4	0.02
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	12h13	130	3.3	< 2	4.6	0.04	0.30	2.09	31.9	11h02	< 20	6.2	3	-	0.06
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	12h30	≥ 16000	1.9	13	-	0.06	0.29	0.86	31.0	10h47	< 20	5.1	< 2	-	0.05
P19	Riacho Cabreira	9h45	2200	1.4	< 2	4.7	0.07	0.28	0.20	28.0	9h24	< 20	12.1	< 2	4.3	0.03

Locais de Amostragem		25/04/2012				04/06/2012								
		Hora	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	9h47	0.21	0.85	28.7	10h19	-	0.1	7	2.2	0.03	1.06	1.93	27.0
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	9h54	0.20	1.03	29.2	10h28	-	5.1	6	3.6	0.02	0.93	1.73	29.0
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	9h29	0.32	0.41	29.7	9h59	-	9.4	8	2.4	0.01	0.69	2.52	29.0
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	9h20	0.32	0.20	28.8	10h07	-	6.2	6	3.3	0.01	0.62	1.22	28.0
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	9h10	0.28	0.09	28.7	9h48	-	10.0	6	2.6	0.01	0.72	0.76	27.0
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	10h24	0.23	0.59	29.2	10h53	-	9.5	6	2.8	0.02	0.41	1.99	27.0
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	10h40	0.29	0.63	30.2	11h09	-	12.4	7	2.9	0.01	0.82	0.49	29.0
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	9h52	0.31	0.26	27.7	9h24	-	17.9	10	2.4	0.02	0.58	2.73	28.0
P9	Boca da Barra.	11h00	0.25	0.35	29.7	11h33	-	24.2	4	3.1	0.01	0.43	2.67	28.0
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	12h55	0.20	3.77	29.0	11h15	-	12.3	-	-	0.01	0.64	1.26	28.0
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	8h53	0.25	2.00	25.0	9h00	-	13.3	<2	3.4	0.03	0.74	3.02	27.4
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sítio do Buraco.	8h59	0.25	2.28	29.0	9h07	-	13.5	<2	3.2	0.04	0.82	0.65	27.2
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	9h11	0.19	1.28	29.0	9h20	-	2.0	<2	5.0	0.01	1.00	1.70	27.7
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma.	10h00	0.23	0.23	26.0	9h17	-	22.9	-	-	0.04	0.46	3.28	26.3
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	10h09	0.24	0.71	29.0	9h55	-	9.7	<2	3.5	0.04	0.87	0.83	28.7
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	10h25	0.24	0.14	30.0	10h12	-	8.0	<2	9.9	0.06	1.27	2.95	29.1
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	11h02	0.25	0.78	31.0	10h50	-	5.2	<2	7.4	0.02	1.01	1.76	30.0
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	10h47	0.27	0.77	29.0	10h30	-	2.2	-	-	0.02	0.97	3.10	29.8
P19	Riacho Cabreira	9h24	0.26	0.10	29.5	9h32	-	12.5	<2	4.7	0.06	1.33	2.02	29.2

Locais de Amostragem		25/07/2012									17/09/2012					
		Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBOs (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBOs (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	9h47	220	< 0.1	< 2	3.0	0.09	0.36	0.84	25.0	9h47	40	< 0.1	< 2	3.0	0.09
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	9h58	< 20	< 0.1	< 2	6.1	0.08	0.40	2.26	25.0	9h58	< 20	< 0.1	< 2	6.1	0.08
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	9h22	3000	0.2	< 2	4.7	0.19	0.29	0.78	23.0	9h22	20	0.2	< 2	4.7	0.19
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	9h32	140	< 0.1	< 2	4.7	0.04	0.32	1.71	24.0	9h32	< 20	< 0.1	< 2	4.7	0.04
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	9h12	80	0.7	< 2	3.6	0.06	0.42	1.28	25.0	9h12	< 20	0.7	< 2	3.6	0.06
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	10h25	2200	3.0	< 2	4.8	0.05	0.37	1.02	24.0	10h25	300	3.0	< 2	4.8	0.05
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	10h44	≥ 16000	5.9	< 2	4.4	0.02	0.38	1.25	25.0	10h44	≥ 16000	5.9	< 2	4.4	0.02
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	8h48	2200	4.9	< 2	5.6	0.01	0.29	0.96	24.0	8h48	130	4.9	< 2	5.6	0.01
P9	Boca da Barra.	11h55	70	29.1	< 2	7.0	0.02	0.30	2.05	27.0	11h55	230	29.5	< 2	7.3	0.02
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	10h52	500	22.9	< 2	5.6	0.02	0.32	2.71	24.0	10h52	1100	22.9	< 2	5.6	0.02
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	8h57	1100	7.3	13	3.6	0.01	0.42	0.87	26.7	8h57	40	7.3	13	3.6	0.01
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sito do Buraco.	9h01	300	7.1	11	3.6	0.02	0.32	2.22	28.5	9h01	60	7.1	11	3.6	0.02
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	9h16	80	27.0	< 2	5.8	0.03	0.39	1.55	26.2	9h16	90	27.0	< 2	5.8	0.03
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumáuma.	9h38	170	< 0.1	-	-	0.04	0.29	0.59	24.8	9h38	< 20	< 0.1	-	-	0.04
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	9h45	700	4.4	9	3.1	0.02	0.36	0.16	26.4	9h45	300	4.4	9	3.1	0.02
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	10h23	< 20	2.2	< 2	7.2	0.01	0.52	1.81	26.8	10h23	< 20	2.2	< 2	7.2	0.01
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	10h38	2200	< 0.1	-	-	0.05	0.38	0.99	26.2	10h38	2800	< 0.1	14	2.3	0.05
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	10h51	300	0.5	-	-	0.03	0.39	2.38	26.0	10h51	40	0.5	13	0.4	0.03
P19	Riacho Cabreira	9h25	700	3.3	< 2	6.0	0.04	0.35	0.84	21.0	9h25	700	3.3	< 2	6.0	0.04

Locais de Amostragem		17/09/2012				21/11/2012								
		Hora	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBOs (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	9h47	0.36	0.84	25.0	10h18	3000	3.1	< 2	4.1	0.02	0.55	0.62	30.5
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	9h58	0.40	2.26	25.0	10h36	40	15.1	4	8.9	0.02	0.64	0.59	30.0
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	9h22	0.29	0.78	23.0	9h55	1300	24.9	4	5.8	0.03	0.10	0.23	28.5
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	9h32	0.32	1.71	24.0	10h21	< 20	15.5	4	8.0	0.04	0.99	0.16	30.0
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	9h12	0.42	1.28	25.0	10h07	< 20	16.4	4	7.9	0.03	0.96	0.30	28.0
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	10h25	0.37	1.02	24.0	9h46	< 20	16.2	4	8.7	0.03	0.76	0.10	28.5
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	10h44	0.38	1.25	25.0	12h39	230	20.4	2	5.7	0.02	0.10	2.48	31.0
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	8h48	0.29	0.96	24.0	9h17	40	2.4	2	7.0	0.04	0.18	0.28	28.0
P9	Boca da Barra.	11h55	0.30	2.05	27.0	13h00	< 20	36.3	4	7.7	0.04	0.55	1.12	28.5
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	10h52	0.32	2.71	24.0	12h51	< 20	26.9	< 2	5.9	0.03	0.12	0.96	28.5
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	8h57	0.42	0.87	26.7	9h28	< 20	16.5	4	6.9	0.03	0.10	3.70	30.2
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sito do Buraco.	9h01	0.32	2.22	28.5	9h23	40	17.0	3	6.1	0.03	0.13	1.97	30.0
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	9h16	0.39	1.55	26.2	9h38	500	18.7	4	4.2	0.03	0.96	0.99	30.0
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma.	9h38	0.29	0.59	24.8	10h03	< 20	< 0.1	-	0.9	0.06	0.99	2.16	29.0
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	9h45	0.36	0.16	26.4	10h08	40	10.5	2	3.9	0.04	0.76	3.21	29.8
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	10h23	0.52	1.81	26.8	11h07	< 20	9.5	2	8.0	0.04	0.20	2.08	30.3
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	10h38	0.38	0.99	26.2	11h30	40	5.1	< 2	6.2	0.03	0.13	1.23	31.0
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	10h51	0.39	2.38	26.6	11h20	500	6.9	3	5.9	0.03	0.13	0.82	30.7
P19	Riacho Cabreira	9h25	0.35	0.84	26.0	9h50	40	13.5	3	5.0	0.02	0.11	0.77	27.4

Locais de Amostragem		20/12/2012									20/02/2013					
		Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	10h00	500	5.0	2	4.9	0.91	0.12	0.57	23.0	10h17	130	15.1	< 2	6.5	0.03
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	10h10	< 20	19.6	< 2	5.8	1.06	0.43	0.09	29.0	10h04	80	20.6	< 2	9.6	0.04
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	9h40	< 20	16.8	< 2	-	0.74	0.25	0.11	35.5	10h37	< 20	21.1	< 2	7.7	0.03
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	9h48	< 20	19.2	< 2	-	0.04	0.19	0.11	30.0	10h30	130	18.9	< 2	8.6	0.05
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	9h18	< 20	19.5	< 2	-	0.01	1.06	0.07	30.0	10h47	< 20	23.4	< 2	4.1	0.05
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	10h35	20	24.0	< 2	-	0.03	0.19	0.08	32.0	9h40	220	25.9	< 2	4.4	0.05
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	10h50	5000	24.6	< 2	-	0.01	1.16	0.21	30.0	9h20	300	25.8	< 2	3.8	0.04
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	8h53	20	15.4	< 2	-	0.02	1.30	0.01	28.5	11h25	< 20	25.7	< 2	6.5	0.04
P9	Boca da Barra.	12h35	< 20	36.6	2	-	0.01	1.21	0.25	30.5	11h48	< 20	36.0	3	3.6	0.03
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	10h56	< 20	26.0	< 2	-	0.02	0.17	0.50	30.0	9h12	230	26.0	3	3.7	0.03
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	9h20	< 20	20.1	< 2	6.5	0.02	0.12	0.20	31.5	9h04	< 20	23.0	3	3.7	0.02
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sito do Buraco.	9h15	< 20	21.1	< 2	6.7	0.02	0.11	0.06	33.6	9h08	20	22.9	3	4.0	0.02
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	9h35	20	20.9	< 2	6.8	0.01	1.28	0.03	29.5	9h24	20	21.3	< 2	4.4	0.03
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma.	10h10	230	0.1	-	-	0.03	0.09	0.11	29.5	10h56	80	14.2	< 2	7.1	0.04
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	10h20	130	14.9	2	7.1	0.03	0.10	0.19	29.8	9h49	< 20	19.1	< 2	7.9	0.06
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	10h50	< 20	13.0	3	10.6	0.07	0.09	0.19	30.0	11h25	< 20	18.9	< 2	7.6	0.06
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	11h23	< 20	6.8	2	7.0	0.04	1.06	0.15	33.2	12h46	< 20	16.2	< 2	4.2	0.05
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	11h06	230	9.5	< 2	5.4	0.09	1.31	0.96	31.6	12h06	40	15.8	< 2	4.3	0.07
P19	Riacho Cabreira	9h50	300	5.0	2	3.1	0.11	0.33	0.67	30.8	10h37	700	13.3	2	6.0	0.09

Locais de Amostragem		17/04/2013									15/05/2013					
		Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBO ₅ (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	10h29	9000	14.3	-	4.6	-	-	-	30.5	9h52	16000	0.5	<2	6.4	-
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	10h19	40	23.2	-	5.7	-	-	-	30.0	9h43	1100	0.8	4	8.0	-
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	10h36	<20	22.6	-	4.2	-	-	-	30.0	9h59	210	2.2	<2	3.8	-
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	10h56	20	25.4	-	5.9	-	-	-	29.0	10h04	40	5.1	<2	6.8	-
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	10h48	<20	26.4	-	4.7	-	-	-	30.0	10h17	≥ 16000	4.6	2	9.2	-
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	9h25	2400	27.1	-	7.6	-	-	-	30.0	9h21	≥ 16000	10.7	<2	3.4	-
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	9h38	110	30.7	-	3.4	-	-	-	29.5	9h03	≥ 16000	15.9	<2	4.6	-
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	11h20	<20	20.3	-	4.8	-	-	-	30.0	10h39	≥ 16000	13.4	3	3.6	-
P9	Boca da Barra.	11h37	<20	37.1	-	6.0	-	-	-	29.0	08h33	16000	33.8	<2	6.5	-
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	09h30	170	31.5	-	4.4	-	-	-	29.0	08h52	1700	27.6	<2	6.5	-
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	09h36	<20	27.6	-	4.3	-	-	-	30.4	08h27	900	15.4	<2	4.5	-
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sito do Buraco.	09h30	130	28.0	-	4.1	-	-	-	30.3	08h33	230	15.5	<2	4.3	-
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	09h46	170	36.5	-	6.1	-	-	-	29.4	08h49	40	33.8	<2	7.9	-
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma.	11h06	3000	2.5	-	1.2	-	-	-	28.7	9h12	600	<0.1	<2	1.0	-
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	11h12	80	24.6	-	6.2	-	-	-	30.6	9h02	2800	12.4	3	6.1	-
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	11h43	<20	22.7	-	8.0	-	-	-	31.1	10h15	80	10.2	2	9.7	-
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	12h24	1300	22.1	-	7.4	-	-	-	33.1	10h47	70	7.4	<2	3.9	-
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	11h58	≥ 16000	20.4	-	13.3	-	-	-	34.0	10h28	≥ 16000	4.9	<2	5.7	-
P19	Riacho Cabreira	10h30	<20	25.3	-	5.0	-	-	-	31.7	09h35	230	0.2	3	5.2	-

Locais de Amostragem		15/05/2013				29/02/2016								
		Hora	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)	Hora	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Salinidade (ups)	DBOs (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (°C)
P1	Rio Mundaú, ± 200 metros da Foz na L. Mundaú.	9h52	-	-	28.0	15h05	490	6.4	30	6.7	0.46	0.15	-	-
P2	L. Mundaú, em frente Fernão Velho.	9h43	-	-	28.0	10h41	45	9.6	11	7.9	0.35	0.24	-	-
P3	L. Mundaú, em frente a Sta. Luzia.	9h59	-	-	27.0	11h26	78	13.4	> 8	7.6	0.28	0.24	-	-
P4	L. Mundaú, Centro Geográfico.	10h04	-	-	28.5	11h33	< 18	16.4	3	7.0	0.30	0.26	-	-
P5	L. Mundaú, em frente a Coqueiro Seco.	10h17	-	-	29.0	11h39	< 18	16.4	2	7.1	0.30	0.28	-	-
P6	L. Mundaú, Canal da Levada.	9h21	-	-	29.0	10h26	230	20.3	16	7.8	0.47	0.34	-	-
P7	L. Mundaú, Canal da Assembleia.	9h03	-	-	28.0	10h18	2400	20.3	< 2	7.0	0.32	0.39	-	-
P8	Zona dos Canais, foz Rio Remédio.	10h39	-	-	28.5	12h00	790	2.9	< 3	6.9	0.34	0.24	-	-
P9	Boca da Barra.	08h33	-	-	28.5	14h31	130	27.8	2	6.9	0.39	0.27	-	-
P10	L. Mundaú, em frente a BRASKEM.	08h52	-	-	27.5	10h11	130	30.5	3	7.0	0.33	0.24	-	-
P11	L. Manguaba, Zona dos Canais/Polo Cloroquímico.	08h27	-	-	28.8	12h24	78	22.1	16	6.3	0.48	0.28	-	-
P12	L. Manguaba, Zona dos Canais/ Sito do Buraco.	08h33	-	-	29.0	12h15	78	15.8	< 2	6.9	0.32	0.25	-	-
P13	L. Manguaba, Canal da Massagueira.	08h49	-	-	28.0	12h35	45	24.4	4	7.3	0.33	0.25	-	-
P14	L. Manguaba, foz do Rio Sumaúma.	9h12	-	-	27.7	14h07	2400	0.2	3	5.6	0.43	0.34	-	-
P15	L. Manguaba, em frente a Marechal Deodoro.	9h02	-	-	28.0	14h02	230	15.8	4	6.1	0.58	0.26	-	-
P16	L. Manguaba, Ponta do Camurupim.	10h15	-	-	29.0	13h03	< 18	15.1	7	6.5	0.34	0.24	-	-
P17	L. Manguaba, ± 200 metros da Foz do Rio Salgado.	10h47	-	-	29.8	17h13	68	13.1	7	6.5	0.33	0.30	-	-
P18	L. Manguaba ± 200 metros da Foz do Rio Paraíba do Meio.	10h28	-	-	30.2	13h24	490	12.8	11	5.7	0.32	0.24	-	-
P19	Riacho Cabreira	09h35	-	-	27.5	13h44	< 18	16.2	7	6.8	0.31	0.22	-	-